

Universidade Federal Fluminense
Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Análise de erros na reconstrução em 3D por seccionamento em
série: um estudo em microestrutura simulada



Talita Fonseca dos Prazeres

Volta Redonda

2019

Talita Fonseca dos Prazeres

**Análise de erros na reconstrução em 3D por seccionamento em
série: um estudo em microestrutura simulada**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Wesley Luiz da Silva Assis

Área de concentração: Processamento e Caracterização de Materiais

Volta Redonda

2019

Prazeres, Talita Fonseca dos.

Análise de erros na reconstrução em 3D por seccionamento em série: um estudo em microestrutura simulada / Talita Fonseca dos Prazeres - Volta Redonda, 2019. 83 p. : il. ; 30 cm.

Orientador: Wesley Luiz da Silva Assis.

Dissertação de mestrado – Universidade Federal Fluminense: Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, 2019.

1. Engenharia Metalúrgica. I. Universidade Federal Fluminense. II. Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda. III. Título.

Análise de erros na reconstrução em 3D por seccionamento em série: um estudo em microestrutura simulada

Talita Fonseca dos Prazeres

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em 28 de fevereiro de 2019.

Banca examinadora:



Wesley Luiz da Silva Assis, D.Sc.

(orientador)

Universidade Federal Fluminense (UFF)



Gláucio Soares da Fonseca, D.Sc.

Universidade Federal Fluminense (UFF)



Roberto de Oliveira Magnago, D.Sc.

Centro Universitário de Volta Redonda
(UniFOA)

Volta Redonda

2019

Agradecimentos

Meus sinceros agradecimentos ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense, por minha aceitação no programa de mestrado; ao professor Wesley, pela orientação e ajuda no desenvolvimento desta pesquisa; à Capes, pela bolsa de estudos; e aos professores participantes da banca, por avaliarem este trabalho.

Resumo

ANÁLISE DE ERROS NA RECONSTRUÇÃO EM 3D POR SECCIONAMENTO EM SÉRIE: UM ESTUDO EM MICROESTRUTURA SIMULADA

Talita Fonseca dos Prazeres

Orientador: Wesley Luiz da Silva Assis

O estudo de materiais metálicos, em termos microestruturais, envolve a utilização de métodos analíticos para a observação de seções bidimensionais de estruturas tridimensionais, o que limita sua análise. Técnicas de reconstrução em três dimensões (3D) têm sido aplicadas ao estudo da microestrutura, permitindo uma análise mais adequada da mesma. Uma delas é a técnica de seccionamento em série seguida de renderização em 3D. No entanto, sua aplicação é considerada trabalhosa e alguns aspectos podem originar erros na reconstrução. Sendo assim, nesta pesquisa investiga-se a seguinte questão: como aspectos geradores de erros nessa técnica afetam uma microestrutura reconstruída em 3D? O objetivo deste trabalho foi, dessa forma, analisar erros de microestruturas simuladas reconstruídas em 3D. Foram produzidas microestruturas policristalinas constituídas por 100, 1.000 e 10.000 grãos, sendo verificado o volume reconstruído e o erro numérico na reconstrução. Um exame estatístico do volume dos grãos, relativo ao número de seções, também foi realizado. Logo, buscaram-se análises qualitativas e quantitativas das reconstruções microestruturais em 3D. Foi observado que todas as fontes de erros do processo de reconstrução em estudo, de fato, afetam a microestrutura reconstruída em 3D, afastando-a do modelo ideal, que no presente estudo, é uma matriz cúbica de 300x300x300. A partir de tal abordagem, espera-se contribuir para que mais pesquisas sobre o tema sejam desenvolvidas, tendo em vista uma recente perspectiva em termos de caracterização microestrutural de materiais.

Palavras-chave: Simulação Computacional. Seccionamento em Série. Reconstrução Tri-dimensional Microestrutural.

Abstract

ERROR ANALYSIS IN 3D RECONSTRUCTION BY SERIAL SECTIONING: A STUDY OF
SIMULATED MICROSTRUCTURE

Talita Fonseca dos Prazeres

Advisor: Wesley Luiz da Silva Assis

The study of metallic materials, in microstructural terms, involves the application of analytical methods for the observation of two-dimensional sections from three-dimensional structures, which limits their analysis. Three dimensional reconstruction techniques (3D) have been applied to the study of the microstructure, allowing a more adequate analysis of the structure. One of them is the serial sectioning technique followed by 3D rendering. However, its application is considered laborious and some aspects can lead to errors in the reconstruction. Thus, in this research the following question is investigated: how do aspects that generate errors in this technique affect a 3D microstructure reconstruction? This work aims to analyze errors of 3D simulated microstructure reconstruction. Polycrystalline microstructures consisting of 100, 1,000 and 10,000 grains were produced, and the reconstructed volume and the numerical error in the reconstruction were verified. A statistical analysis of the grain volume, related to the number of sections, was also performed. As a result, qualitative and quantitative analyzes of the 3D microstructural reconstructions were made. It was observed that all sources of errors of the reconstruction process under study, in fact, affect the 3D microstructure reconstruction, away from the ideal model, which in the present study, is a cubic matrix of 300x300x300. Based on this approach, it is expected that more research on the subject to be developed, in view of a recent perspective in terms of the microstructural characterization of materials.

Keywords: Computational Simulation. Serial Sectioning. Three-dimensional Microstructural Reconstruction.

Índice de Figuras

Figura 1	–	Representação de imagens digitais em 2D (a) e 3D (b) por matriz de pontos em grade retangular. . . .	16
Figura 2	–	Representação de uma mesma imagem por diferentes números de <i>pixels</i>	17
Figura 3	–	Esquema do cubo de cores RGB.	18
Figura 4	–	a. Ortotetraedro; b. arranjo tridimensional (sem vazios) dos poliedros.	22
Figura 5	–	Microestrutura monofásica policristalina vista em três dimensões.	23
Figura 6	–	Diagramas esquemáticos dos vários estágios na solidificação de um material policristalino.	23
Figura 7	–	Diferentes escalas em que a estrutura dos materiais se desenvolve.	24
Figura 8	–	Micrografia obtida por MEV em que se observa grãos metálicos.	25
Figura 9	–	Seções transversais usadas para reconstruir uma forma em 3D.	28
Figura 10	–	Seções em 2D alinhadas de uma amostra com microestrutura porosa.	29
Figura 11	–	Esquema de um processo de reconstrução microestrutural em 3D por seccionamento em série.	30
Figura 12	–	Estruturação das etapas da simulação.	32
Figura 13	–	Exemplo de histograma.	34
Figura 14	–	Histogramas: a. unimodal simétrico, b. bimodal, c. desvio positivo, d. desvio negativo.	35
Figura 15	–	Fluxograma para reconstrução em 3D.	38
Figura 16	–	Imagens em 2D de um plano da microestrutura simulada, antes (a) e após (b) edição da imagem. . . .	40
Figura 17	–	Imagens em 2D de seções em série de uma microestrutura simulada.	41
Figura 18	–	Imagens em 2D da microestrutura simulada com 100 grãos alterada (a), alinhada (b) e cortada (c). . .	42
Figura 19	–	Imagens em 2D da microestrutura simulada com 1.000 grãos alterada (a), alinhada (b) e cortada (c). .	43
Figura 20	–	Imagens em 2D da microestrutura simulada com 10.000 grãos alterada (a), alinhada (b) e cortada (c). .	43
Figura 21	–	Imagem em 2D da microestrutura simulada com 100 grãos em diferentes tamanhos de <i>pixels</i>	44
Figura 22	–	Imagem em 2D da microestrutura simulada com 1.000 grãos em diferentes tamanhos de <i>pixels</i>	45
Figura 23	–	Imagem em 2D da microestrutura simulada com 10.000 grãos em diferentes tamanhos de <i>pixels</i>	45
Figura 24	–	Reconstrução em 3D da microestrutura simulada I antes (a) e após (b) alinhamento das imagens. . . .	49
Figura 25	–	Reconstrução em 3D da microestrutura simulada II antes (a) e após (b) alinhamento das imagens. . . .	49
Figura 26	–	Reconstrução em 3D da microestrutura simulada III antes (a) e após (b) alinhamento das imagens. . .	49
Figura 27	–	Reconstrução em 3D da microestrutura I com diferentes tamanhos de <i>pixels</i>	50
Figura 28	–	Reconstrução em 3D da microestrutura II com diferentes tamanhos de <i>pixels</i>	51
Figura 29	–	Reconstrução em 3D da microestrutura III com diferentes tamanhos de <i>pixels</i>	51
Figura 30	–	Reconstrução em 3D da microestrutura simulada I.	53
Figura 31	–	Reconstrução em 3D da microestrutura simulada I com preenchimento dos planos.	54
Figura 32	–	Reconstrução em 3D da microestrutura simulada II.	55
Figura 33	–	Reconstrução em 3D da microestrutura simulada II com preenchimento dos planos.	56
Figura 34	–	Reconstrução em 3D da microestrutura simulada III.	57
Figura 35	–	Reconstrução em 3D da microestrutura simulada III com preenchimento dos planos.	58
Figura 36	–	Histogramas da microestrutura simulada I.	64
Figura 37	–	Histogramas da microestrutura simulada com 100 grãos em planos aleatórios.	65
Figura 38	–	Histogramas da microestrutura simulada II.	66
Figura 39	–	Histogramas da microestrutura simulada com 1.000 grãos em planos aleatórios.	67
Figura 40	–	Histogramas da microestrutura simulada III.	68
Figura 41	–	Histogramas da microestrutura simulada com 10.000 grãos em planos aleatórios.	69

Índice de Tabelas

Tabela 1	– Exemplo de distribuição de frequência por Larson e Farber (2010).	34
Tabela 2	– Tempo de processamento computacional para as diferentes quantidades de núcleos.	39
Tabela 3	– Sequência de planos utilizados na reconstrução em 3D.	46
Tabela 4	– Identificação das reconstruções em 3D.	48
Tabela 5	– Volume médio dos grãos.	59
Tabela 6	– Volume médio dos grãos em planos aleatórios.	59
Tabela 7	– Desvio padrão.	60
Tabela 8	– Desvio padrão em planos aleatórios.	60
Tabela 9	– Coeficiente de variação.	61
Tabela 10	– Coeficiente de variação em planos aleatórios.	61
Tabela 11	– Amplitude da microestrutura I.	62
Tabela 12	– Amplitude da microestrutura com 100 grãos em planos aleatórios.	62
Tabela 13	– Amplitude da microestrutura II.	62
Tabela 14	– Amplitude da microestrutura com 1.000 grãos em planos aleatórios.	62
Tabela 15	– Amplitude da microestrutura III.	63
Tabela 16	– Amplitude da microestrutura com 10.000 grãos em planos aleatórios.	63
Tabela 17	– Erro computacional no estudo do alinhamento na reconstrução em 3D.	70
Tabela 18	– Erro computacional no estudo do número de <i>pixels</i> das imagens em 2D na reconstrução em 3D.	71
Tabela 19	– Erro computacional no estudo do número de seções na reconstrução em 3D.	71
Tabela 20	– Erro absoluto do maior grão.	72
Tabela 21	– Erro absoluto do maior grão em planos aleatórios.	72
Tabela 22	– Erro absoluto do menor grão.	73
Tabela 23	– Erro absoluto do menor grão em planos aleatórios.	73
Tabela 24	– Erro relativo do maior grão.	73
Tabela 25	– Erro relativo do maior grão em planos aleatórios.	73
Tabela 26	– Erro relativo do menor grão.	74
Tabela 27	– Erro relativo do menor grão em planos aleatórios.	74

Lista de abreviaturas e siglas

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
CCC	Cúbica de corpo centrado
CFC	Cúbica de faces centradas
EEIMVR	Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda
FIB-SEM	<i>Focused Ion Beam- Scanning Electron Microscope</i>
HC	Hexagonal compacta
MEV	Microscópico eletrônico de varredura
NIH	<i>National Institutes of Health</i>
NMM	Núcleo de Modelamento Microestrutural
PA	Progressão aritmética
RAM	<i>Random access memory</i>
RGB	<i>Red-green-blue</i>

Sumário

1	Introdução	11
2	Revisão bibliográfica	15
2.1	Definição de imagem digital	15
2.1.1	Representação de uma imagem digital	15
2.1.2	O modelo RGB de cores	17
2.2	Computação gráfica	18
2.2.1	Renderização	19
2.3	Processamento digital de imagens	19
2.3.1	ImageJ	20
2.4	Estrutura dos metais	21
2.4.1	Micrografia dos metais	25
2.4.2	Estereologia	26
2.5	Seccionamento em série	27
2.6	Reconstrução em 3D	29
2.7	Simulação computacional	31
2.7.1	Simulação computacional na EEIMVR – NMM	32
2.8	Estatísticas	33
2.9	Erros numéricos	36
2.9.1	Representação de erros numéricos	36
2.9.1.1	Erros absoluto e relativo	37
3	Metodologia	38
3.1	Etapas de desenvolvimento da pesquisa	38
3.1.1	Simulação computacional: geração da microestrutura	39
3.1.2	Obtenção das imagens em 2D	40
3.1.2.1	Seccionamento em série	40
3.1.2.2	Análise das fontes de erros	41
3.1.2.2.1	Alinhamento das seções	41
3.1.2.2.2	Número de <i>pixels</i> das imagens em 2D	44
3.1.2.2.3	Número de seções e distância entre elas	46
3.1.3	Reconstrução em 3D: renderização de volume	46
3.1.4	Exame estatístico descritivo do volume dos grãos	47
3.1.5	Verificação do erro numérico do volume na reconstrução em 3D	47
4	Resultados e discussões	48
4.1	Influência do alinhamento das seções	48
4.2	Influência do número de <i>pixels</i> das imagens em 2D	50
4.3	Influência do número de seções e distância entre elas	52
4.3.1	Exame estatístico descritivo do volume dos grãos	59
4.3.1.1	Média	59
4.3.1.2	Desvio padrão	60
4.3.1.3	Coefficiente de variação	60
4.3.1.4	Amplitude	61
4.3.1.5	Histograma	63
4.4	Erro numérico do volume na reconstrução em 3D	70
4.4.1	Erro numérico no estudo da influência do alinhamento das seções	70
4.4.2	Erro numérico no estudo da influência do número de <i>pixels</i> das seções	70
4.4.3	Erro numérico no estudo da influência das seções	71
4.4.3.1	Erros do maior e menor grão	71
4.4.3.1.1	Erro absoluto do maior grão	72
4.4.3.1.2	Erro absoluto do menor grão	72
4.4.3.1.3	Erro relativo do maior grão	73
4.4.3.1.4	Erro relativo do menor grão	74
5	Conclusão	75
6	Referências bibliográficas	77

1 Introdução

A caracterização dos materiais tem por princípio o fato de ser a microestrutura fator determinante de suas propriedades, o que resulta na importância de seu estudo. Das várias formas de estrutura, a microestrutura tem sido historicamente a de maior uso e interesse para o metalurgista (REED-HILL, 1982). Até o início do último trimestre do século XIX, a maioria das investigações de estruturas metálicas eram macroscópicas e superficiais. A ciência da estrutura dos metais era quase inexistente (AVNER, 1997).

O avanço desta ciência partiu da atenção detalhada de pesquisadores cujo conhecimento era mais científico do que prático, sendo o cientista inglês Henry Clifton Sorby responsável pelo período de rápido desenvolvimento que se seguiu. Em setembro de 1864, Sorby apresentou um artigo à *British Association for the Advancement of Science* em que exibiu e descreveu um número de fotografias microscópicas de vários tipos de ferro e aço, considerado o marco inicial da metalografia no estudo da estrutura dos materiais em termos microestruturais (AVNER, 1997).

No entanto, seu artigo só foi impresso em 1887, que remonta a dificuldade de impressão de fotos ou desenhos a preço razoável (MANNHEIMER, 2002). Atualmente, há facilidade tanto na impressão de imagens quanto em sua criação. Com o avanço das tecnologias, a computação se apresenta como ferramenta fundamental em diversas aplicações. No caso desta pesquisa, a computação se faz necessária desde os passos iniciais do estudo, que envolvem a criação de imagens microestruturais por simulação, seu processamento, até a obtenção dos resultados finais para análise.

Ao dedicar-se a imagens que representam o todo ou seções de microestruturas virtuais, uma concepção de computação significativa ao estudo se relaciona à computação gráfica, considerada uma das maneiras mais efetivas e comumente usadas de se comunicar informação processada ao usuário por meio de um computador, exibindo-a na forma de objetos gráficos, imagens, ao invés de textos (GODSE; GODSE, 2001). Não menos importante, e que parece se sobrepor ao conceito de computação gráfica, é a apreensão de processamento de imagens, que diferencia-se por modificar ou interpretar imagens já existentes (HEARN; BAKER, 1997).

Na avaliação tanto de microestruturas quanto macroestruturas de materiais metálicos, um dos problemas mais notáveis relaciona-se ao fato de técnicas analíticas disponíveis serem utilizadas para observação de imagens de seções bidimensionais de estruturas que possuem características tridimensionais (COLPAERT, 2008). Segundo o autor (2008, p. 27), “a estrutura real do metal é tridimensional e erros graves podem ser cometidos quando não se considera adequadamente este fato”. Nesse sentido, a reconstrução microestrutural em três dimensões fornece informação mais precisa em relação à morfologia dos microconstituintes do material (CERQUEIRA *et al.*, 2015).

Contrariamente à materialografia clássica baseada em imagens bidimensionais, a informação completa de espaço contida em imagens tridimensionais permite, dentre outras, percepções sobre a conectividade tridimensional e análise direcional detalhada em uma estrutura. Além disso, propriedades macroscópicas do material podem ser simuladas nas imagens em 3D ou em modelos geométricos adequados à microestrutura (OHSER; SCHLADITZ, 2009). Segundo os autores, o número de métodos para a criação de dados de imagens tridimensionais, bem como o número, a qualidade, e o conteúdo das mesmas está crescendo rapidamente.

O seccionamento em série de seções microestruturais em duas dimensões, com reconstrução e visualização assistida por computador, tem sido cada vez mais utilizado como técnica para a visualização em 3D de microestruturas (SIDHU; CHAWLA, 2004), e os mais notáveis estudos tiveram início a partir do advento de sofisticados programas de computador no começo dos anos 1990 (SHARMA, 2008). Para materiais opacos, o seccionamento em série tem sido um dos métodos mais amplamente utilizados para obtenção de dados de caracterização em três dimensões de macro a microescala (UCHIC, 2011).

Basicamente, o método consiste em obter uma série de imagens de caracterização bidimensional de uma microestrutura a partir de seções planas da superfície de uma amostra onde, idealmente, uma profundidade constante de remoção de material ocorre a cada seção, ou seja, um decréscimo em espessura. Em seguida, programas de computador são utilizados para construir uma matriz tridimensional a partir da série de arquivos de dados de caracterização coletados em duas dimensões, que podem ser posteriormente renderizados como uma imagem ou analisados para parâmetros morfológicos ou topológicos (UCHIC, 2011).

A técnica pode ser realizada manualmente com equipamento de laboratório padrão, mas tem por desvantagem o fato de destruir o volume da amostra examinada durante a sequência de coleta de dados (UCHIC; GROEBER; ROLLETT, 2011). Se revela também um processo demorado e oneroso na criação das imagens bidimensionais devido ao volume necessário para se criar uma imagem tridimensional. Além disso, a quantidade do material que é retirada a cada seccionamento deve ser cuidadosamente controlada para reduzir a variabilidade e garantir consistência no processo (BARRY, 2008).

De acordo com o explanado nos parágrafos anteriores, observa-se dificuldades em relação a essa técnica. Uma alternativa ao seccionamento em série usual é a simulação computacional, de forma a obter uma microestrutura e reproduzir o processo de reconstrução em 3D. A simulação computacional se refere a uma extensa coleção de métodos para representar o comportamento de sistemas reais, geralmente em computador com *software* apropriado (KELTON *et al.*, 2002). Segundo Duarte (2010), na área da ciência e engenharia dos materiais, ferramentas computacionais agilizam e simplificam as pesquisas.

Dessa forma, esta pesquisa teve por objetivo analisar erros na reconstrução em 3D. Adaptou-se a técnica de seccionamento em série padrão a uma microestrutura simulada computacionalmente de um material metálico puro genérico. Os objetivos específicos foram examinar fontes de erros da técnica, sendo elas: o alinhamento das seções, a resolução da imagem em 2D, através do número de *pixels*, e a influência do número de seções utilizadas e da distância entre essas seções. Além disso, uma descrição estatística do volume dos grãos foi realizada ao examinar esse último parâmetro.

Tais aspectos comprometem a fidelidade da reconstrução em 3D à microestrutura original e, por isso, justificam o seu estudo. Uma reconstrução em 3D de uma microestrutura policristalina com diferentes quantidades de grãos foi considerada como modelo ideal nesta pesquisa. A partir do exame das fontes de erros, as demais reconstruções em 3D foram comparadas a esse modelo ideal. Um código para reações de nucleação e crescimento foi utilizado para simular a microestrutura. Programas computacionais foram utilizados para reproduzir as características do processo de reconstrução em 3D.

Tendo o exposto, esta dissertação estrutura-se em mais quatro capítulos. No segundo capítulo encontra-se a revisão bibliográfica, com os principais conceitos relacionados à pesquisa, sobretudo, aspectos de computação, microestrutura dos metais, seccionamento

em série, reconstrução em três dimensões, estatística e erros numéricos. O terceiro capítulo descreve a metodologia adotada no estudo, detalhando as etapas para o seu desenvolvimento. No quarto capítulo expõem-se os resultados obtidos e discussão dos mesmos. No quinto capítulo apresenta-se a conclusão do estudo. Por fim, são indicadas todas as referências utilizadas nesta pesquisa.

2 Revisão bibliográfica

Para fundamentação teórica desta dissertação, os conceitos de imagem digital, computação gráfica e processamento digital de imagens são apresentados. Em sequência, o conceito de estrutura dos metais, com ênfase na microestrutura e sua análise qualitativa e quantitativa, por meio da micrografia e estereologia.

Discorre-se, após, sobre a técnica de seccionamento em série e a reconstrução em 3D. A revisão bibliográfica termina com a elucidação de simulação computacional, sua utilização no grupo de estudos da universidade e conceitos relacionados à estatística descritiva e erros numéricos.

2.1 Definição de imagem digital

Uma imagem é uma representação em duas dimensões de uma cena em três dimensões (JAYARAMAN; ESAKKIRAJAN; VEERAKUMAR, 2009). Segundo os mesmos autores e conforme aceção de Gonzalez e Woods (2010), uma imagem pode ser definida como uma função bidimensional, $f(x, y)$, em que x e y são coordenadas espaciais (plano), e a amplitude de f em qualquer par de coordenadas (x, y) é denominada intensidade ou nível de cinza, ou ainda, intensidade da luz nesse ponto.

Ainda de acordo com Gonzalez e Woods (2010), denomina-se imagem digital quando x , y e os valores de intensidade de f são quantidades finitas e discretas. Na definição dos autores, a imagem digital é composta por um número finito de elementos, cada um com localização e valor específicos. Esses elementos são chamados elementos pictóricos, elementos de imagem, pels ou *pixels*, sendo *pixel* o termo mais utilizado. *Pixel* é o menor elemento de uma imagem (JAYARAMAN; ESAKKIRAJAN; VEERAKUMAR, 2009).

2.1.1 Representação de uma imagem digital

Os computadores não conseguem lidar com imagens contínuas, mas apenas com ordenamentos de números digitais (JÄHNE, 2002). Assim, é necessário representar imagens como ordenamentos de pontos em duas dimensões. Sendo assim, um *pixel* é considerado

um ponto em uma matriz ou grade bidimensional. Mas, de fato, cada *pixel* não representa apenas um ponto matemático, mas sim uma região que pode conter um infinito número de pontos, a célula elementar da grade (GODSE; GODSE, 2001).

No caso mais simples, os *pixels* estão localizados em uma grade retangular (JÄHNE, 2002). A posição do *pixel* é dada na notação comum usada para matrizes ($m \times n$), em que o primeiro índice, m , denota a posição da linha, e o índice n , a posição da coluna (Fig. 1a). Segundo o autor, se a imagem digital contém $M \times N$ *pixels*, o índice m , que representa o número de linhas, vai de 0 a $M-1$ e o índice n , que representa o número de colunas, de 0 a $N-1$. Em imagens tridimensionais um *pixel* é chamado *voxel*, uma abreviação de elemento de volume. A posição de um *voxel* é dada por três índices em sequência: l , denota a profundidade, m , a linha e n , a coluna (Fig. 1b).

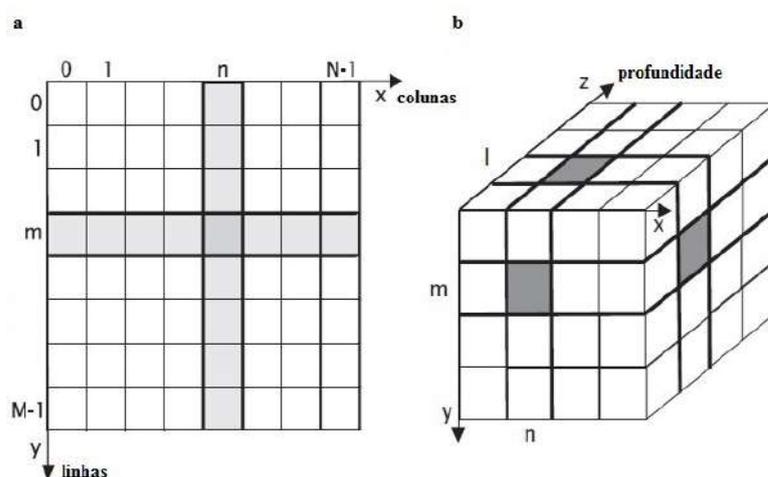


Figura 1 – Representação de imagens digitais em 2D (a) e 3D (b) por matriz de pontos em grade retangular.
Fonte: Adaptado de Jähne (2002, p. 30).

É apresentada na Figura 2 uma mesma imagem por diferentes números de *pixels*. Na grade quadrada dessa figura, cada *pixel* representa uma região quadrada da imagem. Observa-se que, se a imagem contiver número suficiente de *pixels*, tem-se a impressão de uma imagem contínua (Fig. 2d) (JÄHNE, 2002).

Segundo Moraz e Vézica (2008), o número de *pixels* que compõe uma imagem relaciona-se a sua resolução, e está diretamente associado à qualidade e nitidez da imagem. Conforme declaração desses autores (2008, p. 18), “quanto maior a resolução, maior a quantidade de pontos disponíveis para representar as cores¹ e detalhes da imagem”.

¹ Segundo Plataniotis e Venetsanopoulos (2000), cor é uma sensação criada em resposta a um estímulo do nosso sistema visual produzido por uma radiação eletromagnética conhecida como luz.

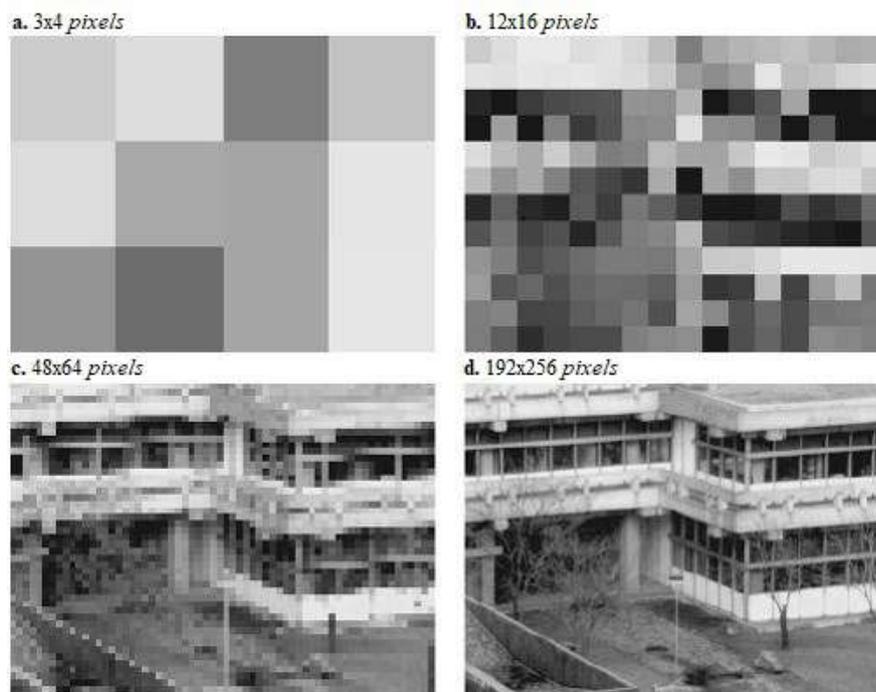


Figura 2 – Representação de uma mesma imagem por diferentes números de *pixels*.

Fonte: Adaptado de Jähne (2002, p. 31).

2.1.2 O modelo RGB de cores

Outro importante aspecto das imagens digitais são as cores, e, nesse sentido, convém apresentar o conceito de modelo de cores. Segundo Marques Filho e Vieira Neto (1999), basicamente, um modelo de cores é uma representação tridimensional na qual cada cor é descrita por um ponto em um sistema de coordenadas 3D. Em monitores coloridos, o modelo de cores mais utilizado é o modelo RGB (GONZALEZ; WOODS, 2010).

No modelo RGB (iniciais das cores em inglês *red*, *green* e *blue*), cada cor aparece em seus componentes espectrais primários vermelho, verde e azul (GONZALEZ; WOODS, 2010). Esse modelo de cores é também chamado de modelo aditivo de cores, pois várias percentagens de cada luz colorida são combinadas para criar cor (ADOBE CREATIVE TEAM, 2008).

De acordo com Anton e Rorres (2012), uma maneira de se fazer isso é identificar as três cores primárias do modelo com os vetores $r = (1,0,0)$ (vermelho puro), $g = (0,1,0)$ (verde puro) e $b = (0,0,1)$ (azul puro) de \mathbb{R}^3 e criar todas as outras cores formando combinações lineares de r , g e b , usando coeficientes entre 0 e 1, que representam, inclusive, a percentagem de cada cor na mistura. Segundo os autores, o conjunto de todas essas cores é o espaço RGB, ou cubo de cores RGB, ilustrado esquematicamente na Figura 3.

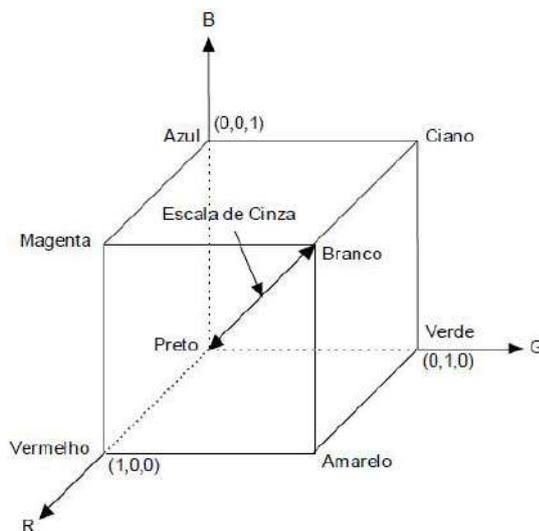


Figura 3 – Esquema do cubo de cores RGB.

Fonte: Adaptado de Marques Filho; Vieira Neto (1999, p. 121).

Na descrição de Gonzalez e Woods (2010), nos vértices do cubo de cores RGB encontram-se as três cores primárias do modelo, juntamente com as cores secundárias magenta ($R+B$), ciano ($G+B$) e amarelo ($R+G$). Na origem se localiza o preto, e no vértice mais distante da origem, o branco. Os vetores ao longo da diagonal entre preto e branco representam a escala de cinza (GONZALEZ; WOODS, 2010). Segundo Soares (2007), cada *pixel* é a representação de um conjunto de 8, 16, 24 ou 32 *bits*², conforme a qualidade do colorido. As três cores primárias do modelo podem produzir de 256 (8 *bits*) até 16 milhões de cores (24 *bits*), que é o padrão atual de computadores.

2.2 Computação gráfica

A computação gráfica é comumente definida como um conjunto de métodos e técnicas para transformar dados em imagens exibidas através de um dispositivo gráfico (GOMES; VELHO; SOUSA, 2012). Segundo Godse e Godse (2001), o computador é uma máquina de processamento de informações. É uma ferramenta para armazenar, manipular e correlacionar dados, sendo a computação gráfica uma das maneiras de se comunicar a informação processada ao usuário, em forma de imagens. Em síntese, é uma área da computação que se concentra no estudo e desenvolvimento de técnicas e algoritmos³ para a geração de imagens através do computador (MANSSOUR; COHEN, 2006)

² Em um computador, um *bit* (do inglês *binary digit*, em português, dígito binário) é a menor unidade de informação e só pode assumir os valores 0 ou 1 (SOARES, 2007).

³ “Um algoritmo é um conjunto não ambíguo e ordenado de passos executáveis que definem um processo finito” (SOUSA FILHO; ALEXANDRE, 2014, p. 59).

Segundo Watt (2000), algoritmos em computação gráfica funcionam principalmente em um domínio tridimensional e as criações neste espaço são então mapeadas em uma exibição bidimensional ou plano de imagem. De acordo com o autor, tradicionalmente, a computação gráfica tem criado imagens começando por uma descrição geométrica muito detalhada, submetendo-a a uma série de transformações que orientam tanto um visualizador quanto objetos no espaço tridimensional. Então, reproduz-se a realidade, fazendo com que os objetos pareçam sólidos e reais – um processo conhecido como renderização.

2.2.1 Renderização

De acordo com Pharr e Humphreys (2010), a renderização é um componente fundamental da computação gráfica. Para os autores, no nível mais alto de abstração, a renderização é o processo de converter uma descrição de uma cena tridimensional em uma imagem, existindo diversas maneiras desse processo ser abordado. Segundo Zeman (2015), a renderização consiste essencialmente em converter a geometria em *pixels*, em uma tela.

Conforme Eck (2016), uma cena em computação gráfica pode ser uma coleção complexa de objetos, cada um com seus próprios atributos. Pharr e Humphreys (2010) afirmam ainda que, algoritmos para animação, modelagem geométrica, texturização e outras áreas da computação gráfica devem ter seus resultados mediante a passagem por algum tipo de processo de renderização para que possam ser visíveis em uma imagem.

2.3 Processamento digital de imagens

O termo “processamento digital de imagens” se refere a manipulação de imagens por meio de um processador (JAYARAMAN; ESAKKIRAJAN; VEERAKUMAR, 2009). No início da década de 1960 surgiram os primeiros computadores potentes o bastante para realizar tarefas de processamento apreciáveis e, desde então, a área cresceu rapidamente devido a sua importância em diversas aplicações (GONZALEZ; WOODS, 2010).

Queiroz e Gomes (2001) afirmam que o processamento digital de imagens não é uma tarefa simples, envolvendo diversas tarefas interconectadas. A partir da matriz de *pixels* que representa a imagem, diversos tipos de processamento digital podem ser implementados por algoritmos computacionais. Esses algoritmos realizam as transformações necessárias para que se possa, por exemplo, obter uma imagem com os realces pretendidos ou extrair

atributos ou informações pertinentes (ESQUEF; ALBUQUERQUE; ALBUQUERQUE, 2003).

De acordo com Silva (1996), o campo de processamento digital de imagens é muito amplo, e ocorrerá em quantas etapas forem necessárias ao alcance de seu objetivo. Para o autor, no caso da caracterização de materiais, é possível melhorar a qualidade das imagens, identificar características individuais e extrair informações quantitativas de interesse.

Segundo Silva, Ammann e Nazar (2000), sistemas de processamento digital de imagens de concepção moderna viabilizam, dentre outras, a obtenção de uma descrição rigorosa da microestrutura dos materiais, possibilitando que muitas das operações necessárias à caracterização sejam parcialmente ou totalmente automatizadas.

2.3.1 ImageJ

Comumente empregado na caracterização de materiais é o *ImageJ*. Broeke, Pérez e Pascau (2015) descrevem o *ImageJ* como um versátil pacote de *software* de código aberto, projetado para processamento e análise de imagens científicas, escrito na linguagem de programação Java. Segundo os mesmos autores, o *ImageJ* é utilizado em diversas áreas de pesquisa.

Em engenharia, é usado para quantificar e visualizar dados obtidos por microscopia. O modelo de execução dinâmica do Java permite que novos módulos (“*plugins*”) sejam escritos como partes independentes do código Java (BURGER; BURGE, 2009). Para esta pesquisa, o *plugin* de interesse é o *Volume Viewer*, que permite a visualização de um volume em 3D.

De acordo com os autores citados nesta seção, o programa foi desenvolvido em 1987 por Wayne Rasband, no *National Institutes of Health* (NIH), Estados Unidos, originalmente como um substituto do seu antecessor, o pacote de *software NIH-Image*, disponível apenas para a plataforma *Apple Macintosh*. Rasband, ainda um ativo colaborador do *ImageJ*, publicou a primeira distribuição do mesmo em 1997. A versão atual do *software*, as atualizações, a documentação, o código-fonte completo, imagens de teste e uma coleção de complementos de terceiros em contínua expansão encontram-se disponíveis no *website ImageJ*.

2.4 Estrutura dos metais

“O conceito de estrutura é fundamental na Engenharia de Materiais e na Metalurgia” (COLPAERT, 2008, p. 3), estando diretamente relacionado às propriedades dos materiais, e por consequência, ao desempenho em serviço dos mesmos. “A palavra estrutura vem do latim *structura*, derivada do verbo *struere*, construir. No sentido mais geral, ela significa organização das partes ou dos elementos que formam um todo” (PADILHA, 2000, p. 59). A estrutura dos materiais metálicos é analisada tanto em condições microscópicas quanto macroscópicas.

Os metais são agregados de átomos que, com exceção do mercúrio, são sólidos à temperatura ambiente (SCOTT, 1991). Cada átomo consiste em um núcleo muito pequeno composto por prótons e nêutrons, que é circundado por elétrons em movimento, o que configura a estrutura atômica (CALLISTER, 2002). Os átomos permanecem unidos por meio de ligações metálicas resultantes do compartilhamento de elétrons disponíveis (SCOTT, 1991). Esses átomos, íons ou moléculas estão organizados espacialmente no material, constituindo sua estrutura cristalina (CALLISTER, 2002).

De acordo com Reed-Hill (1982, p. 4), “um cristal é definido como um arranjo ordenado de átomos no espaço”. Os metais e a maioria dos sólidos não metálicos são cristalinos, isto é, seus átomos se encontram em um reticulado que se repete a longo alcance nas três dimensões (PADILHA; AMBROZIO FILHO, 2004). Diferentes arranjos dos átomos originam diferentes componentes estruturais denominados fases, partes fisicamente homogêneas observadas na estrutura do material (SANTOS, 2006). Além das fases, irregularidades na rede cristalina, os chamados defeitos ou imperfeições cristalinas, podem ser observados (CALLISTER, 2002).

Ainda segundo Callister (2002), na descrição de estruturas cristalinas, os átomos podem ser representados como esferas sólidas, e para sólidos cristalinos, a estrutura do cristal é exatamente o arranjo espacial dessas esferas. As várias estruturas cristalinas são especificadas em termos de células unitárias, que representam a simetria da estrutura, na forma de paralelepípedos. Três estruturas cristalinas encontradas na maioria dos metais mais comuns são: cúbica de corpo centrado (CCC), cúbica de faces centradas (CFC) e hexagonal compacta (HC).

Esse agregado de numerosos pequenos cristais representam, normalmente, os materiais metálicos, sendo também denominados comumente de grãos (REED-HILL, 1982), mas, de acordo com Colpaert (1983), podem chamar-se nódulos, veios, agulhas, dentre outros, quando apresentam formas ou aspectos particulares. Segundo Reed-Hill (1982), devido aos vários cristais, os metais são policristalinos. Poliedros regulares são frequentemente empregados como modelos de grão para materiais monofásicos (COLPAERT, 2008), como exemplificado na Figura 4.

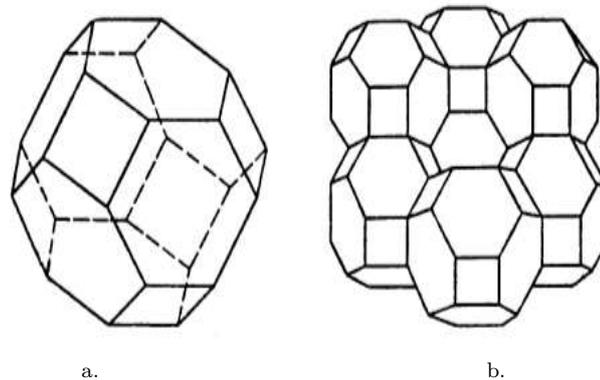


Figura 4 – a. Ortotetraicaidecaedro; b. arranjo tridimensional (sem vazios) dos poliedros.

Fonte: Padilha (2000, p. 185).

Em razão do pequeno tamanho dos cristais, usualmente utiliza-se um microscópio com aumentos de 100 a 1000 vezes para exame dos aspectos estruturais associados aos grãos de um metal. Quando necessitam de um aumento para seu exame, as estruturas denominam-se microestruturas (REED-HILL, 1982), e segundo Colpaert (2008), as características da mesma ocorrem em uma escala de dimensões que se convencionou chamar de escala “microestrutural” (μm , 10^{-6} m). Já alguns objetos metálicos, tais como peças fundidas, possuem cristais de tamanho tal que são distinguíveis a olho nu ou facilmente observáveis sob uma lupa, o que constitui a macroestrutura (REED-HILL, 1982).

Na Figura 5 é apresentada uma microestrutura de um material policristalino em três dimensões, em que se observa os pequenos cristais, ou grãos, arranjados de maneira a preencher todo o espaço (RIOS; PADILHA, 2007). Os grãos são, na estrutura, regiões contínuas de mesma orientação cristalográfica (COLPAERT, 2008). Observa-se também uma região de transição entre um grão e outro: os contornos de grãos, que são regiões não cristalinas ou amorfas que envolvem os diferentes cristais ou grãos mantendo-os unidos (COLPAERT, 2008; RIOS; PADILHA, 2007).

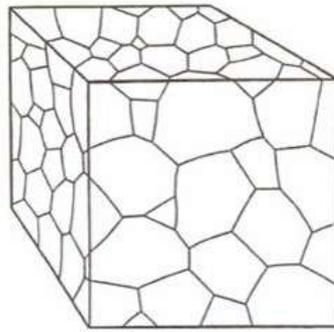


Figura 5 – Microestrutura monofásica policristalina vista em três dimensões.
Fonte: Padilha (2000, p. 185).

Os quatro diagramas esquemáticos indicados na Figura 6, que representam estágios na solidificação de uma amostra policristalina, ilustram adequadamente conceitos apresentados nesta seção (CALLISTER, 2007):

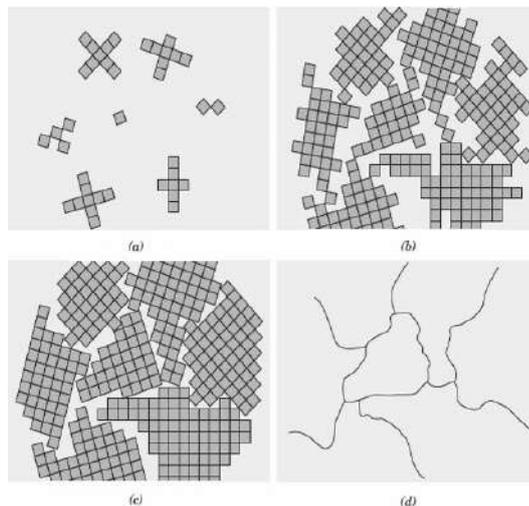


Figura 6 – Diagramas esquemáticos dos vários estágios na solidificação de um material policristalino.
Fonte: Adaptado de Callister (2007, p. 48).

- A princípio, pequenos cristais se formam em várias posições. Os cristais possuem orientações cristalográficas aleatórias, conforme indicado pelos retículos quadrados, que representam as células unitárias.
- Os grãos crescem mediante a adição sucessiva de átomos vindos do líquido circunvizinho. As extremidades de grãos adjacentes se chocam umas às outras à medida que o processo de solidificação se aproxima do término.
- Completa-se a solidificação e ocorre a formação de grãos de formatos irregulares e diferentes orientações cristalográficas, que configura a estrutura cristalina.
- É apresentada a estrutura de grãos como ela apareceria em um microscópio, em que as linhas escuras são os contornos dos grãos, evidenciando a microestrutura.

Na Figura 7 estão representadas diferentes escalas em que a estrutura dos materiais se desenvolve, com dimensões aproximadas de alguns objetos no lado esquerdo como referência (COLPAERT, 2008). É possível observar a escala de dimensões da estrutura de um componente metálico, em metro (m), assim como a dimensão de uma simples estrutura atômica, em ângström (Å).

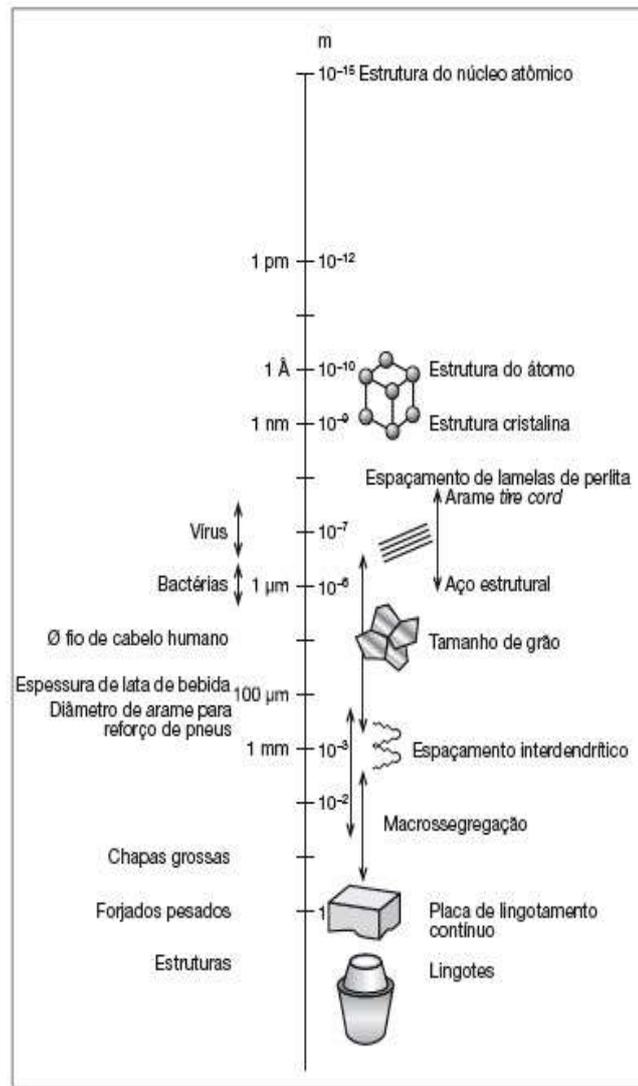


Figura 7 – Diferentes escalas em que a estrutura dos materiais se desenvolve.

Fonte: Colpaert (2008, p. 4).

Segundo Geels (2007), a microestrutura de um material é caracterizada através do tamanho, forma, disposição, quantidade, tipo e orientação das fases e seus defeitos, e essas características microestruturais podem existir em tamanhos de pelo menos dez ordens de magnitude. De acordo com o autor, cada material contém milhões de características microestruturais por centímetro cúbico, existindo vários instrumentos que permitem a visualização de quase todas essas características em toda sua extensão de dimensões.

2.4.1 Micrografia dos metais

A metalografia microscópica, ou micrografia dos metais, consiste no estudo dos materiais metálicos com o auxílio do microscópio (COLPAERT, 1983). Em microscopia, o tipo mais comum de imagem representa um plano de seção através da estrutura (RUSS; DEHOFF, 2000). De acordo com Padilha e Ambrozio Filho (2004), ao se observar uma estrutura ao microscópio, tem-se uma descrição qualitativa de seus microconstituintes e de seus defeitos.

Segundo Mannheimer (2002) e Callister (2002), a microscopia dos materiais se dedica em grande parte ao estudo de amostras opacas, e tanto os microscópios óticos quanto os eletrônicos são usados com frequência. Contudo, o melhor dos microscópios não irá revelar a estrutura de uma amostra que tenha sido mal preparada. O sucesso no estudo microscópico depende em grande parte do cuidado na preparação da amostra em análise. A intenção final é obter uma superfície plana, sem riscos e semelhante a um espelho, em que se revele com precisão a estrutura do metal (AVNER, 1997; REED-HILL, 1982).

Para Reed-Hill (1982), todavia, a obtenção dessa superfície não é uma tarefa fácil, e os procedimentos para alcance desse objetivo podem ser intitulados preparação de amostras metalográficas. Segundo Colpaert (2008), nos casos em que a microestrutura é observada através de seções, as técnicas de preparação de amostras são semelhantes, e o emprego de uma técnica apropriada torna visível a textura microscópica do material. Na Figura 8 evidencia-se os diversos grãos de um material.

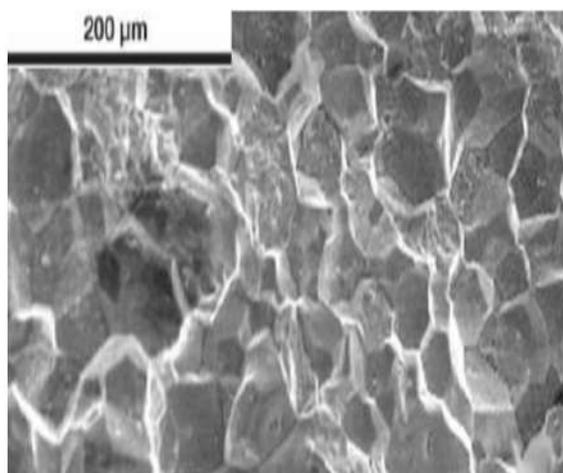


Figura 8 – Micrografia obtida por MEV em que se observa grãos metálicos.

Fonte: Adaptado de Colpaert (2008, p. 29).

O autor especifica uma técnica de preparação de amostras para a realização de um ensaio micrográfico em microscópio ótico nas seguintes etapas (COLPAERT, 2008):

- Escolha e localização da seção a ser estudada, que pode incluir seção transversal ou longitudinal, através de corte da amostra.
- Obtenção de uma superfície plana e polida no local escolhido para estudo, que compreende os processos de lixamento e polimento.
- Exame ao microscópio para a observação das ocorrências visíveis sem ataque.
- Ataque da superfície por um reagente químico adequado.
- Exame ao microscópio para a observação da microestrutura.
- Registro do aspecto observado (fotografia da seção bidimensional em análise).

2.4.2 Estereologia

As microestruturas de materiais metálicos são tridimensionais, porém, a maior parte das técnicas de microscopia produz imagens em duas dimensões. Nesse sentido, a estereologia se apresenta como metodologia que permite a inferência da geometria da estrutura tridimensional de um material a partir de observações de imagens bidimensionais de sua estrutura (COLPAERT, 2008).

De acordo com Esteves (2011), a estereologia compreende um conjunto de procedimentos baseados em geometria e probabilidade que, a partir de medições ou contagem de elementos (segmentos de retas, pontos, área de seções e perímetro) da imagem plana bidimensional, produz informações sobre as características tridimensionais da estrutura em estudo. Desse modo, a estereologia é um método de análise de imagens (ROYET, 1991).

A teoria rigorosa da estereologia é bastante complexa, e responsável por certa relutância ao seu emprego rotineiro. No entanto, algumas relações e medidas básicas são simples, e rendem frutos consideráveis. Conforme ocorreu em muitos outros casos, o advento da informática, e seu enorme impacto no desenvolvimento da análise de imagens, validou o esforço matemático aportado ao assunto (MANNHEIMER, 2002, p. IX.1).

Segundo Colpaert (2008), contudo, existem problemas e dificuldades associados a essa dedução do estado micro (e macro) estrutural tridimensional, a partir de cortes bidimensionais. Conforme Exner (2004), mesmo a interpretação qualitativa das imagens nem sempre é fácil, pois as imagens planares geralmente não apresentam a complexidade dos detalhes tridimensionais adequadamente.

2.5 Seccionamento em série

Embora alguns parâmetros microestruturais, como fração volumétrica ou área das interfaces, possam ser obtidos diretamente do plano, existe um grupo de parâmetros que só pode ser obtido a partir de uma representação em 3D da microestrutura (ALKEMPER; VOORHEES, 2001). Esse grupo inclui o número de características por unidade de volume (partículas, células, etc.), conectividade das características, distribuições de tamanho, informações de distribuição no espaço e a forma detalhada de um elemento da microestrutura. E, de acordo com os autores, o método mais prático para obter informações tridimensionais da microestrutura é o seccionamento em série⁴, embora considerado trabalhoso.

Uma das primeiras tentativas de elucidar o desenvolvimento de uma característica microestrutural em 3D ocorreu em 1918, quando foi realizado um experimento de seccionamento para obtenção de uma série de micrografias bidimensionais de perlita ferrosa por Otto Forsman (MANGAN; LAUREN; SHIFLET, 1997). Outros estudos seguiram-se, contudo, geralmente produziam apenas visualizações, como filmes, ou medidas simplistas de estrutura; em última análise, apenas de natureza qualitativa (GROEBER, 2007). Como já citado, os mais significativos estudos em seccionamento em série tiveram início a partir do advento de sofisticados programas de computador⁵ no começo dos anos 1990 (SHARMA, 2008). Recentemente, segundo Groeber (2007), análises de seções em série têm sido usadas para produzir dados para modelagem computacional.

Conceitualmente o método é simples, sendo realizado iterativamente até o término do experimento (UCHIC, 2011). Conforme descrição de Baldissera *et al.* (2007), o processo consiste em obter uma imagem em microscópio de uma região do plano da microestrutura, com posterior polimento da amostra para retirada de pequenas camadas da mesma. Logo após, novas imagens são obtidas, dos planos localizados exatamente abaixo dos planos anteriores. O procedimento é então realizado repetidas vezes para gerar uma pilha de seções que poderá ser renderizada para a visualização de uma microestrutura em 3D. Seções em série são ilustradas na Figura 9, com a reprodução de uma forma esférica em 3D.

⁴ Do inglês *serial sectioning*.

⁵ Programas computacionais (ou *software*, do inglês) são, fundamentalmente, um conjunto de instruções que direcionam o computador para executar certas tarefas (CHAPRA; CANALE, 2011).

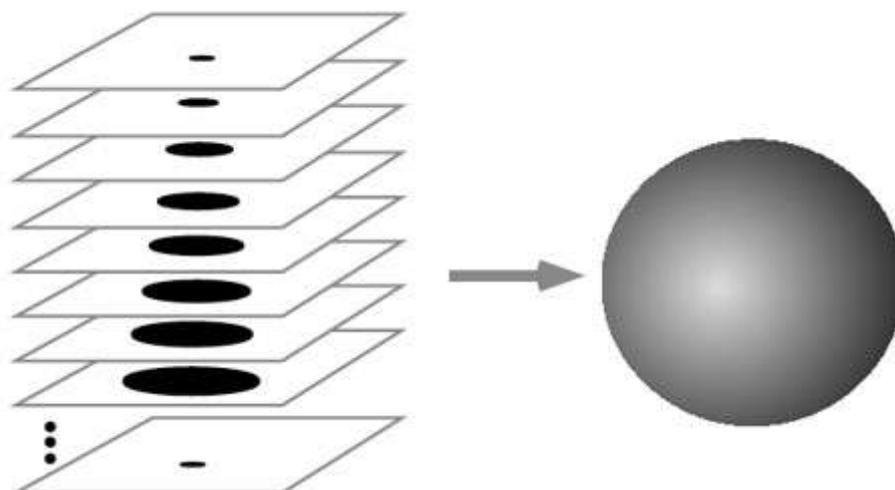


Figura 9 – Seções transversais usadas para reconstruir uma forma em 3D.

Fonte: Alkemper; Voorhees (2001, p. 392).

De acordo com Alkemper e Voorhees (2001) são necessárias de 50 a 150 seções transversais para obtenção de uma boa informação de forma, e a preparação de uma única amostra pode levar semanas, entretanto, já existem técnicas que permitem a obtenção de 20 seções por hora. Pesquisas com 250 seções para estudo de ligas de aço são encontradas em literatura. Grãos inteiros e precipitados individuais foram reconstruídos por corte e edição de imagens para conter apenas as áreas de interesse (KRAL *et al.*, 2000).

Alkemper e Voorhees (2001) afirmam que os maiores problemas com esse método são, além do tempo de consumo do processo, garantir que a distância entre duas seções seja conhecida com precisão, que pode ser resolvido usando-se máquinas de polimento automáticas e mantendo-se os tempos de polimento constantes, e o alinhamento das imagens em relação ao deslocamento e inclinação horizontal. Apenas o posicionamento das seções ao microscópio provoca deslocamentos entre as imagens.

Segundo os autores acima citados, o alinhamento das imagens pode ser feito com o auxílio de marcações por microindentações na microestrutura, permitindo também que a distância entre as seções seja determinada. Conforme menção de Rodrigues (2009), uma outra maneira de realizar o alinhamento consiste em utilizar programas de análise de imagens, em que as pilhas de seções são digitalmente alinhadas, como mostrado na Figura 10. Observa-se, nas bordas das imagens, regiões escuras que surgiram devido ao deslocamento sofrido pelas imagens em 2D durante o processo de alinhamento.

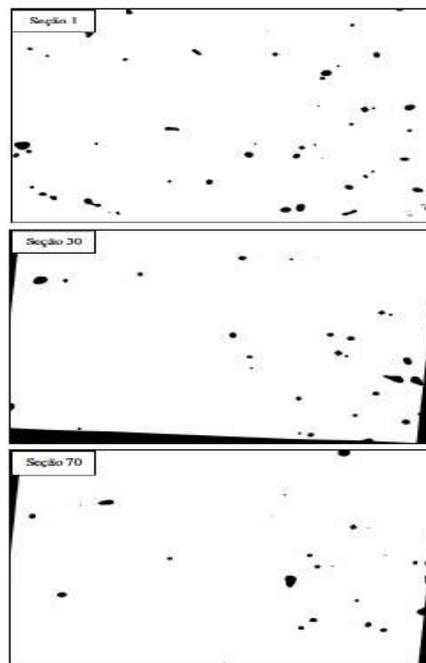


Figura 10 – Seções em 2D alinhadas de uma amostra com microestrutura porosa.
Fonte: Rodrigues (2009, p. 64).

O processo de obtenção das imagens em 2D muitas vezes resulta na perda de continuidade geométrica tridimensional através das seções (LIU, 2014). Segundo Ullah *et al.* (2013), o processo introduz uma lacuna entre as seções de imagens consecutivas, e há geralmente uma diferença de resolução na seção XY de cada imagem e na espessura entre seções (espaçamento Z); dessa forma, para obtenção de uma reconstrução de alta resolução, técnicas de interpolação são usadas para preenchimento dessas lacunas. Para Uchic (2011), o ideal seria coletar dados em 2D de alta resolução para gerar dados da estrutura em 3D com a maior fidelidade possível.

2.6 Reconstrução em 3D

O seccionamento em série permite a quantificação de microestruturas em três dimensões usando técnicas clássicas de metalografia, juntamente com a reconstrução assistida por computador (CHAWLA; GANESH; WUNSCH, 2004). Conforme já apresentado, embora a representação em 2D de microestruturas seja comum e forneça alguma ideia da morfologia da microestrutura, ela não é totalmente representativa da estrutura em 3D do material, e, por esse motivo, se faz necessária a utilização de uma técnica que capture a natureza em 3D da microestrutura para sua visualização e completo entendimento (CHAWLA; GANESH, 2005).

De acordo com Fiala (2005), com o avanço das tecnologias e a transição para imagens digitais, os microscopistas tem manifestado uma necessidade ainda maior de programas computacionais capazes de organizar grandes quantidades de dados de imagem de seção serial, ao mesmo tempo em que facilitam medidas quantitativas e a visualização da estrutura em três dimensões. Segundo o autor, em programas de reconstrução em 3D, algoritmos são aplicados, por exemplo, no alinhamento das seções e algoritmos adicionais são necessários para a visualização da microestrutura.

De acordo com o estudo de Lanzagorta *et al.* (1998), baseado na reconstrução e visualização em 3D de um aço liga, a natureza tridimensional da microestrutura de um material não é facilmente predita a partir de seções isoladas do mesmo. Para os autores, a técnica de visualização permite aos metalúrgicos compreender a disposição tridimensional e a morfologia das características microestruturais. Em relação à aspectos individuais da microestrutura, a chamada segmentação dos dados identifica todos os *voxels* associados aos objetos de interesse, como, por exemplo, um grão (UCHIC, 2011). Na Figura 11 está destacado um grão da microestrutura reconstruída em 3D por seccionamento em série.

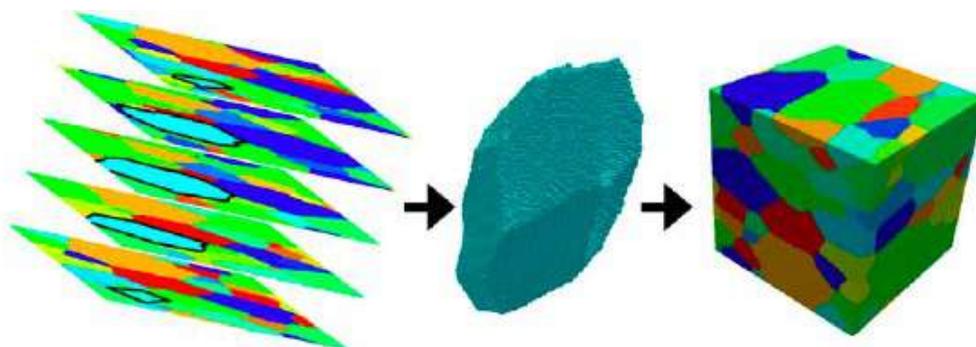


Figura 11 – Esquema de um processo de reconstrução microestrutural em 3D por seccionamento em série.

Fonte: Uchic; Groeber; Rollett (2011, p. 8).

Para Ghosh, Bhandari e Groeber (2008), é essencial que os modelos microestruturais sejam desenvolvidos com informações tridimensionais detalhadas. Segundo os autores, modelos que envolvem extrapolações estatísticas de imagens de superfície ou de seção em 2D e os modelos morfologicamente “precisos” de reconstrução em 3D por seção serial gerados por FIB-SEM⁶, que são métodos de reconstrução geralmente de natureza destrutiva, têm recebido considerável atenção. O FIB-SEM é uma técnica de análise destrutiva por feixe de íons focalizados acoplados a um microscópio eletrônico de varredura que permite obter imagens em 2D e 3D de alta resolução em escala nanométrica (SILVA, 2014).

⁶ Do inglês *Focused Ion Beam- Scanning Electron Microscope*.

No entanto, a confiabilidade desses métodos para reproduzir características microestruturais importantes dependem da precisão das técnicas de interpolação estatísticas, caso contrário, são causas de grandes erros na reconstrução (GHOSH; BHANDARI; GROEBER, 2008). De acordo com Joos (2015), algumas fontes de erros na reconstrução em 3D se relacionam, principalmente:

- Ao processo de segmentação (devido a baixo contraste e ruídos na imagem);
- À resolução de dados da imagem (resolução insuficiente da microestrutura pode levar a uma sobre ou subestimação das frações de volume);
- Ao volume reconstruído (induz-se ao erro estatístico caso o volume reconstruído não seja representativo o suficiente de toda a estrutura).

Outros métodos de reconstrução em 3D incluem técnicas baseadas em ultra-som ou suas variantes, como microscopia acústica ou ultra-som a laser, que dependem de boas propriedades de reflexão e têm aplicação limitada em metais; assim como métodos de tomografia computadorizada de raios-X, amplamente empregados na geração de modelos sólidos em 3D, mas geralmente deficientes na obtenção da resolução desejada para o estudo detalhado de metais policristalinos (GHOSH; BHANDARI; GROEBER, 2008).

2.7 Simulação computacional

Simulação refere-se a uma ampla coleção de métodos para imitar o comportamento de sistemas reais, geralmente por meio de um computador com um *software* apropriado (KELTON *et al.*, 2002). Segundo os autores, de fato, “simulação” pode ser um termo muito geral, uma vez que encontra utilidade em diversos campos, indústrias e aplicações. Hoje, a simulação está mais popular e desenvolvida, uma vez que os computadores e programas estão cada vez melhores.

Para Robinson (2004), o desenvolvimento de programas para simulação computacional verificaram-se em consequência de aperfeiçoamentos em *hardware* e *software*. A década de 1950 contemplou as primeiras simulações em computador. Na década que se seguiu, o advento de linguagens de programação como Fortran beneficiou fortemente a simulação. Nos anos seguintes, os progressos tecnológicos permitiram novos avanços na área e, atualmente, uma vasta gama de *software* está disponível para o desenvolvimento de modelos de simulação.

Em diversas pesquisas é possível observar a considerável utilização da simulação computacional como ferramenta de estudo. No trabalho de Manohar *et al.* (2014), o desenvolvimento de ferramentas de simulação computacional evidenciou a aplicabilidade da mesma em processos tipicamente metalúrgicos, através da visualização, experimentação, concepção e otimização dos processos considerados. Segundo os autores, em engenharia metalúrgica diversos processos metalúrgicos podem ser analisados através de simulação.

2.7.1 Simulação computacional na EEIMVR – NMM

Na escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda (EEIMVR) funciona o laboratório do Núcleo de Modelamento Microestrutural (NMM), que enfatiza o modelamento quantitativo da evolução da microestrutura com base em simulação computacional. De acordo com Assis (2006), o projeto para criação do NMM surgiu em 2003, sob coordenação do professor Paulo Rangel Rios, desde então, diversos estudos a níveis de mestrado e doutorado já foram realizados.

As atividades do NMM incluem o estudo de técnicas para modelar a evolução microestrutural em diversas situações da metalurgia física e transformação de fases (ASSIS, 2006). Nesta pesquisa, para a obtenção da microestrutura virtual, foi empregado um código computacional desenvolvido no NMM que simula reações de nucleação e crescimento, que ocorrem em transformações de fases⁷, já validado pelos trabalhos do grupo. Um fluxograma de estruturação das etapas dessa simulação é exibido na Figura 12.

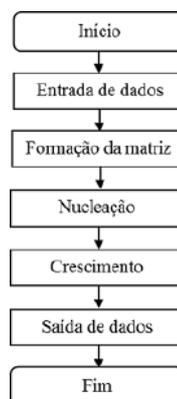


Figura 12 – Estruturação das etapas da simulação.

Fonte: Elaborada pela autora, 2017.

⁷ As transformações de fase se iniciam com o surgimento de partículas muito pequenas de uma nova fase, que crescem até que a transformação se complete. Em geral a formação da nova fase se divide nas etapas de nucleação e crescimento. Ocorre o surgimento de uma nova fase β , a partir de uma fase matriz α . A nucleação diz respeito à formação de uma interface entre a matriz e a nova fase, o crescimento está relacionado à migração desta interface (RIOS; PADILHA, 2007).

Cada tipo de nucleação, assim como a forma de crescimento, é representado por uma sub-rotina. A determinação do tamanho da matriz cúbica, o tipo de nucleação e a quantidade de núcleos iniciais são os dados principais necessários, em geral, podendo variar de acordo com o tipo de nucleação (RIBEIRO, 2011). Quando finalizada a nucleação, o programa entra na sub-rotina de crescimento e é executado até que toda a matriz tenha se transformado, sendo disponibilizado os valores da fração volumétrica transformada.

Esse código utiliza como método de crescimento o chamado Cone Causal⁸. A princípio o código foi desenvolvido com o parâmetro do Autômato Celular, e, após melhorias, com o método do Cone Causal (ALVES, 2015). Segundo o autor, novas rotinas foram implementadas para se obter uma simulação mais fiel ao que ocorre na prática. O código foi escrito em linguagem Fortran, e para maior agilidade das simulações, foi aplicada uma paralelização em *OpenMP*.

A nucleação e o crescimento baseiam-se nas tesselações de Poisson Voronoi, que segundo Zhang *et al.* (2012), têm sido tradicionalmente usadas para representar materiais policristalinos na metalurgia, uma vez que essa tesselação é uma descrição geométrica natural de uma estrutura de grãos que se origina de um processo de cristalização homogêneo, onde os grãos são aleatoriamente e simultaneamente nucleados e o crescimento dos grãos é idêntico para todos os núcleos.

Após a simulação computacional, programas computacionais específicos são utilizados para o estudo dos dados obtidos, como o *software Tecplot 360*, descrito como uma poderosa ferramenta para visualizar uma ampla gama de dados técnicos. Esse *software* permite o desenho de linhas, superfícies em duas e três dimensões em uma variedade de formatos e visualização volumétrica em 3D (TEC PLOT, INC., 2013).

2.8 Estatísticas

Na definição de Larson e Farber (2010, p. 3), “Estatística é a ciência que coleta, organiza, analisa e interpreta dados para a tomada de decisões”. Dentre os modos de se organizar e descrever um conjunto de dados está a distribuição de frequência. Segundo os

⁸ Basicamente, o cone causal considera uma esfera de raio R centrada num ponto da matriz cúbica. A medida que essa esfera aumenta, como uma função do tempo, a transformação deste ponto na matriz pode acontecer quando, no interior da esfera, existir pelo menos um núcleo. Sobre esse assunto recomenda-se a leitura de Alves (2015), Oliveira (2013) e Ribeiro (2011).

autores, a distribuição de frequência é uma tabela que apresenta classes ou intervalos das entradas de dados com uma contagem do número de entradas em cada classe, conforme mostra a Tabela 1. Esse número de entrada de dados em uma classe é a frequência f da classe.

Classe	Frequência f	Ponto médio
7-18	6	12,5
19-30	10	24,5
31-42	13	36,5
43-54	8	48,5
55-66	5	60,5
67-78	6	72,5
79-90	2	84,5

Tabela 1 – Exemplo de distribuição de frequência por Larson e Farber (2010).

Por vezes, é mais simples analisar um gráfico representativo da distribuição de frequência, como o histograma de frequência, diagrama de barras que representa a distribuição de frequência de um conjunto de dados, exemplificado na Figura 13 (LARSON; FARBER, 2010). De acordo com os autores, o histograma tem as seguintes propriedades: a escala horizontal é quantitativa e mede os valores dos dados, a escala vertical mede as frequências das classes e as barras consecutivas devem estar encostadas umas nas outras.

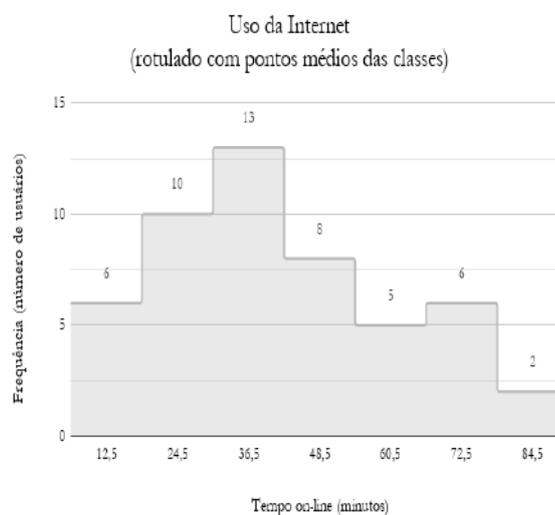


Figura 13 – Exemplo de histograma.
Fonte: Adaptado de Larson; Farber (2010, p. 36).

Larson e Farber (2015) afirmam que a forma da distribuição de frequência é uma das características que um gráfico revela. De acordo com Devore (2006, p. 18), “os histogramas podem ter diversos formatos”. Alguns desses formatos são apresentados pelo autor, na Figura 14, que exhibe histogramas “ajustados”, obtidos pela sobreposição de uma curva ajustada sobre as barras, que ilustram algumas possibilidades.

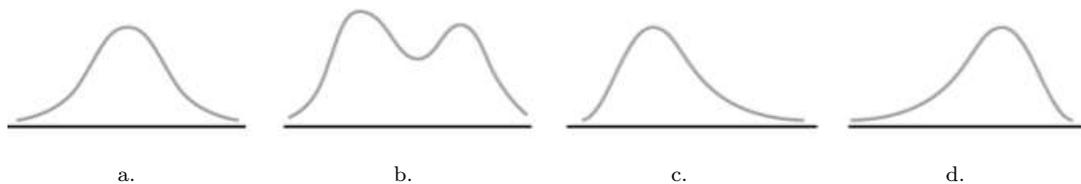


Figura 14 – Histogramas: a. unimodal simétrico, b. bimodal, c. desvio positivo, d. desvio negativo.

Fonte: Adaptado de Devore (2006, p. 19).

Além da descrição gráfica de dados quantitativos, existem estatísticas numéricas que descrevem o centro e a variabilidade de um conjunto de dados, como as medidas de tendência central e de dispersão. “Uma medida de tendência central é um valor que representa uma observação típica ou central de um conjunto de dados” (LARSON; FARBER, 2015, p. 64). A média é uma dessas medidas. Segundo Costa Neto (2002), sendo $x_i (i=1,2,\dots, n)$ o conjunto de dados, define-se sua média aritmética ou, simplesmente, média, por:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (1)$$

Medidas de dispersão são utilizadas para medir a variação (ou dispersão) de um conjunto de dados. Dentre elas estão a amplitude, a variância, o desvio padrão e o coeficiente de variação. A amplitude, R , é a medida mais simples, sendo, de acordo com Costa Neto (2002), a diferença entre o maior e o menor valores do conjunto de dados, indicada na equação 2. O autor declara que, por depender de apenas dois valores do conjunto de dados, a amplitude contém relativamente pouca informação sobre a dispersão.

$$R = x_{\text{máx}} - x_{\text{mín}}. \quad (2)$$

A variância e o desvio padrão utilizam todos os valores do conjunto de dados. As equações 3 e 4 são definidas para a variância e o desvio padrão, respectivamente, para uma população (COSTA NETO, 2002). Uma desvantagem da variância é que sua unidade de medida difere da unidade de medida do conjunto de dados. Para superar esse problema extrai-se a raiz quadrada da variância, obtendo-se assim o desvio padrão, raiz quadrada positiva da variância (LARSON; FARBER, 2015).

$$s^2(x) = s_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2}{n}, \quad (3)$$

$$s_x = +\sqrt{s_x^2}. \quad (4)$$

O coeficiente de variação é definido como o quociente entre o desvio-padrão e a média, conforme indica a equação 5, sendo frequentemente expresso em porcentagem (COSTA NETO, 2002). Segundo Larson e Farber (2015), para comparar a variação em conjuntos de dados diferentes, pode-se empregar o desvio padrão quando os elementos dos conjuntos têm a mesma unidade de medida e suas médias são aproximadamente iguais. Utiliza-se o coeficiente de variação para conjuntos de dados com unidades de medidas diferentes ou médias diferentes.

$$c_v(x) = \frac{s_x}{\bar{x}}. \quad (5)$$

2.9 Erros numéricos

Segundo Dornelles Filho (2016), ao contrário do que julga o senso comum, o computador não é uma máquina de calcular perfeita, sendo os cálculos por ele efetuados sujeitos a erros. De acordo com Santos e Silva (2006), um computador só representa um subconjunto finito de números do conjunto dos racionais, denominados números de ponto flutuante⁹. Dessa forma, os resultados das operações aritméticas podem apenas ser aproximados.

“Os erros numéricos são causados pelo uso de aproximações para representar operações e quantidades matemáticas exatas” (CHAPRA; CANALE, 2011, p. 46). De acordo com os autores, erros numéricos incluem erros de arredondamento e erros de truncamento. Segundo Quarteroni e Saleri (2007), a soma desses dois erros constitui o erro computacional, sendo representado pelos erros absoluto e relativo.

2.9.1 Representação de erros numéricos

Segundo Santos e Silva (2006), a representação de erros é muito importante no exame dos resultados numéricos, sendo, por conseguinte, necessário o uso de medidas para esse fim. As representações de erros mais comuns são o erro absoluto e o erro relativo, indicados, respectivamente, pelas equações 6 e 7 a seguir.

⁹ Sobre números de ponto flutuante recomenda-se a leitura de Chapra e Canale (2011).

2.9.1.1 Erros absoluto e relativo

Erro absoluto é a diferença numérica entre o valor verdadeiro de uma quantidade e seu valor aproximado. Nesta pesquisa, a quantidade em estudo é o volume. Assim, se X é o valor verdadeiro de uma quantidade e X_1 seu valor aproximado, então o erro absoluto E_A é dado por (Sastry, 2012):

$$E_A = X - X_1 = \delta X. \quad (6)$$

O erro relativo é definido como:

$$E_R = \frac{E_A}{X} = \frac{\delta X}{X}, \quad (7)$$

e o erro percentual por:

$$E_P = 100E_R. \quad (8)$$

3 Metodologia

Este capítulo apresenta a metodologia desta pesquisa, descrevendo as etapas em que o estudo se desenvolveu. Na Figura 15 é apresentado, de forma resumida, um fluxograma das atividades realizadas para a reconstrução em 3D, por seccionamento em série, da microestrutura simulada computacionalmente.

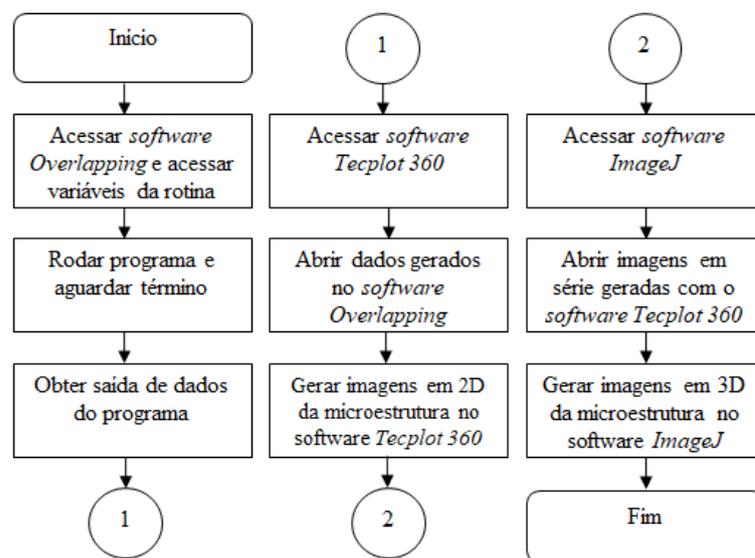


Figura 15 – Fluxograma para reconstrução em 3D.

Fonte: Elaborada pela autora, 2017.

Tanto a simulação quanto as demais etapas necessárias à manipulação de dados computacionais foram realizadas no Laboratório de Modelamento Microestrutural da EEIMVR, em computador com processador *Intel Xeon*, memória RAM de 16384 MB e sistema operacional *Windows 7 Professional* de 64 bits.

3.1 Etapas de desenvolvimento da pesquisa

As atividades indicadas no fluxograma pertencem, em suma, a três de cinco etapas de desenvolvimento da pesquisa. A primeira etapa foi a simulação computacional para geração das microestruturas. A segunda etapa consistiu na obtenção da série de imagens digitais em 2D das seções¹⁰ planas das microestruturas simuladas. Na terceira etapa realizou-se a reconstrução em 3D das microestruturas.

¹⁰ Consideram-se sinônimos, nesta pesquisa, seções, planos e imagens bidimensionais.

Na obtenção das imagens em 2D considerou-se por variáveis o alinhamento das seções, o número de *pixels* das imagens em 2D e o número e distância das seções. Uma vez desenvolvidas as etapas indicadas no fluxograma da Figura 15, realizou-se, por fim, uma análise quantitativa através do exame estatístico descritivo do volume dos grãos relativo ao número de seções e a verificação numérica de erro do volume na reconstrução em 3D.

3.1.1 Simulação computacional: geração da microestrutura

Inicialmente, para geração das imagens da microestrutura em 2D semelhantes às obtidas em experimento usual foi realizada a simulação computacional. O código computacional desenvolvido no NMM simula os processos de nucleação e crescimento de um material metálico puro genérico. Escrito em linguagem Fortran 2003, foi compilado pelo *Microsoft Visual Studio* 2012. Uma rotina foi utilizada para a realização das simulações.

As simulações foram processadas no *software Overlapping*. Ao abrir o programa, acessava-se em seguida o código desenvolvido, entrada de dados da simulação. Nesta etapa, algumas variáveis foram estabelecidas para o início da compilação dos dados, sendo as mais importantes, o tamanho da matriz cúbica, o tipo de nucleação e o número de núcleos. Uma vez estabelecidas essas variáveis, aguardava-se a saída de dados do programa.

Em todas as simulações considerou-se uma matriz cúbica de tamanho 300^3 , adimensional, com uma distribuição aleatória dos núcleos. Três diferentes quantidades de núcleos foram utilizadas obtendo-se, dessa forma, dados para reconstrução em 3D de três microestruturas distintas. Para cada simulação foi requerido um tempo de processamento computacional, indicado na Tabela 2.

Tamanho da matriz	Núcleos	Tempo de processamento
300^3	100	105 min. e 5 s.
300^3	1.000	199 min. e 17 s.
300^3	10.000	2195 min. e 7 s.

Tabela 2 – Tempo de processamento computacional para as diferentes quantidades de núcleos.

Embora autores afirmem que uma boa informação de forma requer de 50 a 150 seções, optou-se por utilizar 300 seções nesta pesquisa, visto estudo de 250 seções encontrado em literatura. Por isso a escolha dessa dimensão para a matriz cúbica. A escolha do número de grãos realizou-se de modo a obter grãos cada vez menores para um mesmo volume discreto reconstruído em 3D.

3.1.2 Obtenção das imagens em 2D

Para obtenção das imagens em 2D utilizadas na reconstrução em 3D realizou-se inicialmente o seccionamento em série e, em seguida, a análise das fontes de erro da técnica, descritas em sequência.

3.1.2.1 Seccionamento em série

Uma vez concluída a simulação, os dados de saída do programa *Overlapping* foram utilizados como dados de entrada no *software Tecplot 360*, utilizado para a obtenção das imagens seccionadas em 2D da microestrutura simulada. No *software Tecplot 360* foi aplicada a multiescala de cores, destacando os vários grãos da microestrutura e um formato inicial esférico para os núcleos.

Para cada uma das três simulações foram gerados 300 planos, todos extraídos da matriz original. Por possuir 300 pontos discretos em cada direção (300^3), esse é o número máximo de planos gerados a partir da matriz obtida por simulação computacional. Os planos seccionados (planos xy) foram obtidos com uma variação unitária na direção que corresponde a altura (direção z), até que fossem obtidas todas as 300 imagens.

A imagem em 2D obtida originalmente através do *software Tecplot 360* foi editada no *software Photoshop* para a remoção da borda, de forma a possibilitar apenas a visualização da microestrutura. A Figura 16 exhibe a imagem em 2D de um plano da microestrutura de 100 grãos obtida por simulação, em que se observa os diversos grãos de que é formada, antes (Fig. 16a) e após (Fig. 16b) edição da imagem.

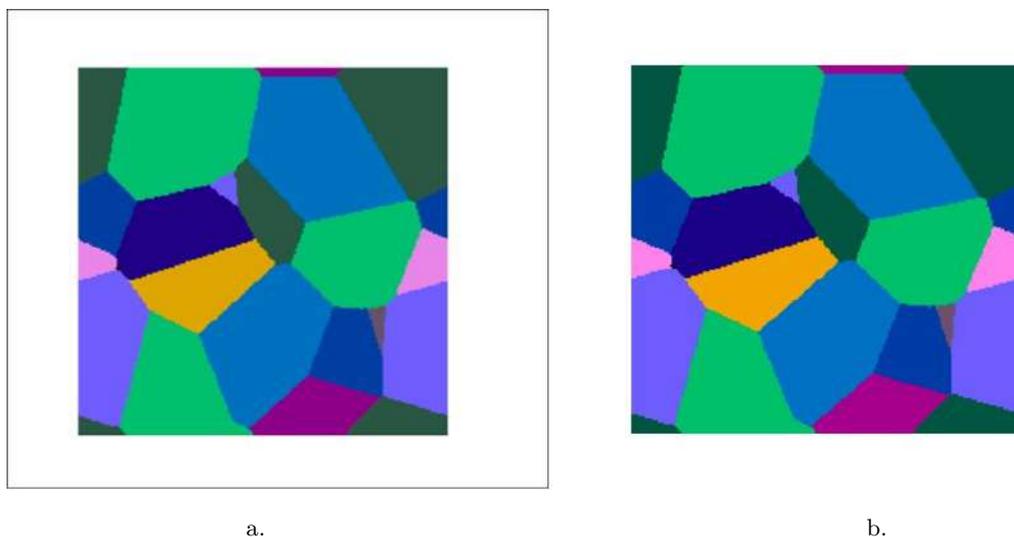


Figura 16 – Imagens em 2D de um plano da microestrutura simulada, antes (a) e após (b) edição da imagem.

Fonte: Elaborada pela autora, 2017.

Removida a borda da imagem gerada no *software Tecplot 360*, apenas a microestrutura é destacada, de forma semelhante a uma imagem obtida por microscopia de microestruturas reais. A imagem inicial, representada na Figura 16a, com dimensões de 1000x889 *pixels*, resultou, depois da edição, em uma imagem de 682x682 *pixels*, indicada na Figura 16b.

Após, as imagens foram redimensionadas para 300x300 *pixels*, de modo a adquirirem as dimensões da matriz cúbica. Para esse redimensionamento, o *software Fotosizer* foi utilizado. Obtidas todas as imagens em 2D, conforme ilustra esquematicamente a Figura 17, o próximo passo do experimento computacional foi analisar as fontes de erros e, por fim, reconstruir as microestruturas em 3D com os planos seccionados.

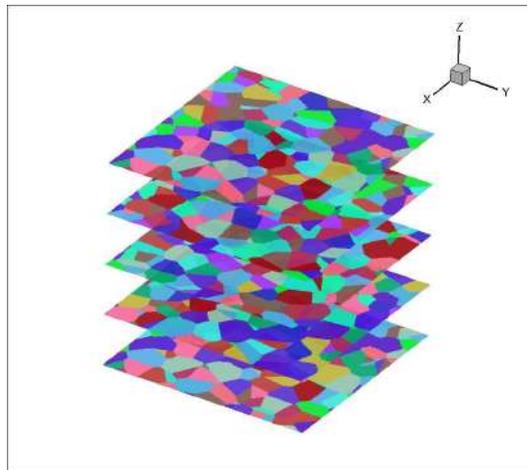


Figura 17 – Imagens em 2D de seções em série de uma microestrutura simulada.

Fonte: Elaborada pela autora, 2018.

3.1.2.2 Análise das fontes de erros

Como o estudo analisa a influência do alinhamento das imagens em 2D, do número de *pixels* das imagens em 2D e do número de planos e distância entre eles, o procedimento para cada uma delas é descrito a seguir.

3.1.2.2.1 Alinhamento das seções

Como verificado em literatura, o alinhamento das seções é uma das dificuldades da técnica de seccionamento em série. Contudo, programas de análise de imagens podem ser utilizados. Assim, para o estudo da influência do alinhamento dos planos, foram produzidas alterações de -5° e 5° no ângulo das imagens em 2D, após uma imagem não modificada, servindo essa de referência no alinhamento. As imagens alteradas foram modificadas uma

a uma no *software iPhoto*. Logo após, as imagens foram então alinhadas com o auxílio do *plugin* de alinhamento *StackReg* do *software ImageJ*.

Nas Figuras 18, 19 e 20 são apresentadas as três primeiras imagens em 2D antes (a) e após (b) o alinhamento das seções para as microestruturas simuladas com 100, 1.000 e 10.000 grãos, respectivamente; e após edição, em (c). Observa-se em (a) a sequência de imagens: não modificada (1), alterada em -5° (2) e alterada em 5° (3) no ângulo. O não alinhamento das imagens alteradas pode ser percebido com o auxílio da linha desenhada que corta as imagens e pelas indicações nas imagens 2 e 3.

Já em (b), a linha permite verificar que as imagens estão alinhadas. Adotando-se por referência o grão de onde a linha se inicia, nota-se que a ponta do grão toca a linha em todas as três imagens, para as três microestruturas. As imagens então alinhadas (b) foram editadas (c) para remoção das regiões escuras que surgiram no alinhamento, similar ao observado na Figura 10 em uma microestrutura real. As imagens foram cortadas uma a uma no *software Photoshop*, excluindo-se suas bordas e obtendo-se apenas a área da imagem em 2D com a microestrutura.

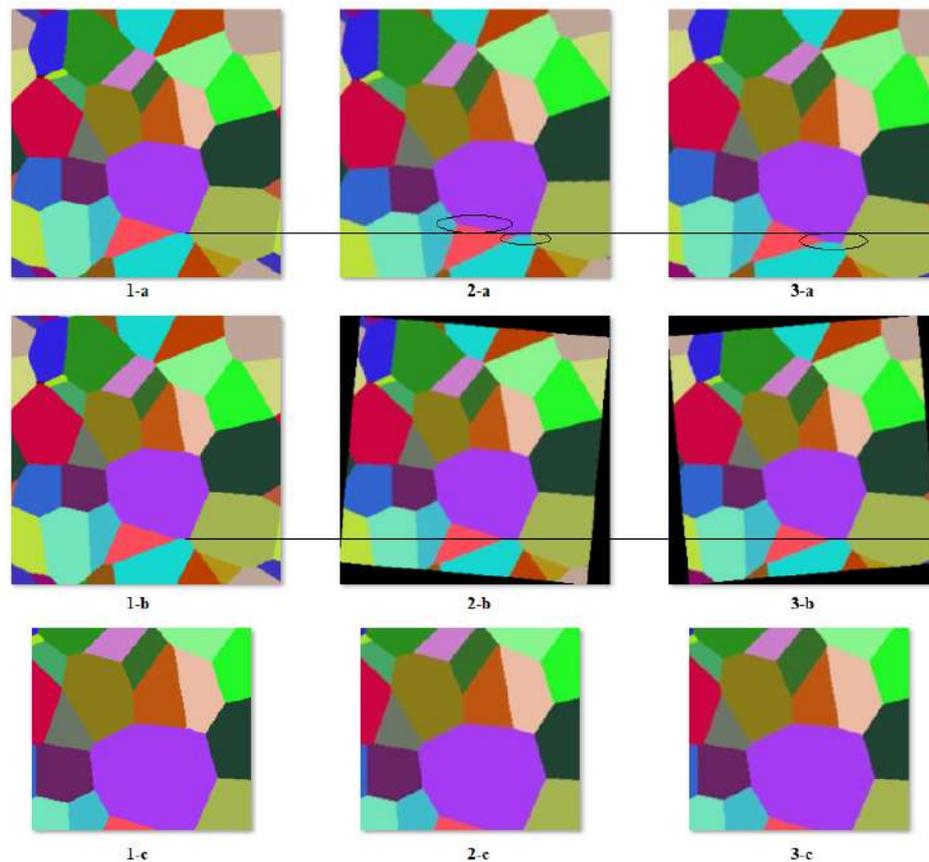


Figura 18 – Imagens em 2D da microestrutura simulada com 100 grãos alterada (a), alinhada (b) e cortada (c).

Fonte: Elaborada pela autora, 2018.

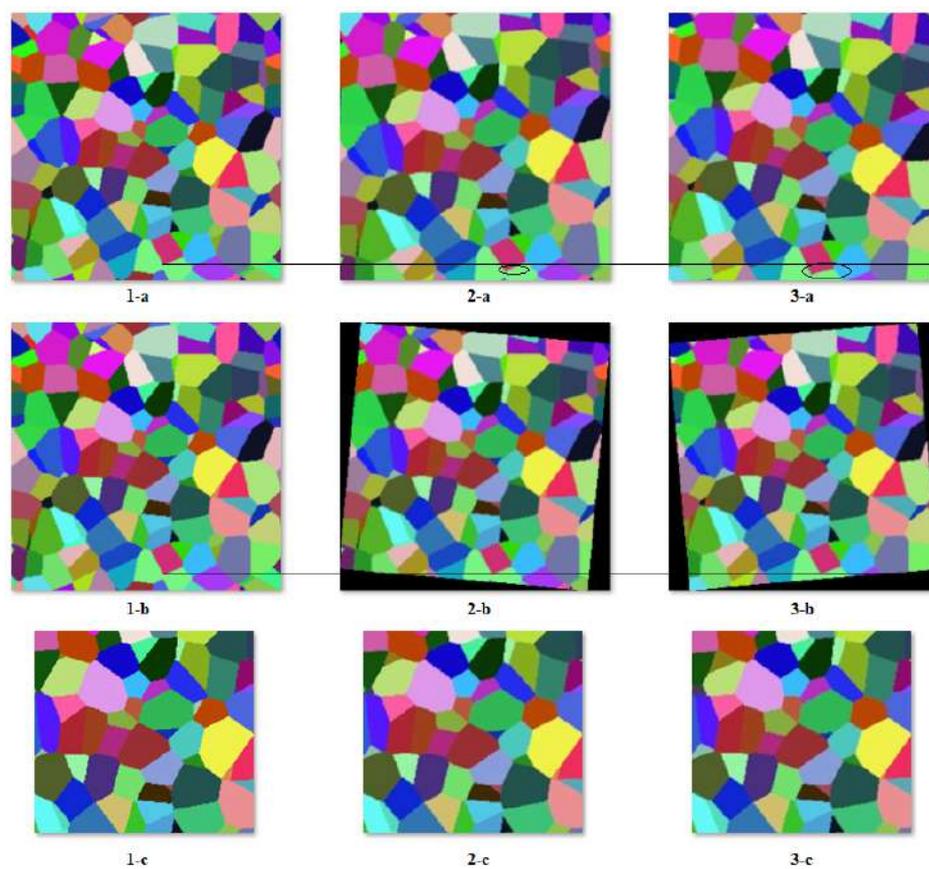


Figura 19 – Imagens em 2D da microestrutura simulada com 1.000 grãos alterada (a), alinhada (b) e cortada (c).
 Fonte: Elaborada pela autora, 2018.

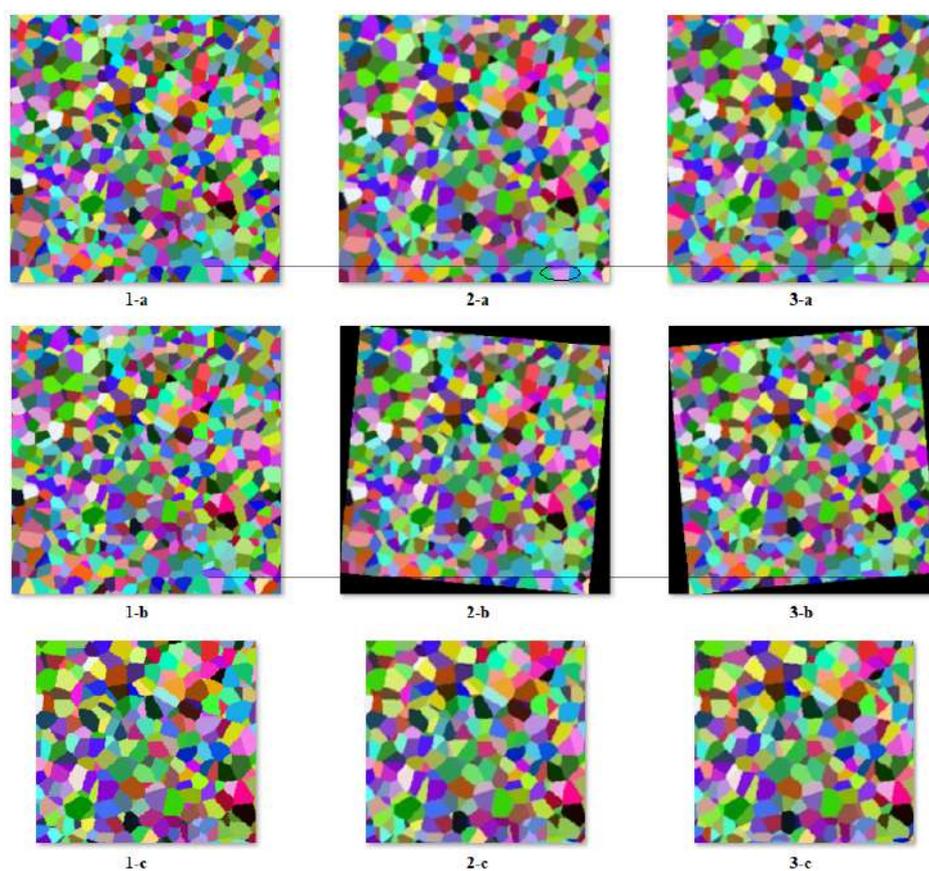


Figura 20 – Imagens em 2D da microestrutura simulada com 10.000 grãos alterada (a), alinhada (b) e cortada (c).
 Fonte: Elaborada pela autora, 2018.

3.1.2.2.2 Número de pixels das imagens em 2D

Um problema na reconstrução em 3D relaciona-se ao uso de imagens de baixa resolução. O número de *pixels* interfere na qualidade das imagens digitais, relacionando-se à resolução dessas imagens. Para analisar esse aspecto, foram produzidas imagens em 2D com quatro diferentes números de *pixels*, de modo semelhante ao apresentado na Figura 2. Foram obtidas imagens em 2D com 300x300, 225x225, 150x150 e 75x75 *pixels*, que correspondem, respectivamente, a 100%, 75%, 50% e 25% de 300, que é o tamanho em qualquer dimensão da matriz original.

O *software Fotosizer* foi utilizado para gerar as imagens digitais com diferentes números de *pixels*. A partir das imagens de 300x300 *pixels*, alterou-se, de uma só vez, as dimensões das imagens em 2D de cada série de imagens de seccionamento das três microestruturas em estudo para a quantidade desejada. Nas Figuras 21, 22 e 23 são ilustradas a primeira imagem em 2D das microestruturas em análise com os números de *pixels* considerados. Para manter as dimensões das imagens de menores resoluções iguais às dimensões da imagem original, aumentou-se o tamanho da célula de cada *pixel*.

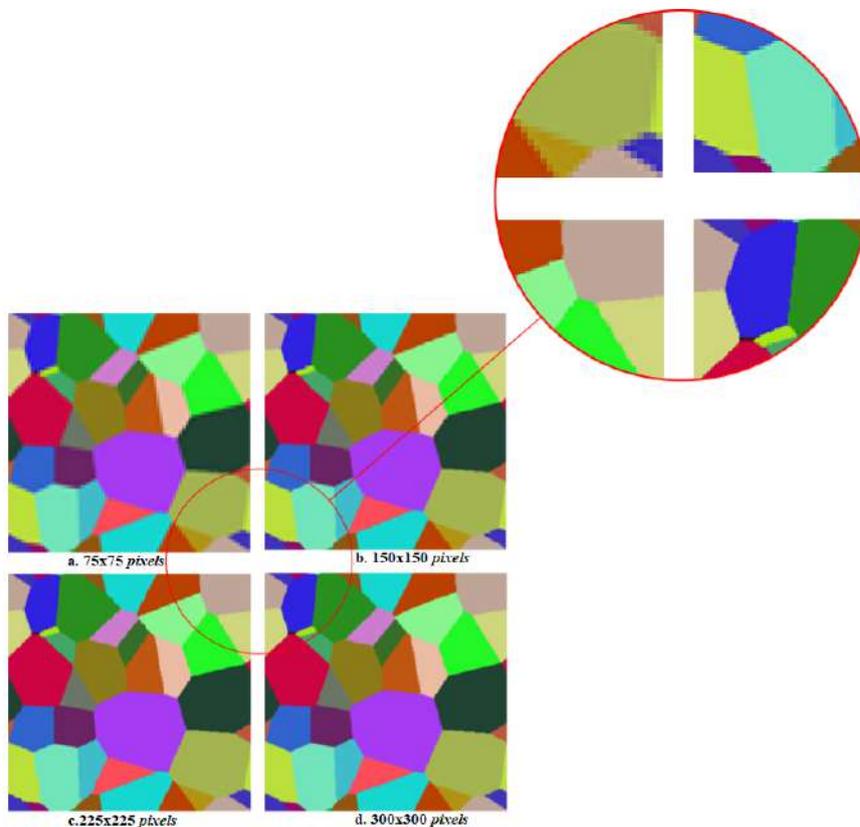


Figura 21 – Imagem em 2D da microestrutura simulada com 100 grãos em diferentes tamanhos de *pixels*.

Fonte: Elaborada pela autora, 2018.

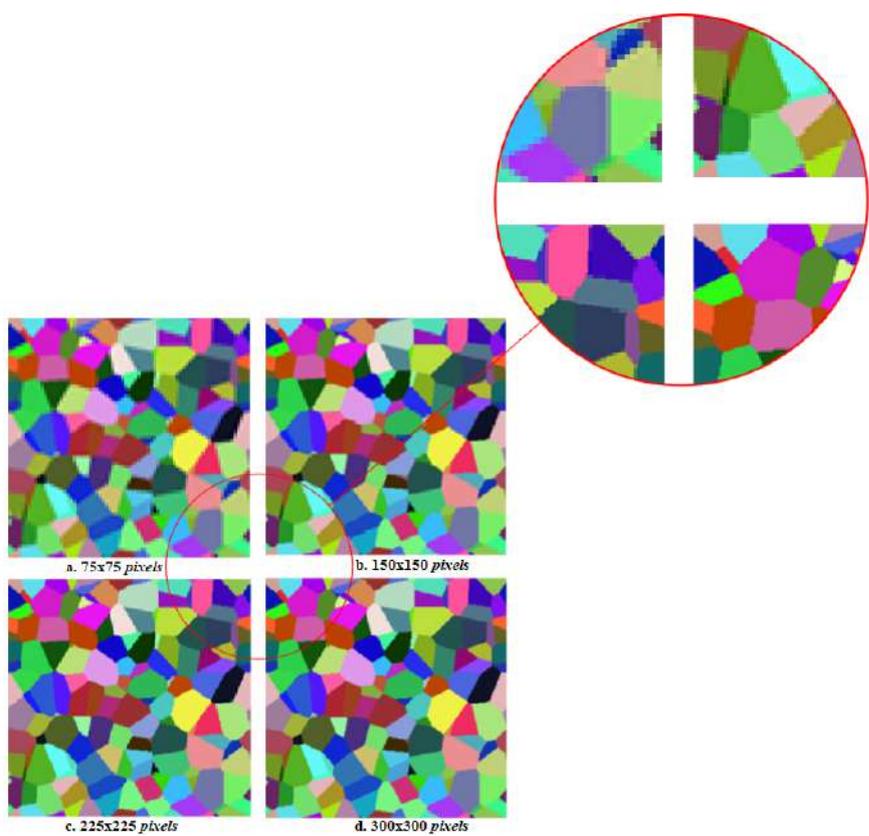


Figura 22 – Imagem em 2D da microestrutura simulada com 1.000 grãos em diferentes tamanhos de *pixels*.
 Fonte: Elaborada pela autora, 2018.

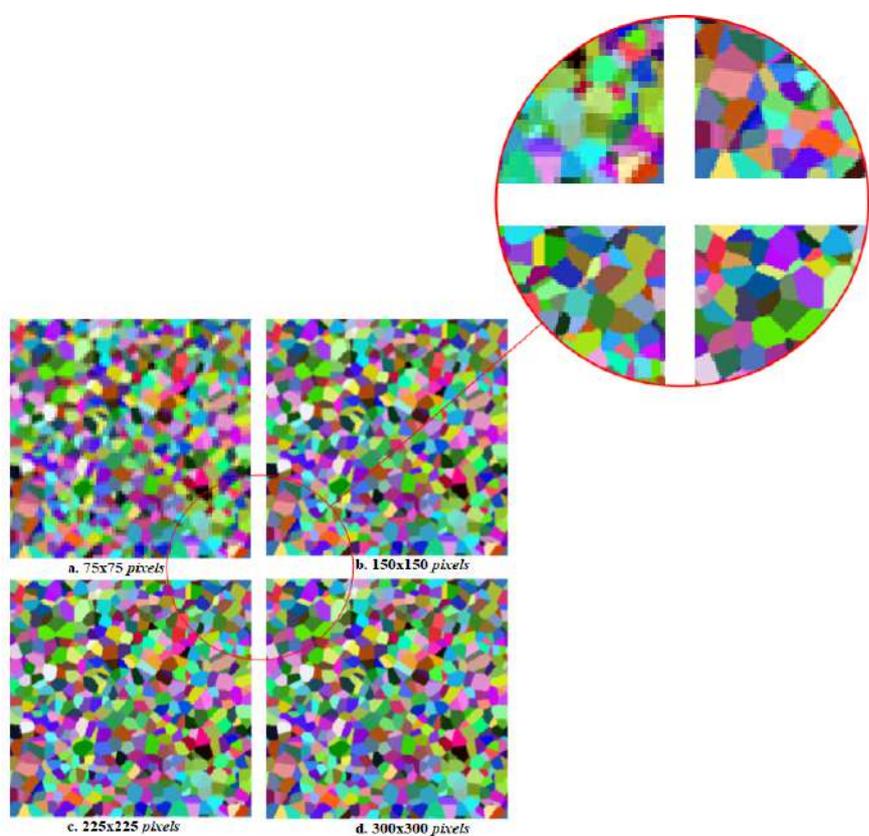


Figura 23 – Imagem em 2D da microestrutura simulada com 10.000 grãos em diferentes tamanhos de *pixels*.
 Fonte: Elaborada pela autora, 2018.

3.1.2.2.3 Número de seções e distância entre elas

De modo a reproduzir um comportamento próximo ao usual, para o estudo da influência do número de seções e da distância entre elas, foram geradas reconstruções em 3D com diferentes números de planos: 300, 150, 100, 75, 60 e 30 planos. As seções utilizadas na reconstrução em 3D, numeradas de 1 a 300, foram selecionadas em sequência de séries de progressão aritmética (PA), conforme apresenta a Tabela 3.

Nº de planos	%	Razão da PA (r)	Planos removidos ($r-1$)	Sequência de planos
300	100,00	1	0	1, 2, 3, ..., 300
150	50,00	2	1	1, 3, 5, ..., 299
100	33,33	3	2	1, 4, 7, ..., 298
75	25,00	4	3	1, 5, 9, ..., 297
60	20,00	5	4	1, 6, 11, ..., 296
30	10,00	10	9	1, 11, 21, ..., 291

Tabela 3 – Sequência de planos utilizados na reconstrução em 3D.

A cada duas seções sucessivas, a indicação da Tabela 3, de $r-1$, indica o número de planos removidos, em que r é a razão da progressão. A cada duas seções, a distância entre elas é aumentada. Assim, nessa tabela são especificadas a quantidade total de seções e seu correspondente em percentual, o número de planos removidos a cada duas seções sucessivas e a série de planos selecionados para utilização na reconstrução em 3D.

As mesmas quantidades de planos indicadas na Tabela 3 foram aplicadas em um segundo experimento de reconstrução em 3D. Porém, utilizou-se a funcionalidade *z-Aspect* do *Volume Viewer*, que estende a pilha de imagens digitais em 2D na direção z , para obtenção do mesmo volume da microestrutura original. O valor do *z-Aspect* utilizado em cada reconstrução em 3D é o mesmo valor da razão r dessa tabela.

3.1.3 Reconstrução em 3D: renderização de volume

De posse das imagens bidimensionais obtidas, utilizou-se então o *software* de análise de imagens *ImageJ* para obtenção da imagem microestrutural reconstruída em três dimensões. O processo consistiu, essencialmente, na seleção da série de imagens em 2D obtidas na etapa anterior através do comando de importação da sequência de imagens e, após, no emprego do recurso de visualização do volume, através do *plugin Volume Viewer*.

Desse modo, obtinha-se a reconstrução em 3D da microestrutura. Todas as reconstruções em 3D foram obtidas com uma inclinação angular de -50° , -53° e -27° nas direções x , y e z , respectivamente, para as microestruturas com 100, 1.000 e 10.000 grãos. Cada um dos aspectos analisados produziu diferentes reconstruções em 3D que são objeto de verificação de erro numérico do volume na última etapa.

3.1.4 Exame estatístico descritivo do volume dos grãos

Sendo o número de seções o principal parâmetro do seccionamento em série, visto ser uma técnica de reconstrução em 3D baseada na obtenção de seções planas bidimensionais de uma amostra de material, foi realizado, para o estudo desse aspecto, um exame estatístico descritivo do volume dos grãos. Para este trabalho foi desenvolvido um algoritmo para análise estatística de dados obtidos na simulação computacional que considera o número e a distância entre as seções. Os dados de saída da simulação computacional das microestruturas foram utilizados como dados de entrada nesse programa.

Neste estudo, a população consiste no total de grãos de cada uma das microestruturas: 100, 1.000 e 10.000 grãos, e o volume dos grãos, a variável quantitativa discreta em análise. Com base nas estatísticas descritas no referencial teórico, foi possível obter o volume médio dos grãos, a amplitude, o desvio padrão, o coeficiente de variação e os histogramas de distribuição de volume dos grãos para cada reconstrução em 3D levando-se em conta o número de seções utilizadas. Conforme explanação no próximo capítulo, um exame para o caso de não aleatoriedade da distância entre as seções também foi realizado.

3.1.5 Verificação do erro numérico do volume na reconstrução em 3D

O erro computacional é representado pelos erros absoluto e relativo. Sendo assim, a verificação numérica de erros foi realizada para o volume obtido na reconstrução em 3D das três análises do estudo conforme equações 6, 7 e 8. A primeira reconstrução em 3D é o ponto de partida da análise numérica de erros, sendo considerada o modelo ideal e, por isso, isenta de erro. O volume da primeira reconstrução em 3D de cada aspecto analisado é o valor verdadeiro, todos os demais são aproximações. Na última análise, com o intuito de verificar como um grão da microestrutura é afetado pela redução no número de planos, serão apresentados os erros correspondentes ao maior e menor grão de cada microestrutura.

4 Resultados e discussões

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nesta pesquisa e discussões sobre os mesmos. Para identificação, as reconstruções em 3D para as três quantidades de grãos são especificadas conforme indicação da Tabela 4. Os aspectos analisados são apresentados em seções.

Quantidade de grãos	Reconstrução em 3D da microestrutura simulada
100	I
1.000	II
10.000	III

Tabela 4 – Identificação das reconstruções em 3D.

4.1 Influência do alinhamento das seções

Nas Figuras 24, 25 e 26 são apresentadas as reconstruções em 3D das microestruturas simuladas antes (a) e após (b) o alinhamento das imagens em 2D. Conforme a indicação da seta na imagem *a* da Figura 24, que sinaliza a região central da microestrutura, é possível observar que, após o alinhamento das imagens em 2D, houve uma perda de informação da microestrutura, sendo a região da borda totalmente perdida na reconstrução em 3D. Nota-se também uma pequena alteração nos contornos de grão. O mesmo se observa para as reconstruções em 3D das outras duas microestruturas, exibidas nas Figuras 25 e 26.

Após o alinhamento, as imagens digitais em 2D de 300x300 *pixels* foram cortadas para remoção das regiões pretas, originando imagens em 2D de 198x184 *pixels*. A dimensão de altura do volume reconstruído não se altera, e as novas dimensões correspondem a 40,48% do volume da microestrutura reconstruída em 3D antes do alinhamento. O processo, portanto, constituiu-se em uma significativa perda de volume reconstruído. Ao se produzir as alterações de ângulo nas imagens em 2D observou-se uma redução da qualidade da imagem, o que justifica a alteração dos contornos de grão na reconstrução em 3D.

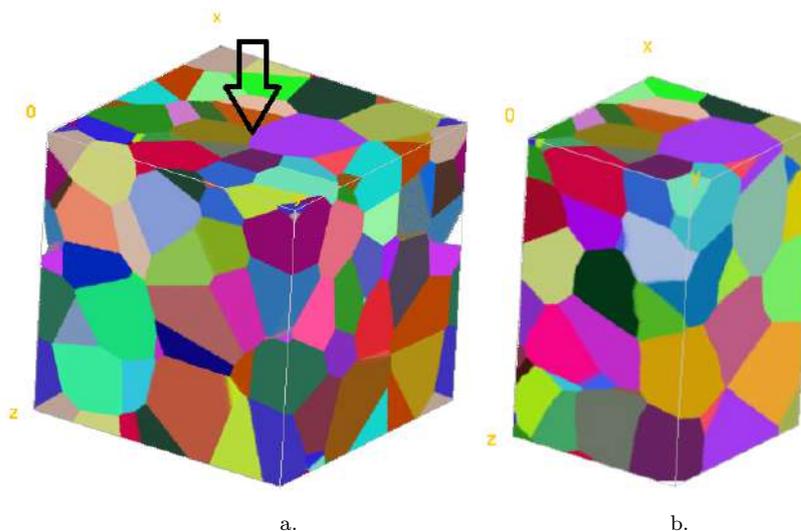


Figura 24 – Reconstrução em 3D da microestrutura simulada I antes (a) e após (b) alinhamento das imagens.
 Fonte: Elaborada pela autora, 2017.

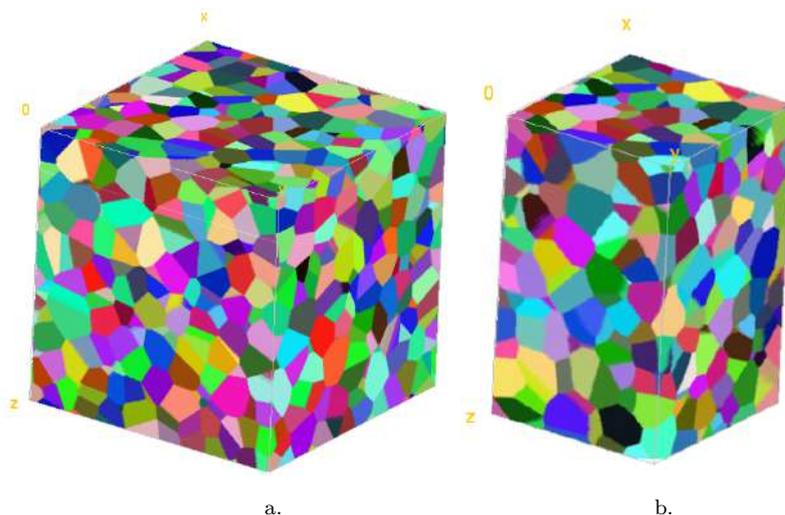


Figura 25 – Reconstrução em 3D da microestrutura simulada II antes (a) e após (b) alinhamento das imagens.
 Fonte: Elaborada pela autora, 2017.

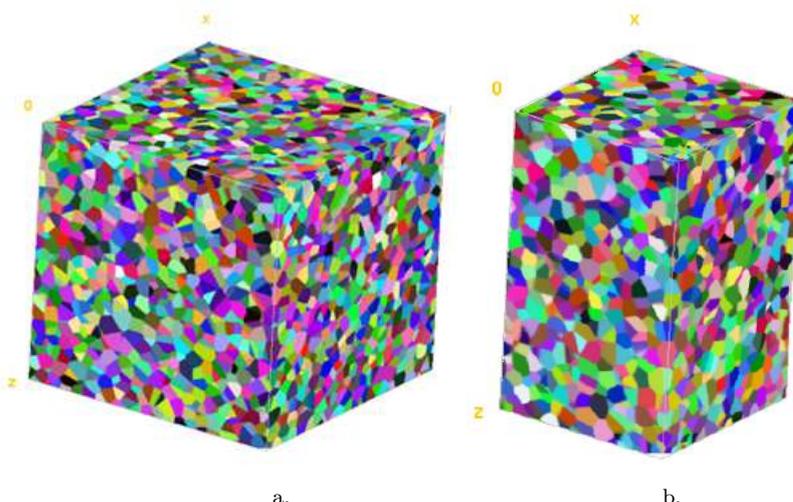


Figura 26 – Reconstrução em 3D da microestrutura simulada III antes (a) e após (b) alinhamento das imagens.
 Fonte: Elaborada pela autora, 2017.

4.2 Influência do número de pixels das imagens em 2D

Nas Figuras 27 a 29 são exibidas as reconstruções em 3D das três microestruturas a partir de diferentes números de *pixels* das imagens digitais em 2D. Como o principal objetivo no estudo deste aspecto era analisar o efeito de uma baixa resolução das imagens em 2D na qualidade das imagens das reconstruções em 3D, essas imagens foram ampliadas de forma a obter aproximadamente as dimensões da microestrutura original.

A partir do exame das imagens, verifica-se uma mudança mais significativa na qualidade da imagem reconstruída em 3D a partir da reconstrução com as seções de 150x150 *pixels* (Figs. 27c, 28c e 29c). Não houve uma mudança considerável na reconstrução em 3D com as seções de 225x225 *pixels* (Figs. 27b, 28b e 29b), e a reconstrução em 3D com as seções de 75x75 *pixels* (Figs. 27d, 28d e 29d) produziu a mais notável alteração na imagem.

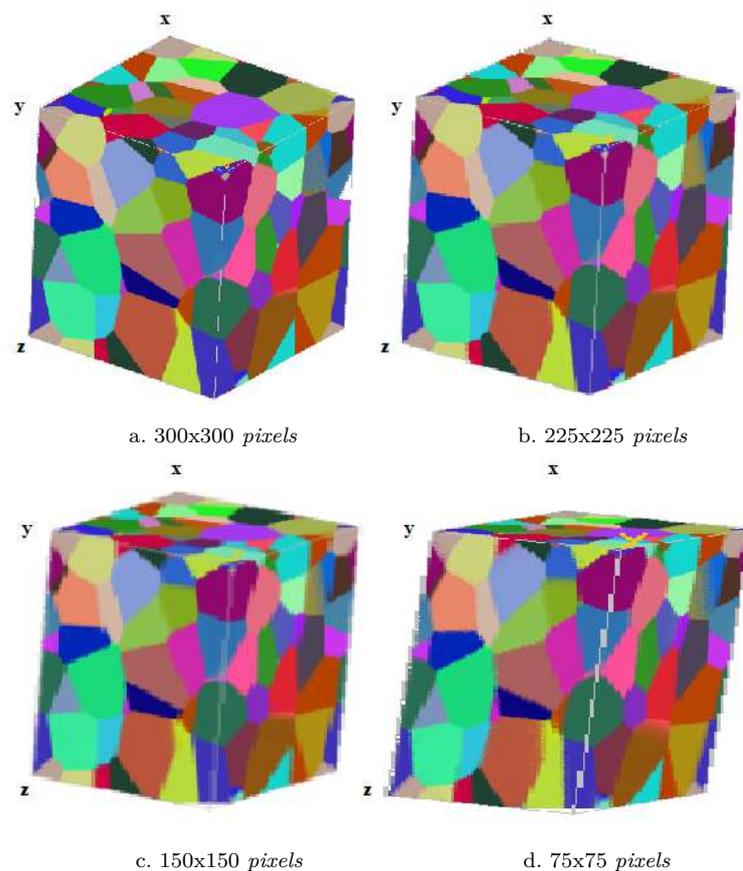


Figura 27 – Reconstrução em 3D da microestrutura I com diferentes tamanhos de *pixels*.

Fonte: Elaborada pela autora, 2018.

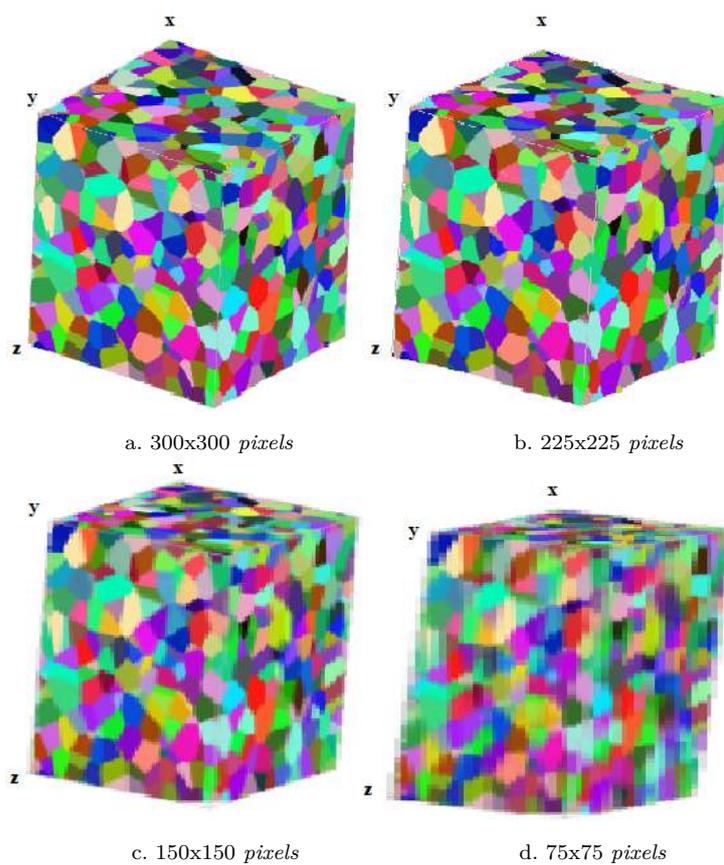


Figura 28 – Reconstrução em 3D da microestrutura II com diferentes tamanhos de *pixels*.
 Fonte: Elaborada pela autora, 2018.

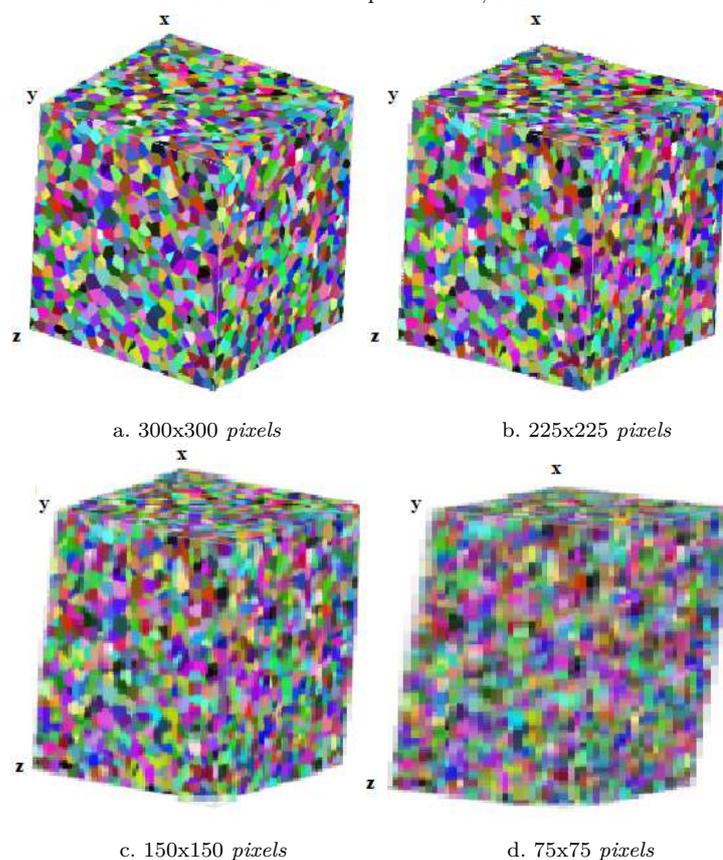


Figura 29 – Reconstrução em 3D da microestrutura III com diferentes tamanhos de *pixels*.
 Fonte: Elaborada pela autora, 2018.

A partir da redução do número de *pixels* das imagens em 2D observa-se que os contornos de grãos na reconstrução em 3D são prejudicados, pois essa redução afeta a nitidez e detalhes da imagem. Devido a ampliação, o menor número de *pixels* considerado acabou por produzir uma distorção na imagem reconstruída em 3D (Figs. 27d, 28d e 29d). Nas reconstruções em 3D das três microestruturas, o menor número de *pixels* é o que mais prejudica a visualização dos contornos de grãos, e é mais proeminente na microestrutura com menor tamanho de grãos (Fig. 29d).

4.3 Influência do número de seções e distância entre elas

Nas Figuras 30 a 35 são apresentadas as reconstruções em 3D das microestruturas simuladas com diferentes números de seções, conforme descrito na metodologia. As Figuras 31, 33 e 35 apresentam a reconstrução em 3D com o mesmo número de planos das reconstruções apresentadas nas Figuras 30, 32 e 34. Contudo, nas reconstruções em 3D das Figuras 31, 33 e 35 foi utilizado o *z-Aspect*, de modo a ampliar o volume na direção *z*, obtendo-se as mesmas dimensões de volume do modelo ideal.

Nota-se que os dois experimentos de reconstrução em 3D são sensíveis à redução do número de planos. É possível observar uma redução na altura da microestrutura reconstruída em 3D à medida que se diminui a quantidade total de planos utilizados e aumenta-se a distância entre os mesmos no eixo *z* (Figuras 30, 32 e 34). O achatamento dos grãos ocorre pois o volume de cada grão vai ser composto por um número de seções menor que na microestrutura original, ou seja, com o máximo número de seções.

Já nas Figuras 31, 33 e 35, devido ao *z-Aspect*, foram preenchidos os espaços vazios deixados entre dois planos consecutivos ao longo da direção *z*, e as microestruturas reconstruídas em 3D possuem a mesma altura. Nota-se, nessas figuras, que os grãos das microestruturas reconstruídas perdem seu formato original, sendo mais evidente conforme se diminui o número de planos e aumenta-se o valor do *z-Aspect*. Esse comportamento é melhor visualizado nas últimas reconstruções (Figs. 31f, 33f e 35f).

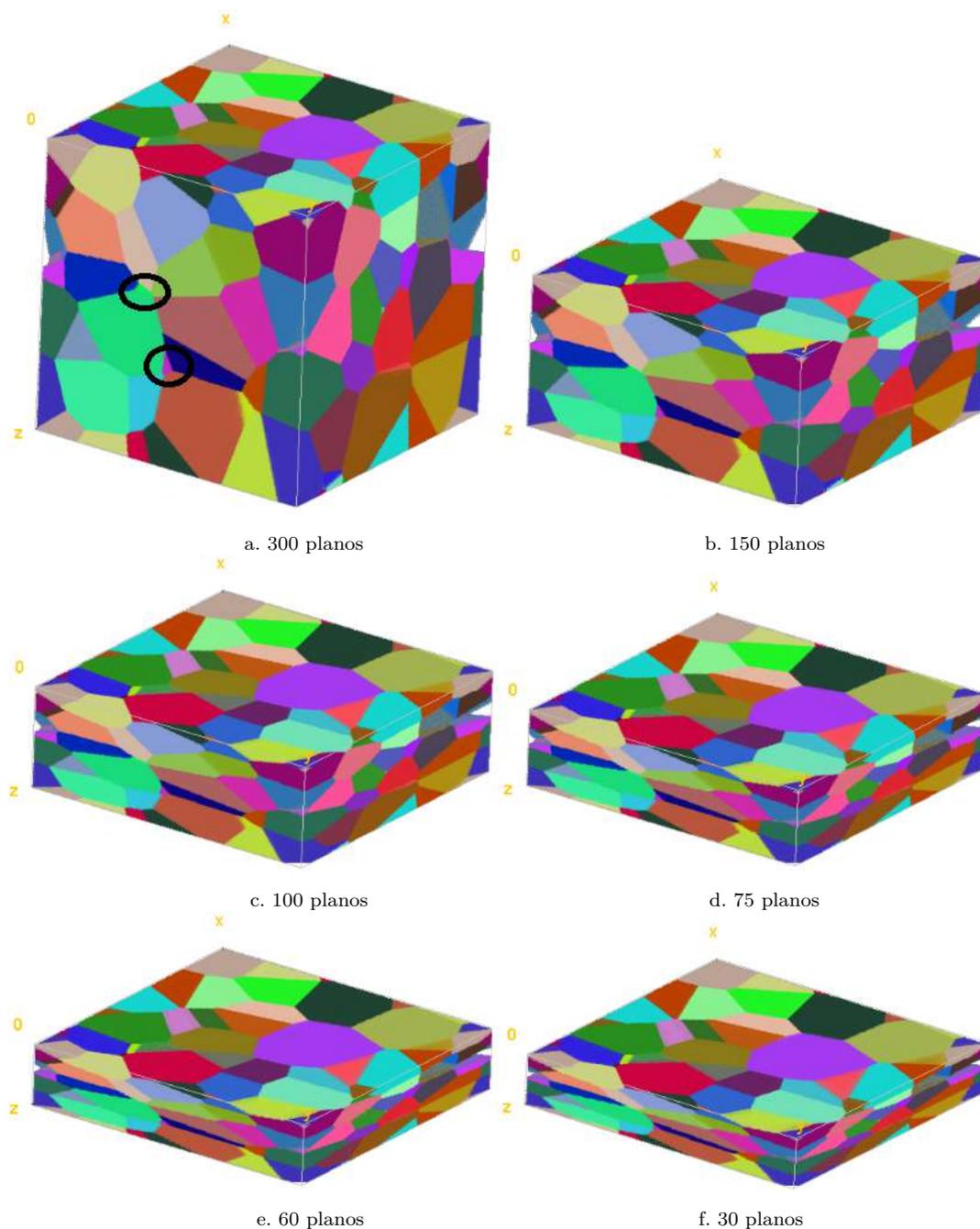


Figura 30 – Reconstrução em 3D da microestrutura simulada I.

Fonte: Elaborada pela autora, 2017.

Na Figura 30a observa-se que os dois pequenos grãos em destaque (um de cor verde e o outro de cor rosa) tornam-se praticamente imperceptíveis na última reconstrução em 3D (Fig. 30f). Nas próximas reconstruções em 3D, apresentadas na Figura 31, o grão verde acaba por se confundir com o grão vizinho, de mesma coloração, o que é mais visível na Figura 31f.

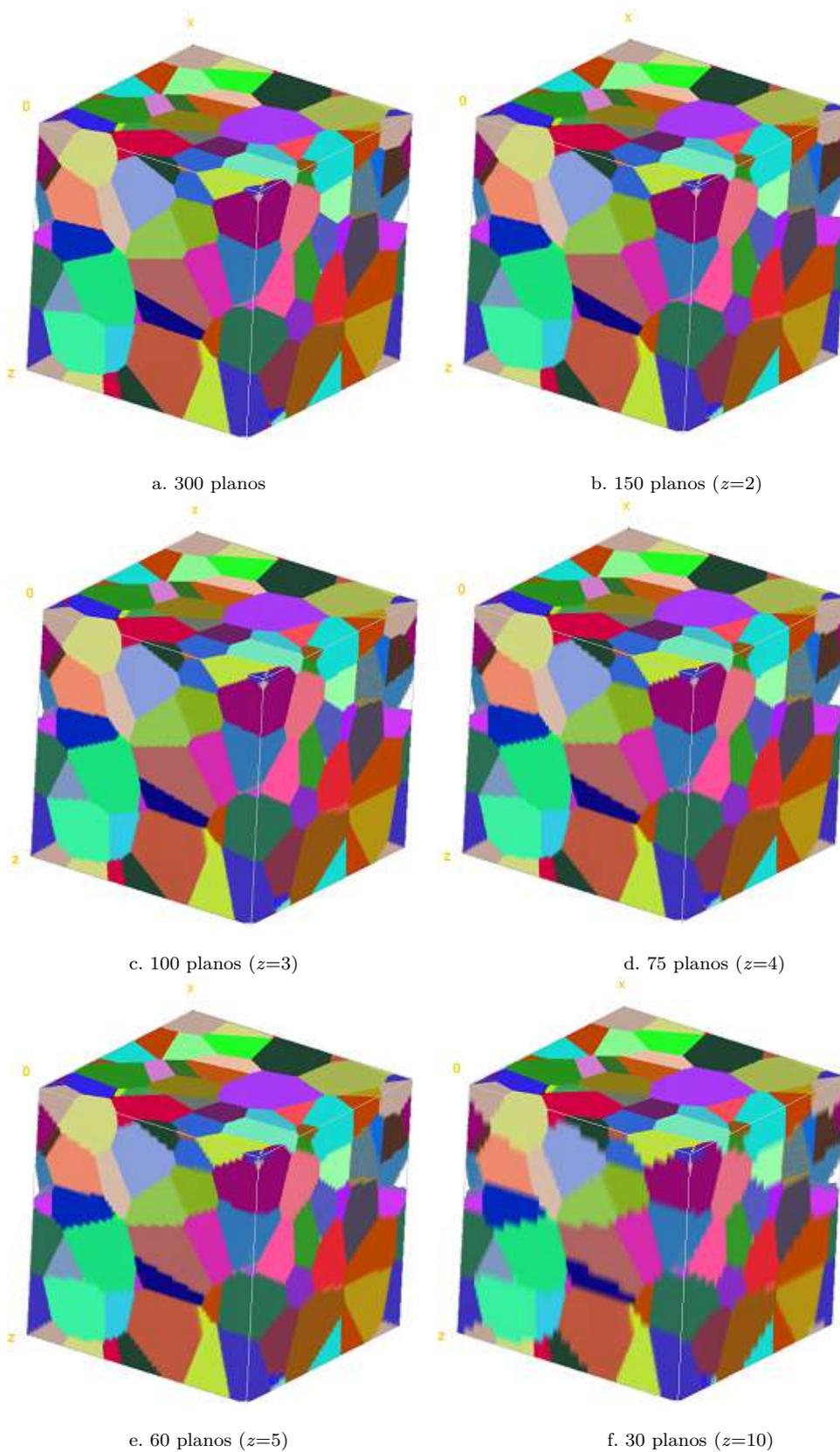


Figura 31 – Reconstrução em 3D da microestrutura simulada I com preenchimento dos planos.
 Fonte: Elaborada pela autora, 2017.

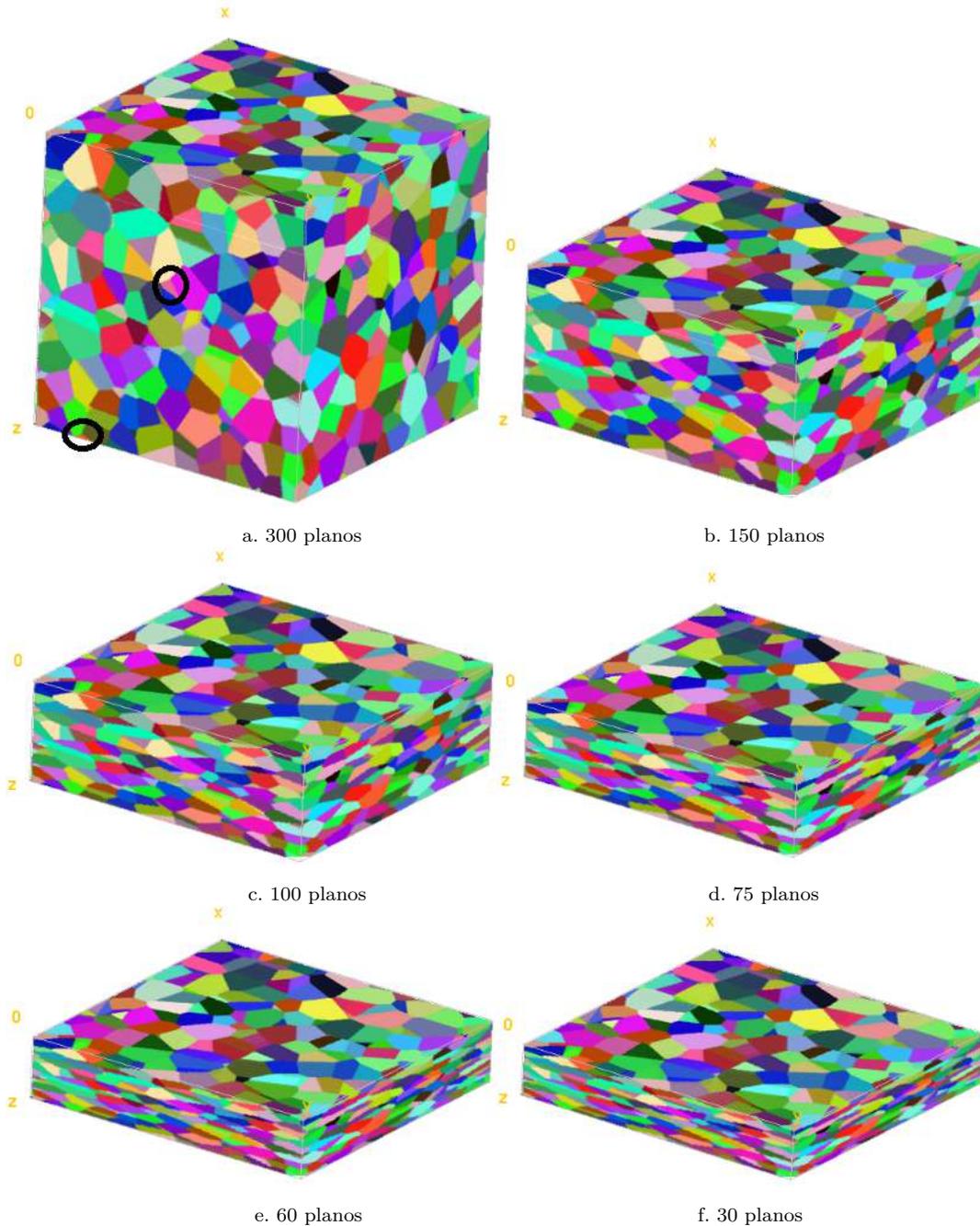


Figura 32 – Reconstrução em 3D da microestrutura simulada II.

Fonte: Elaborada pela autora, 2017.

Na reconstrução em 3D com 1.000 grãos torna-se mais visível a influência do número de seções, visto o tamanho dos grãos ser menor. Na Figura 32a, o pequeno grão em destaque na base da microestrutura torna-se imperceptível a partir da terceira reconstrução (Fig. 32c), desaparecendo por completo na última reconstrução (Fig. 32f). Na Figura 33, como na Figura 31, observa-se que, ao longo das reconstruções em 3D, os grãos vão perdendo sua geometria original.

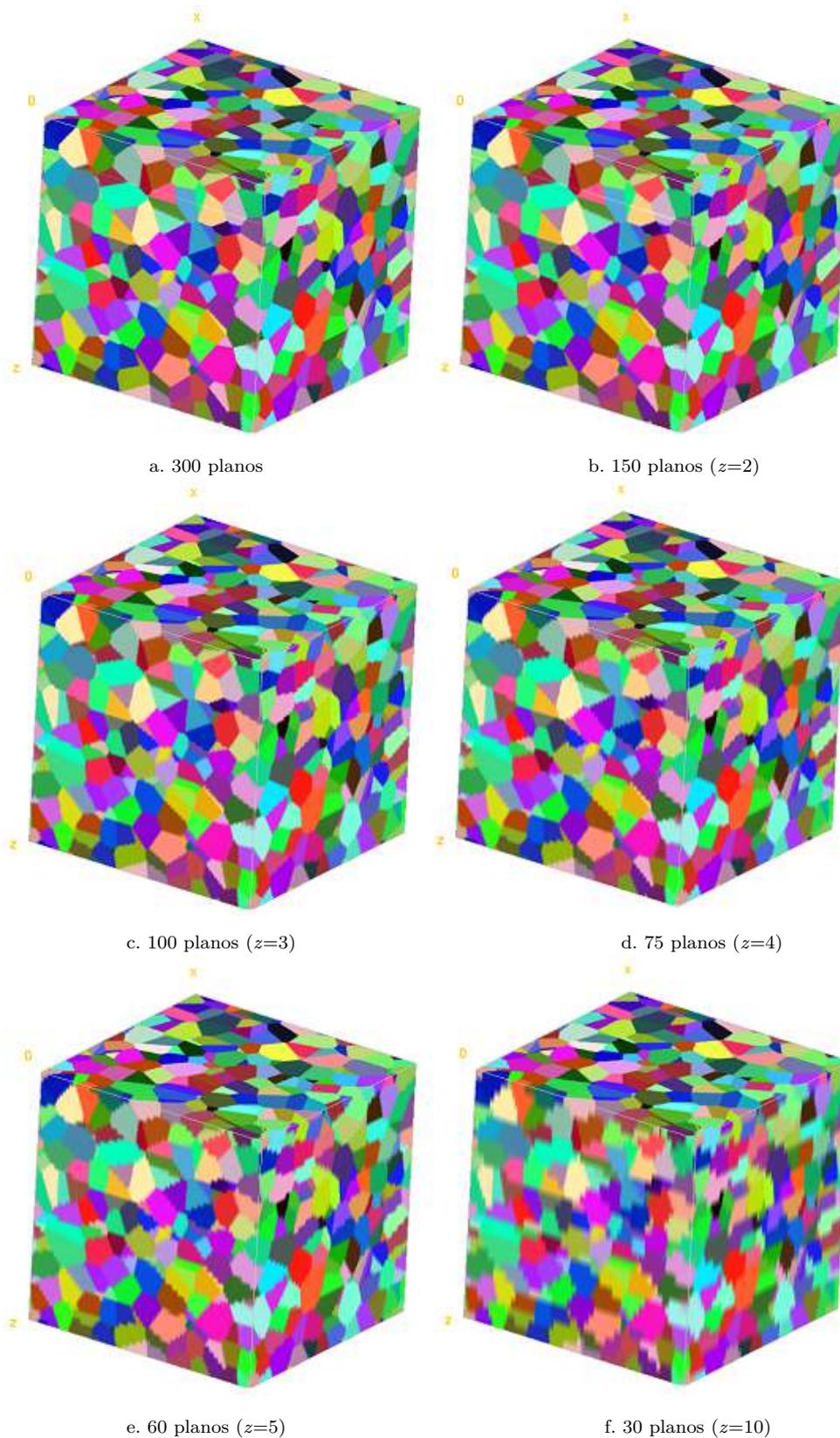


Figura 33 – Reconstrução em 3D da microestrutura simulada II com preenchimento dos planos.
 Fonte: Elaborada pela autora, 2017.

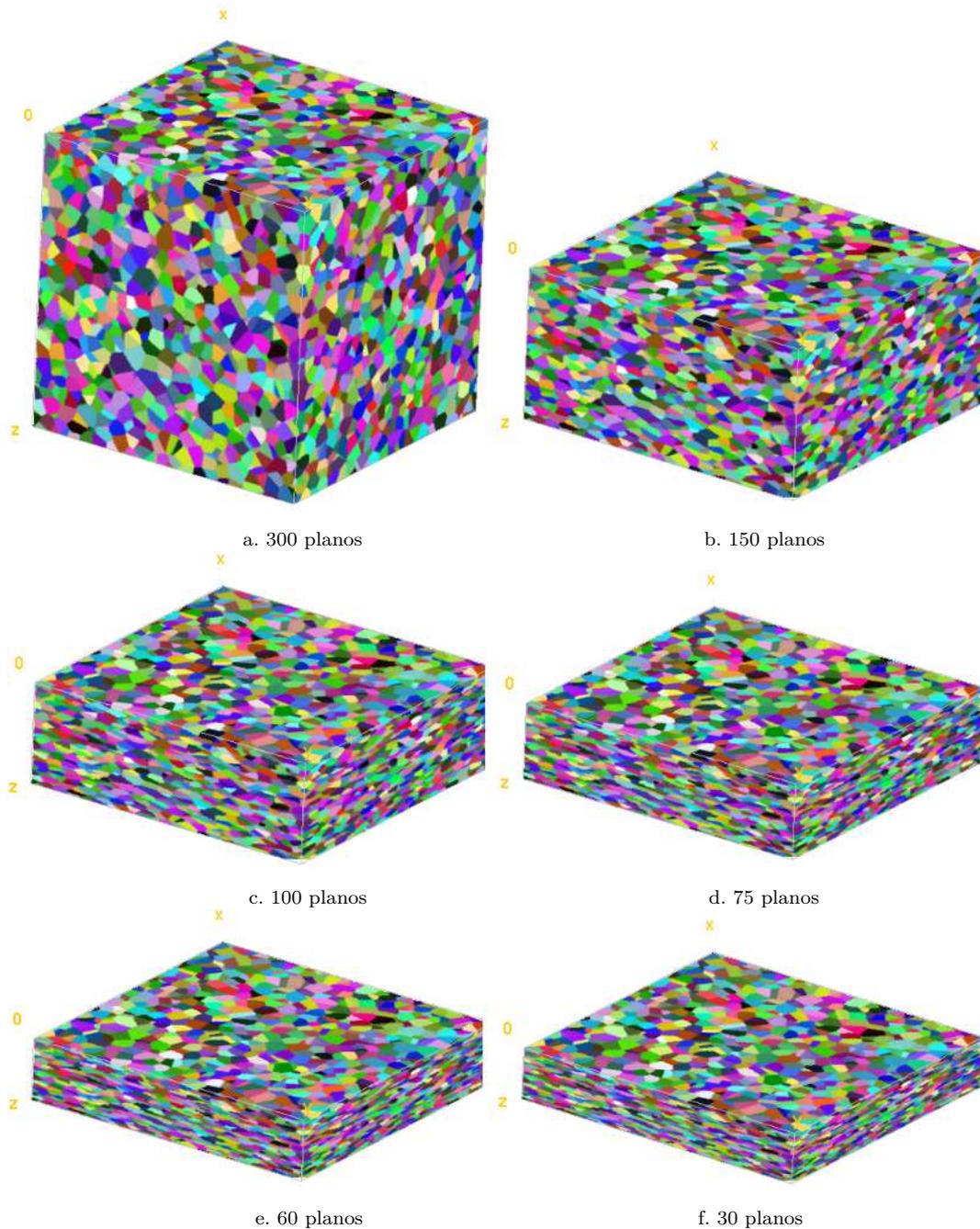


Figura 34 – Reconstrução em 3D da microestrutura simulada III.

Fonte: Elaborada pela autora, 2017.

Na reconstrução em 3D com 10.000 grãos, nenhum grão específico foi destacado. Essa microestrutura possui os grãos de menor tamanho e, por isso, é a mais significativamente afetada pela redução do número de seções. Na Figura 34c já é possível observar que é mais difícil distinguir os grãos, sendo a forma dos mesmos totalmente perdida na última reconstrução (Fig. 34f), o que também se observa nas outras duas reconstruções em 3D. Na Figura 35 observa-se o padrão das Figuras 31 e 33, sendo ainda mais difícil diferenciar os grãos na última reconstrução (Fig. 35f).

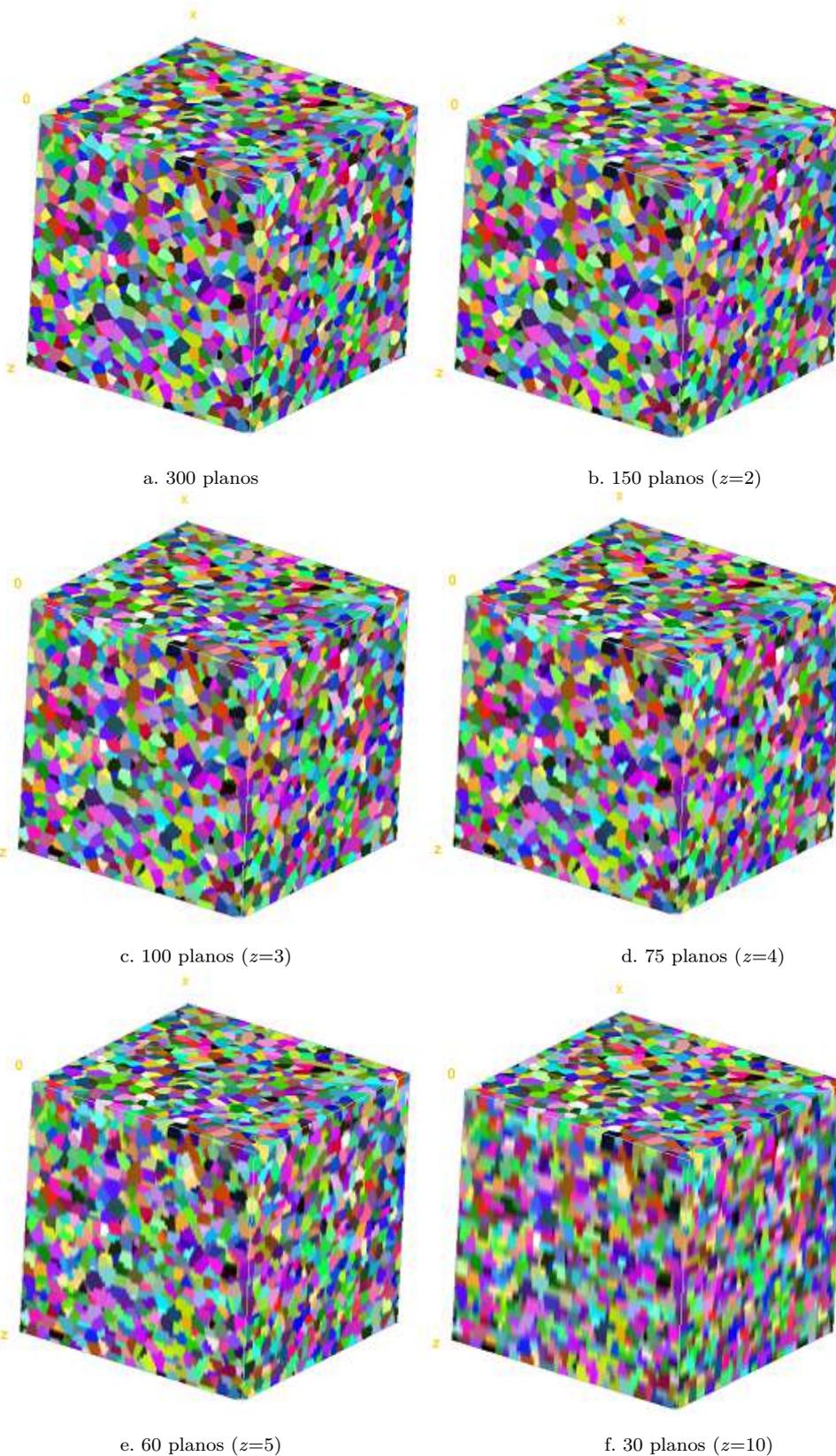


Figura 35 – Reconstrução em 3D da microestrutura simulada III com preenchimento dos planos.
 Fonte: Elaborada pela autora, 2017.

4.3.1 Exame estatístico descritivo do volume dos grãos

Serão apresentadas as estatísticas numéricas média, desvio padrão, coeficiente de variação, amplitude e histograma de distribuição de frequência, adimensionais, em termos de volume dos grãos de cada reconstrução em 3D das microestruturas em estudo. Após análise estatística dos dados obtidos para os planos com distâncias não aleatórias, verificou-se que não houve muita diferença entre os dados. Desenvolveu-se então uma funcionalidade ao programa para uma escolha aleatória da distância entre os planos. Assim, foi possível observar que houve uma diferença maior, como descrito a seguir.

4.3.1.1 Média

Na Tabela 5 é apresentado o volume médio dos grãos das microestruturas reconstruídas em 3D, enquanto na Tabela 6 são apresentados os dados para o caso de aleatoriedade da distância entre os planos. Como esperado, em ambas as tabelas verifica-se que o volume médio do grão diminui à medida que se aumenta a quantidade de grãos para um mesmo volume reconstruído, e quando se reduz a quantidade de planos.

Pelo exame da Tabela 5 observa-se uma proporcionalidade no volume médio dos grãos das três microestruturas, o que não se verifica na Tabela 6, em que os planos são aleatórios. Com exceção dos valores para 300 planos, que são iguais nas duas tabelas por possuírem todos os planos do modelo ideal, todos os valores apresentados na Tabela 6 foram inferiores aos da Tabela 5.

Grãos	300 planos	150 planos	100 planos	75 planos	60 planos	30 planos
100	270.000	135.000	90.000	67.500	54.000	27.000
1.000	27.000	13.500	9.000	6.750	5.400	2.700
10.000	2.700	1.350	900	675	540	270

Tabela 5 – Volume médio dos grãos.

Grãos	300 planos	150 planos	100 planos	75 planos	60 planos	30 planos
100	270.000	104.400	78.300	61.200	45.900	26.100
1.000	27.000	10.800	7.650	5.760	4.950	2.520
10.000	2.700	1.035	774	585	513	261

Tabela 6 – Volume médio dos grãos em planos aleatórios.

4.3.1.2 Desvio padrão

As Tabelas 7 e 8 apresentam o desvio padrão, respectivamente, para as reconstruções em 3D das microestruturas em estudo, e para o caso da distância aleatória dos planos. Como as médias observadas nos conjuntos de dados apresentados nas Tabelas 5 e 6 não são aproximadamente iguais, o desvio padrão não se configura como medida ideal para medir a variação dos dados, mas se faz necessário para o cálculo do coeficiente de variação.

O que se observa da comparação entre as Tabelas 7 e 8 é que alguns valores apresentados em uma tabela foram superiores ou inferiores para cada quantidade de planos em relação à outra tabela, ao se verificar cada quantidade de grãos. Nas duas tabelas, o desvio padrão é menor à medida que se diminui o número de planos e aumenta-se a quantidade de grãos.

Grãos	300 planos	150 planos	100 planos	75 planos	60 planos	30 planos
100	118.132,70	59.237,81	39.614,49	29.799,71	23.919,24	12.181,71
1.000	11.085,64	5.542,55	3.695,03	2.771,15	2.216,31	1.106,35
10.000	1.183,37	592,58	396,26	298,34	240,17	127,94

Tabela 7 – Desvio padrão.

Grãos	300 planos	150 planos	100 planos	75 planos	60 planos	30 planos
100	118.132,70	44.632,10	35.062,99	31.161,14	21.235,72	14.633,03
1.000	11.085,64	4.767,74	3.710,48	3.288,09	2.414,00	1.085,33
10.000	1.183,37	554,87	455,38	423,45	316,43	205,25

Tabela 8 – Desvio padrão em planos aleatórios.

4.3.1.3 Coeficiente de variação

O coeficiente de variação é a medida de variação mais indicada pois os conjuntos de dados apresentam médias diferentes. Nas Tabelas 9 e 10 é apresentado o coeficiente de variação, em percentagem. Observa-se que o coeficiente de variação não apresentou uma mudança considerável para cada quantidade de grãos das microestruturas em estudo, como mostrado na Tabela 9, o que indica que a diferença entre os volumes em relação à média continuou praticamente a mesma para cada quantidade de planos ao se analisar cada quantidade de grãos.

Maior similaridade entre os valores verifica-se, pelo exame da Tabela 9, para a quantidade de 1.000 grãos. O valor de 41,06% foi apresentado pelas quatro primeiras quantidades de planos, com pouca variação em relação aos outros dois valores. As outras duas quantidades de grãos apresentaram uma diferença de menos de 4% em relação ao maior e menor valor apresentados por cada uma.

Grãos	300 planos	150 planos	100 planos	75 planos	60 planos	30 planos
100	43,75	43,88	44,02	44,15	44,29	45,12
1.000	41,06	41,06	41,06	41,06	41,04	40,98
10.000	43,83	43,89	44,03	44,20	44,48	47,38

Tabela 9 – Coeficiente de variação.

Na Tabela 10 observa-se que os valores do coeficiente de variação para os planos espaçados aleatoriamente variaram mais para cada quantidade de grãos. Verificam-se valores com uma diferença maior para cada quantidade de grãos, como os valores de 56,07%, 71,64% e 78,64% apresentados em 30 planos, em relação aos menores valores: 42,75%, 41,06% e 43,83% apresentados, respectivamente, por cada quantidade de grãos.

Grãos	300 planos	150 planos	100 planos	75 planos	60 planos	30 planos
100	43,75	42,75	44,78	50,92	46,27	56,07
1.000	41,06	44,15	48,50	57,08	48,77	71,64
10.000	43,83	53,61	58,83	72,38	61,68	78,64

Tabela 10 – Coeficiente de variação em planos aleatórios.

4.3.1.4 Amplitude

Como a amplitude contém pouca informação quanto à dispersão, serão comentados apenas o maior e menor valores apresentados pelos conjuntos de dados. Nas Tabelas 11 a 16 são apresentados o volume do maior e menor grão de cada microestrutura em planos com espaçamentos não aleatórios e aleatórios, e a amplitude.

Comparando-se as Tabelas 11 e 12 observa-se que os valores para o maior volume do grão da Tabela 12 foram maiores para 100, 75 e 30 planos, e menores para as demais quantidades de planos em relação à Tabela 11. Apenas para 30 planos o valor do menor volume do grão da Tabela 12 foi maior se comparado à Tabela 11.

Dados	300 planos	150 planos	100 planos	75 planos	60 planos	30 planos
$x_{\text{máx}}$	587.887	291.456	192.665	144.084	116.646	61.715
$x_{\text{mín}}$	44.487	22.135	14.655	10.953	8.679	3.884
R	543.400	269.321	178.010	133.131	107.967	57.831

Tabela 11 – Amplitude da microestrutura I.

Dados	300 planos	150 planos	100 planos	75 planos	60 planos	30 planos
$x_{\text{máx}}$	587.887	278.398	200.987	161.100	101.839	73.866
$x_{\text{mín}}$	44.487	18.583	14.442	9.581	7.271	4.025
R	543.400	259.815	186.545	151.519	94.568	69.841

Tabela 12 – Amplitude da microestrutura com 100 grãos em planos aleatórios.

Pelo exame das Tabelas 13 e 14 é possível verificar que grãos desapareceram no caso de planos aleatórios, conforme valor zero apresentado pelo volume do menor grão nas quantidades de 75 e 30 planos da Tabela 14. Para as quantidades de 60 e 30 planos da Tabela 13, os volumes do maior grão foram menores se comparados com os valores da Tabela 14. Os volumes do menor grão da Tabela 14 foram menores se comparados com os valores da Tabela 13.

Dados	300 planos	150 planos	100 planos	75 planos	60 planos	30 planos
$x_{\text{máx}}$	76.670	38.347	25.547	19.192	15.336	7.651
$x_{\text{mín}}$	4.614	2.273	1.542	1.129	923	464
R	72.056	36.074	24.005	18.063	14.413	7.187

Tabela 13 – Amplitude da microestrutura II.

Dados	300 planos	150 planos	100 planos	75 planos	60 planos	30 planos
$x_{\text{máx}}$	76.670	35.111	22.455	18.007	15.503	11.142
$x_{\text{mín}}$	4.614	1.425	556	0	332	0
R	72.056	33.686	21.899	18.007	15.171	11.142

Tabela 14 – Amplitude da microestrutura com 1.000 grãos em planos aleatórios.

Para uma quantidade de 10.000 grãos houve desaparecimento dos grãos nos dois casos, conforme indica o valor zero das Tabelas 15 e 16 para o menor volume do grão. Para o caso de planos aleatórios, o desaparecimento começa a partir de uma quantidade de 100 planos, e de 75 planos para o caso dos planos não aleatórios em estudo. Como observado para as quantidades de 100 e 1.000 grãos, o volume do maior grão é ligeiramente maior

para certas quantidades de planos em uma tabela quando comparado ao outro caso em análise.

Dados	300 planos	150 planos	100 planos	75 planos	60 planos	30 planos
$x_{\text{máx}}$	11.146	5.512	3.645	2.727	2.180	1.148
$x_{\text{mín}}$	201	97	4	0	0	0
R	10.945	5.415	3.641	2.727	2.180	1.148

Tabela 15 – Amplitude da microestrutura III.

Dados	300 planos	150 planos	100 planos	75 planos	60 planos	30 planos
$x_{\text{máx}}$	11.146	4.860	3.674	3.316	3.103	1.748
$x_{\text{mín}}$	201	7	0	0	0	0
R	10.945	4.853	3.674	3.316	3.103	1.748

Tabela 16 – Amplitude da microestrutura com 10.000 grãos em planos aleatórios.

4.3.1.5 Histograma

Nas Figuras 36 a 41 são exibidos os histogramas de distribuição de frequência do volume dos grãos rotulados com pontos médios das classes para os dois casos em estudo. Nas Figuras 36, 38 e 40 para as microestruturas reconstruídas em 3D em planos não aleatórios e nas Figuras 37, 39 e 41 para a condição de aleatoriedade da distância entre os planos.

Nas Figuras 36 a 41 observa-se graficamente a redução do volume médio dos grãos conforme se reduz o número de planos. Com relação ao formato dos histogramas, pode-se dizer que os mesmos apresentaram uma curva de desvio positivo, ou assimetria positiva, visto o achatamento dos dados à direita da curva, principalmente nos histogramas apresentados nas Figuras 38 a 41.

O que se verifica da análise dos histogramas apresentados nas Figuras 36, 38 e 40, para as microestruturas reconstruídas em 3D com distância não aleatória entre as seções, é que, apesar do volume total médio ser proporcional à redução do número de planos, como indicado na Tabela 5, não significa que o volume de cada grão foi reduzido do mesmo modo.

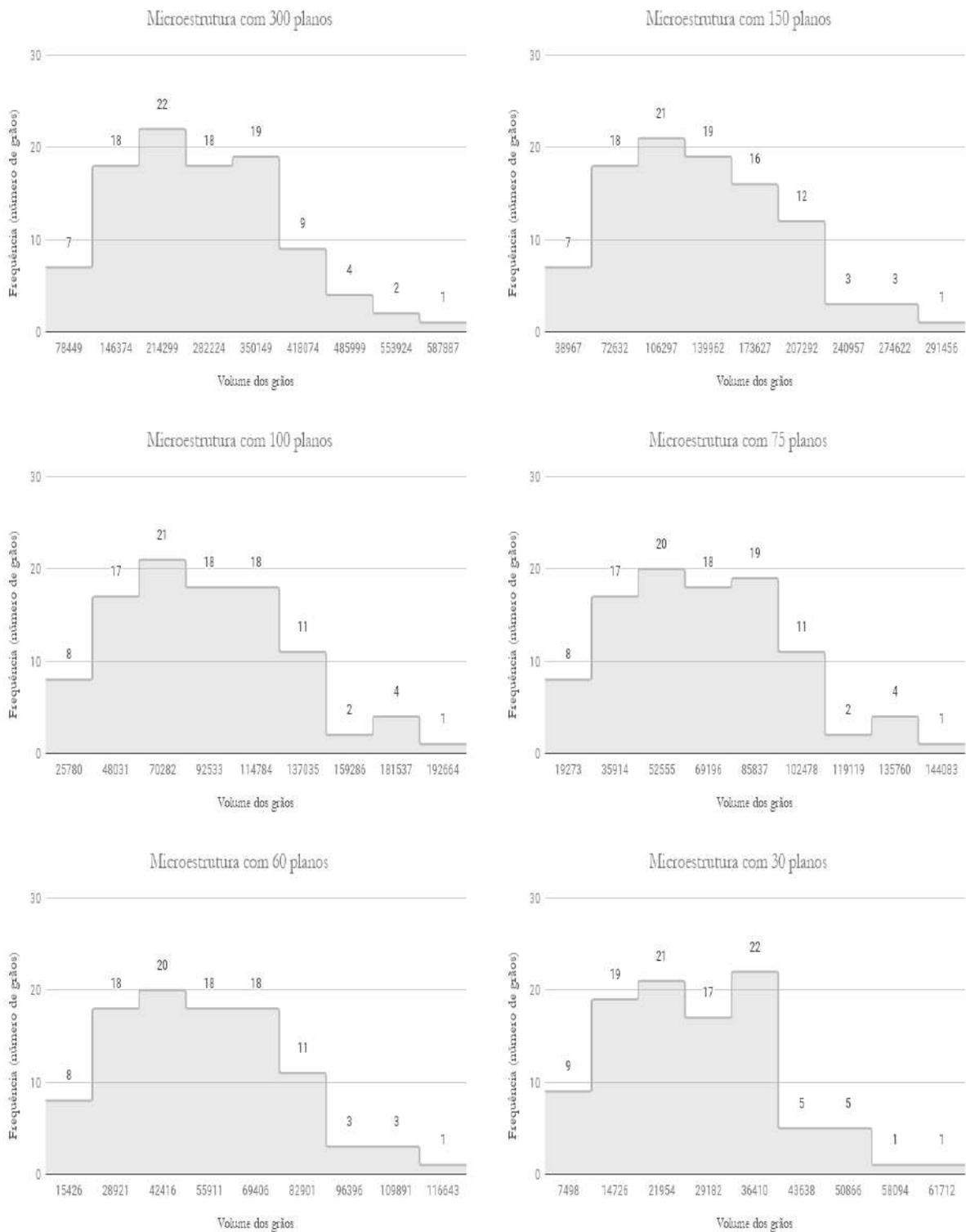


Figura 36 – Histogramas da microestrutura simulada I.

Fonte: Elaborada pela autora, 2018.

Pelo exame dos histogramas da Figura 36 observa-se que poucos grãos se situam nos valores extremos da distribuição. As maiores frequências estão distribuídas nas segundas a quintas classes.

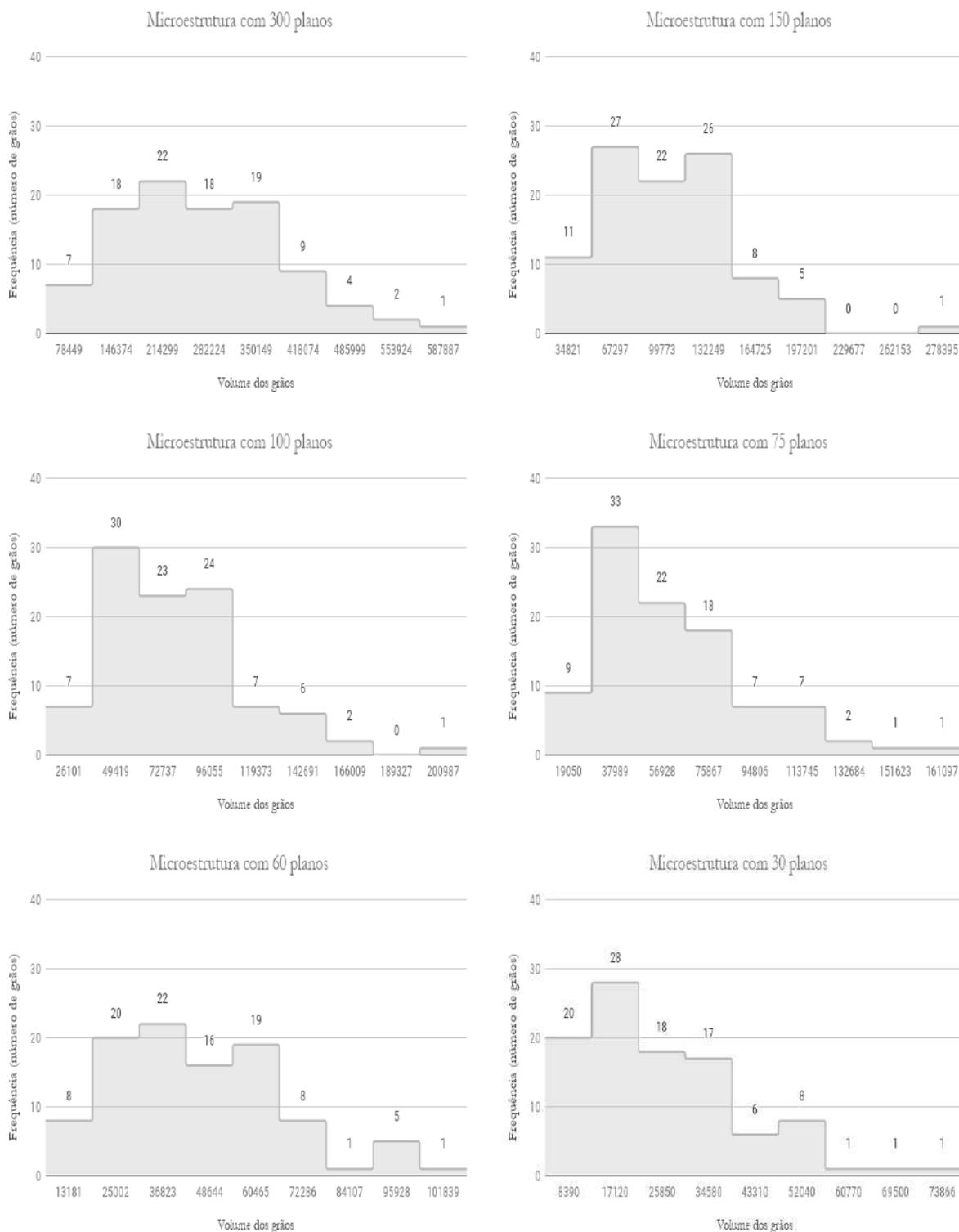


Figura 37 – Histogramas da microestrutura simulada com 100 grãos em planos aleatórios.
 Fonte: Elaborada pela autora, 2018.

Pela observação da Figura 37 nota-se uma diferença em relação aos histogramas apresentados na Figura 36, tanto no volume médio das classes quanto no formato dos gráficos.

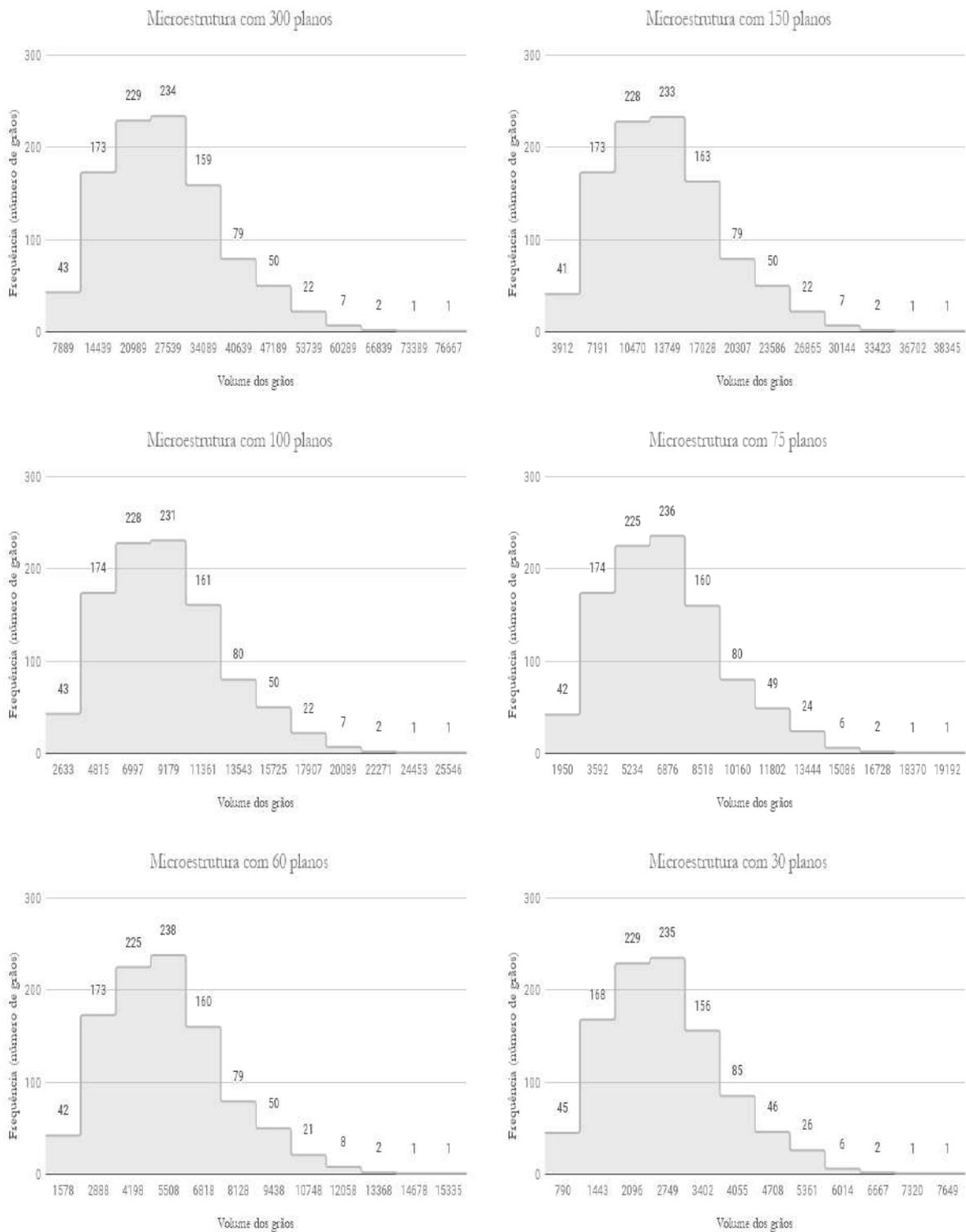


Figura 38 – Histogramas da microestrutura simulada II.

Fonte: Elaborada pela autora, 2018.

Pelo exame da Figura 38 observa-se que os histogramas apresentam um formato semelhante. Poucos grãos apresentam volume em valores mais extremos da distribuição e as maiores frequências estão distribuídas nas segundas a quintas classes.

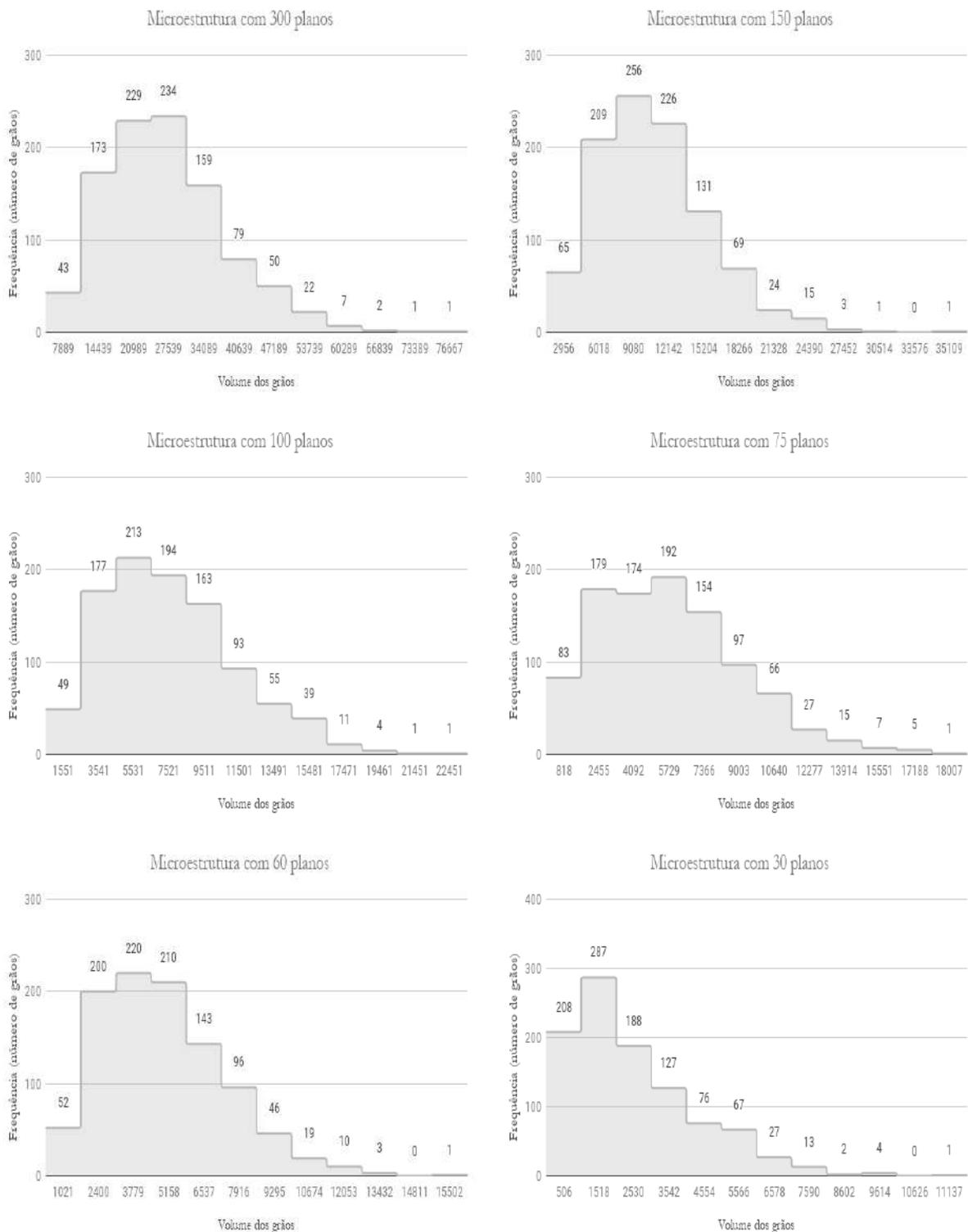


Figura 39 – Histogramas da microestrutura simulada com 1.000 grãos em planos aleatórios.

Fonte: Elaborada pela autora, 2018.

Nos histogramas da Figura 39 nota-se também que poucos grãos apresentam volume em valores mais extremos da distribuição. Contudo, é possível verificar um número maior de grãos na primeira classe das microestruturas com 75 e 30 planos, que pode ser justificado pelo desaparecimento de grãos de menor volume.

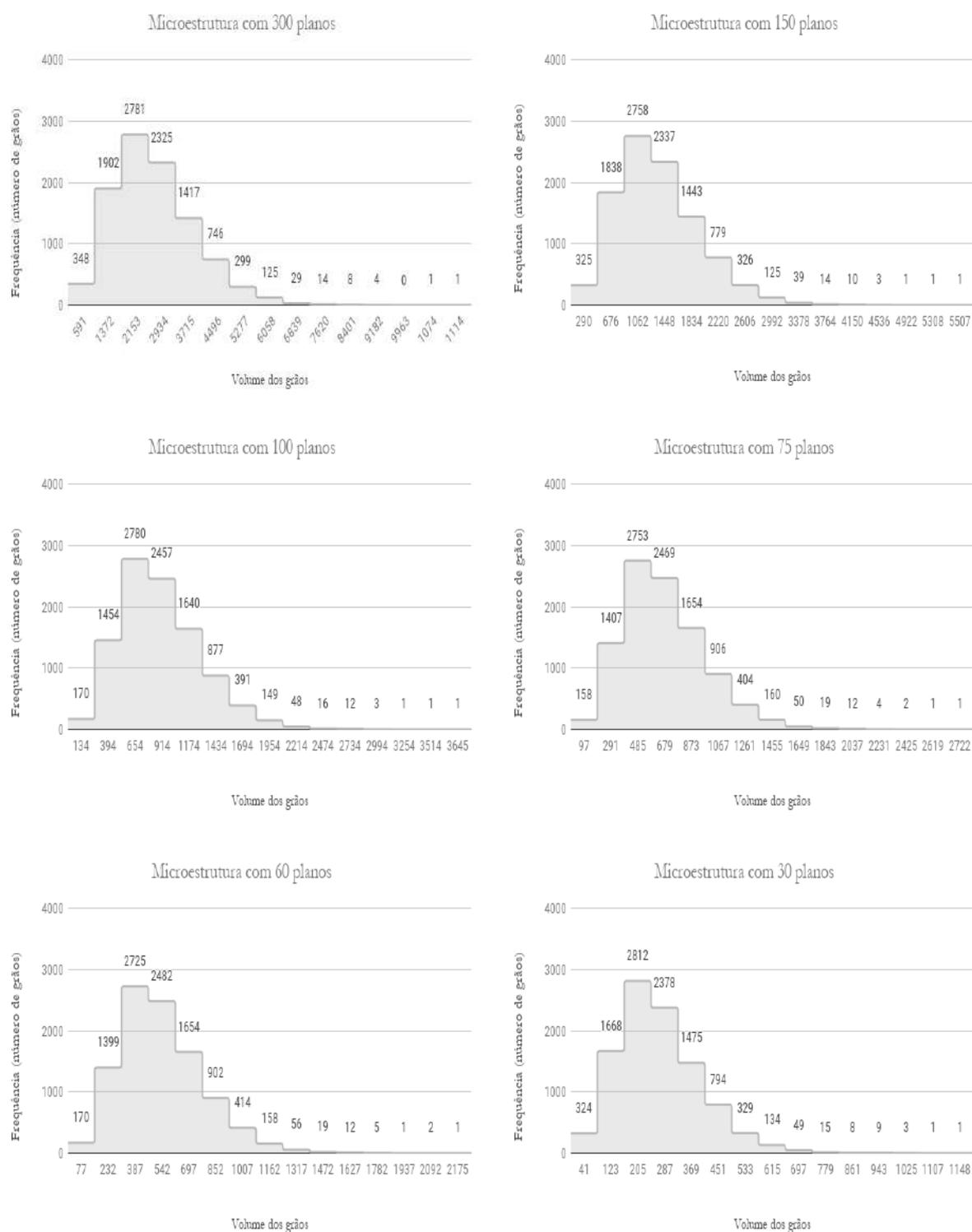


Figura 40 – Histogramas da microestrutura simulada III.
 Fonte: Elaborada pela autora, 2018.

Observa-se que os histogramas da Figura 40 apresentam um formato semelhante. Pelo exame dos histogramas dessa figura verifica-se que a microestrutura com 30 planos apresentou um pequeno acréscimo de grãos na primeira classe, pelo provável aumento do número de pequenos grãos que desapareceram.

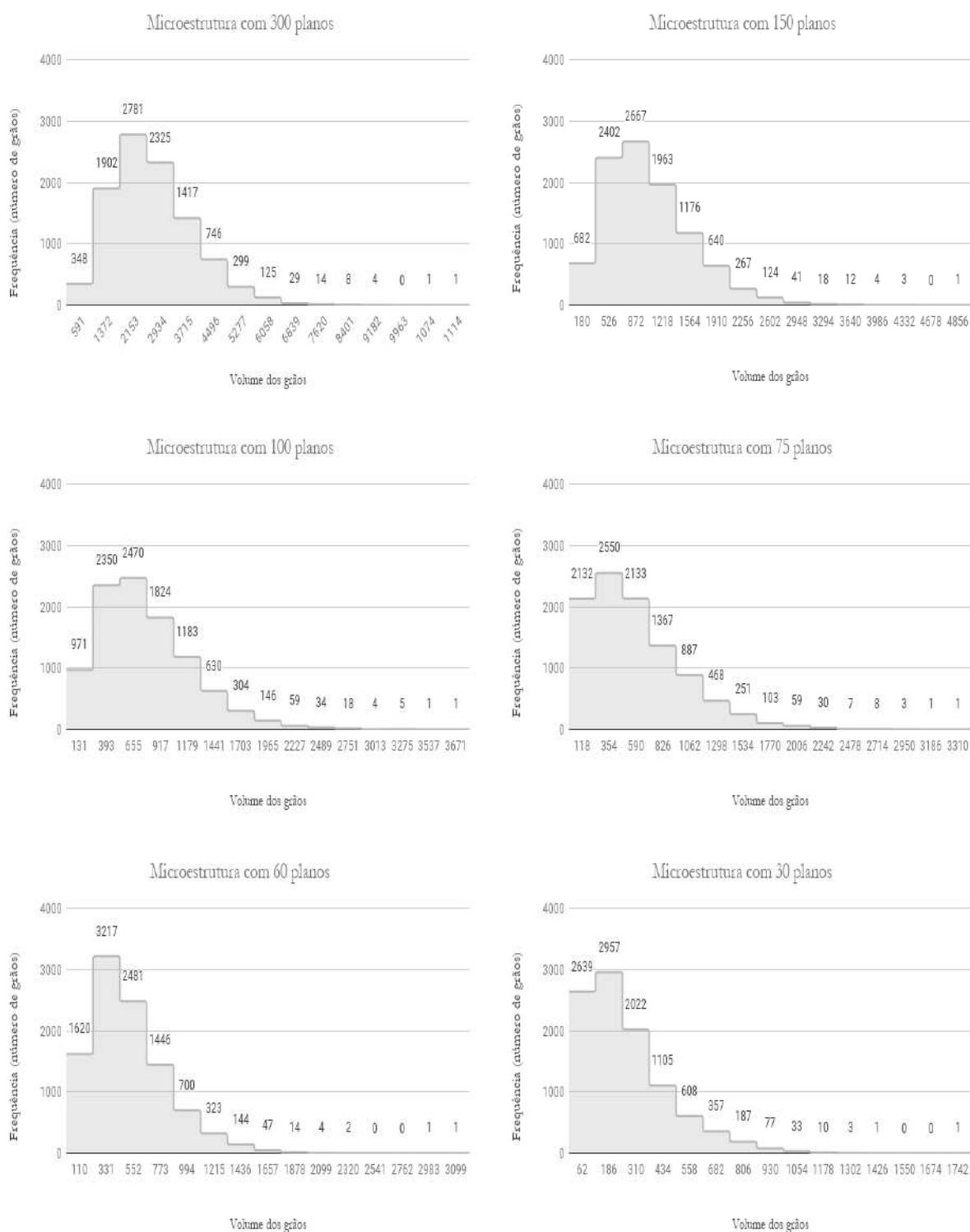


Figura 41 – Histogramas da microestrutura simulada com 10.000 grãos em planos aleatórios.
 Fonte: Elaborada pela autora, 2018.

Em comparação aos histogramas da Figura 40, nos histogramas da Figura 41 é possível verificar mais grãos na primeira classe da distribuição de frequência. A aleatoriedade dos planos pode explicar um número maior de pequenos grãos, ou seja, de menor volume, que são mais suscetíveis a desaparecer.

4.4 Erro numérico do volume na reconstrução em 3D

Nas Tabelas 17 a 19 são apresentados os erros absoluto e relativo da reconstrução em 3D em relação aos aspectos analisados conforme equações 6 e 7. O erro relativo é apresentado em sua forma percentual, conforme equação 8. A primeira reconstrução em 3D de cada um dos aspectos analisados, computacionalmente, é a reconstrução, ou modelo, ideal. Possui a mesma dimensão nos três eixos e espaçamento unitário entre as seções.

Pelo exame das tabelas observa-se que quanto menor o volume, em *voxels*, em relação ao volume ideal, maiores serão os erros absoluto e relativo, como previsto. O erro numérico corresponde ao complemento do volume reconstruído. Logo, se o volume reconstruído apresenta valor inferior ao ideal, o erro numérico é o erro do que se deixou de reconstruir.

4.4.1 Erro numérico no estudo da influência do alinhamento das seções

Na Tabela 17 é apresentado o erro absoluto e o erro relativo, em percentual, para o caso do estudo da influência do alinhamento das imagens em 2D. O que se verifica é que o alinhamento produziu uma perda de volume reconstruído de mais de 50%. Como já comentado, as imagens em 2D precisaram ser editadas e, após o corte, houve a redução das dimensões das imagens em 2D.

x	y	z	Volume (<i>Voxels</i>)	%	Erro Absoluto (E_A)	Erro Percentual (E_P)
300	300	300	27.000.000	100,00	-	-
198	184	300	10.929.600	40,48	16.070.400	59,52

Tabela 17 – Erro computacional no estudo do alinhamento na reconstrução em 3D.

4.4.2 Erro numérico no estudo da influência do número de pixels das seções

Conforme se verifica no exame da Tabela 18, que apresenta o erro numérico no estudo da influência do número de *pixels* das imagens em 2D é que, como previsto, há o aumento dos dois erros à medida que se reduz o número de *pixels* das imagens em 2D. Para o menor número de *pixels*, o erro relativo da reconstrução em 3D chegou a 93,75%. Observa-se uma diferença de 50% no erro relativo entre as reconstruções com imagens em 2D de 225x225 *pixels* e 75x75 *pixels*.

x	y	z	Volume (Voxels)	%	Erro Absoluto (E_A)	Erro Percentual (E_P)
300	300	300	27.000.000	100,00	-	-
225	225	300	15.187.500	56,25	11.812.500	43,75
150	150	300	6.750.000	25,00	20.250.000	75,00
75	75	300	1.687.500	6,25	25.312.500	93,75

Tabela 18 – Erro computacional no estudo do número de *pixels* das imagens em 2D na reconstrução em 3D.

4.4.3 Erro numérico no estudo da influência das seções

Na Tabela 19 são apresentados os erros absoluto e relativo, em percentual, ao se reduzir o número de imagens em 2D em planos com distâncias não aleatórias, conforme descrição na metodologia. O que se verifica é que os erros aumentam à medida que se reduz o número de planos, chegando a 90% de erro relativo na última reconstrução e apresentando uma diferença de 40% em relação a primeira redução do número de seções, ou seja, com 150 planos.

x	y	z	Volume (Voxels)	%	Erro Absoluto (E_A)	Erro Percentual (E_P)
300	300	300	27.000.000	100,00	-	-
300	300	150	13.500.000	50,00	13.500.000	50,00
300	300	100	9.000.000	33,33	18.000.000	66,67
300	300	75	6.750.000	25,00	20.250.000	75,00
300	300	60	5.400.000	20,00	21.600.000	80,00
300	300	30	2.700.000	10,00	24.300.000	90,00

Tabela 19 – Erro computacional no estudo do número de seções na reconstrução em 3D.

4.4.3.1 Erros do maior e menor grão

A seguir são exibidos os erros absolutos do maior e menor grão, em sequência, os erros relativos. Nas Tabelas 20 a 27 são apresentados os erros numéricos dos dois casos em análise. As Tabelas 20, 22, 24 e 26 apresentam os erros absoluto e relativo para o maior e menor grão das microestruturas ao se analisar a influência do número de planos e distância entre os mesmos. Contudo, ao se examinar esse aspecto, como citado na metodologia, foi verificado também os erros para o caso de uma aleatoriedade na distância entre os planos, Tabelas 21, 23, 25 e 27.

Pelo exame das Tabelas 20 a 27 é possível observar que, como esperado, os dois erros aumentam quando que se reduz a quantidade de planos, sendo a distância entre as seções aleatórias ou não. Devido ao tamanho do grão, o erro absoluto, Tabelas 20 a 23, é menor conforme aumenta-se a quantidade de grãos.

4.4.3.1.1 Erro absoluto do maior grão

O que se observa-se pelo exame das Tabelas 20 e 21 é que não houve muita diferença entre os dados apresentados nas duas tabelas para o erro absoluto do maior grão. Para cada quantidade de grãos, alguns dados apresentados em uma tabela foram superiores ou inferiores aos apresentados na outra tabela.

Verifica-se, contudo, que para a quantidade de 150 planos aleatórios, todos os valores apresentados na Tabela 21 foram maiores que os valores apresentados na Tabela 20. E, para a quantidade de 30 planos aleatórios, todos os valores apresentados na Tabela 21 foram inferiores aos apresentados na Tabela 20.

Grãos	300 planos	150 planos	100 planos	75 planos	60 planos	30 planos
100	-	296.431	395.222	443.803	471.241	526.172
1.000	-	38.323	51.123	57.478	61.334	69.019
10.000	-	5.634	7.501	8.419	8.966	9.998

Tabela 20 – Erro absoluto do maior grão.

Grãos	300 planos	150 planos	100 planos	75 planos	60 planos	30 planos
100	-	309.489	386.900	426.787	486.048	514.021
1.000	-	41.559	54.215	58.663	61.167	65.528
10.000	-	6.286	7.472	7.830	8.043	9.398

Tabela 21 – Erro absoluto do maior grão em planos aleatórios.

4.4.3.1.2 Erro absoluto do menor grão

Com relação a esse erro, verifica-se que o valor de 201 apresentado nas Tabelas 22 e 23 repetidamente para a quantidade de 10.000 grãos se deve ao desaparecimento de grãos ocorrido. Com exceção desses valores e do valor apresentado para a quantidade de 30 planos aleatórios em uma microestrutura com 100 grãos, Tabela 23, todos os demais valores dessa tabela foram maiores do que os apresentados na Tabela 22.

Grãos	300 planos	150 planos	100 planos	75 planos	60 planos	30 planos
100	-	22.352	29.832	33.534	35.808	40.603
1.000	-	2.341	3.072	3.485	3.691	4.150
10.000	-	104	197	201	201	201

Tabela 22 – Erro absoluto do menor grão.

Grãos	300 planos	150 planos	100 planos	75 planos	60 planos	30 planos
100	-	25.904	30.045	34.906	37.216	40.462
1.000	-	3.189	4.058	4.614	4.282	4.614
10.000	-	194	201	201	201	201

Tabela 23 – Erro absoluto do menor grão em planos aleatórios.

4.4.3.1.3 Erro relativo do maior grão

Com relação às Tabelas 24 e 25, observa-se que os valores foram próximos para as três quantidades de grãos quando se analisa a quantidade de planos. Diferença maior está na quantidade de 60 planos aleatórios, Tabela 25, em que há uma diferença de mais de 10% entre o menor e maior valor apresentados. Para a quantidade de 150 planos aleatórios, todos os erros apresentados na Tabela 25 foram superiores aos apresentados na Tabela 24. Para 30 planos aleatórios, todos os erros relativos da Tabela 25 foram inferiores aos da Tabela 24.

Grãos	300 planos	150 planos	100 planos	75 planos	60 planos	30 planos
100	-	50,42	67,23	75,49	80,16	89,50
1.000	-	49,98	66,68	74,97	80,00	90,02
10.000	-	50,55	67,30	75,53	80,44	89,70

Tabela 24 – Erro relativo do maior grão.

Grãos	300 planos	150 planos	100 planos	75 planos	60 planos	30 planos
100	-	52,64	65,81	72,60	82,68	87,44
1.000	-	54,21	70,71	76,51	79,78	85,47
10.000	-	56,40	67,04	70,25	72,16	84,32

Tabela 25 – Erro relativo do maior grão em planos aleatórios.

4.4.3.1.4 Erro relativo do menor grão

No exame das Tabelas 26 e 27 verificam-se erros de 100% devido ao desaparecimento de grãos. Da mesma forma que o erro absoluto do menor grão, apenas para a quantidade de 100 grãos em 30 planos com distâncias aleatórias, Tabela 27, o valor apresentado foi inferior ao apresentado em planos não aleatórios, Tabela 26.

Grãos	300 planos	150 planos	100 planos	75 planos	60 planos	30 planos
100	-	50,24	67,06	75,38	80,49	91,27
1.000	-	50,74	66,58	75,53	80,00	89,94
10.000	-	51,74	98,01	100,00	100,00	100,00

Tabela 26 – Erro relativo do menor grão.

Grãos	300 planos	150 planos	100 planos	75 planos	60 planos	30 planos
100	-	58,23	67,54	78,46	83,66	90,95
1.000	-	69,12	87,95	100,00	92,80	100,00
10.000	-	96,52	100,00	100,00	100,00	100,00

Tabela 27 – Erro relativo do menor grão em planos aleatórios.

5 Conclusão

Com a realização desta pesquisa foi possível verificar a utilidade da computação no desenvolvimento do tema em estudo. A simulação computacional do processo de reconstrução em 3D, por meio da técnica de seccionamento em série após renderização do volume, permitiu a obtenção de microestruturas policristalinas representativas de um material metálico e semelhantes a uma microestrutura real. Desse modo, a conclusão do experimento virtual foi exequível através de recursos da computação gráfica e do processamento digital de imagens.

No procedimento usual de seccionamento em série, a obtenção de imagens em 2D de estruturas metálicas, por microscopia, requer a preparação de amostras de materiais. Nesta pesquisa, simplificou-se sua execução e observou-se sua aproximação do processo efetivo. A técnica padrão pode consumir um grande tempo, além de incorrer em causas de erros advindos de seu desenvolvimento. No entanto, encontra-se em literatura que avanços em metalografia microscópica permitem obter imagens em 2D cada vez mais rápido e, nesse sentido, destaca-se a importância de equipamentos modernos.

Com relação às fontes de erros na aplicação da técnica, verificou-se qualitativamente a influência dos aspectos considerados na reconstrução em 3D. Os três aspectos analisados influenciaram a qualidade da imagem reconstruída em 3D, afastando-a do modelo ideal. Sendo as microestruturas policristalinas, a principal alteração foi observada nos grãos e em seus contornos. Com relação ao número de seções utilizadas no seccionamento em série nota-se que, quanto menos planos são utilizados, menor é a fidelidade geométrica dos grãos.

No exame estatístico, contudo, houve pouca diferença entre os dados para as diferentes microestruturas. Em consequência, foi realizado o estudo estatístico para a hipótese de aleatoriedade da distância entre os planos. A revisão bibliográfica permitiu constatar que a obtenção das seções pode se processar de modo automático, garantindo uma escolha não aleatória da distância entre os planos. Entretanto, na ausência de tal instrumento é suscetível a aleatoriedade na distância entre as seções. Sendo assim, esse é um fator importante para análise de tal cenário.

Ainda sobre o estudo do número de seções e distância entre as mesmas, apesar de ter sido mais complexo afirmar o desaparecimento de grãos de forma qualitativa, foi possível numericamente a confirmação do mesmo. Alguns grãos foram completamente eliminados nas microestruturas com maiores quantidades de grãos e menores quantidades de planos, o que confirma a necessidade de uma reconstrução em 3D com adequado número de seções. Constatou-se também que os menores grãos foram mais afetados pelo número de seções que os maiores grãos, sendo a distância entre as seções aleatória ou não. Todavia, erros maiores foram identificados nos menores grãos em planos distanciados aleatoriamente.

A verificação numérica de erros mostrou que a microestrutura reconstruída computacionalmente irá apresentar erro que, será maior, quanto menor for o volume reconstruído em relação ao modelo ideal considerado. Das três análises em estudo, o maior erro relacionou-se ao número de *pixels* das imagens em 2D. A menor resolução em *pixels* afeta mais o contorno do grão e conseqüentemente, seu volume. Ao se examinar o erro no alinhamento infere-se que, devido à perda significativa de volume após o alinhamento, uma grande quantidade de informação pode ser omitida nesse processo. Quanto ao número de seções observou-se, como esperado, que maiores serão os erros ao se reduzir o número de seções.

Tendo o exposto, o objetivo deste trabalho foi alcançado e foi possível uma boa correlação com a teoria e prática apresentadas sobre o assunto. Ainda que todo o processo envolva grande manipulação de imagens, demande tempo e como qualquer pesquisa, apresente suas dificuldades, o mesmo ocorre em procedimento padrão. Porém, para o número de seções em estudo, esse processo poderia ter sido bem mais dispendioso e demandado outros materiais e recursos, o que favorece um experimento simulado.

Ressalta-se, por fim, a importância do tema abordado para o avanço dos estudos sobre microestrutura de materiais metálicos. Sugere-se então, para trabalhos futuros, o estudo em microestrutura real, com possível utilização de outra técnica de reconstrução, ou mesmo uma comparação com a simulação computacional. Embora a estereologia possa inferir características tridimensionais de uma microestrutura, a reconstrução em 3D se apresenta como um precursor para a ciência mais completa e significativa da estrutura em 3D desses materiais.

6 Referências bibliográficas

ADOBE CREATIVE TEAM. **Adobe illustrator CS3: Classroom in a book - guia oficial de treinamento**. Porto Alegre: Bookman, 2008.

ALKEMPER, J.; VOORHEES, P. W. **Quantitative serial sectioning analysis**. Journal of Microscopy, v. 201, pt 3, pp. 388-394, march 2001.

ALVES, A. L. M. **Simulação computacional de reações de nucleação e crescimento de fases simultâneas e sequenciais pelo método do cone causal**. Dissertação de Mestrado. Pós Graduação - Universidade Federal Fluminense (UFF). Volta Redonda - RJ, 2015.

ANTON, H.; RORRES, C. **Álgebra linear com aplicações**. 10. ed. Porto Alegre: Ed. Bookman, 2012.

ASSIS, W. L. S. **Investigação do efeito da nucleação, da velocidade de crescimento e da distribuição da energia armazenada na recristalização pelo método do autômato celular em três dimensões**. Dissertação de Mestrado. Pós Graduação - Universidade Federal Fluminense (UFF). Volta Redonda - RJ, 2006.

AVNER, S. H. **Introduction to physical metallurgy**. 2nd ed. New York: Tata McGraw Hill, 1997.

BALDISSERA, M. R.; ASSIS, W. L. S; FREITAS, A. F. P.; RIOS, P. R. **Simulação do processo de reconstrução em três dimensões**. 62º Congresso Anual da ABM, Vitória - ES, 23 a 27 de julho de 2007.

BARRY, E. P. **Three-dimensional reconstruction of microstructures in $\alpha + \beta$ titanium alloys**. Thesis. Graduate School of The Ohio State University, 2008.

BROEKE, J.; PÉREZ, J. M. M.; PASCAU, J. **Image processing with ImageJ**. 2nd ed. Birmingham: Packt Publishing, 2015.

BURGER, W; BURGE, M. J. **Principles of digital image processing: Fundamental techniques**. Londres: Springer, 2009.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC editora, 2002.

CALLISTER, W. D. **Materials science and engineering: An introduction**. 7th ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

CERQUEIRA, F. A.; NISHIKAWA, A. S.; GUESSER, W. L.; AZEVEDO, C. R. F. **Three-dimensional reconstruction of compacted graphite in vermicular cast iron by manual serial sectioning**. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 68 (3), pp. 307-312, jul./sep., 2015.

CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Métodos numéricos para engenharia**. 5. ed. 2011. Porto Alegre: AMGH, 2011.

CHAWLA, N.; GANESH, V. V. **Three-dimensional (3D) microstructure visualization and finite element modeling of the mechanical behavior of heterogeneous materials**. In 11th International Conference on Fracture - ICF 11, v. 2, pp. 1006-1011, 2005.

CHAWLA, N.; GANESH, V. V.; WUNSCH, B. **Three-dimensional (3D) microstructure visualization and finite element modeling of the mechanical behavior of SiC particle reinforced aluminum composites**. Scripta Materialia 51, pp. 161-165, 2004.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1983.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.

COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2002.

DEVORE, Jay L. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. São Paulo: Cengage Learning, 2006.

DORNELLES FILHO, A. A. **Fundamentos de cálculo numérico**. Porto Alegre: Bookman, 2016.

DUARTE, P.T. **Aplicação de modelos matemáticos de crescimento de microestrutura ao estudo do crescimento de grãos em filmes de nanoestruturados**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em modelagem Matemática da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (Unijui). Ijuí - RS. 2010.

ECK, D. J. **Introduction to computer graphics: Version 1.1**. Department of Mathematics and Computer Science. Hobart and William Smith Colleges. Geneva: NY, 2016.

ESQUEF, I. A.; ALBUQUERQUE, Márcio P.; ALBUQUERQUE, Marcelo P. **Processamento digital de imagens**. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF, 2003. Disponível em: <<http://www.cbpf.br/cat/pdsi/pdf/cap3webfinal.pdf>> Acesso em: 20/06/2017.

ESTEVEZ, E. M. **Simulação computacional de medidas estereológicas em estruturas de metal duro (WC-Co)**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal - RN. 2011.

EXNER, H. E. **Stereology and 3D microscopy: useful alternatives or competitors in the quantitative analysis of microstructures?** Image Analysis & Stereology, 23: pp. 73-82, 2004.

FIALA, J. C. **Reconstruct: a free editor for serial section microscopy**. Journal of Microscopy, v. 218, pt 1, 52–61, april 2005.

GEELS, K. **Metallographic and materialographic specimen preparation, light microscopy, image analysis and hardness testing**. West Conshohocken: ASTM International, 2007.

GHOSH, S.; BHANDARI, Y.; GROEBER, M. **CAD-based reconstruction of 3D polycrystalline alloy microstructures from FIB generated serial sections**. Computer-Aided Design 40, pp. 293–310, 2008.

GODSE, A. P.; GODSE, D. A. **Computer graphics**. Pune: Technical Publications Pune, 2001.

GOMES, J.; VELHO, L.; SOUSA, M. C. **Computer graphics: theory and practice**. Boca Raton: CRC Press, 2012.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. C. **Processamento digital de imagens**. 3. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

GROEBER, M. **Development of an automated characterization representation framework for the modeling of polycrystalline materials in 3d**. Dissertation. Graduate School of The Ohio State University. 2007.

HEAR, D. D.; BAKER, M. P. **Computer graphics: C version**. 2nd ed. New York: Prentice-Hall, 1997.

JÄHNE, B. **Digital image processing**. 5th ed. New York: Springer, 2002.

JAYARAMAN, S.; ESAKKIRAJAN S.; VEERAKUMAR, T. **Digital image processing**. New Delhi: Tata McGraw Hill, 2009.

JOOS, Jochen. **Microstructural characterisation, modelling and simulation of solid oxide fuel cell cathodes**. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, KIT Scientific Publishing, 2015.

KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P.; SADOWSKI, D. A. **Simulation with arena**. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2002.

KRAL, M.V.; MANGAN, M.A.; SPANOS, G.; ROSENBERG, R.O. **Three-dimensional analysis of microstructures**. *Materials Characterization* 45, 2000, p. 17-23.

LANZAGORTA, M.; KRAL, M. V.; SWAN II, J. E.; SPANOS, G.; ROSENBERG, R.; KUO, E. **Three-dimensional visualization of microstructures**. *Proceedings Visualization'98* (Cat. No. 98CB36276), pp. 487-490. IEEE, 1998.

LARSON, RON; FARBER, BETSY. **Estatística aplicada**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

LARSON, RON; FARBER, BETSY. **Estatística aplicada**. 6. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015.

LIU, Y. **3d image reconstruction from serial sections**. Dissertation. Applied Mathematics and Computational Science - University of Pennsylvania. 2014.

MANGAN, M. A.; LAUREN, P. D.; SHIFLET, G. J. **Three-dimensional reconstruction of Widmanstätten plates in Fe-12.3Mn-0.8C**. *Journal of Microscopy*, v. 188, pt 1, pp. 36-41, october 1997.

MANNHEIMER, W. A. **Microscopia dos materiais: Uma introdução**. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais, 2002.

MANOHAR, P. A.; ACHARYA, S.; WU, P. Y. **Enhancing manufacturing process education via computer simulation and visualization**. 121st ASEE Annual Conference & Exposition. Indianápolis - IN, 2014.

MANSSOUR, I. H.; COHEN, M. **Introdução à computação gráfica**. *RITA*, v. XIII - n. 2, 2006.

MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H. **Processamento digital de imagens**. Rio de Janeiro: Brasport, 1999.

MORAZ, E.; VÉZICA, F. **Desvendando os recursos do Photoshop CS4: Descubra todos os segredos dessa sensacional ferramenta de edição de imagens digitais**. São Paulo: Digetari Books, 2008.

OHSEER, J.; SCHLADITZ, K. **3D images of materials structures: Processing and analysis**. Weinheim: Wiley-VCH, 2009.

OLIVEIRA, S. C. **Simulação computacional 3-d e modelamento analítico das reações simultâneas com aplicações à recristalização de um aço IF**. Tese de doutorado. Pós Graduação - Universidade Federal Fluminense (UFF). Volta Redonda - RJ. 2013.

PADILHA, A. F.; AMBROZIO FILHO, F. **Técnicas de análise microestrutural**. São Paulo: Hemus, 2004.

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia: microestrutura e propriedades**. Paraná: Hemus, 2000.

PHARR, M.; HUMPHREYS, G. **Physically based rendering: From theory to implementation**. 2nd ed. Burlington: Elsevier, 2010.

PLATANIOTIS, K. N.; VENETSANOPOULOS, A. N. **Color image processing and applications**. New York: Springer, 2000.

QUARTERONI, A.; SALERI, F. **Cálculo científico com MATLAB e octave**. Milano: Springer, 2007.

QUEIROZ, J. E. R.; GOMES, H. M. **Introdução ao processamento digital de imagens**. RITA, v. VIII, n. 1, 2001.

REED-HILL, R. E. **Princípios de metalurgia física**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois S.A., 1982.

RIBEIRO, T. C. S. **Simulação computacional da microestrutura das transformações por nucleação e crescimento**. Tese de doutorado. Pós Graduação - Universidade Federal Fluminense (UFF). Volta Redonda - RJ, 2011.

RIOS, P. R.; PADILHA, A. F. **Transformações de fase**. São Paulo: Artliber, 2007.

ROBINSON, S. **Simulation: the practice of model development and use**. John Wiley & Sons, Ltd., 2004.

RODRIGUES, M. R. B. **Reconstrução microestrutural 3D das ligas Ti-6Al-4V e Nb-TiO₂ por seccionamento em série**. Tese de Doutorado. Pós Graduação - Universidade Federal Fluminense (UFF). Volta Redonda - RJ, 2009.

ROYET, J. **Stereology: a method for analysing images**. Progress in Neurobiology, v. 37, pp. 433-474, 1991.

RUSS, J. C.; DEHOFF, R. T. **Practical stereology**. 2nd ed. New York: Springer, 2000.

SANTOS, J. D.; SILVA, Z. C. **Métodos numéricos**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2006.

SANTOS, R. G. **Transformações de fases em materiais metálicos**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2006.

SASTRY, S. S. **Introductory Methods of Numerical Analysis**. 5 th ed. PHI Learning Private Limited: New Delhi, 2012.

SCOTT, D. A. **Metallography and microstructure of ancient and historic metals**. Marina del Rey, CA: Getty Conservation Institute in association with Archetype Books. 1991.

SHARMA, H. **3-Dimensional analysis of microstructures in titanium**. Master Thesis. Delft University of Technology. 2008.

SIDHU, R.S.; CHAWLA, N. **Three-dimensional microstructure characterization of Ag₃Sn intermetallics in Sn-rich solder by serial sectioning**. Materials Characterization 52, pp. 225– 230, 2004.

SILVA, F. A.; AMMANN, J. J.; NAZAR, A. M. M. **Métodos de análise numérica de imagens aplicados na caracterização microestrutural de materiais**. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 14., São Pedro - SP. Anais, 2000.

SILVA, F. A. **Aplicação das técnicas de processamento digital de imagens na caracterização de materiais**. Tese de doutorado. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campinas. 1996.

SILVA, L. F. **Aquisição, processamento e análise de imagens 3D: MicroTC e FIB-SEM na caracterização de defeitos em solda molhada**. Tese de doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia de Materiais. 2014.

SMALLMAN, R. E.; NGAN, A. H. W. **Modern physical metallurgy**. 8th ed. Elsevier, 2014.

SOARES, L. Z. R. **Internet: um mundo paralelo**. São Paulo: Melhoramentos, 2007.

SOUSA FILHO, G. F.; ALEXANDRE, E. S. M. **Introdução à computação**. João Pessoa: Editora da UFPE, 2014.

TEC PLOT, INC. **Tecplot 360 2013: Getting started manual**. Bellevue - WA, 2013.

UCHIC, M. D. **Serial sectioning methods for generating 3d characterization data of grain and precipitate-scale microstructures**. Computational Methods for Microstructure-Property Relationships, pp. 31-52, 2011.

UCHIC, M. D.; GROEBER, M. A.; ROLLETT, A. D. **Automated serial sectioning methods for rapid collection of 3D microstructure data**. JOM, v. 63, pp. 25-29, 2011.

ULLAH, A.; LIU, G.; WANG, H.; KHAN, M.; KHAN, D. F.; LUAN, J. **Optimal approach of three-dimensional microstructure reconstructions and visualizations**. Materials Express, Vol. 3, N° 2, 2013.

WATT, A. **3D computer graphics**. 3rd ed. Addison Wesley, 2000.

ZEMAN, N. B. **Essential skills for 3D modelling, rendering and animation**. CRC Press, 2015.

ZHANG, P.; KARIMPOUR, M.; BALINT, D.; LIN, J.; FARRUGIA, D. **A controlled Poisson Voronoi tessellation for grain and cohesive boundary generation applied to crystal plasticity analysis**. Computational Materials Science 64, p. 84-89, 2012.