

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

METALOGRAFIA QUANTITATIVA DE LIGAS DE Al-Si HIPOEUTÉTICAS POR  
ANÁLISE DE IMAGENS DIGITAIS

**Tiago Arangura Krause**

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Vinicius Karlinski de Barcellos

Porto Alegre

2015

*Em memória e homenagem a Edelhardt Krause,  
Idelzuite Vieira Krause e Lourdes Arangura Brignol,  
que sempre desejaram me ver graduado.  
Vocês estarão sempre comigo.*

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Vinicius Karlisnki de Barcellos pelo apoio, conselhos, orientações e confiança no trabalho.

Ao Engenheiro Dr. Carlos Raimundo Ferreira Frick pelos ensinamentos e conselhos durante a realização do trabalho.

Ao LAFUN pela estrutura e oportunidade fornecidas.

A minha namorada Tayze Cristina Borba Heinrichs pelo apoio e compreensão.

Aos meus pais que sempre confiaram, me apoiaram e incentivaram durante a graduação.

Aos familiares e amigos que de alguma forma auxiliaram e apoiaram durante o período que estive envolvido com o trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	VI
LISTA DE TABELAS .....	VIII
LISTA DE ABREVIATURA E SÍMBOLOS .....	IX
RESUMO .....	X
ABSTRACT .....	XI
1.0 INTRODUÇÃO.....	1
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
<u>2.1 Alumínio e suas ligas</u> .....	2
<u>2.1.1 Considerações gerais</u> .....	2
<u>2.1.2 Classificação das ligas de alumínio</u> .....	3
<u>2.1.3 Elementos de liga</u> .....	4
<u>2.1.4 O sistema Al-Si</u> .....	6
<u>2.2 Metalografia Quantitativa</u> .....	9
<u>2.2.1 Introdução</u> .....	9
<u>2.2.2 Percentual de fases</u> .....	9
<u>2.2.3 Análise de porosidades</u> .....	10
<u>2.2.4 Espaçamento interdendrítico</u> .....	11
<u>2.3 Análises de Imagens Digitais</u> .....	11
<u>2.3.1 Considerações gerais</u> .....	12
<u>2.3.2 Processamento de imagens</u> .....	13
3.0 MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
<u>3.1 Materiais</u> .....	15
<u>3.1.1 Ligas analisadas</u> .....	15
<u>3.1.2 Programa <i>Omnimet</i></u> .....	16
<u>3.1.3 Equipamentos</u> .....	17
<u>3.2 Metodologia</u> .....	18
<u>3.2.1 Preparação das amostras</u> .....	18

<u>3.2.2 Metalografia</u> .....	19
<u>3.2.3 Análise quantitativa manual</u> .....	20
<u>3.2.4 Elaboração das rotinas</u> .....	21
<u>3.2.5 Execução das rotinas</u> .....	23
4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	24
<u>4.1 Metalografias</u> .....	24
<u>4.2 Análises metalográficas quantitativa</u> .....	27
<u>4.2.1 Medidas manuais para o percentual de Si</u> .....	27
<u>4.2.2 Medidas manuais para o percentual de porosidade</u> .....	28
<u>4.2.3 Medidas manuais para o espaçamento entre braços de dendritas (DAS)</u> .....	30
<u>4.3 Rotinas</u> .....	31
<u>4.3.1 Percentuais de Fases</u> .....	32
<u>4.3.2 Análise de porosidades</u> .....	34
<u>4.3.3 Espaçamento entre braços de dendritas (DAS)</u> .....	36
<u>4.4 Análises metalográficas digitais</u> .....	39
<u>4.4.1 Percentuais de fase</u> .....	39
<u>4.4.2 Porosidades</u> .....	43
<u>4.4.3 Cálculo do DAS</u> .....	47
5.0 CONCLUSÕES .....	50
6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	51
7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	52

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Diagrama de fases do sistema binário Al-Si (ASM HANDBOOK, 1992).....	7
Figura 2.2 – Microestrutura bruta de fusão de ligas do sistema Al-Si: a) hipoeutética; b) eutética; c) hipereutética (ASM HANDBOOK, 2004). .....	7
Figura 2.3 – Influência do teor de Si nas propriedades das ligas de alumínio (MONDOLFO, 1976).....	8
Figura 2.4 – Exemplo de micrografia com grade para análise percentual de área (MACIEL et al., 2010).....	10
Figura 2.5 – Exemplo de análise linear para obtenção do espaçamento entre braços de dendritas (LEXICON, consultado 2015).....	11
Figura 3.1 – Sequência de vazamento das amostras: a) alumínio líquido sendo vazado no molde cerâmico; b) amostras aguardando a solidificação completa. ....	16
Figura 3.2 – Microscópio ótico com a câmera matricial conectado ao computador via cabo USB. ....	18
Figura 3.3 – Esquema de corte das amostras.....	19
Figura 3.4 – Pontos a serem analisados em uma amostra devidamente cortada, lixada e polida. ....	19
Figura 3.5 – Grade 20x20 em uma imagem carregada no programa Omnimet. ....	20
Figura 3.6 – Árvore de comandos do Omnimet 9.8. ....	21
Figura 3.7 – Exemplo de rotina para análise de ferrita (modelo pronto do programa), carregada na tela de edição de rotinas.....	23
Figura 4.1 – Micrografias da liga 1: 1) sem ataque químico; 2) com ataque químico; a) posição centro; b) posição a meio raio; c) parede da amostra. ....	25
Figura 4.2 – Micrografias da liga 2: 1) sem ataque químico; 2) com ataque químico; a) posição centro; b) posição a meio raio; c) parede da amostra. ....	26

Figura 4.3 – Micrografia da liga 1 na região central obtida no microscópio estereoscópico, utilizando-se um aumento de 10x.....	27
Figura 4.4 – Cálculo manual do DAS realizado no Omnimet, na liga 1, posição central da amostra: objeto 1 pontos em vermelho, objeto 2 pontos em verde, objeto 3 pontos em azul e objeto 4 pontos em branco.....	31
Figura 4.5 – Estrutura da rotina de análise de percentual de silício.....	32
Figura 4.6 – Estrutura da rotina para análise de porosidades.....	35
Figura 4.7 – Estrutura da rotina para cálculo do DAS.....	39
Figura 4.8 – Micrografias da liga 1 após execução da rotina de percentual de Si: 1) sem ataque químico; 2) com ataque químico; a) posição centro; b) posição a meio raio; c) parede da amostra. ....	41
Figura 4.9 – Micrografias da liga 2 após execução da rotina de percentual de Si: 1) sem ataque químico; 2) com ataque químico; a) posição centro; b) posição a meio raio; c) parede da amostra. ....	42
Figura 4.10 – Comparação entre o método de contagem de pontos e a análise automatizada: a) poro sem a incidência de ponto de intersecção; b) poro detectado pela rotina do programa. ..	44
Figura 4.11 – Micrografias da liga 2 após execução da rotina de avaliação de porosidades: 1) sem ataque químico; 2) com ataque químico; a) posição centro; b) parede da amostra. ....	45
Figura 4.12 – Micrografias da liga 1 após execução da rotina de avaliação de porosidades: 1) sem ataque químico; 2) com ataque químico; a) posição centro; b) posição a meio raio; c) parede da amostra. ....	46
Figura 4. 13 – Histograma do comprimento do DAS obtido através do Omnimet. ....	47
Figura 4. 14 – Conversão manual da escala de pixels para milímetros.....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação das ligas de alumínio fundidas (ASM HANDBOOK, 1990).....	3
Tabela 2.2 – Comparações entre análise metalográfica manual e digital (ASM HANDBOOK, 2004).....	13
Tabela 3.1 – Resultado da análise via MEV/EDS das ligas e padrão conforme AMS 4218. ..	16
Tabela 4.1 – Resultados da análise quantitativa manual para o percentual de Si.....	28
Tabela 4.2 - Resultados da análise quantitativa manual para o percentual de porosidade. ....	28
Tabela 4.3 – Resultados da análise quantitativa manual para o cálculo do DAS.....	30
Tabela 4.4 - Resultados da análise por execução da rotina de percentual de Si.....	40
Tabela 4.5 - Resultados da análise por execução da rotina de porosidades para o percentual de área.....	43
Tabela 4.6 - Resultados da análise por execução da rotina de porosidades para o diâmetro circular médio por método Feret. ....	43
Tabela 4.7 - Resultados da análise por execução da rotina para cálculo do DAS.....	48



## LISTA DE ABREVIATURA E SÍMBOLOS

AMS	<i>Aerospace Material Specifications;</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute;</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials;</i>
B/W	<i>Black and white scale;</i>
DAS	<i>Dendrite Arm Spacing;</i>
E	Alongamento
EDS	<i>Energy Dispersive Espectometry;</i>
Gb	<i>Gigabytes;</i>
HF	Ácido fluorídrico;
Hv	Dureza medida em Vickers;
ISO	<i>International Organization for Standarization;</i>
L	Comprimento de reta;
LAFUN	Laboratório de Fundição;
LR	Limite de resistência
LE	Limite de escoamento
M	Magnificação;
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura;
Pa	Pontos contados;
Pp	Percentual de área;
Pt	Pontos total;
RAM	<i>Random Acces Memory;</i>
RGB	<i>Red, green and blue scale;</i>
s	Segundos;
SAE	<i>Society of Automotive EGINEERS;</i>
SIS	<i>Swedish Standards Institute;</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul;
USB	<i>Universal Serial Bus;</i>
°C	Temperatura em grau Celsius;
μ	Mícron;
Ø	Diâmetro;

## RESUMO

A metalografia quantitativa vem sendo beneficiada pelas técnicas de processamento digital de imagens, no que se refere a medições como fração volumétrica de fases, tamanho de grãos, espaçamento interdendrítico, entre outros, devido a um considerável aumento na confiabilidade estatística dos resultados e na velocidade de análise.

Este trabalho tem como objetivo principal desenvolver e criar as rotinas para facilitar e agilizar a análise metalográfica quantitativa de forma automatizada para as análises de percentual de silício presente em uma liga Al-Si, para análise de percentuais de porosidades e medição do diâmetro médio dos poros e para o cálculo do espaçamento interdendrítico. Assim como, comparar os resultados obtidos de forma computacional com os resultados obtidos pela forma convencional, análise química e literatura.

Para tais análises, utilizou-se o programa *Omnimet*, desenvolvido pela empresa *Buehler Ltd*, com o auxílio de um microscópio ótico para captura e digitalização das micrografias dos corpos de provas. As amostras foram vazadas, em moldes do tipo casca cerâmica, a uma baixa taxa de resfriamento durante a solidificação. Foram avaliadas duas ligas: Liga 1 consiste em uma liga Al-7Si e a liga 2 é uma liga A356. Após elaboração das rotinas de análises, ambas foram executadas em três regiões diferentes das amostras, utilizando amostras com e sem ataque químico.

Comparando-se os resultados obtidos através do programa com os outros métodos de análises, encontrou-se resultados semelhantes para as três análises realizadas. Além disto, o programa obteve estes resultados mais rápidos e, em alguns casos, de forma mais precisa que os métodos convencionais.

Sendo assim, com este estudo, ficou evidente que a análise de imagens digitais favorece as análises metalográficas quantitativas, sendo capaz de obter resultados tão quanto confiáveis em relação aos métodos já utilizados, podendo ser empregado futuramente para outras análises de forma ágil e simples.

## ABSTRACT

Quantitative metallography has been benefited by digital image processing techniques, in relation to the measurement such as the volumetric fraction of phases, grain size, interdendritic spacing, among others, due to a significant increase in the statistical reliability of the results and speed analysis.

This work aims to develop and create routines to facilitate and expedite quantitative metallographic analysis in an automated way to the silicon percentage analysis present in an Al-Si alloy, for porosity percentage analysis and measurement of the average pore diameter and to calculate the dendritic arm spacing. So as to compare the computational results got with the results obtained by conventional form, chemical analysis and literature.

For these analyzes, it was used the Omnimet program developed by Buehler Ltd., with the assistance of an optical microscope to capture and digitizing the micrographs of the samples. Specimens were cast in molds of ceramic shell type, at a low cooling rate during solidification. Two leagues were evaluated: first one consists of an Al-7Si alloy, and the second one is an A356 alloy. After creation of routines, both were carried out in three different regions of the samples, using samples with and without chemical attack.

Comparing the results obtained through the program with other methods of analysis, we found similar results for the three methods. Furthermore, the program obtained these results faster and in some cases more accurately than conventional methods.

Therefore, this study revealed that the digital image analysis support quantitative metallographic analysis, being able to get results as reliable as compared to methods already employed and can be used in the future for further analysis in a quick and simple way.

## 1.0 INTRODUÇÃO

Para uma melhor qualidade do produto produzido, é necessário conhecer a microestrutura do material e como esta afeta ou é importante para as propriedades mecânicas. Para tal conhecimento é necessário que seja feita a quantificação da microestrutura, porém os métodos convencionais de análises quantitativas, além de serem entediantes para operador, requerem certo tempo para que sejam realizadas, principalmente em grandes escalas.

O aprimoramento das técnicas de caracterização microestrutural é necessário, pois o desenvolvimento de bons produtos requer, cada vez mais, o real domínio das relações entre os parâmetros dos seus processos de obtenção e suas características microestruturais.

A metalografia quantitativa vem sendo beneficiada pelas técnicas de processamento digital de imagens no que se refere a medições como fração volumétrica de fases, tamanho de grãos, espaçamento interdendrítico, entre outros, devido a um considerável aumento na confiabilidade estatística dos resultados e na velocidade de análise.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver e criar as rotinas para facilitar e agilizar a análise metalográfica quantitativa utilizando o programa *Omnimet*, e comparar os resultados obtidos através deste procedimento com as técnicas convencionais de metalografia quantitativa, com a análise química e com a literatura e informações já previamente conhecidas do material, verificando assim a veracidade e a precisão das informações obtidas computacionalmente.

## 2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Alumínio e suas ligas

#### 2.1.1 Considerações gerais

Segundo metal mais abundante na Terra, o Alumínio passou a ser uma alternativa em aplicações de engenharia por volta do final do século dezenove, quando Charles Martin Hall e Paul Héroult desenvolveram, independentemente, um método para o refino da bauxita, conhecido hoje como processo *Hall-Héroult* (ASM SPECIALITY HANDBOOK, 1993).

Uma das características mais marcantes do alumínio e de suas ligas é possuir baixas densidades aliado a altas resistências, o que vem levando a substituição do aço e do ferro fundido por alumínio, propiciando redução de peso aos componentes e estruturas tanto nas indústrias automotivas assim como em aeronaves, navios, tanques e blindagens.

As ligas de alumínio apresentam também alta resistência à corrosão em diversos meios como atmosfera, água e petroquímicos, o que juntamente com suas características atóxicas permitem seu uso em embalagens para as indústrias de bebidas e alimentícia assim como seu emprego na área de produção de utensílios domésticos, ferramentas e outros. Ainda que a condutividade elétrica do alumínio seja menor que a do cobre, é bastante utilizado em redes de transmissão de energia por ter um menor custo. E pela sua aparência reflexiva e estética superficial tem suas aplicações em obras arquitetônicas e ornamentais.

Outra característica notável que se destaca nas ligas de alumínio atualmente é a sua capacidade de reciclagem. O processo de reciclagem do alumínio utiliza 5% da energia elétrica e libera somente 5% das emissões de gás de efeito estufa quando comparado com a produção de alumínio primário (ABAL, consultado 2015).

As desvantagens do alumínio ficam por conta de sua resistência mecânica e dureza que são relativamente baixas, o que pode ser corrigido pela adição de elementos de ligas como Cu, Si, Mg, Zn e outros. Dentre esta enorme variedade de ligas de alumínio, algumas se destacam devido às suas características fundamentais, outras se tornam obsoletas e algumas,

com pequenas alterações na sua composição ou por adição de novos elementos de liga, ganham importância perante a indústria.

### 2.1.2 Classificação das ligas de alumínio

As várias ligas de alumínio existentes são, atualmente, classificadas de acordo com a norma H35.1 da ANSI (*American National Standards Institute*) e o seu registro foi realizado pela *Aluminum Association* nos Estados Unidos (ASM HANDBOOK, 1990).

As ligas foram divididas em duas categorias, uma para ligas de alumínio fundidas e outra para forjados e o que diferencia ambas são os elementos de ligas presentes. Em ambos os casos um sistema numérico de quatro dígitos foi utilizado para classificar as ligas.

Tabela 2.1 - Classificação das ligas de alumínio fundidas (ASM HANDBOOK, 1990).

Classificação da Liga	Elemento de Liga Majoritário
1XX.X	Alumínio 99% em peso
2XX.X	Cobre
3XX.X	Silício, com adições de cobre ou magnésio
4XX.X	Silício
5XX.X	Magnésio
7XX.X	Zinco
8XX.X	Estanho
9XX.X	Outros elementos

Neste sistema numérico, o primeiro dígito refere-se ao elemento de liga principal. O segundo e terceiro dígitos especificam uma certa liga, ou no caso para o alumínio (1XX.X) indica a pureza do mesmo. Já o quarto dígito, que é separado dos demais por um ponto decimal representa a forma do produto, fundido ou lingote. Em alguns casos ainda se utiliza uma letra maiúscula que antecede estes quatro dígitos, que serve para distinguir modificações na liga original ou alterações nos limites de impurezas, estas que seguem a ordem alfabética, iniciando pela letra A, porém emitindo as letras I, O, Q e X, como por exemplo, as ligas 380, A380 e B380, que diferem entre si pelas tolerâncias de zinco e ferro presentes.

### 2.1.3 Elementos de liga

O alumínio em estado puro apresenta baixas durezas e resistência mecânica, não servindo para determinadas aplicações, daí a necessidade de combiná-lo com outros metais para aumentar sua utilidade industrial. As ligas apresentam características diferentes daquelas apresentadas pelos seus metais constituintes, tais como dureza, condutividade, ductilidade, entre outras. Além disso, suas propriedades dependem da composição, microestrutura e até mesmo do tratamento térmico aplicado (CALLISTER, 2002).

Os elementos de liga atuam no alumínio de duas maneiras: formando soluções sólidas ou segundas fases. Quando há a formação de solução sólida, o ganho de resistência mecânica provém da diferença entre os raios atômicos do solvente (matriz de alumínio) e do soluto (elementos de liga), ou seja, quanto maior esta diferença, maior será o aumento da resistência mecânica. Já para os formadores de segunda fase, o ganho de resistência e dureza se dá pelo aumento da fração volumétrica das fases constituídas pelos precipitados formados pelos elementos de liga.

Assim as Ligas de Alumínio de uso comercial tem na sua composição química:

- a) Elementos principais: responsáveis pelas alterações nas propriedades mecânicas;
- b) Elementos secundários: cujos percentuais são menores e tem como objetivo uma ação específica para se obter determinada propriedade de uso ou característica de fundição como;
- c) Elementos modificadores, refinadores ou neutralizadores: usados em pequenos percentuais com a finalidade de alterar a microestrutura, obtendo-se melhores propriedades ou características de processo;
- d) Elementos tidos como impurezas: os quais devem ser controlados ou balanceados de maneira mais rigorosa.

Em fundição, as adições de elementos de liga propiciam uma melhoria significativa em certas características fundamentais ao processo, tais como aumenta da fluidez e redução

da fragilidade a quente, assim como melhoria na resistência à corrosão, e na usinabilidade e soldabilidade das ligas.

Serão a seguir considerados os principais elementos de ligas utilizados:

- a) Cobre – traz a liga um ganho considerável de resistência mecânica e dureza, pois torna a liga termicamente tratável. Tem como função também reduzir a contração interna da solidificação e melhorar a usinabilidade das peças. Porém propicia uma redução na fluidez e proporciona fragilidade a quente, o que reduz a fundibilidade da liga;
- b) Silício – é o elemento mais usado comercialmente nas ligas de alumínio. Permite uma maior fluidez do alumínio líquido, permitindo melhores preenchimentos nas cavidades dos moldes. O silício pode ser adicionado para reduzir a temperatura de fusão sem provocar fragilidade excessiva, assim, as ligas Al-Si são utilizadas em arames de solda ou como ligas para brasagem de alumínio (soldagem de alumínio). Porém quando utilizado em altos teores torna difícil a usinagem.
- c) Magnésio – as ligas Al-Mg têm resistência mecânica e tenacidade consideravelmente altas. Possui alta resistência à corrosão, especialmente perante a água do mar e ambientes marinhos, sendo esta a principal vantagem das peças fundidas em ligas Al-Mg. Porém esta melhor resistência à corrosão requer baixo teor de impurezas (tanto sólida e gasosa) e, assim, as ligas devem ser preparadas a partir de metais de alta qualidade e tratado com muito cuidado na fundição. Combinado as ligas Al-Si torna estas termicamente tratáveis, podendo melhorar muito a resistência das mesmas, além de melhorar a usinabilidade destas.
- d) Zinco – pode ser considerado um elemento de liga, mas em alguns casos uma impureza. Aumenta a resistência mecânica, porém reduz a ductilidade. Em grandes quantidades pode, durante a solidificação, gerar trincas e produzir contrações.



- e) Estanho – comumente utilizada na fabricação de rolamentos devido à excelente capacidade de lubrificação que o estanho proporciona à liga. Para tanto requer pequeno espaçamento interdendrítico, obtido somente com taxas de resfriamento elevadas.

Outros elementos de ligas como cromo, manganês, ferro e titânio podem ser utilizados como refinadores de grãos, entre outras funções. Já outros elementos como sódio, estrôncio e fósforo modificam a estrutura do eutético em ligas hipoeutéticas do sistema Al-Si.

#### 2.1.4 O sistema Al-Si

Dentre as principais ligas de alumínio existentes e registradas pela *Aluminum Association*, cerca de 50% correspondem ao sistema Al-Si (GARCIA, 2001).

O amplo uso das ligas do sistema Al-Si deve-se as importantes características que o silício, no papel de principal elemento de liga, dá ao alumínio em relação aos outros elementos. O silício proporciona a redução de contrações durante a solidificação, reduz a incidência de porosidades em peças fundidas, reduz o coeficiente de expansão térmica e melhora a soldabilidade da liga. Além destas, traz as melhorias já citadas anteriormente tais como, melhorar a fluidez do alumínio líquido, reduzir o ponto de fusão da liga, fora os ganhos de resistência mecânica.

O sistema Al-Si consiste em um sistema binário com um eutético simples, que ocorre a 577°C em uma composição correspondente a 12,6% de Si, conforme pode ser visto na figura 2.1. Dependendo do teor de silício as ligas são classificadas em: hipoeutéticas com teor de Si entre 5-11% em peso, ligas eutéticas com composição do silício entre 11-13% e hipereutéticas com 14-20% de Si em peso. A figura 2.2 apresenta as microestruturas brutas de fusão obtidas destes três grupos de liga.

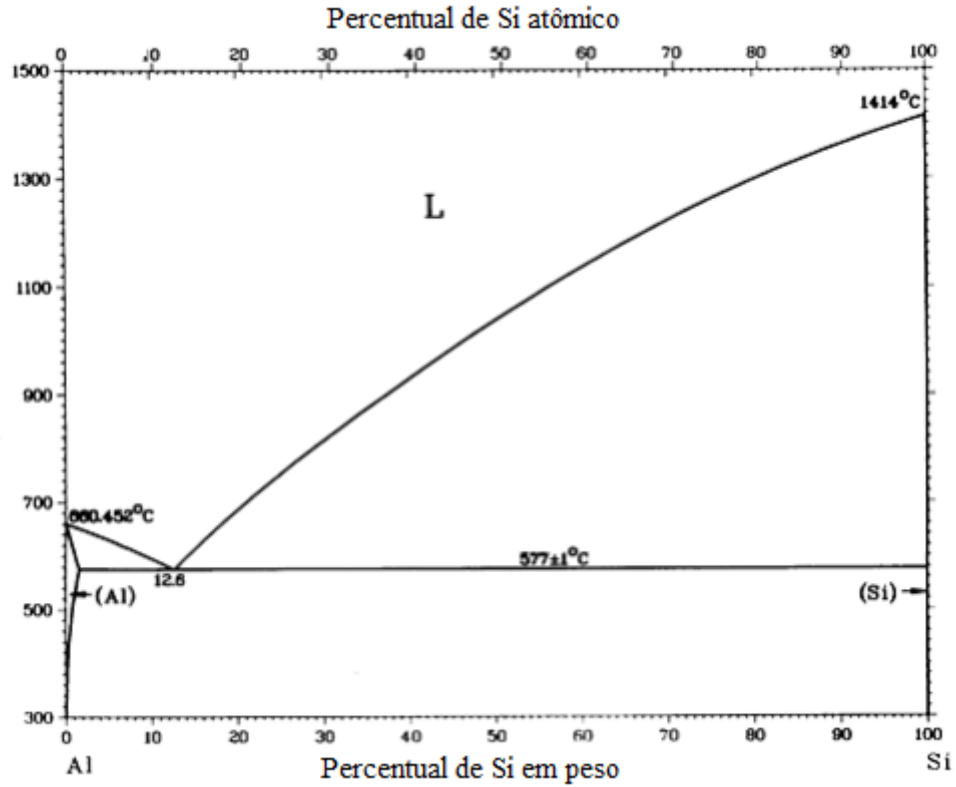


Figura 2.1 - Diagrama de fases do sistema binário Al-Si (ASM HANDBOOK, 1992).

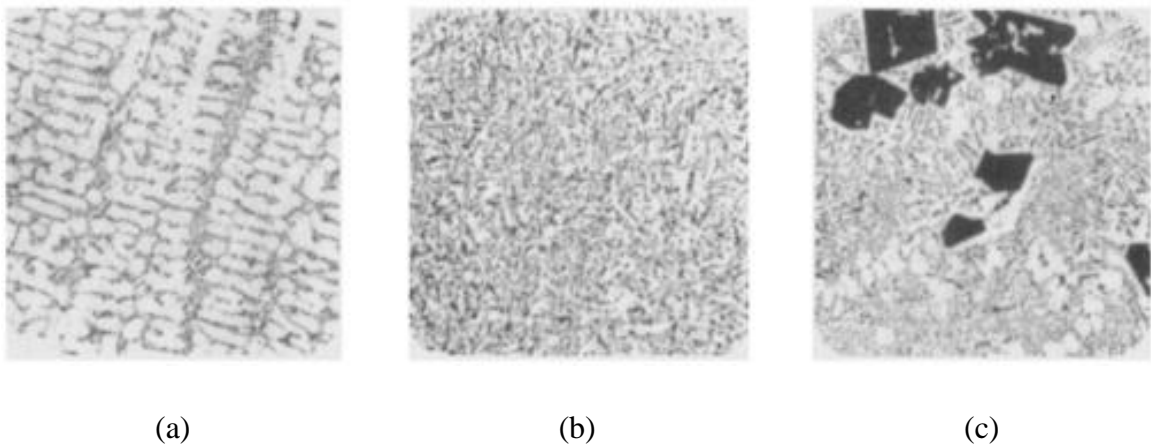


Figura 2.2 – Microestrutura bruta de fusão de ligas do sistema Al-Si: a) hipoeutética; b) eutética; c) hipereutética (ASM HANDBOOK, 2004).

As ligas hipoeutéticas possuem estrutura formada por uma fase primária alumínio- $\alpha$  com morfologia dendrítica e de uma segunda fase eutética com morfologia acicular na forma de grandes plaquetas na matriz de alumínio (COUTO et al, 2010). Nas ligas eutéticas há uma morfologia mista da fase primária e com a fase secundária bem dispersa. No caso das

hipereutéticas a estrutura é semelhante às ligas eutéticas, porém a fase rica em silício nucleia e cresce antes da fase rica em alumínio, o que acaba gerando grandes precipitados de silício.

As ligas binárias Al-Si apresentam uma grande variedade de propriedades físicas e mecânicas que dependem de sua estrutura e do teor de Si presente, conforme podemos ver na figura 2.3.

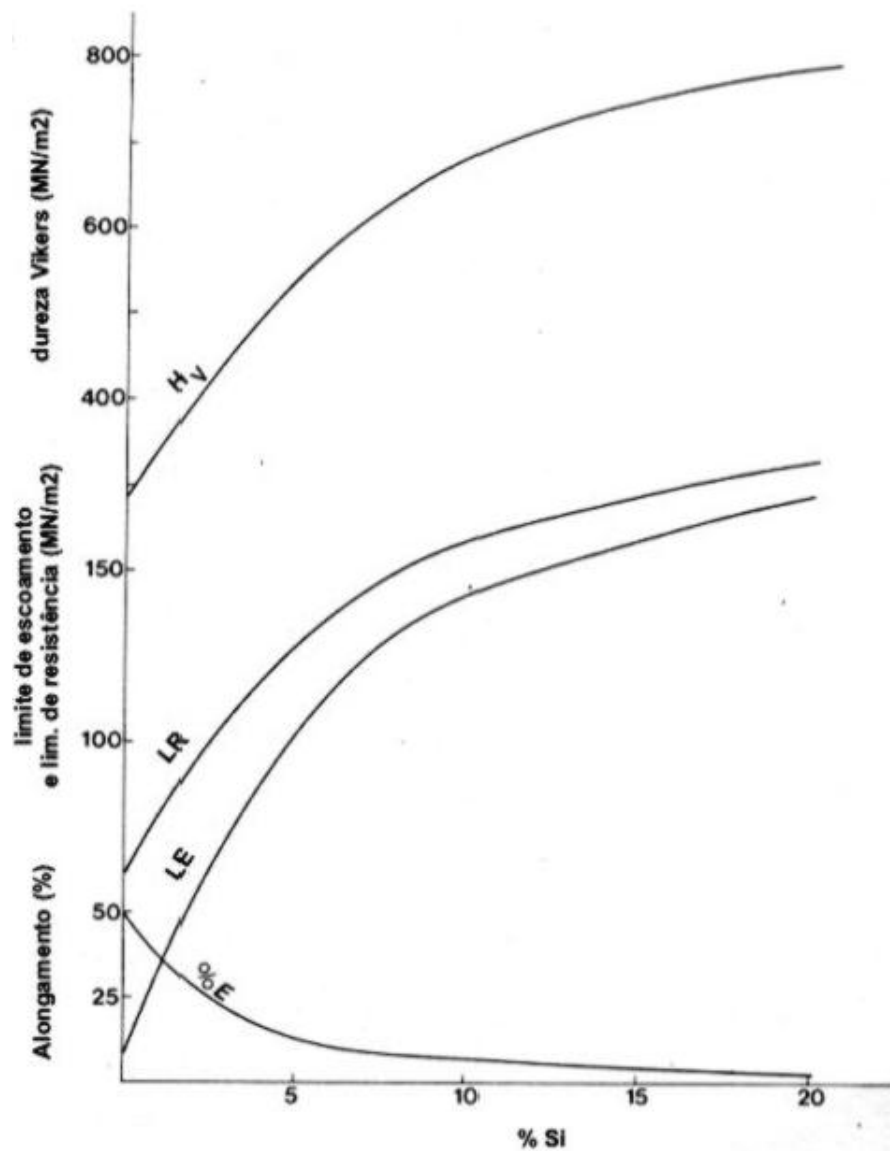


Figura 2.3 – Influência do teor de Si nas propriedades das ligas de alumínio (MONDOLFO, 1976).

## 2.2 Metalografia Quantitativa

### 2.2.1 Introdução

O conhecimento da composição microestrutural de um material é de fundamental importância nas suas propriedades mecânicas. A quantificação dessas microestruturas permite um melhor controle de qualidade do material. A metalografia quantitativa envolve determinar certas características da microestrutura de um material através de uma série de medidas feitas em imagens geradas de micrografias.

Dentre as principais medidas possíveis na metalografia quantitativa estão a quantidade, forma, tamanho de grão, distribuição de fases e defeitos em uma microestrutura.

Existem dois métodos para que estas análises quantitativas sejam realizadas: método de comparação e método de medição.

- a) Método de comparação: é o mais rápido a ser feito, consistem em comparar as imagens das amostras com padrões já disponíveis e publicados. Estes padrões são publicados e seguem as normas da ASTM, ISO e SIS.
- b) Método de medição: existem várias técnicas de medições, dependendo do tipo de análise a ser feita, tais como análise linear, método de contagem de pontos (ASTM E562), método planimétrico (método *Jeffries*), etc. Mais demorado, parte das medidas feitas manuais e requer bastante atenção do operador.

### 2.2.2 Percentual de fases

Pode ser medido por diferentes métodos tais como, análise linear, fração de áreas ou por pontos. Usualmente se utiliza o método de contagens de pontos, que segue a norma ASTM E562, onde uma grade contendo um grande número de pontos é posta sobre a imagem de uma determinada área da microestrutura, conforme pode ser visto na figura 2.4, podendo ser feita diretamente no microscópio ou sobre as micrografias. Esta análise deve ser feita

sobre vários pontos da amostra para uma maior precisão, assim como o número de pontos da grade, quanto mais pontos, maior será a precisão da medida.

Sendo assim, o percentual de área ( $P_p$ ) é dado pela divisão, entre o somatório de pontos coincidente entre a grade e a fase em questão ( $P_a$ ), pelo total de pontos na grade ( $P_t$ ).

$$P_p = \Sigma P_a / P_t. \quad \text{Eq. (1)}$$

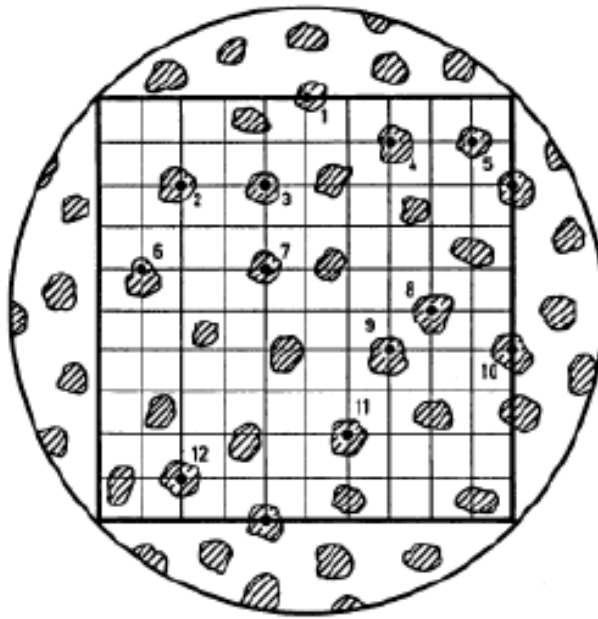


Figura 2.4 – Exemplo de micrografia com grade para análise percentual de área (MACIEL et al., 2010).

### 2.2.3 Análise de porosidades

A metalografia quantitativa que envolve as análises de porosidades é semelhante às utilizadas para medições de percentual de fase porém ao se utilizar a grade, contam-se os pontos incidentes sobre as porosidades.

Normalmente as empresas possuem suas normas quanto à porosidade e, dependendo do percentual de porosidade, tamanho ou área, ou até mesmo a região onde a porosidade se encontra, define se a peça pode ser aprovada ou sucateada. Neste caso o objetivo da análise é mostrar se a amostra ou peça estaria dentro ou fora das normas.

### 2.2.4 Espaçamento interdendrítico

O que se busca medir é o espaçamento entre braços de dendritas (DAS – Dendrite Arm Spacing) que traz informações importantes sobre o tamanho e a morfologia das estruturas dendríticas.

Para o cálculo do DAS utiliza-se o método de análise linear (figura 2.5), onde sobre uma certa região da micrografia, uma reta, de tamanho L conhecido, é traçada sobre os braços de dendritas. O valor do DAS é dado pela divisão entre a medida da reta (L) pelo número total de braços de dendritas (n) sobre a reta e pela magnificação da micrografia (M).

$$\text{DAS} = L / n * M \quad \text{Eq. (2)}$$

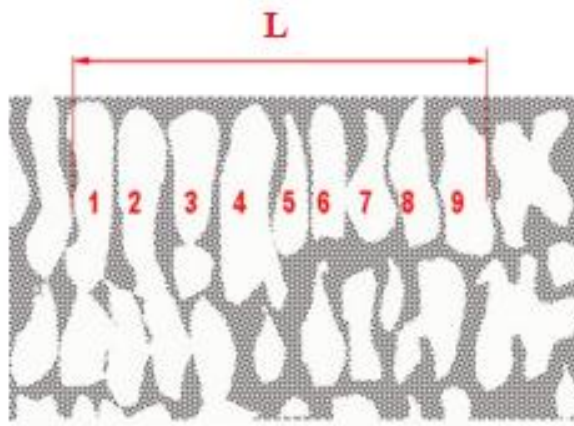


Figura 2.5 – Exemplo de análise linear para obtenção do espaçamento entre braços de dendritas (LEXICON, consultado 2015).

Assim como no método de contagem de pontos, deve ser feito em vários pontos das amostras, sempre cortando no mínimo quatro a cinco braços de dendrita, para que a medida seja obtida de forma estatística e com maior precisão.

### 2.3 Análises de Imagens Digitais

### 2.3.1 Considerações gerais

Todos estes métodos quantitativos de metalografia fornecem excelentes resultados, porém, se necessário realizar em grande escala ou até mesmo diariamente, se torna cansativo, exaustivo e repetitivo para o operador que o realizará. Visando minimizar estes desgastes, aliado a constante evolução tecnológica do ser humano, desde 1970 vem sendo desenvolvido poderoso analisadores de imagens, capazes de realizarem estas mesmas análises em questões de segundos.

Inicialmente havia certo receio no uso destes programas, dentre os motivos estavam o alto custo, a necessidade de aprender a operar o equipamento, a dificuldade em preparar as rotinas e procedimentos automáticos e a necessidade do uso de amostras de alta qualidade para obtenção de imagens digitais (ASM HANDBOOK, 2004).

Porém atualmente para empresas de grande porte se torna indispensável à utilização destes sistemas, visto que trazem agilidade no processamento de imagens, com excelentes resultados obtidos e a capacidade da reprodutibilidade dos testes, além de que, atualmente, considerando o uso diário, estes programas já deixaram de ser de alto custo para as empresas.

A análise digital tem vantagens e desvantagens em relação às análises quantitativas manuais. A Tabela 2.2 mostra uma comparação entre os métodos para diferentes análises.

Tabela 2.2 – Comparações entre análise metalográfica manual e digital (ASM HANDBOOK, 2004).

<b>Propriedade ou análise</b>	<b>Manual</b>	<b>Digital</b>
Fadiga humana após longas horas de trabalho	Alta	Indiferente
Sensitividade a ilusões	Alta	Indiferente
Qualidade da imagem necessária	Média	Alta resolução
Repetibilidade dos resultados	Baixa	Alta para procedimentos 100% automático
Reprodutibilidade das análises	Baixa	Reprodutibilidade total
Avaliação qualitativa da microestrutura	Pode ser ótima	Difícil realizar e ineficiente
Avaliação quantitativa da microestrutura	Requer tempo e alguns parâmetros não podem ser validados	Pode ser excelente
Custo da análise	Baixa para poucas peças; crescimento rápido conforme cresce quantidade a ser analisada.	Alta para pequenas quantidades; grande redução conforme aumenta o número de peças.
Velocidade da análise	Baixa	Alta
Experiência do operador	Efeito significativo nos resultados	Não requer muita para análises automáticas; mas muito importante na implementação do sistema.

### 2.3.2 Processamento de imagens

Uma imagem se torna visível para o olho humano tal como uma série contínua de brilho e cor. Basicamente, o procedimento para a análise de imagens realiza transformações sobre três tipos de imagem: a) imagem de vídeo, que é um conjunto de sinais eletrônicos; b) imagem digitalizada, que é uma tradução padronizada e congelada da imagem de vídeo ou analógica; c) imagem binária, a partir da qual a informação desejada poderá ser extraída.



Quando uma imagem é digitalizada esta é convertida em valores numéricos, isto é, transformada em um padrão de elemento de imagem, ou pixel. Cada pixel tem um valor numérico correspondente a sua posição, brilho e cor. Usando esses valores, a imagem pode ser medida e analisada matematicamente, modificada e armazenada como um arquivo de imagem. O processo é baseado em modificações da localização do pixel e brilho.

O objetivo do processamento de imagem é destacar ou melhorar as condições para análise de algum material ou objeto a ser analisado (inclusões, contornos de grão, porosidades) ou para remover objetos indesejados (sujeira, riscos e distorções). Estes ajustes e correções são feitos através de uma gama enorme de operações, estas quais variam de programa para programa.

Normalmente as análises finais são realizadas em escalas de branco e preto, ou seja, uma escala binária, onde os pixels são convertidos a valores de 1 (preto) ou 0 (branco). A conversão de imagens para a escala branco e preto pode ser feita de diversas maneiras, mas a mais comum é utilizar a técnica do *thresholding*, que se baseia na intensidade dos pixels. Todos os pixels com a intensidade escolhida são convertidos para valores de 1, enquanto o restante é convertido para 0 (ASM HANDBOOK, 2004).

Mas programas mais atuais e de maior poder de análise, como no caso do *Omnimet 9.8*, que será utilizado para as análises experimentais do trabalho, já permitem a realização de algumas análises utilizando-se de imagens coloridas, na escala RGB (*red, green and blue scale*), o que em alguns métodos pode ser vantajoso para diferenciar, por exemplo, a presença de mais de uma fase na amostra.

### 3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será descrito os materiais e equipamentos que foram utilizados para o desenvolvimento do presente trabalho, assim como a metodologia utilizada na obtenção dos resultados.

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 Ligas analisadas

Para o desenvolvimento do trabalho foram analisadas duas ligas do sistema Al-Si, ambas hipoeutéticas. Uma delas é uma liga Al-7Si, contendo basicamente só alumínio e silício na sua composição (Liga 1) e uma segunda liga, que se trata de uma liga A356, que é uma liga do sistema Al-Si, contendo de 6,5% a 7,5% de Si em peso e com a adição de Mg na sua composição (Liga 2). Estas ligas foram escolhidas, pois já vinham sendo trabalhadas pelo Laboratório de Fundição (LAFUN) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em outros trabalhos prévios.

As amostras foram vazadas em moldes do tipo casca cerâmica que podem ser vistos na figura 3.1, a uma temperatura do metal líquido aproximadamente de 711 °C, com uma taxa de resfriamento de -0,2 °C/s.

Ambas as ligas já possuíam a análise química via EDS (*Energy Dispersive Spectrometry*), feitas através do microscópio eletrônico de varredura (MEV). A tabela 3.1 mostra os resultados obtidos no MEV/EDS e também as composições limites para uma liga de alumínio e silício de acordo com *Aluminum Association* e registrado na SAE AMS 4218. Estes valores serão utilizados posteriormente para comparação com os resultados obtidos através das análises metalográficas quantitativas manuais e digitais.

Tabela 3.1 – Resultado da análise via MEV/EDS das ligas e padrão conforme AMS 4218.

Ligas	Elementos de Liga (Composição %)								
	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Outros
AMS 4218		6,5-7,5	0,6	0,25	0,35	0,45	0,35	0,25	0,05
Liga 1	92,71	7,05	0,18	0,01	0	0	0,01	0,01	-
Liga 2	92,84	6,61	0,18	0,01	0	0,31	0,01	0,01	-

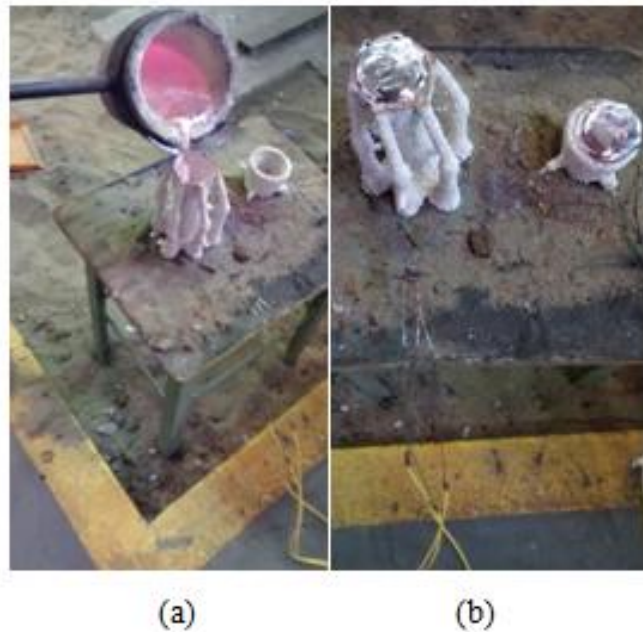


Figura 3.1 – Sequência de vazamento das amostras: a) alumínio líquido sendo vazado no molde cerâmico; b) amostras aguardando a solidificação completa.

### 3.1.2 Programa *Omnimet*

Desenvolvido pela *Buehler Ltd*, empresa norte americana especializada no desenvolvimento de equipamentos e programas de computadores voltados para análise metalográfica, o *Omnimet* possui várias funções, tais como organizador e catalogador de imagens, analisador de imagens, além de possuir um sistema de processamento de imagens digitais com diversas funções e operações que permitem resolver, ajustar e melhorar estas, tendo forte uso não só na área metalúrgica como em diversos outros setores industriais.

A versão do programa utilizada é a versão 9.8. Em sua versão completa, disponibiliza vários módulos, sendo alguns destes:

- Captura de imagem: permite digitalizar uma imagem, ou até mesmo realizar as rotinas de análises diretamente de um microscópio acoplado ao computador;
- Processamento de imagens: disponibiliza todas as ferramentas necessárias para correções e ajustes na qualidade das imagens, alterar a imagem para escalas de cinza, entre outros filtros disponíveis;
- Análise de imagens: possibilita a tomada de medidas manuais de comprimentos, perímetro, ângulos e também a criação das rotinas que irão fazer as análises metalográficas automatizadas.

### 3.1.3 Equipamentos

Para as análises digitais foi utilizado um computador com processador *Intel(R) Core(TM)i5* 3,40 GHz, memória RAM (*Random Acces Memory*) de 2 Gb e sistema operacional *Windows(R) 7* de 32 bits. Para a captura das imagens foi utilizado um microscópio ótico da marca Olympus, modelo BX60M, acoplado a uma câmera matricial de alta resolução, da marca Infaimon, ligada ao computador por um cabo USB (*Universal Serial Bus*).

Como foi utilizada uma taxa de resfriamento baixa para solidificação das amostras, para as análises de espaçamento interdendrítico as imagens das amostras tiveram que ser obtidas em um microscópio estereoscópico da marca Leica, modelo EZ4 HD com faixas de aumentos visuais de 8x a 35x.



Figura 3.2 – Microscópio ótico com a câmera matricial conectado ao computador via cabo USB.

## 3.2 Metodologia

### 3.2.1 Preparação das amostras

Depois de solidificada as amostras, para que as análises pudessem ser feitas, estas foram cortadas ao meio utilizando um disco de corte na cortadora metalográfica Cut-off, conforme mostra o esquema na figura 3.3, para que a superfície interna das amostras pudessem ser analisadas.

A superfície interna de cada amostra foi lixada manualmente, utilizando-se lixas de grana 120# até 1200#. Depois de lixadas, as amostras foram polidas utilizando uma poltriz metalográfica com suspensão de alumina de 0,6 $\mu$  e 0,3 $\mu$  até atingirem uma aparência especular.

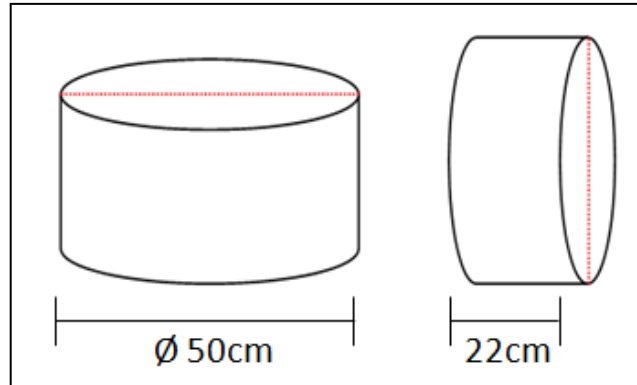


Figura 3.3 – Esquema de corte das amostras.

### 3.2.2 Metalografia

Após as amostras terem sido preparadas, foi feita a metalografia das amostras utilizando-se o próprio *Omnimet* e o microscópio ótico ligado ao computador. Optou-se por realizar as análises das amostras em três diferentes pontos, sendo estes na parede, no centro da amostra e a meio raio, conforme mostra a figura 3.4, para ambas as ligas. Além disto, foram utilizadas amostras sem ataque e com ataque químico. Para o ataque químico foi utilizado ácido fluorídrico (HF) com concentração de 0,5%.

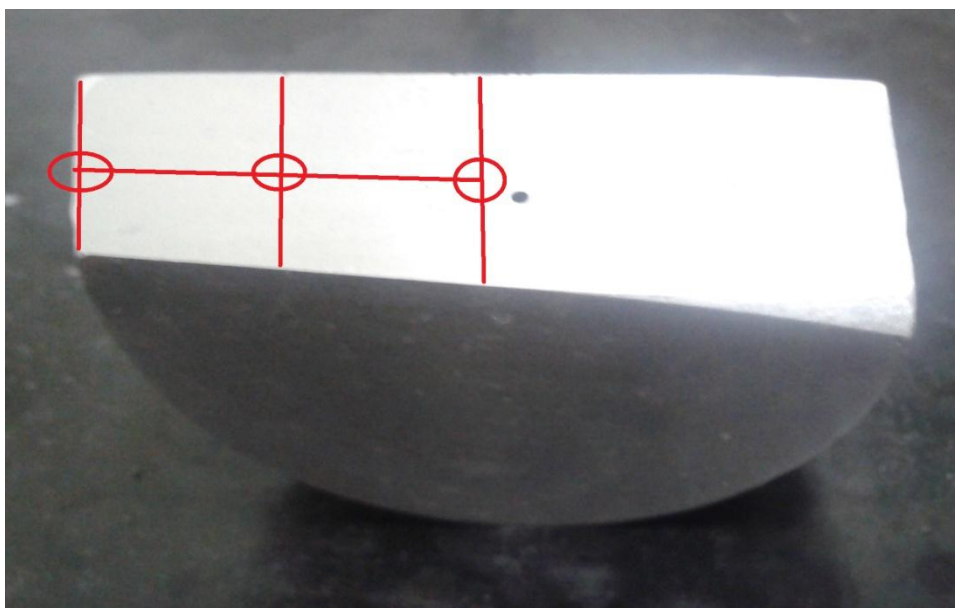


Figura 3.4 – Pontos a serem analisados em uma amostra devidamente cortada, lixada e polida.

### 3.2.3 Análise quantitativa manual

Para uma comparação dos resultados obtidos computacionalmente foram feitas as análises manuais conforme descritas no capítulo 2.2. Estas análises foram realizadas no próprio sistema *Omnimet*, visto que o mesmo disponibiliza ferramentas para tais.

Para as análises de percentuais de fase e porosidades o sistema disponibiliza a projeção de uma grade para que seja utilizado o método de contagem de pontos, conforme descrito no item 2.2.2 e seguindo as normas da ASTM E562. Para uma precisão dos resultados foi utilizado uma grade de 20x20, ou seja, com 400 pontos de intersecção, conforme mostra a figura 3.5.

Para as medidas de espaçamento interdendrítico foi utilizado o método descrito no tópico 2.2.3 deste trabalho, que consiste em traçar uma linha de tamanho conhecido e contar os braços de dendrita sobre esta linha para que assim seja realizado o cálculo conforme a equação 2.

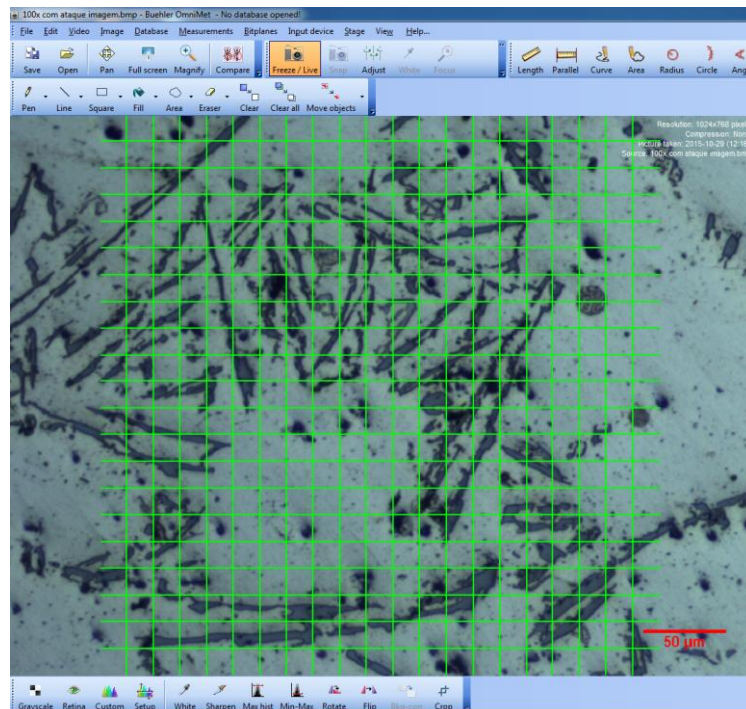


Figura 3.5 – Grade 20x20 em uma imagem carregada no programa *Omnimet*.

### 3.2.4 Elaboração das rotinas

O *Omnimet* possui uma ferramenta de análise que permite a elaboração de rotinas, ou seja, uma série de comandos que podem ser processadas automaticamente sobre a imagem, que ao final irá trazer os resultados da análise, disponibilizando estes em forma de dados, histogramas e gráficos de barra, podendo ser salvos posteriormente.

As rotinas consistem basicamente em seis comandos que podem ser utilizados, conforme podem ser vistos na figura 3.6.

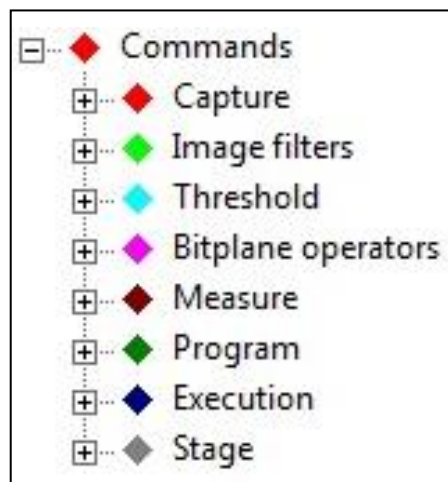


Figura 3.6 – Árvore de comandos do Omnimet 9.8.

Cada comando destes tem a sua função dentro da rotina, conforme descrito abaixo:

- Captura: obter uma imagem do microscópio ou carregar uma imagem previamente salva no computador. As imagens salvas diretamente do microscópio o sistema já faz a calibragem automática para conversão dos resultados de pixels para milímetros, em caso de imagens provenientes de outros aparelhos, haverá a necessidade de uma calibragem manual;
- Filtros de imagem: comandos que irão fazer ajustes na imagem como mudança de escala de cores, correção no brilho, contraste e outras ferramentas de processamento de imagem que irão facilitar a análise posterior;



- *Thresholding*: como já citado na revisão, a técnica de *thresholding* consiste em binarizar a imagem baseada na intensidade de determinado pixel. O programa é capaz de fazer isto nas escalas de tons de cinza, RGB planar e cilíndrica;
- Operadores de *bitplane*: após binarizada a imagem, estas são as ferramentas e operações que irão ser feitas nestes dados binários para ajustá-los da melhor maneira para futuras análises;
- Medição: cálculos e medidas são aplicados automaticamente a estes dados binários gerados e transformados em valores;
- Programação: são comandos usados para determinar os resultados das rotinas. Podem ser usados para salvar, exibir ou exportar os dados.

Conforme pode ser visto na figura 3.7, a estrutura de uma rotina pode ser variada, não havendo a necessidade de seguir determinada ordem, nem a necessidade de utilizar-se de todos os comandos. O programa permite durante a elaboração das rotinas que estas sejam testadas, tanto passo a passo quanto de forma automática. Alguns dos comandos citados acima podem ainda serem definidos para execução interativa, ou seja, mesmo quando a rotina for executada de forma automática, ao chegar neste determinado comando, ela irá pausar e solicitar que o operador realize o próximo passo para após dar continuidade a rotina.

Para este trabalho foi definido a criação das rotinas para análise dos percentuais de silício nas ligas, análise de percentual e tamanho médio de porosidades e também para medição do espaçamento interdendrítico.

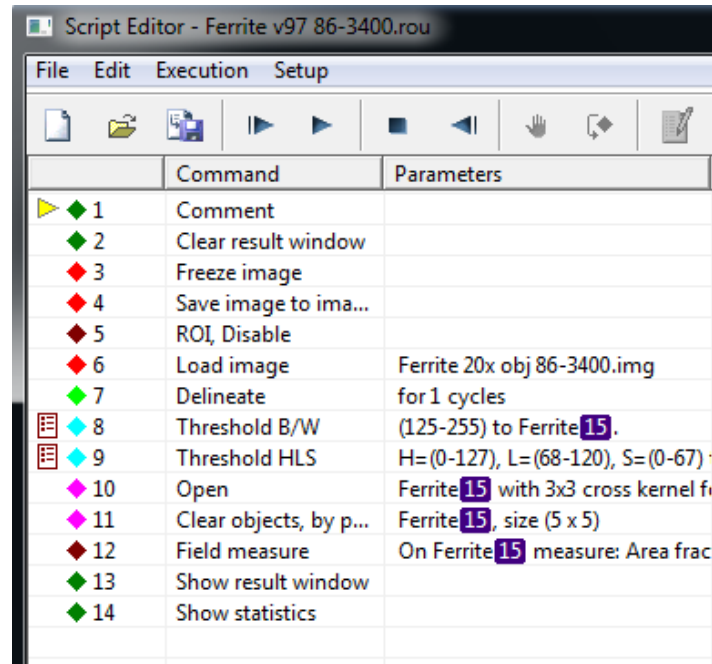


Figura 3.7 – Exemplo de rotina para análise de ferrita (modelo pronto do programa), carregada na tela de edição de rotinas.

### 3.2.5 Execução das rotinas

Depois de criadas e devidamente testadas optou-se por executar as rotinas nas micrografias previamente obtidas e salvas no computador das amostras preparadas para obtenção dos resultados.

Para um resultado mais estatístico cada rotina foi executada nos três diferentes pontos já citados no item 3.2.2, assim como para as micrografias com ataque e sem ataque químico, totalizando doze resultados obtidos para cada rotina.

## 4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo irá abordar os resultados obtidos em cada etapa do trabalho, conforme citado no capítulo anterior, assim como fazer uma comparação entre as diferentes análises realizadas, tentando estabelecer um grau de confiança para os resultados obtidos através da análise digital.

### 4.1 Metalografias

As figuras 4.1 e 4.2 mostram as micrografias obtidas para realização das análises de percentual de fases e avaliação de porosidades. Para liga 1 ficam bem nítidas as plaquetas de Si formadas em tons de cinza escuro e a matriz de alumínio em tons mais claros.

Como as peças foram vazadas a uma taxa de resfriamento baixa, esperava-se já que o espaçamento interdendrítico fosse alto, pois quanto menor a taxa de resfriamento, maior será o espaçamento. Sendo assim, no microscópio ótico, mesmo no menor aumento não foi possível à obtenção das imagens ideais para a realização da análise, pois não se conseguia visualizar nas imagens as dendritas de forma que se pudesse medir estatisticamente o espaçamento entre os braços de dendritas.

Para tal, foram obtidas imagens utilizando-se o microscópio estereoscópico, com menores aumentos, começando em 8x até 35x. Porém como citado na revisão bibliográfica, a análise de imagens digitais requer que a imagem possua certa qualidade e as micrografias obtidas no microscópio estereoscópico disponível não são ideais neste quesito. Sendo assim só foi possível fazer a análise via programa em uma das micrografias, que foi da posição central, com um aumento de 10x em uma amostra da liga 1 (Figura 4.3).

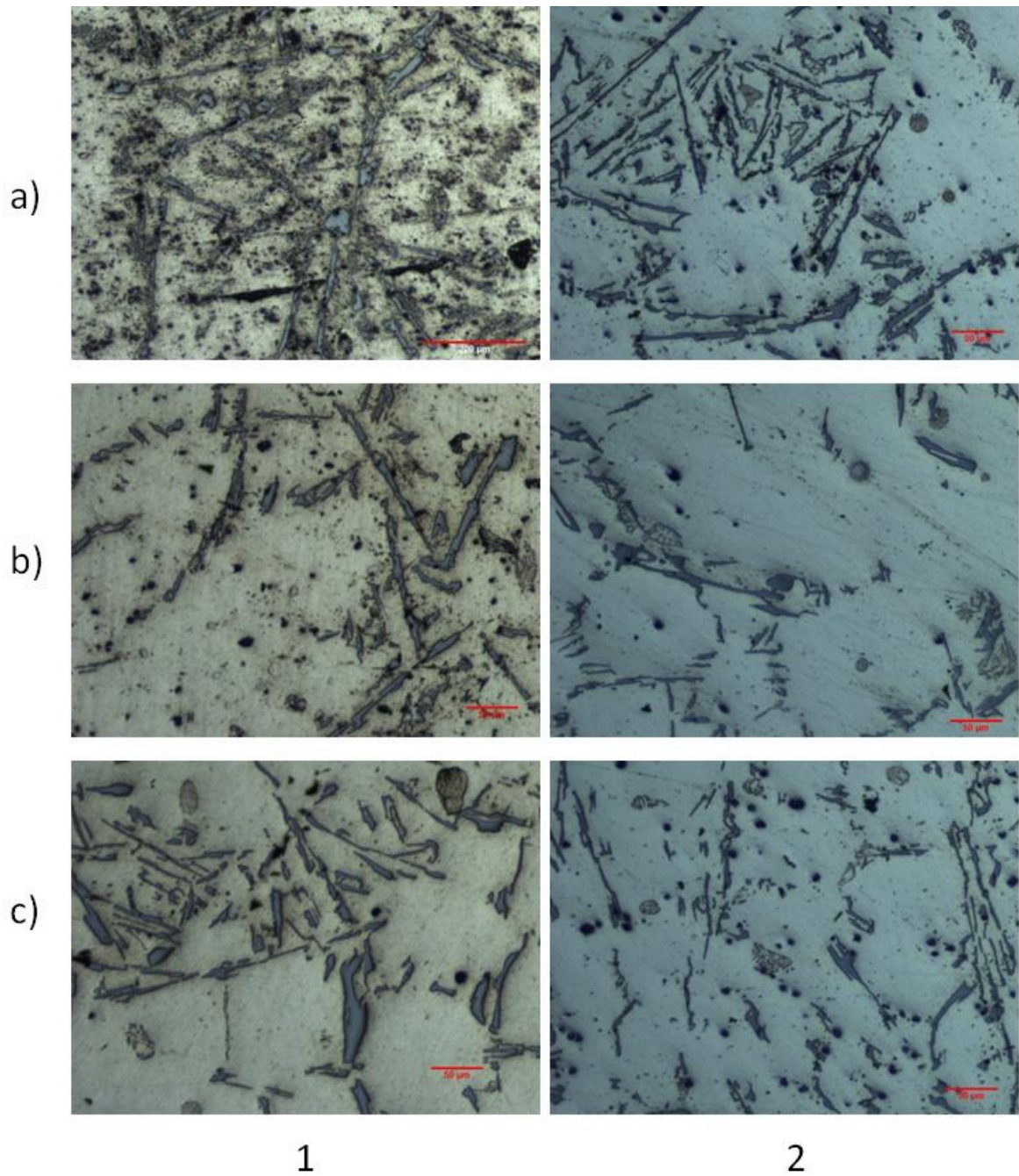


Figura 4.1 – Micrografias da liga 1: 1) sem ataque químico; 2) com ataque químico; a) posição centro; b) posição a meio raio; c) parede da amostra.

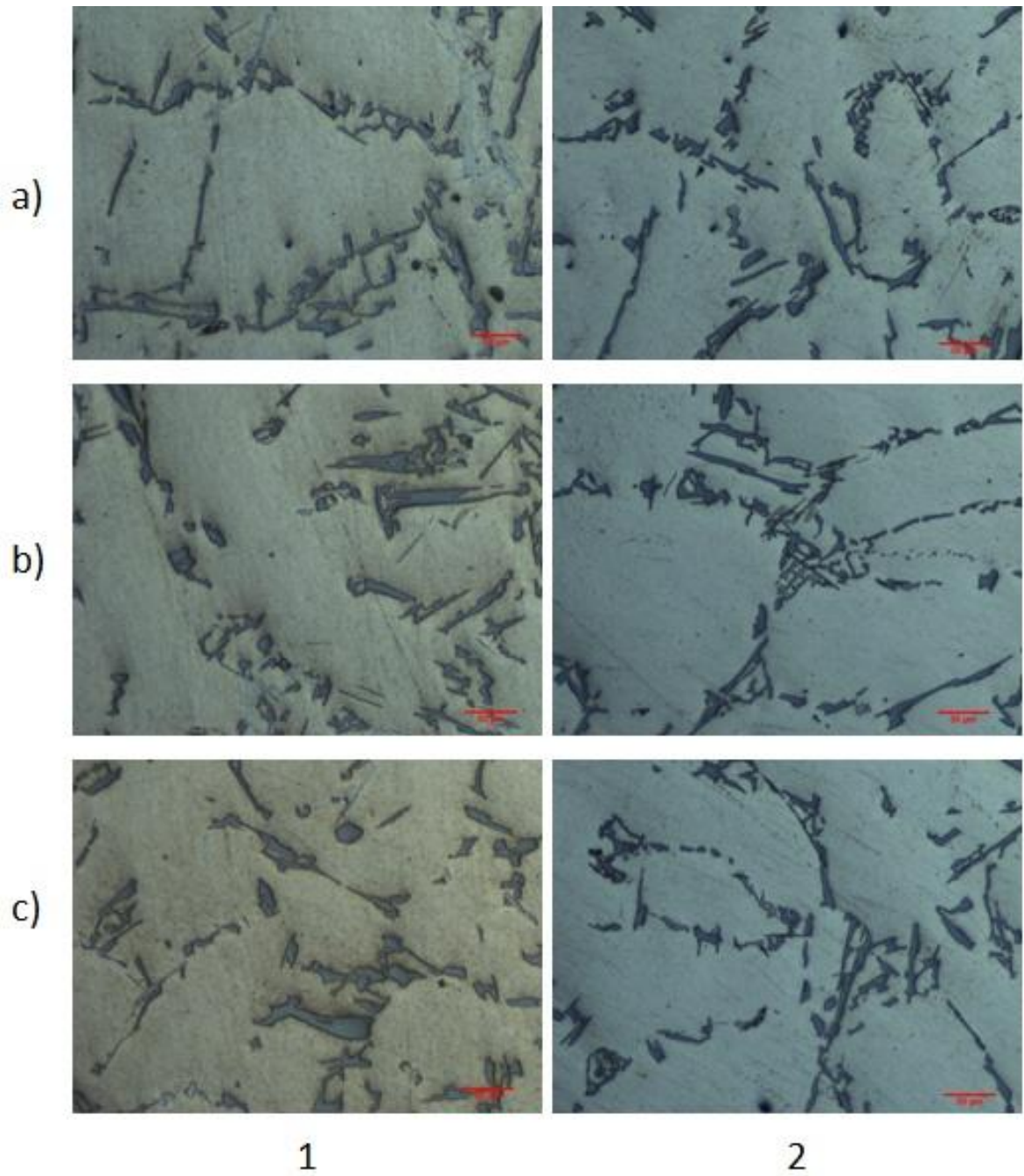


Figura 4.2 – Micrografias da liga 2: 1) sem ataque químico; 2) com ataque químico; a) posição centro; b) posição a meio raio; c) parede da amostra.

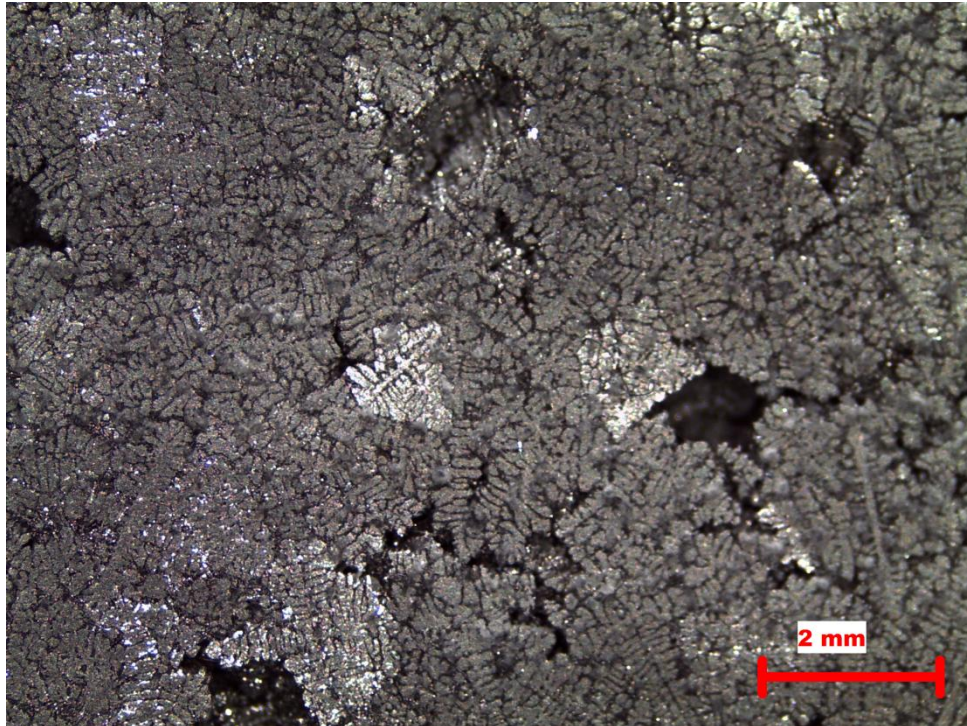


Figura 4.3 – Micrografia da liga 1 na região central obtida no microscópio estereoscópico, utilizando-se um aumento de 10x.

#### 4.2 Análises metalográficas quantitativa

Conforme comentado anteriormente, estas análises foram feitas para se ter um critério de comparação entre os métodos convencionais, MEV/EDS e o digital proposto neste trabalho.

##### 4.2.1 Medidas manuais para o percentual de Si

Conforme descrito na metodologia, utilizando-se uma grade de 20x20 calculou-se os percentuais de Si presente em cada micrografia utilizando-se o método de contagens de pontos. A tabela 4.1 mostra os resultados obtidos para todas as regiões da amostra.

Tabela 4.1 – Resultados da análise quantitativa manual para o percentual de Si.

	% de Si							
	Sem ataque químico				Com ataque químico			
	Centro	Meio	Parede	<b>Média</b>	Centro	Meio	Parede	<b>Média</b>
Liga 1	6,80%	6,50%	8,50%	<b>7,27%</b>	8,50%	6,50%	6,30%	<b>7,10%</b>
Liga 2	8,50%	8,50%	7,80%	<b>8,27%</b>	8,80%	7,80%	8,30%	<b>8,30%</b>

Observando-se os resultados, percebe-se que para liga 1 a média se manteve dentro dos 7% em peso esperado, com valores bem semelhantes inclusive à análise química. Já para a liga 2 os resultados ficaram acima do ideal, cerca de 1,7% em peso de Si. Na análise de imagens existem algumas variantes que podem interferir no resultado, aqui a principal delas foi que as imagens obtidas apresentavam uma grande concentração de Si, em forma de grandes placas, naquela região, conforme pode ser visto na figura 4.2.

#### 4.2.2 Medidas manuais para o percentual de porosidade

Para obtenção dos percentuais de porosidades nas amostras também foi utilizado o método de contagem de pontos em uma grade 20x20 em todas as regiões citadas. Na tabela 4.2 podem ser visualizados os resultados obtidos através da análise.

Tabela 4.2 - Resultados da análise quantitativa manual para o percentual de porosidade.

	% de Porosidade							
	Sem ataque químico				Com ataque químico			
	Centro	Meio	Parede	<b>Média</b>	Centro	Meio	Parede	<b>Média</b>
Liga 1	4,30%	3,30%	1,30%	<b>2,97%</b>	1,80%	0,50%	2,30%	<b>1,53%</b>
Liga 2	0,50%	-	-	<b>0,17%</b>	0,30%	-	-	<b>0,10%</b>

Esta análise foi feita para se ter um critério de comparação ao método automatizado, visto que para realizá-lo, dependendo do tamanho e da dispersão dos poros, o método de contagem de pontos não se torna efetivo, pois caso não haja incidência de um ponto da grade sobre um poro, a contagem será zero e indicará que não há porosidades. Ou então a análise teria que ser feita com uma grade contendo um número muito maior de pontos, o que além de

demorado, a própria grade pode acabar atrapalhando a visualização correta da imagem e interferindo no resultado.

Mesmo com este detalhe, é possível observar uma tendência de conter mais poros na região central das amostras, em relação aos outros pontos. Isto se deve ao processo de solidificação durante o vazamento. Por ser uma peça maciça e uniforme, com um molde que propicia à extração de calor de forma uniforme, a frente de solidificação tende a seguir das extremidades da peça para o centro, onde concentrará uma maior massa de metal líquido, que acabará sendo a última região a se solidificar. Isto acaba gerando grande concentração de contrações do metal, que irão formar macroporosidades nesta região. Nas regiões da parede e a meio raio a tendência é que se formem microporosidades. Como foi utilizada uma taxa baixa de resfriamento ( $-2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ), irão se formar grandes dendritas na interface líquido-sólido, o que acaba gerando uma dificuldade para que o metal líquido penetre entre as dendritas e ocorra a formação destes microporos.

Para a liga 2, onde há a adição de Mg na liga, verifica-se pequenas quantidades de poros, sendo que não foram detectados poros nas regiões a meio raio e na parede. Isto se deve a outro fator que origina porosidades nas peças, a formação de bolhas de gases dissolvidos durante o processo de solidificação. Ao se solidificarem, os metais líquidos reduzem as condições de solubilidade dos gases, formando bolhas que podem ficar aprisionadas. Para reduzir a ocorrência deste tipo de porosidade existem técnicas como manter baixa a temperatura do metal líquido, minimizando assim a dissolução dos gases no metal ou adicionar materiais que possam combinar-se com os gases e de alguma forma removê-los ou dissolve-los, não permitindo assim a formação destas bolhas. Este é o caso do Mg, que tem forte tendência a reagir com oxigênio em altas temperaturas, reduzindo assim a presença de gás aprisionado no alumínio líquido.

Esta relação da presença de macroporosidades no centro das amostras e a formação de microporosidades nas outras regiões ficaram evidenciadas nas análises digitais, visto que através do uso das rotinas, o *Omnimet* permite analisar o diâmetro médio das porosidades e isto será mostrado e discutido mais adiante no trabalho.



#### 4.2.3 Medidas manuais para o espaçamento entre braços de dendritas (DAS)

Como já citado anteriormente sobre a qualidade das imagens para o cálculo do DAS, este procedimento foi feito manualmente apenas na única imagem em que foi possível analisar-se via rotina, apenas como critério de comparação entre os resultados obtidos, e também em relação à literatura.

A figura 4.4 mostra a região e as linhas traçadas, assim como a janela de contagem de objetos (braços secundários de dendritas) que o *Omnimet* permite realizar manualmente. Os resultados estão descritos na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resultados da análise quantitativa manual para o cálculo do DAS.

	<b>DAS</b>			
	L (µm)	Nº de pontos	M	<b>Resultado (µm)</b>
Objeto 1	1230,05	13	1	94,62
Objeto 2	521,55	5	1	104,31
Objeto 3	764,18	8	1	95,52
Objeto 4	664,91	5	1	132,98
<b>Média</b>				<b>106,86</b>

O cálculo do DAS foi realizado conforme a equação 2 citada anteriormente neste trabalho. Como o *Omnimet* permite uma calibragem manual das imagens, convertendo o tamanho em pixels para milímetros, o tamanho da linha (L) é dado em tamanho real, sendo assim a magnificação da imagem (M) acaba sendo desconsiderada (estabelecido valor de 1).

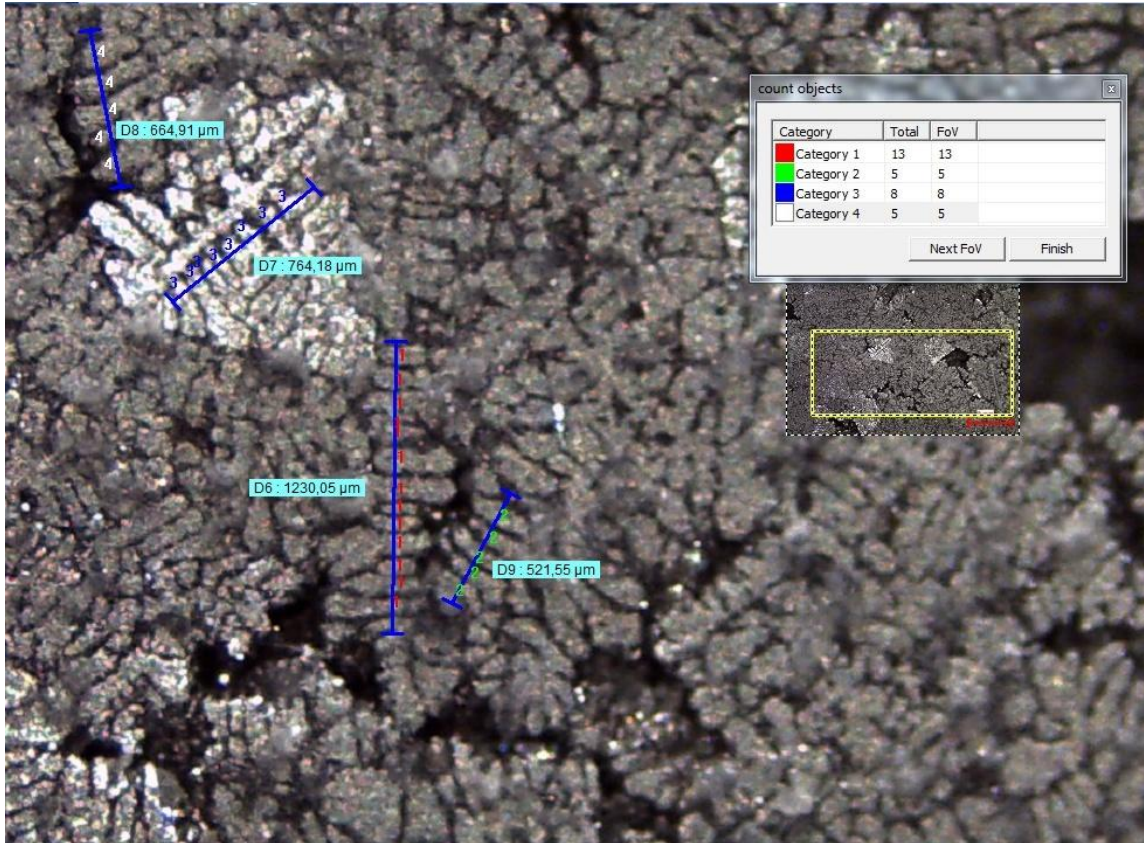


Figura 4.4 – Cálculo manual do DAS realizado no Omnimet, na liga 1, posição central da amostra: objeto 1 pontos em vermelho, objeto 2 pontos em verde, objeto 3 pontos em azul e objeto 4 pontos em branco.

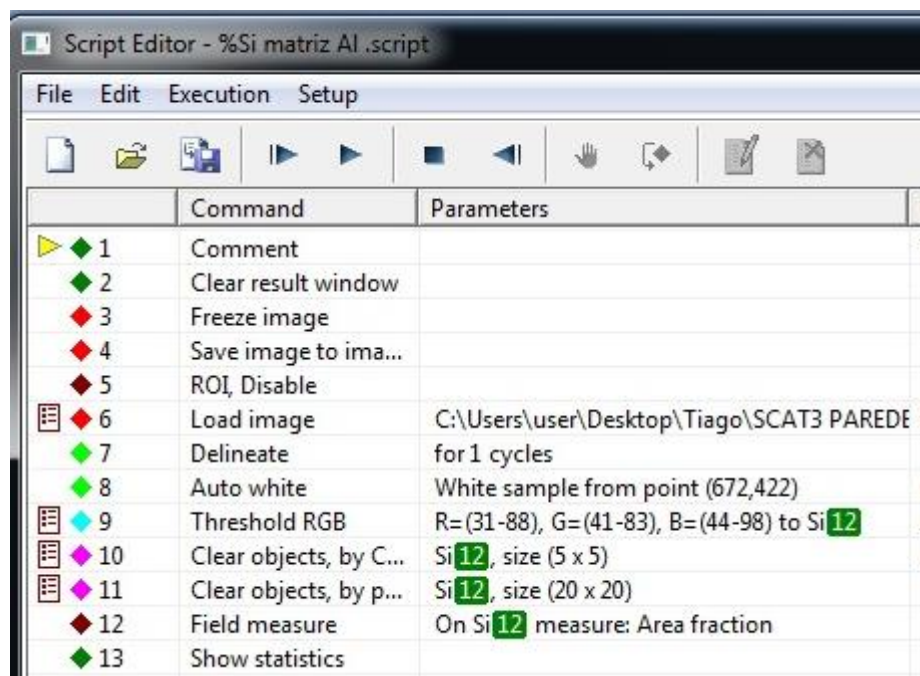
A comparação com a análise automatizada e com as informações obtidas na literatura serão discutidas no item referente às análises digitais.

### 4.3 Rotinas

Neste item será abordada a estrutura das rotinas e a função que cada comando específico utilizado tem dentro destas. Com a grande variedade de filtros, operadores e comandos que o programa disponibiliza, foi necessário encontrar quais teriam melhor resultado na obtenção de dados das análises executadas.

### 4.3.1 Percentuais de Fases

O objetivo desta rotina é, através das imagens obtidas, estabelecer a quantidade, em percentual, das fases de silício presente em cada amostra. A dificuldade na criação desta rotina estava em separar os tons de cores, que para o computador, em uma escala de 0 a 255 de tonalidade de pixels na escala de cinzas, confundia os tons das regiões onde era silício com os da matriz de alumínio. Conforme mostra a figura 4.5, foi necessário para tanto, utilizar o *thresholding* na escala RGB planar para obter melhores resultados.



	Command	Parameters	
▶	1	Comment	
◆	2	Clear result window	
◆	3	Freeze image	
◆	4	Save image to ima...	
◆	5	ROI, Disable	
◆	6	Load image	C:\Users\user\Desktop\Tiago\SCAT3 PAREDE I
◆	7	Delineate	for 1 cycles
◆	8	Auto white	White sample from point (672,422)
◆	9	Threshold RGB	R=(31-88), G=(41-83), B=(44-98) to Si 12
◆	10	Clear objects, by C...	Si 12, size (5 x 5)
◆	11	Clear objects, by p...	Si 12, size (20 x 20)
◆	12	Field measure	On Si 12 measure: Area fraction
◆	13	Show statistics	

Figura 4.5 – Estrutura da rotina de análise de percentual de silício.

Os primeiros cinco comandos das rotinas são padronizados em todas as rotinas e estão descrito abaixo:

- Comentário: não é bem um comando, e sim uma maneira de inserir algum comentário à rotina, de forma a sinalizar ou especificar algo naquele ponto para futuros usuários ou até mesmo lembretes;

- Limpar janela de resultados: libera a memória do programa de resultados obtidos em alguma análise anterior. Ideal para que não haja confusão de dados obtidos quando forem realizadas várias análises consecutivas;
- Congelar imagem: Como a ideia era realizar análises feitas diretamente do microscópio, este comando tem a função de congelar a imagem atual que está sendo visualizada na tela do programa, através do microscópio;
- Salvar imagem: salva a imagem atual que está sendo mostrada na memória do programa;
- Desativar ROI (region of interest): o programa possibilita análises em somente uma área de interesse dentro da imagem, caso necessário. Este comando tem função de desabilitar a ROI caso tenha sido utilizada em uma análise anterior.

Depois destes passos padrões, foi acrescentado um sexto comando que tem como função carregar uma imagem salva no computador, visto que as imagens das amostras já haviam sido obtidas no microscópio, anteriormente ao início da elaboração das rotinas, então ele também estará presente na estrutura das demais.

A seguir, iniciam-se os comandos específicos de cada rotina, que como já citado no capítulo 3, não necessariamente seguem uma ordem, mas consiste basicamente em filtrar a imagem para melhorar sua qualidade, binarizar os dados, trabalhar os dados binarizados e obter os resultados, conforme detalhados a seguir:

- Delinear: objetivo deste comando é eliminar os borrões das bordas e contornos da imagem, eliminando alguns tons de pixels e mantendo outros sem modificações. Parâmetro para 1 ciclo significa que o programa realizará uma vez o comando;
- Branco automático: faz um ajuste nos tons de branco conforme o ponto selecionado na imagem. Função real deste comando aqui é destacar a cor da matriz de alumínio, diferenciando-a bem dos precipitados de silício presente, facilitando os ajustes do *thresholding* posteriormente;

- *Threshold RGB*: comando que irá binarizar os dados da imagem, no caso aqui utilizou-se a escala RGB planar para os parâmetros estabelecidos, no *bitplane* determinado (12 no caso da rotina especificada);
- Limpar objetos por tamanho: permite estabelecer uma determinada geometria e um tamanho específico, e o que for menor que este valor, o programa elimina automaticamente. Utilizado para remover pequenos pontos, que, mesmo com ajustes na escala RGB, acabam sendo marcado fora dos precipitados de silício, permitindo assim melhores resultados;
- Limpar objetos por tamanho de pixel: semelhante ao comando anterior, mas agora elimina por tamanho de pixel;
- Medida de campo: realiza as medidas determinadas em algum *bitplane*. No caso da rotina específica é feita as medidas de fração de área no *bitplane* 12, onde foram binarizados os dados do *thresholding*.
- Mostrar estatísticas: abre a janela de dados e mostra os histogramas e gráficos obtidos na análise.

Alguns comandos, como neste caso o 6, 9, 10 e 11 possuem um símbolo ao lado do comando. Os comandos que possuem este símbolo significam que serão executados de forma interativa, dependem do operador para prosseguir e finalizar a rotina. São deixados assim, pois nem todas as imagens obtidas terão a mesma iluminação, tonalidades e qualidade, então cabe ao operador ajustar, de forma manual, simples e rápida, para que os resultados obtidos sejam mais coerentes.

#### 4.3.2 Análise de porosidades

Para a rotina de porosidade a ideia principal é conseguir obter informações sobre as porosidades, de forma que a peça possa ser analisada e classificada quanto a presença dos defeitos de poros.

A estrutura da rotina, que pode ser visto na figura 4.6, é bem semelhante a da utilizada para o percentual de fases. A diferença é que como porosidades e vazios aparecem na imagem

com a tonalidade totalmente preta, pode ser então utilizada a escala de cinzas, o que facilita a realização do *thresholding* na imagem, visto que é fácil separar o preto de outras tonalidades de cinza.

	Command	Parameters	
▶	1	Comment	
◆	2	Clear result window	
◆	3	Freeze image	
◆	4	Save image to ima...	
◆	5	ROI, Disable	
◆	6	Load image	C:\Users\user\Desktop\Tiago\PCAT1 MEIO\1
◆	7	Delineate	for 1 cycles
◆	8	Grayscale	
◆	9	Threshold B/W	(0-25) to Poros 14 .
◆	10	Boundary fill	Poros 14
◆	11	Fill holes	Poros 14
◆	12	Field measure	On Poros 14 measure: Area fraction
◆	13	Field measure	On Poros 14 measure: Total area
◆	14	Field measure	On Poros 14 measure: Average circular diam
◆	15	Object measure	On Poros 14 measure: Average Feret diamete
◆	16	Show statistics	
◆	17	Show result window	

Figura 4.6 – Estrutura da rotina para análise de porosidades.

Como já citado no item 4.3.1 os comandos do 1 ao 6 são exatamente os mesmos e tem as mesmas funções. Abaixo segue a descrição dos passos seguintes que formam o restante da rotina:

- Delinear: mesma função citada no item anterior;
- Escala de cinza: converte a imagem para apenas tons de cinzas, indo da tonalidade zero (preto) a 255 (branco);
- *Threshold B/W (black and white)*: diferente da rotina de percentual de fases, em função de podermos trabalhar com tons de cinza, se utiliza o *thresholding*

na escala de branco e preto, selecionando como parâmetros a tonalidade dos pixels a serem binarizados, que no caso, conforme mostra a figura 4.6 foi estabelecido do zero ao 25.

- Preenchimento de bordas: adiciona um pixel a mais à borda dos objetos no *bitplane* selecionado. Utilizado para quando existe um contorno com contrastes muito grande entre os tons mais claros e mais escuros, para que haja um preenchimento melhor da região selecionada;
- Preenchimento de buracos: como próprio nome diz, caso haja um buraco no centro de um *bitplane*, este comando irá preenchê-lo;
- Medida de campo: como já citado anteriormente, irá fazer os cálculos de acordo com o *bitplane* e parâmetros selecionados. Para a rotina de porosidades foi medida a fração de área e o diâmetro circular médio;
- Medida de objetos: semelhante à medida de campo, mas com algumas opções de parâmetros diferentes. Neste caso utilizou-se para medir o diâmetro circular médio utilizando o método Feret, que consiste em medir a distância entre duas linhas paralelas tangenciais ao plano do objeto. Para uma maior precisão o programa faz esta medida, para cada objeto, em oito ângulos diferentes e calcula a média destas medidas para estabelecer o diâmetro daquele objeto;
- Mostrar estatísticas e janela de dados: como no item anterior, abre a janela com os dados e medidas e exhibe os gráficos e histogramas com os resultados.

Assim como a rotina de percentual de fases, alguns comandos também foram deixados no modo interativo, de forma que consiga se ajustar os parâmetros de acordo com a qualidade da imagem.

#### 4.3.3 Espaçamento entre braços de dendritas (DAS)

Para a obtenção da medida do DAS, é necessário que a rotina desenhe na imagem o esqueleto interdendrítico, isto é, que forme nesta, linhas que irão representar os braços de dendritas, para que sejam feitas as medidas da distância entres estas linhas.

Esta foi a mais complexa dentre as rotinas desenvolvidas no trabalho, foi utilizado uma série de operadores para que os resultados ficassem corretos. Novamente os comandos do 1 ao 6 se repetem, assim como o comando de delinear que, tem a mesma função citada nos itens anteriores. Segue abaixo então os comandos, seguindo a ordem da Figura 4.7, utilizados para a obtenção dos cálculos do DAS:

- *Threshold B/W (black and white)*: como nas imagens para análise de dendritas, estas se mostram em praticamente tons de cinza claro ou em tons claros, deixando o vazio entre elas como se fosse uma matriz escura, conforme pode ser visto na figura 4.3, permitiu que fosse trabalhado na escala de tons de cinza para realizar o *thresholding*. Aqui o objetivo é selecionar toda a matriz dendrítica, deixando de fora apenas o fundo escuro formado pelos vazios;
- Fechar: comando tem duas funções, serve para preencher buracos internos dos *bitplanes*, caso existam, e também dilata em um pixel todo contorno dos objetos;
- Inverter: como próprio nome diz, ele inverte as seleções de *bitplanes*. Foi utilizado para converter o que havia sido deixado de fora no *thresholding*, para o *bitplane* 1, e que o estava nele passa a ficar em branco. Permitindo assim que se inicie o desenho do esqueleto interdendrítico;
- Limpar objetos por tamanho de pixel: remove do *bitplane* selecionado os pixels de um determinado tamanho;
- Erosão: amplia em um pixel o contorno dos objetos;
- Afinar: reduz os objetos selecionados, de forma centralizada, até o tamanho do pixel desejado. Contrário de outros comandos, este não remove objetos, apenas afina eles, até o limite de 1 pixel em casos de objetos muito pequenos;
- Suprimir: Corta pequenas linhas, isto é, tudo que tiver apenas um pixel vizinho, seja eliminado. A função é eliminar do esqueleto pontos únicos, deixando apenas os braços do esqueleto.
- Mostrar *bitplanes*: ativa e desativa *bitplanes*. Utilizado para ativar o *bitplane* 6 que vai ser utilizado para traçar as linhas de medidas do DAS;



- Editar *bitplanes* manualmente: ativa a ferramenta de desenho no *bitplane* selecionado e exibe uma caixa de mensagem com instruções ao operador. As instruções aqui consistem em desenhar as linhas que servirão de base para o cálculo do DAS, iniciando no centro de um braço de dendrita, atravessando ao menos de 4 a 5 braços do esqueleto interdendrítico e finalizando no centro de outro;
- Operadores lógicos: realiza operações lógicas com os *bitplanes*. Utilizado para subtrair do *bitplane* 6, tudo que ele corta com o 1 (esqueleto), isto é, os pixels que pertencem ao esqueleto não serão contabilizados no *bitplane* 6;
- Medida de objetos: Como parâmetro utilizou-se o diâmetro máximo de Feret, onde o cálculo é feito da mesma maneira do citado no item 4.3.2, porém por ser tratar de uma linha, o programa irá calcular a distância máxima entre os pontos que interceptam a reta.
- Mostrar janela de dados: assim como citado anteriormente, abre a janela de dados e os histogramas.

Comparado às outras rotinas, em que alguns parâmetros foram definidos para serem executados de forma interativa, nesta, apesar de ter sido criada para ser executada de forma automatizada, sempre será necessário a intervenção do operador, visto que há a necessidade de se traçar as retas para o cálculo do DAS, algo que o programa não consegue fazer sozinho. Porém mesmo assim, a análise é feita bem mais rápida que se fosse feita de forma manual, visto que não há a necessidade ficar contando os braços de dendritas e nem o cálculo, pois o programa realiza estas funções sozinho.

	Command	Parameters
▶ ◆ 1	Comment	
◆ 2	Clear result window	
◆ 3	Freeze image	
◆ 4	Save image to ima...	
◆ 5	ROI, Disable	
◆ 6	Load image	espaçamento\PCAT1\2PCAT1P10XDIREITA01
◆ 7	Delineate	for 1 cycles
◆ 8	Threshold B/W	(88-255) to Bitplane1 1.
◆ 9	Close	Bitplane1 1 with 3x3 hexagonal kernel for 1 c
◆ 10	Invert	Bitplane1 1 to Bitplane1 1
◆ 11	Clear objects, by p...	Bitplane1 1, size (15 x 15)
◆ 12	Erode	Bitplane1 1 with 3x3 hexagonal kernel for 1 c
◆ 13	Thin	Bitplane1 1 with 3x3 hexagonal kernel to end
◆ 14	Prune	Bitplane1 1 with 3x3 hexagonal kernel for 5 c
◆ 15	Show bitplanes	Bitplane1 1, Arm spacing 6
◆ 16	Comment	
◆ 17	Edit bitplanes man...	Edit Arm spacing 6 using Line, Draw Straight
◆ 18	Comment	
◆ 19	Boundary fill	Bitplane1 1
◆ 20	Comment	
◆ 21	Logical operators	Arm spacing 6 Minus Bitplane1 1 to Arm sp
◆ 22	Clear objects, by p...	Arm spacing 6, size (4 x 4)
◆ 23	Comment	
◆ 24	Object measure	On Arm spacing 6 measure: Maximum Feret
◆ 25	Show result window	

Figura 4.7 – Estrutura da rotina para cálculo do DAS.

#### 4.4 Análises metalográficas digitais

Neste item serão abordados os resultados obtidos através da execução das rotinas criadas e descritas no item 4.3, assim como as comparações entre os resultados obtidos através dos diferentes métodos de análises.

##### 4.4.1 Percentuais de fase

A tabela 4.4 mostra o resultado de todas as análises feitas para a medida do percentual de silício presente nas amostras. As figuras 4.8 e 4.9 mostram as micrografias após a execução da rotina no *Omnimet*.

Tabela 4.4 - Resultados da análise por execução da rotina de percentual de Si.

	% de Si							
	Sem ataque químico				Com ataque químico			
	Centro	Meio	Parede	<b>Média</b>	Centro	Meio	Parede	<b>Média</b>
Liga 1	7,15%	6,20%	6,97%	<b>6,77%</b>	6,66%	6,50%	7,11%	<b>6,76%</b>
Liga 2	8,47%	9,22%	7,83%	<b>8,51%</b>	7,49%	8,05%	8,71%	<b>8,08%</b>

Comparando os resultados com a análise feita no MEV/EDS pode-se dizer que os resultados foram bem próximos para a liga 1, com uma diferença média de 0,3%. Para a liga 2, assim como aconteceu na análise manual, os resultados ficaram acima do encontrado, devido a grande concentração de Si na região das micrografias tiradas. Esse fator fica evidenciado ao compararem-se os resultados de ambas as análises, computacional e manual, onde tanto os valores médios como quanto os pontuais (com algumas exceções) ficaram aproximados, ou seja, a região de análise da amostra influencia diretamente no resultado. Para minimizar este erro pode-se fazer uma análise em uma quantidade maior de pontos da amostra, algo que seria totalmente viável e não levaria muito tempo para ser realizado via programa, devido à facilidade e a rapidez com que o programa executa as rotinas após as mesmas estarem prontas.

Para a análise de percentual de Si, houve certa dificuldade em estabelecer os valores de *thresholding*, mesmo utilizando a escala RGB, pois certos tons de cores das plaquetas de Si se assemelhavam aos de alguns pontos da matriz de alumínio, o que leva ao programa os identificar como área de Si.

Mesmo com estes problemas pontuais, a rotina se mostrou bem efetiva para medir os percentuais de Si nas ligas, sendo muito mais rápida e fácil de se executar que o método convencional de contagem de pontos, trazendo resultados bem semelhantes. Podendo futuramente ser aprimorada para que obtenção dos dados seja mais precisa.

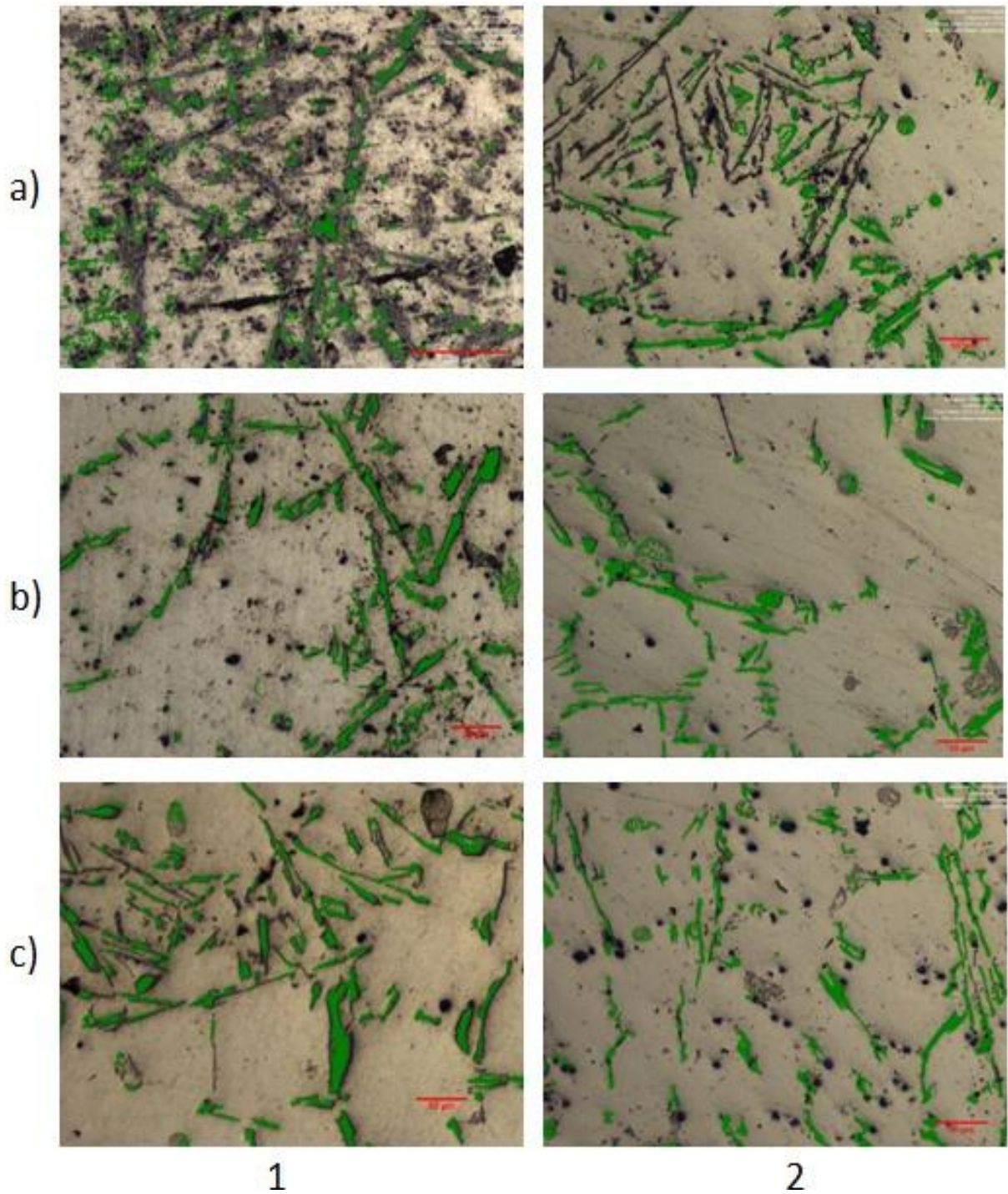


Figura 4.8 – Micrografias da liga 1 após execução da rotina de percentual de Si: 1) sem ataque químico; 2) com ataque químico; a) posição centro; b) posição a meio raio; c) parede da amostra.

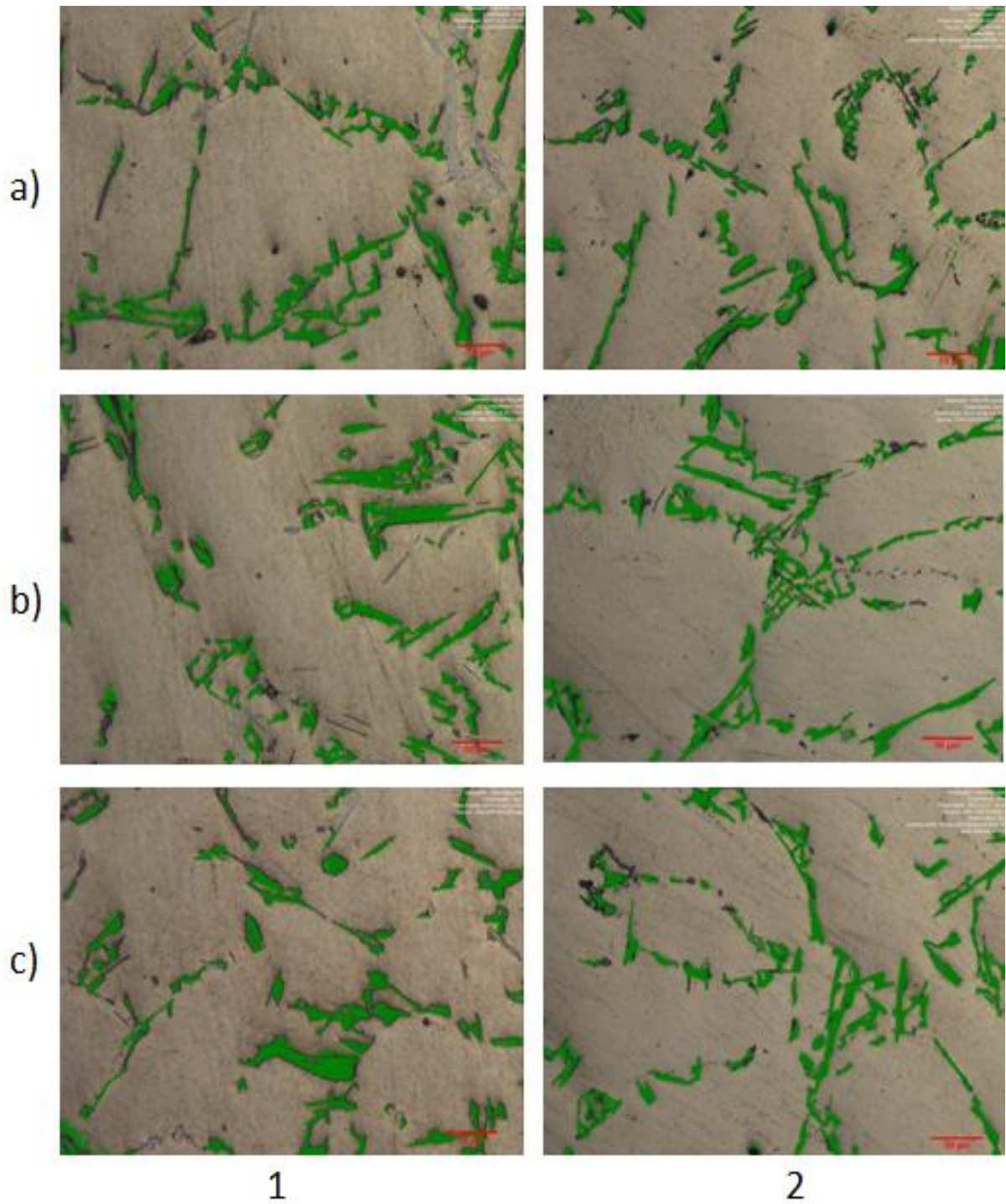


Figura 4.9 – Micrografias da liga 2 após execução da rotina de percentual de Si: 1) sem ataque químico; 2) com ataque químico; a) posição centro; b) posição a meio raio; c) parede da amostra.

#### 4.4.2 Porosidades

A rotina para análise de porosidades foi utilizada para calcular o percentual de poros presente nas amostras e também o diâmetro médio, valor este que não seria tão fácil de se obter manualmente. As tabelas 4.5 e 4.6 mostram, respectivamente, os valores obtidos para percentual de poros e o diâmetro médio encontrado em micrômetros. As figuras 4.11 e 4.12 mostram as micrografias das amostras após execução da rotina. Na figura 4.10 as micrografias faltantes são as que não houveram presença de poros detectados.

Para o diâmetro médio foi utilizado a medida simples, através da média dos diâmetros totais, e pelo método Feret, que faz uma avaliação objeto a objeto (considera-se objeto um valor de dados binarizados agrupados, que seriam cada poro especificamente) conforme está descrito no item 4.3.2, e calcula média de todos estes objetos. Ambos os resultados foram semelhantes, então para o prosseguimento do trabalho optou-se por avaliar os resultados obtidos através do método Feret, que é mais preciso.

Tabela 4.5 - Resultados da análise por execução da rotina de porosidades para o percentual de área.

	% de Porosidade							
	Sem ataque químico				Com ataque químico			
	Centro	Meio	Parede	Média	Centro	Meio	Parede	Média
Liga 1	4,53%	3,31%	1,52%	<b>3,12%</b>	2,20%	0,38%	2,05%	<b>1,54%</b>
Liga 2	0,63%	-	-	<b>0,21%</b>	0,17%	-	0,13%	<b>0,10%</b>

Tabela 4.6 - Resultados da análise por execução da rotina de porosidades para o diâmetro circular médio por método Feret.

	Tamanho médio de porosidade ( $\mu\text{m}$ )					
	Sem ataque químico			Com ataque químico		
	Centro	Meio	Parede	Centro	Meio	Parede
Liga 1	7,67	3,44	3,38	4,10	1,57	3,25
Liga 2	1,20	-	-	1,39	-	1,12

Comparando-se os resultados com o método de contagem de pontos, o programa obteve resultados bem semelhantes em todos os pontos das amostras, com diferenças menores que 0,30% entre os resultados. O programa mostrou ser ainda mais efetivo, visto que pela análise manual, conforme tabela 4.2, para liga 2, com ataque químico na região da parede, por contagem de pontos não foi possível detectar poros, enquanto que o programa mostrou a presença de pequenas porosidades. Esta diferença se dá, conforme mencionado anteriormente, sobre o fato de, se não houver pontos da grade incidentes sobre os poros, a contagem de pontos será zero, assim como o resultado. Na figura 4.10 é possível ver a micrografia desta região comparando a grade com a micrografia após execução da rotina. O círculo em vermelho destaca um poro que foi detectado pelo programa, e com o uso da grade não houve incidência de pontos de intersecção sobre o mesmo, sendo assim o resultado considerado igual a zero. Na amostra sem ataque químico, nas regiões a meio raio e na parede, as micrografias obtidas realmente não continham porosidades.

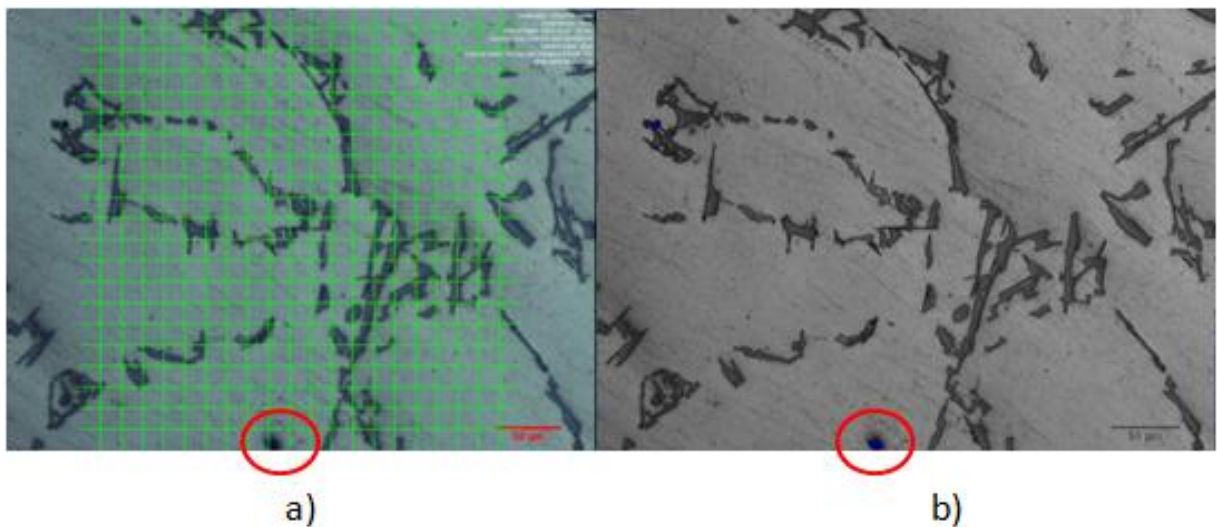


Figura 4.10 – Comparação entre o método de contagem de pontos e a análise automatizada: a) poro sem a incidência de ponto de intersecção; b) poro detectado pela rotina do programa.

Sobre o tamanho médio dos poros, a relação citada no item 4.2.2 sobre a presença de macroporosidades no centro da amostra e de microporosidades nas outras regiões, torna-se evidente. Na tabela 4.6, que mostra os valores obtidos para o diâmetro médio dos poros, pode-

se ver que na região central foram encontrados, na média, poros com mais que o dobro do diâmetro que nas outras regiões, motivo este já citado no item referido.

Como as análises de porosidades podem ser realizadas utilizando-se a escala de tons de cinza, se torna mais fácil ajustar os parâmetros do *thresholding*, o que elimina nessa rotina o fator de tons semelhantes como ocorreu para o percentual de Si, visto que os poros em todas as amostras sempre aparecerão como vazios na imagem, ou seja, em preto. Único cuidado aqui é para que o programa não detecte alguns contornos como vazios, principalmente ao redor das placas de Si, caso ocorra basta fazer um ajuste nos parâmetros do *thresholding* para eliminar este erro.

Sendo assim o resultado das análises de porosidade é bem confiável e de fácil e rápida aplicação e execução ao utilizar-se o programa, trazendo resultados até melhores e mais completos que os obtidos manualmente.

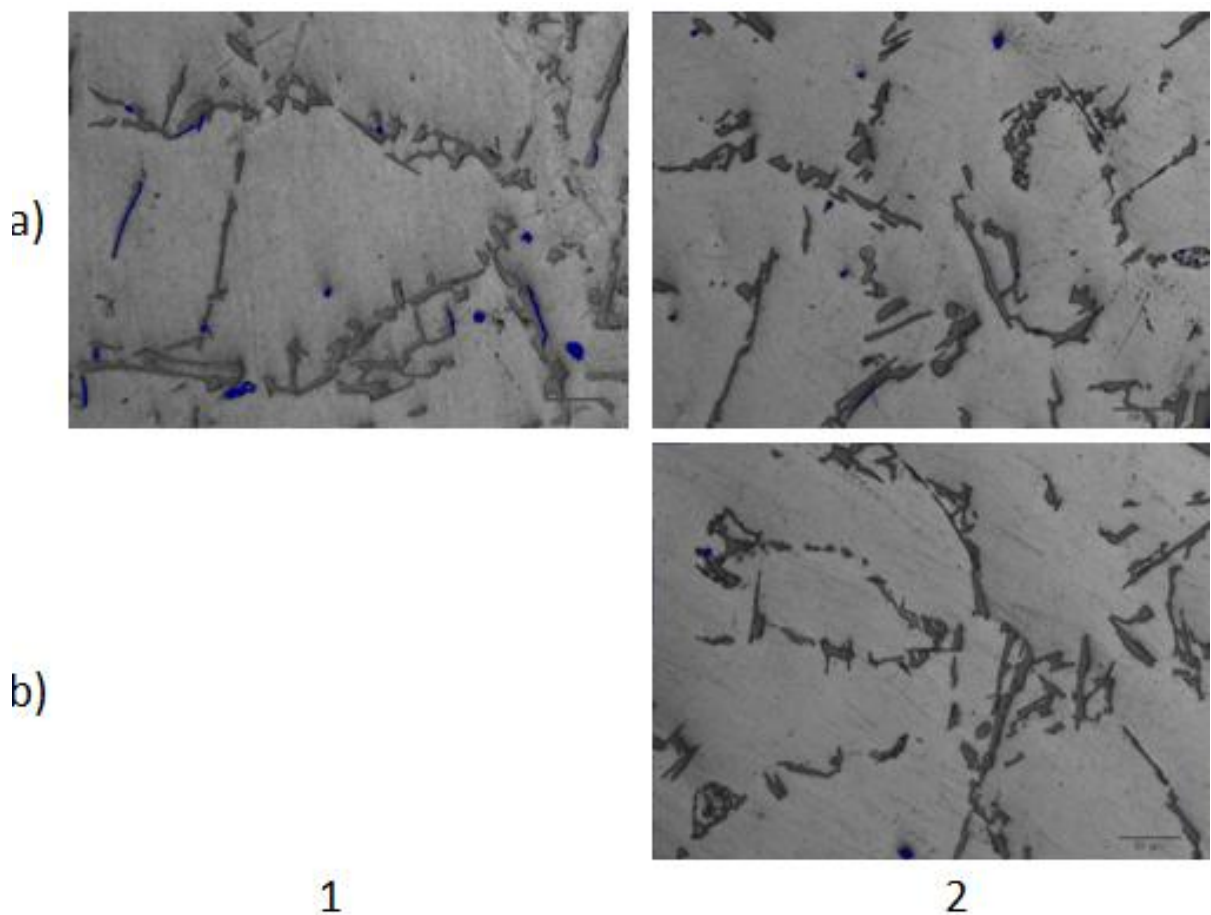


Figura 4.11 – Micrografias da liga 2 após execução da rotina de avaliação de porosidades: 1) sem ataque químico; 2) com ataque químico; a) posição centro; b) parede da amostra.



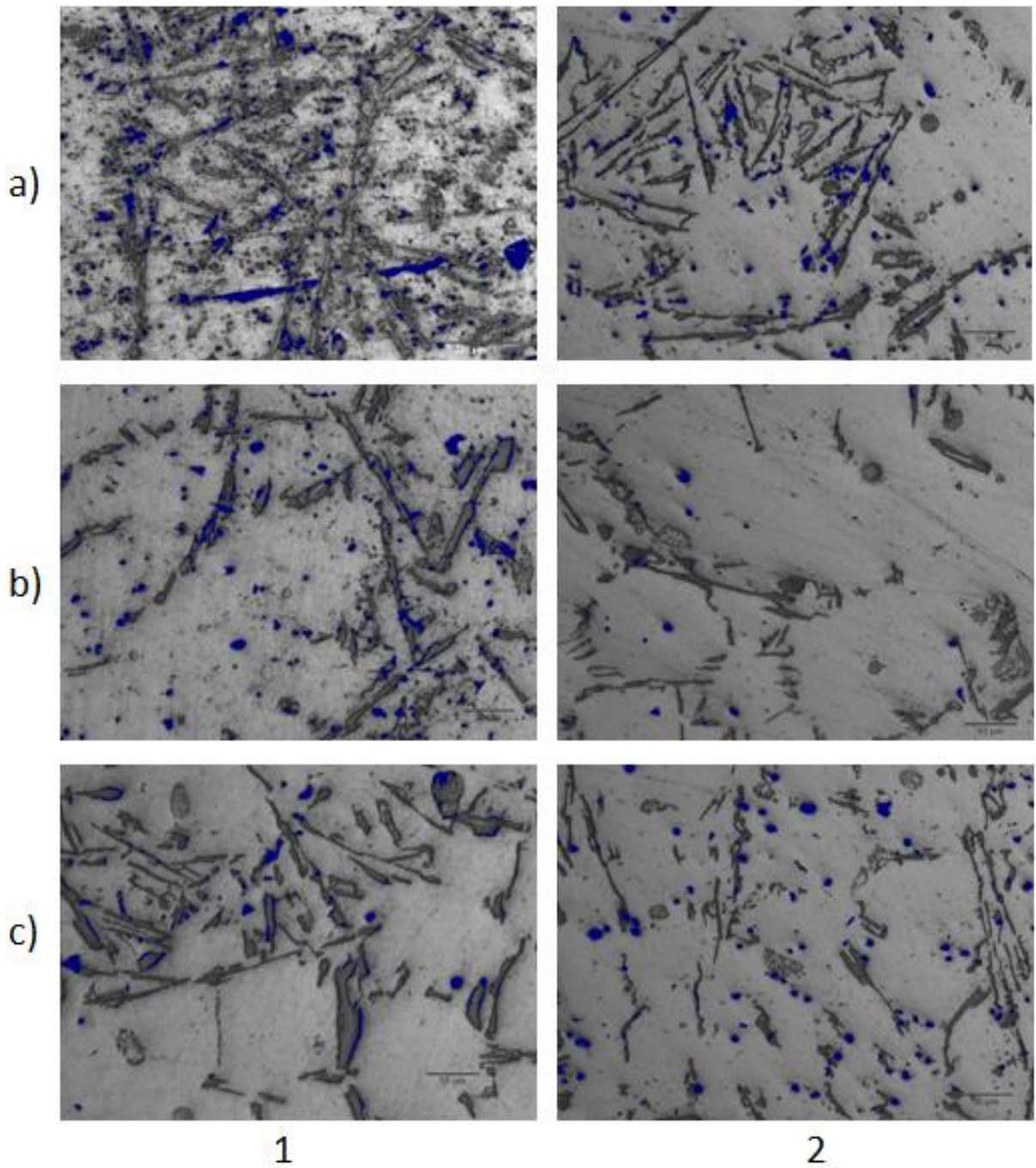


Figura 4.12 – Micrografias da liga 1 após execução da rotina de avaliação de porosidades: 1) sem ataque químico; 2) com ataque químico; a) posição centro; b) posição a meio raio; c) parede da amostra.

#### 4.4.3 Cálculo do DAS

Como já citado anteriormente, a execução da rotina para o cálculo do DAS só foi possível na micrografia de uma amostra da liga 1, na região central e com aumento de 10x, devido à qualidade das imagens obtidas no microscópio estereoscópico. Esta micrografia pode ser vista na figura 4.3 do item 4.1.

A figura 4.13 mostra o histograma, obtido através do método de Feret, para medida do DAS. O eixo Y mostra a quantidade braços de dendritas medido e o eixo X o comprimento entre estes braços em pixels.

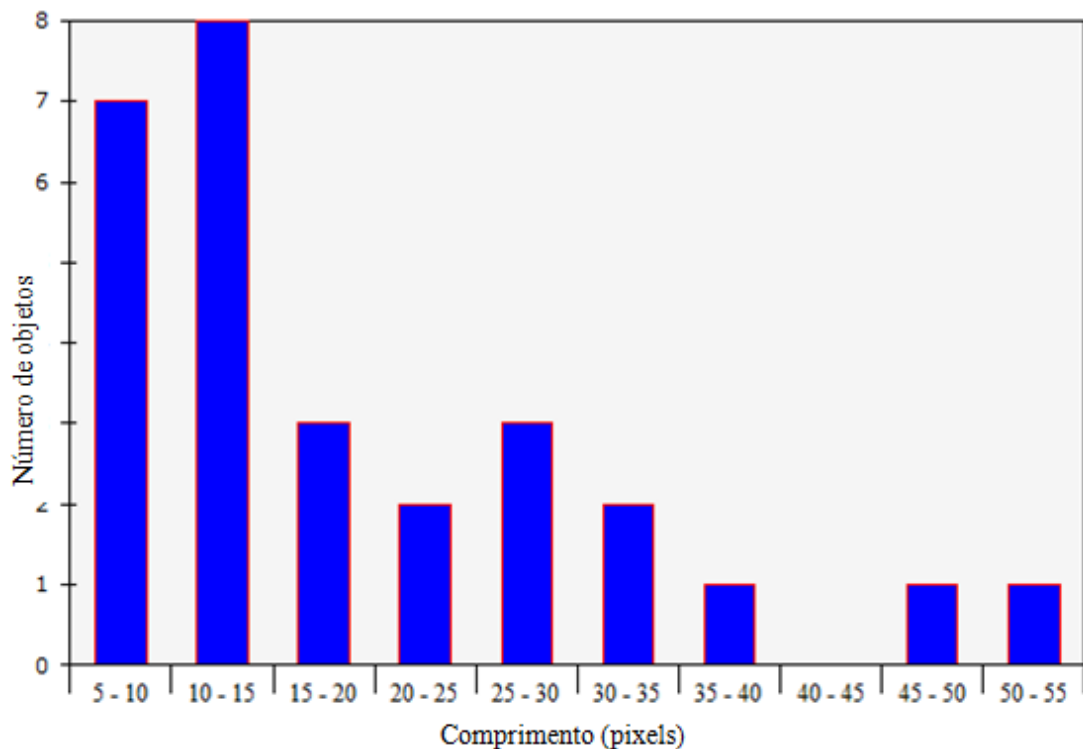


Figura 4. 13 – Histograma do comprimento do DAS obtido através do *Omnimet*.

Como a imagem não foi obtida através do *Omnimet*, ela não possui a calibragem do sistema e a conversão de pixels para milímetro teve que ser feita manualmente. Todas as micrografias obtidas tem um padrão com a escala da imagem, e o programa possui uma ferramenta que faz a conversão do número de pixels em uma determinada reta de comprimento conhecido. Para tal conversão posiciona-se a reta sobre a escala da imagem e o programa exibirá a conversão, conforme mostrado na figura 4.14. Para a micrografia utilizada

na rotina a conversão pixels para milímetros ficou de 374:2, ou, já convertendo para micrômetros, 1 pixel mede aproximadamente 5,347  $\mu\text{m}$ .

A tabela 4.7 mostra os resultados, já com os valores convertidos de pixels para o padrão internacional de medidas.

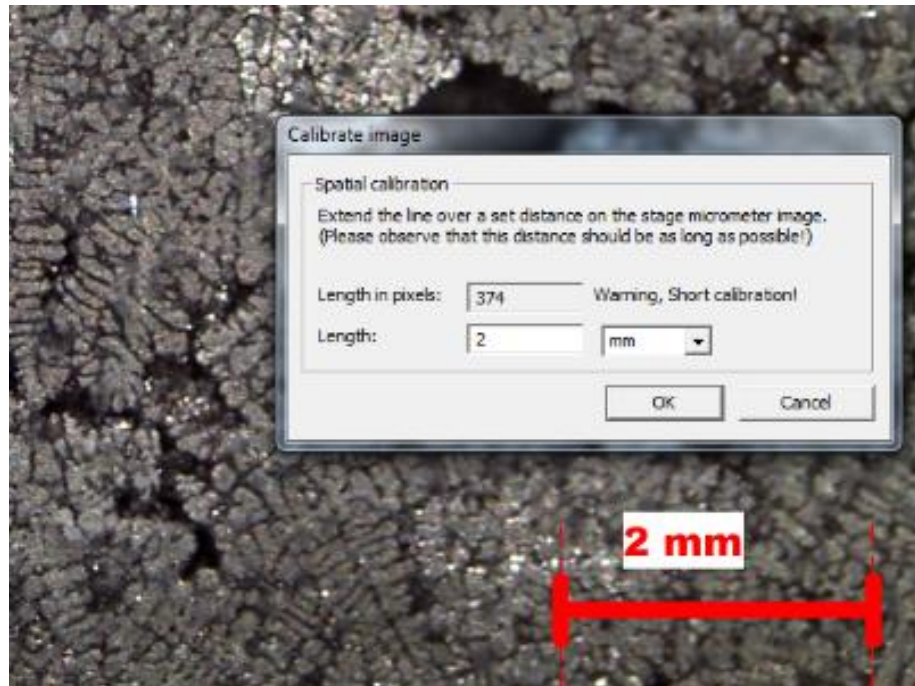


Figura 4. 14 – Conversão manual da escala de pixels para milímetros.

Tabela 4.7 - Resultados da análise por execução da rotina para cálculo do DAS.

Dados:	Tamanho do DAS ( $\mu\text{m}$ )
Média	100,53
Total	2815,03
Mín:	32,09
Máx:	280,32
Objetos	28

Comparando os resultados com a média do cálculo feito manualmente, temos valores bem aproximados, com uma diferença de  $0,6 \mu\text{m}$  entre um e outro. Isso mostra que mesmo com a baixa resolução da imagem e com toda a complexidade da rotina, o programa foi capaz de obter, de forma semiautomática (já que a rotina requer que sejam desenhadas manualmente as linhas), praticamente o mesmo resultado do que cálculo manual.

Além disto, estes resultados condizem com o que a literatura diz a respeito sobre a relação do DAS com as taxas de resfriamento. Segundo Bäckerud et al. (1991), para uma taxa de resfriamento de  $-0,2 \text{ }^\circ\text{C/s}$ , para uma liga do sistema Al-7Si, o DAS é de  $95-97 \mu\text{m}$ .

Considerando que haja uma pequena margem de erro, que se trata de medidas em micrômetros, que a imagem utilizada não foi a ideal, o resultado das análises ficou muito próximo do que se esperava, podendo-se assim considerar a rotina como uma excelente ferramenta para se calcular o DAS.

## 5.0 CONCLUSÕES

A elaboração das rotinas inicialmente é um processo complexo, visto que o programa disponibiliza uma série de filtros e operadores para execução das mesmas, sendo assim foi necessário primeiramente entender e estudar a função destes comandos. Posteriormente foi preciso também avaliar a forma que as medidas finais seriam consideradas, para se montar a rotina utilizando-se de comandos para que o resultado final fosse o desejado.

Para as medidas de percentual de fase, mesmo com certa dificuldade em relação à tonalidade de cores, foi possível determinar o percentual de Si nas amostras. Comparando-se ao método convencional os resultados ficaram muito próximos, com uma diferença aproximada de 0,30% em relação ao MEV/EDS, que também leva em conta somente uma certa região da amostra.

Para avaliação de porosidades, o uso da rotina se mostrou mais satisfatório que a avaliação convencional. Além de, para os resultados de percentuais de poros terem sido obtidos valores semelhantes, com diferenças menores que 0,2%, utilizando a mesma rotina é possível medir também o diâmetro médio das mesmas, sem interferir no tempo que o programa leva para executar a rotina. Além disso, os resultados obtidos condizem com o que a literatura cita quanto à tendência de formação de porosidades.

Quanto a rotina para o cálculo do espaçamento interdendrítico, além de ter sido a mais complexa de se desenvolver, houve uma dificuldade maior em executá-la, devido a qualidade das imagens obtidas no microscópio estereoscópico. Apesar deste fator, o resultado obtido foi satisfatório, visto que foi semelhante ao método convencional e também condiz com que a literatura refere-se ao valor utilizado na taxa de resfriamento.

Considerando-se que as medidas convencionais seguem normas e padrões internacionais, e são utilizadas para tais análises, como o programa obteve resultados semelhantes, se não melhores a estas, fica evidenciado que o programa pode sim ser utilizado para a realização das análises metalográficas quantitativas citada neste trabalho, obtendo resultados confiáveis e estatisticamente corretos. Além disto, o programa permite, visto que quando se realiza esse tipo de análise, principalmente na indústria, onde é feita em grandes quantidades de amostras, um ganho de tempo em relação à análise manual, pois a execução de uma rotina, depois de pronta, leva cerca de segundos para ser finalizada.

## 6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Primeiramente o aprimoramento das rotinas que foram elaboradas durante o desenvolvimento deste trabalho, visto que o programa disponibiliza ferramentas para tal.

Na liga A356 em algumas micrografias é possível a visualização de uma outra fase, que provavelmente trata-se do intermetálico formado pelo Mg, a rotina de análise de percentual de fases pode ser ampliada para o cálculos destes intermetálicos também.

As rotinas foram criadas com o objetivo de analisar especificamente ligas de Al-Si, mas podem futuramente serem ajustadas ou utilizadas como base para o desenvolvimento de rotinas para avaliação de outras ligas.

Sugere-se também a elaboração de rotinas para outras análises possíveis que o programa permite, entre elas para medida de dureza e tamanho de grãos.

Por fim, aconselha-se, quando utilizadas, que as rotinas sejam executadas em uma maior quantidade de pontos na amostra, para que haja uma maior representatividade dos resultados.

## 7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABAL. **Informativo e estatísticas da Associação Brasileira de Alumínio.** Disponível em: <<http://www.abal.org.br/>>. Acesso em nov. 2015.
- [2] ASM SPECIALITY HANDBOOK. **Aluminum and Alluminum Alloys.** Ohio: ASM International, 1993.
- [3] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E562 – 08: Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Sistematic Manual Point Count.** Estados Unidos, 2008.
- [4] ASM HANDBOOK. **Alloy Phase Diagrams.** Ohio: ASM International, v.3, 1992.
- [5] ASM HANDBOOK. **Metallography and Microstrutures.** Ohio: ASM International, v9, 2004.
- [6] ASM HANDBOOK. **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials.** Ohio: ASM International, v.2, 1990.
- [7] BACKERUD, L; CHAI, G.; TAMMINEM, J. **Solidification Characteristics of Aluminum Alloys.** Estocolmo, 1990.
- [8] CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 5ed. LTC, São Paulo, 2002.
- [9] COUTO, A. A.; MARRECO, D. M.; CABRAL NETO, A.; VATAVUK, J.; NAVA, M. A. **Caracterização de ligas Al-Si eutéticas e hipereutéticas fundidas por centrifugação para aplicações automotivas.** In: 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2010, Cmapos do Jordão, São Paulo.
- [10] GARCIA, A. **Solidificação: Fundamentos e Aplicação.** Campinas, SP: Ed. Campinas, 2001..
- [11] LEXICON. **Dendrite Arm Spacing.** Disponível em: <<http://www.giessereilexicon.com/>>. Acesso em nov. 2015.
- [12] MACIEL, A. R.; SILVA, J. **Metalografia Quantitativa.** Viória, 2010.
- [13] MONDOLFO, L. F. **Aluminium Alloys: Structur and Properties.** Londres: Butterworth & Co., 1976