

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Bruno César Caixeta Leme

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA OPEN-SOURCE PARA A CLASSIFICAÇÃO E CONTAGEM DE PARTÍCULAS EM ÓLEOS INDUSTRIAIS

Taubaté – SP

2016

Bruno César Caixeta Leme

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA OPEN-SOURCE PARA A CLASSIFICAÇÃO E CONTAGEM DE PARTÍCULAS EM ÓLEOS INDUSTRIAIS

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo Curso de Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de concentração: Automação

Orientador: Prof. Dr. Luis Fernando de Almeida

**Taubaté – SP
2016**

BRUNO CÉSAR CAIXETA LEME

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA OPEN-SOURCE PARA A
CLASSIFICAÇÃO E CONTAGEM DE PARTÍCULAS EM ÓLEOS INDUSTRIAIS**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo Curso de Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Data: _____

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luis Fernando de Almeida

Universidade de Taubaté

Assinatura: _____

Prof. Dr. Álvaro Manoel Sousa Soares

Universidade de Taubaté

Assinatura: _____

Prof. Dr. Valdeci Donizete Gonçalves

Instituto Federal de São Paulo

Assinatura: _____

DEDICATÓRIA

Dedico esse mestrado à minha esposa Jean Carla Pires Duarte Leme, pela paciência, apoio e incentivo para que, mesmo com todas as condições adversas, continuasse estudando. Aos meus pais Orlando Rodrigues Leme e Maria do Rosário Araújo Caixeta por todo o incentivo na área acadêmica e também pelo apoio financeiro.

AGRADECIMENTOS

Agradeço de coração o professor Dr. Luis Fernando por acreditar, incentivar e pela paciência durante minhas ausências por causa do trabalho.

Ao professor Dr. Álvaro Manoel Sousa Soares pelos esclarecimentos, apoio e companhia no laboratório de engenharia mecânica.

Ao meu irmão Júlio César Leme pelas noites perdidas para melhorar o trabalho me auxiliando com o código e na aquisição de imagens com o microscópio.

E a meu amigo Cleiber da Silva Coelho por todo o suporte durante as viagens entre o laboratório e a universidade.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta *open-source* para a classificação e contagem automática de partículas em óleos industriais. As análises são realizadas através da filtragem do óleo por membranas onde as imagens são obtidas por uma câmera ligada a um microscópio óptico conforme a norma ISO4407:2002. Para a codificação dos resultados, foi utilizada a norma ISO4406:1999 que descreve o método utilizado para sua nomenclatura. O framework foi elaborado em torno do software ImageJ que possui vasta literatura na área e possibilita a extensão futura da ferramenta para outras áreas. Os resultados obtidos demonstram o potencial da ferramenta para a contagem de partículas de forma rápida e eficaz fornecendo, ao especialista, informações importantes sobre as características do particulado analisado.

PALAVRAS-CHAVE: Contagem de partículas, Manutenção preditiva, Óleos lubrificantes industriais, ISO4407, ISO4406.

ABSTRACT

This work presents the development of an open-source tool for automatic classification and counting of particles in industrial oils. Analyses are performed by filtering the oil through a membrane where the images are obtained by a camera connected to an optical microscope according to the standard ISO4407: 2002. For coding the results, the standard ISO4406 was used and describes the method used to its nomenclature. The framework was developed around the software ImageJ which has vast literature in the field and enables the tool for further extension to other areas. The results demonstrate the potential of the tool for quickly and effectively count particles, giving to the specialist important information about the analyzed particulate characteristics.

Keywords: Particle Counting, Predictive maintenance, industrial lubricant oils, ISO4407, ISO4406.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aplicação do uso de termografia.....	14
Figura 2 - Recomendações de limpeza de óleo para cada tipo de componentes.	20
Figura 3 – Conceito de funcionamento do contador por bloqueio de luz.....	21
Figura 4 - Conceito de funcionamento do contador por refração a laser.....	22
Figura 5 – Membrana bloqueada por partículas.....	22
Figura 6 – Amostra de uma partícula com a classe correspondente.....	23
Figura 7 - Os quatro principais tipos de desgaste.	24
Figura 8 – As informações que são obtidas com as características das partículas...	25
Figura 9 – Método de análise on-line e off-line.....	26
Figura 10 - Principais etapas no processamento de imagens.....	27
Figura 11 - Interface básica do ImageJ.	28
Figura 12 – Arquitetura genérica (área em verde representa as etapas de preparação da membrana; área em amarelo representa as etapas de software)	29
Figura 13 - Sistema para filtração e análise composto por: (a) câmera USB; (b) microscópio; (c) kit de filtração; (d) membranas.....	30
Figura 14 – Membrana de éster de celulose lisa.....	31
Figura 15 - Fluxograma da rotina principal do software.	33
Figura 16 - Interface para aquisição das imagens.....	34
Figura 17 - Interface para processamento básico das imagens.....	35
Figura 18 – Ilustração dos diâmetros máximo e mínimo de Feret.....	36
Figura 19 - Interface com informações sobre as partículas contadas.	36
Figura 20 - Modulo para calibração do microscópio.....	39
Figura 21 - Definição do offset.	40
Figura 22 – Sistemas para filtração utilizados na análise.....	42
Figura 23 – Técnico realizando análise nas membranas.	42
Figura 24 - (a) imagem original em 8-bits; (b) imagem binarizada; (c) partículas contadas.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Total de partículas dentro das especificações divididas em classes.....	37
Tabela 2 – Intervalo de contagem usado para codificação das amostras.....	38
Tabela 3 – Classificação para a primeira membrana analisada.....	44
Tabela 4 – Classificação para a segunda membrana analisada.....	45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tipos de manutenções	13
Quadro 2 - Parâmetros medidos durante análise de vibração	14

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARP - *Aerospace Recommended Practices*

CMOS - *Complementary metal-oxide semiconductor*

ISO - *Internacional Standard Organization*

LED - *Light-Emitting Diode*

MP - megapixel

NAS - *National Aerospace Standards*

NBR – Norma Brasileira Registrada

NIH – *National Institute of Health*

ROI – *Region of interest*

SAE - *Society of Automotive Engineers*

USB – Universal Serial Bus

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Trabalhos Correlatos	15
1.2 Objetivo do Trabalho	16
1.3 Metodologia	17
1.4 Estrutura da Dissertação	18
2 ANÁLISE DE PARTÍCULAS DE DESGASTE	19
2.1 Contagem de Partículas	20
2.1.1 Tipos de Contagem de Partículas	21
2.2 Análise Morfológica	23
2.3 Métodos para Análise de Óleo	26
2.4 Processamento de Imagens	27
3 DESENVOLVIMENTO	29
3.1 Sistema de Filtração	30
3.2 Software	32
3.2.1 Aquisição da Imagem	33
3.2.2 Processamento Básico	34
3.2.3 Decisão pelo Uso das <i>Características Extraídas</i>	35
3.2.4 Normatização	37
3.3 Calibração e Ajuste das Configurações do Microscópio	39
4 TESTES E RESULTADOS	41
4.1 Coleta das Amostras	41
4.2 Análise das Amostras	43
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	47
REFERÊNCIAS	49
APÊNDICE A – Tabela da norma ISO4406 para codificação das amostras	53
APÊNDICE B – Procedimento para calibração do microscópio	54
APÊNDICE C – Imagens das análises	56

1 INTRODUÇÃO

Na constante busca pela eficiência na produtividade, as empresas procuram o desenvolvimento de técnicas que permitam elevar ao máximo a disponibilidade dos meios de produção evitando paradas inesperadas. Há também certos segmentos nos quais as falhas em equipamentos podem ocasionar perdas irreparáveis, como na aviação, sendo essencial a previsão de problemas.

A NBR5462 (1994) trata da manutenção com o intuito de se maximizar a disponibilidade e a confiabilidade dos equipamentos industriais. A norma define diretrizes para a aplicação de planos de manutenção com base em três tipos de manutenção, a corretiva, a preventiva e a preditiva.

Na manutenção corretiva a intervenção no equipamento se dá apenas depois de ocorrer a falha. Geralmente, ela é a mais custosa para as empresas, pois resultam em parada inesperada do maquinário, comprometendo a produção, forçam a mobilização não programada de pessoal para atender ao chamado e podem comprometer outros componentes do maquinário. Apesar de necessária, empresas tendem a evitar ao máximo a manutenção corretiva pelo emprego de outros tipos de manutenção.

A manutenção preventiva baseia-se na troca do componente antes que esse atinja o ponto de colapso. Essa troca é, geralmente, baseada no histórico de falhas e evita os problemas citados no parágrafo anterior. Por consequência, é possível atingir níveis maiores de disponibilidade e os custos com pessoal pode ser diminuído uma vez que a mão de obra pode ser planejada e os componentes necessários para a troca podem ser adquiridos com antecedência. Entretanto, um dos pontos a se discutir sobre esse tipo de manutenção é a possibilidade de trocas de componentes que poderiam funcionar adequadamente por mais tempo.

A manutenção preditiva difere fundamentalmente da manutenção preventiva pelo fato da intervenção nos equipamentos apenas ocorrerem com a eminência do problema e não apenas substituindo o componente com o tempo. Pode-se também, com as técnicas preditivas, acompanhar a evolução do problema, possibilitando um melhor plano de ação de quando efetuar a intervenção. Além disso, com a

manutenção preditiva é possível reduzir investimento em componentes uma vez que os mesmos são trocados apenas quando chegam a um estado crítico. O Quadro 1 apresenta a definição da modalidade das manutenções e suas principais características.

Quadro 1 – Tipos de manutenções

Fonte: Marçal, Susin (2000)

	Manutenção Corretiva	Manutenção Preventiva	Manutenção Preditiva
Estado de operação da máquina	Fora de serviço	Fora de serviço	Operando ou fora de serviço
Razão da interferência	Falha	Inspeção programada	Controle programado ou contínuo
Tarefas a serem executadas na máquina	Reposição dos componentes	Desligamento da máquina para inspeção ou reposição de componentes	Monitoramento
Objetivo da intervenção	Retorno ao trabalho	Garantir o funcionamento por um tempo	Predizer ou detectar falhas

Para auxiliar na manutenção, existem diversas abordagens para o prognóstico e diagnóstico de falhas em equipamentos. Dentre as mais comuns podem ser citadas a termografia, a análise de vibração e a análise de óleo.

A termografia é uma modalidade de ensaio não destrutivo que usa como base a detecção da radiação infravermelha para formar imagens térmicas de um determinado corpo (MALDAGUE, 2001). Tal abordagem baseia-se no fato de que qualquer objeto acima do zero absoluto gera luz infravermelha proporcional ao seu calor (NOGUEIRA; REIS, 2010). Dentre a vasta gama de aplicação da termografia, pode ser citado, principalmente, seu uso em equipamentos elétricos. Dentre suas principais vantagens, destaca-se o fato de ser um método não invasivo, seguro para o operador e uma abordagem relativamente barata para inspeção (HUDA; TAIB, 2013). A Figura 1 ilustra um exemplo de aplicação com a utilização da termografia.



Figura 1 - Aplicação do uso de termografia.

Fonte: ZenerGulf (2016)

Na análise de vibração, são utilizados sensores para medir a variação de aceleração em fontes rotativas. Segundo Marçal e Susin (2000), os parâmetros obtidos com a vibração fornecem características as quais permitem detectar a natureza das falhas e a sua severidade. O Quadro 2 apresenta algumas características básicas que identificam os principais problemas em elementos expostos a vibração.

Quadro 2 – Parâmetros medidos durante análise de vibração

Fonte: Marçal, Suzin (2000)

Parâmetro medido	Natureza da falha ou defeito a ser detectado
Amplitude do Deslocamento de vibração	Desbalanceamento, falta de alinhamento, folgas, má fixação, mal acoplamento, correias frouxas, eixo torto.
Amplitude da Velocidade da vibração	Mancais ou rolamentos defeituosos.
Amplitude da Aceleração da vibração	Estado dos rolamentos, fricção excessiva entre componentes, falta de lubrificação nos mancais.
Frequência de vibração	Dados complementares para monitoramento de qualquer característica de vibração essencial na determinação de qualquer problema detectado.

Existem diversas análises que são realizadas em óleos lubrificantes (LAGO, 2007). Sejam para garantir as propriedades dos lubrificantes como viscosidade e ausência de água, ou para conhecer a fundo os contaminantes presentes no meio, dentre outras. A tribologia, campo que estuda a relação de desgaste entre componentes, está atraindo grande atenção por parte das indústrias. Com a análise das partículas de desgastes em óleos lubrificantes é possível prever dentre outras informações: o tipo de desgaste do equipamento, o componente que está sofrendo o

desgaste e a severidade com que a mesma está se desenvolvendo (GONÇALVES; ALMEIDA; MATHIAS, 2014, LAGO, 2007). A análise de partículas de desgaste pode ocorrer, basicamente, de duas formas, contagem de partículas e análise morfológica, cujos aspectos conceituais serão detalhados no Capítulo 2 desta dissertação. Entretanto, outros tipos de análise também são considerados, como por exemplo, análise por composição.

1.1 Trabalhos Correlatos

Para auxiliar no diagnóstico de forma otimizada, tem-se cada vez mais buscado o uso de sistemas especialistas automatizados no apoio à tomada de decisão, seja por equipamentos com sistemas embarcados ou por computadores que fazem as verificações de forma *online*. Dentre as vantagens na utilização de tais sistemas podem ser citadas a constância nos resultados, a velocidade no qual são realizadas as análises e a descentralização do conhecimento, que antes ficava limitado apenas a especialistas da área.

A literatura apresenta diversas propostas voltadas à automatização de ferramentas para o auxílio no diagnóstico de falhas em máquinas. No âmbito da análise de vibrações podem ser citados os trabalhos de: Marçal e Susin (2005), que propõem um modelo utilizando Lógica *Fuzzy* para detectar desbalanceamentos em máquinas rotativas, baseado no padrão de vibração do sistema rotativo analisado; Samanta e Al-Balushi (2003), que utilizam características do domínio do tempo adicionadas a uma Rede Neural Artificial do tipo *Perceptron Multicamadas (Multi-Layer Perceptron, MLP)* para detecção de ausência ou presença defeitos em rolamentos de máquinas rotativas; e Almeida et al. (2015), que propõem uma forma para a previsão de falhas em equipamentos submetidos a vibração, também utilizando uma MLP.

No que diz respeito a contagem de partículas, existem alguns estudos envolvendo a contagem automática de objetos por microscopia óptica. Geissmann (2013), por exemplo, propõe o desenvolvimento de uma ferramenta *open-source* para contagem de células e elementos circulares. Gonçalves (2009) e Gonçalves, Almeida e Mathias (2014) por sua vez, tratam a contagem de partículas de desgaste

em óleo lubrificante pela norma ISO-4406. Nela a contagem é realizada por meio da foto comparação, que consiste na avaliação de um especialista, confrontando a imagem obtida com um catálogo de imagens. Tal método é bastante eficaz e amplamente aceito, porém apresenta-se subjetivo uma vez que depende da avaliação humana constante, impossibilitando sua completa automatização.

Tratando-se dessa temática para a contagem de partículas, em especial voltado às normativas internacionais para particulados em óleos industriais, notou-se uma carência de trabalhos na área, principalmente, aqueles focados na contagem automática tendo como referência a norma ISO-4406.

Nota-se, portanto, que a contagem e classificação de partículas por tamanho, ainda é uma área promissora para pesquisa. Apesar de existirem *softwares* genéricos que podem ser utilizados para a contagem de partículas de óleo (GEISSMANN, 2013, RASBAND, 2016) ainda não existem ferramentas próprias para a classificação baseadas nas normas correntes. Além disso, as alternativas comerciais atualmente presentes no mercado para a contagem automática ainda possuem um valor elevado, restando às empresas menores a adoção da contagem manual, que além de trabalhosa exigem um alto grau de experiência por parte do usuário.

1.2 Objetivo do Trabalho

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta *open-source* para contagem e classificação automática de partículas em óleos lubrificantes/hidráulicos industriais, de forma *off-line* e de baixo custo, que automatize o processo já existente de contagem manual por microscopia óptica. Acredita-se que seu uso, além de proporcionar maior agilidade para a realização das análises, também o fará de forma mais confiável uma vez que a contagem e o dimensionamento das partículas se ocorrem de forma autônoma.

O projeto é fundamentado tanto na literatura já existente quanto nas normas ISO4406 (1999) e ISO4407 (2002). A escolha acerca do dimensionamento das partículas baseou-se nas normas vigentes, porém poderá ser acrescida, futuramente,

de tamanhos específicos, dada a necessidade de seu usuário para casos específicos.

1.3 Metodologia

O desenvolvimento desse trabalho foi realizado com base nas seguintes etapas:

- Delimitação do problema: nesta etapa foi realizado o levantamento bibliográfico atentando-se às inovações propostas na área e as limitações existentes. Buscou-se também por trabalhos correlatos que fizessem a contagem de partículas mesmo que não aplicados a tribologia.

- Levantamento das normas vigentes e das especificações de *hardware*: uma vez delimitado o escopo do trabalho, esta etapa visou o embasamento teórico via normativas e os componentes necessários para a realização das análises. Para melhor entendimento das formas usuais no processamento do óleo para a análise, foram consultados laboratórios a fim de se obter o conhecimento necessário e os equipamentos mais indicados para a situação.

- Estudo das formas para processamento digital de imagens: com base nos atributos mencionados pela bibliografia, foram estudadas as formas mais eficientes para o processamento das imagens e posterior extração das principais características que serão utilizadas para a contagem estatística das partículas.

- Implementação do protótipo: com intuito de materializar o levantamento realizado, esta fase propôs o desenvolvimento de um protótipo que realizasse todas as etapas para a preparação da amostra e por fim um *software* para a então contagem automática das partículas.

- Verificação dos resultados: foram adquiridos óleos usados com contaminantes para verificar o funcionamento de todo o conjunto. As amostras foram numeradas e analisadas em laboratório via contagem de partículas por foto comparação para então comparação com os resultados obtidos pelo protótipo.

- Considerações finais: são levantados os principais pontos de avanço e também as limitações da pesquisa. Também são apresentadas as propostas para

realização de análises ainda mais rápidas e futuras ferramentas que auxiliem ainda mais o diagnóstico dos óleos verificados.

1.4 Estrutura da Dissertação

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos:

- O Capítulo 1 introduz a temática proposta, a razão da motivação pelo tema, a metodologia que será utilizada e os objetivos do trabalho;
- O Capítulo 2 apresenta conceitos pertinentes à análise de partículas de desgaste, incluindo uma visão geral dos estudos envolvendo o processamento de imagens e dos métodos utilizados para análise;
- O Capítulo 3 trata do desenvolvimento do protótipo, dos requisitos de *hardware* para a filtração das amostras, do desenvolvimento do *software*, a aquisição das imagens, o processamento básico das imagens adquiridas, da forma para calibração do microscópio, e a normatização dos dados gerados;
- O Capítulo 4 aborda os resultados obtidos e sua organização para apresentação;
- O Capítulo 5 apresenta as considerações gerais sobre a pesquisa e as propostas para pesquisas futuras.

2 ANÁLISE DE PARTÍCULAS DE DESGASTE

O atrito é uma das principais causas da redução da vida útil de componentes mecânicos (ZMITROWICZ, 2005), sendo o responsável pelo desgaste e consequente geração de partículas de diferentes tamanhos e formas que, em contato com óleos lubrificantes e hidráulicos, ocasionam sua contaminação (GLAESER, 2001). O uso de óleo em tais condições pode ser atribuído como uma das principais causas do desgaste e da falha de equipamentos hidráulicos (FITCH, 2012).

A lubrificação é tratada como um dos métodos mais eficientes para redução nos fenômenos ocasionados pela fricção entre as superfícies de sólidos e, por consequência, responsável pela maximização da vida útil dos componentes. O campo da tribologia estuda tais fenômenos e sua relação com o desgaste sofrido por tais materiais. É, também, campo da tribologia o estudo de técnicas que visam a identificação e previsão dessas falhas antes que cheguem a um estado crítico (GORYACHEVA, 1998; ROWE, 1983).

As partículas geradas pelo atrito carregam informações únicas a respeito de sua fonte geradora (GONÇALVES; ALMEIDA; MATHIAS 2010). As características dessas partículas bem como sua quantidade, quando relacionadas ao tempo de operação de determinado equipamento, podem fornecer valiosas informações a respeito das condições de operação destes. Tais análises são imprescindíveis para a eficiente realização de manutenções e a consequente redução de gastos (FITCH, 2012; GLAESER, 2001; TIC; LOVREC; ELDER, 2012).

Por ser uma área extensa, o estudo das partículas em óleos industriais pode ser dividido em subcampos que caracterizam seus atributos como sua morfologia e contagem de partículas.

2.1 Contagem de Partículas

Atualmente, existem diversos métodos para a análise de óleos lubrificantes/hidráulicos, sendo o mais empregado para determinar as condições de um dado fluido, a contagem das partículas (TIC; LOVREC; ELDER, 2012). A contagem de partículas é um procedimento já bastante utilizado pela manutenção preditiva em diversas áreas que fornece, de forma simples, as condições gerais do fluido analisado. Seu uso se dá principalmente pela sua assertividade, baixo valor para realizar a análise, e tempo relativamente baixo para diagnóstico (TIC; LOVREC; ELDER, 2012).

A contagem de partículas busca obter o grau de pureza de um determinado óleo, quantificando o particulado em classes. A quantidade pode indicar, dentre diversos fatores, a progressão na taxa de desgaste. Quanto às suas dimensões, a importância se dá principalmente para o entendimento da atual severidade do desgaste já sofrido (GONÇALVES; ALMEIDA; MATHIAS 2010). Com as informações do grau de pureza é possível também definir planos de manutenção e a melhor hora de intervir para a correção das características do mesmo.

A partir da contagem das partículas é possível definir planos de manutenção e estimar a vida de componentes sabendo quando realizar a troca do óleo lubrificante. A Figura 2 apresenta lista de recomendações de limpeza de óleo com base na quantidade de partículas encontrada conforme estabelece o padrão ISO.

OPERATING PRESSURE	<1,500 PSI	1,500-2,500 PSI	>2,500 PSI
Servo Valve	16/14/12	15/13/11	14/12/10
Proportional Valve	17/15/12	16/14/12	15/13/11
Variable Volume Pump	17/16/13	17/15/12	16/14/12
Cartridge Valve	18/16/14	17/16/13	17/15/12
Fixed Piston Pump	18/16/14	17/16/13	17/15/12
Vane Pump	19/17/14	18/16/14	17/16/13
Pressure/Flow Control Valve	19/17/14	18/16/14	17/16/13
Solenoid Valve	19/17/14	18/16/14	18/16/14
Gear Pump	19/17/14	18/16/14	18/16/14

Figura 2 - Recomendações de limpeza de óleo para cada tipo de componentes.

Fonte: Casey (2012)

2.1.1 Tipos de Contagem de Partículas

Existem, atualmente, três principais métodos para a contagem das partículas de forma normatizada:

- 1) Contagem por microscopia óptica: foi o primeiro método utilizado (MAYER, 2006). Consiste na separação de uma parte significativa da amostra e a contagem de forma manual em microscópio óptico. A norma ISO4407 (2002) define os procedimentos necessários para a preparação da amostra, do microscópio, da amplificação necessária, e do método estatístico correto para contagem.
- 2) Contagem óptica automática de partículas: é o modo mais comum atualmente para contagem de partículas (MAYER, 2006). A tecnologia dos equipamentos envolvida para contagem automática está dividida em dois grupos, ambos normatizados pela ISO11500 (2012):
 - Por bloqueio de luz: as partículas atravessam uma luz branca que gera uma sombra na fotocélula posicionada na outra extremidade, onde sua tensão é proporcional a luminosidade recebida. As sombras das partículas variam com seus tamanhos fazendo com que a fotocélula varie sua tensão. A Figura 3 ilustra o seu funcionamento.

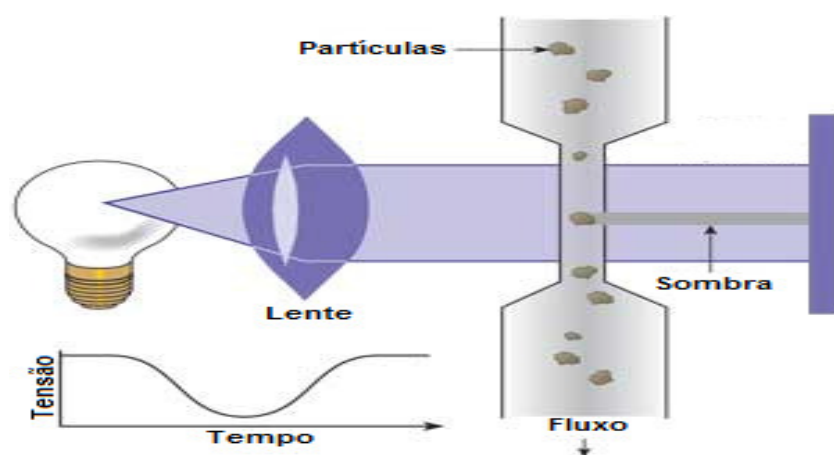


Figura 3 – Conceito de funcionamento do contador por bloqueio de luz.

Fonte: NORIA CORPORATION (2016)

- Por Laser: similar ao método por bloqueio de fonte luminosa, uma fotocélula posicionada no lado oposto ao laser altera a sua tensão em

função da difusão causada pelo bloqueio da partícula. A Figura 4 ilustra seu funcionamento.

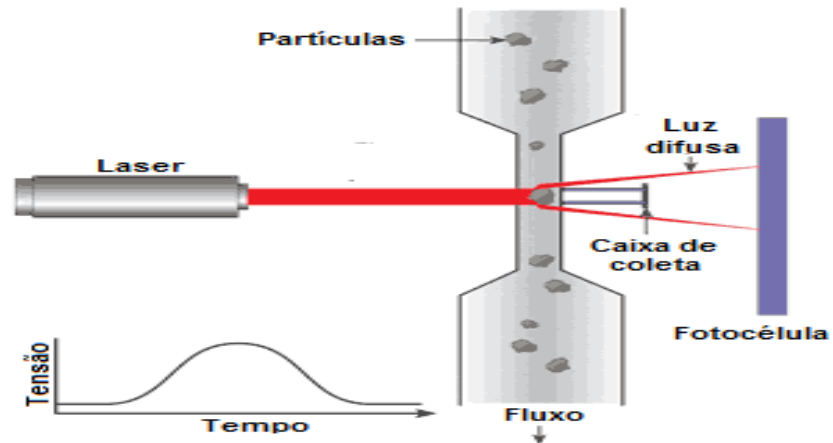


Figura 4 - Conceito de funcionamento do contador por refração a laser.

Fonte: NORIA CORPORATION (2016)

- 3) Contagem de partículas por bloqueio de poros: é utilizada uma membrana que, ao ser bloqueada pelas partículas, acarreta na mudança de seu fluxo. Tal variação é medida em um dado intervalo de tempo mantendo-se a pressão constante. A Figura 5 ilustra seu funcionamento.

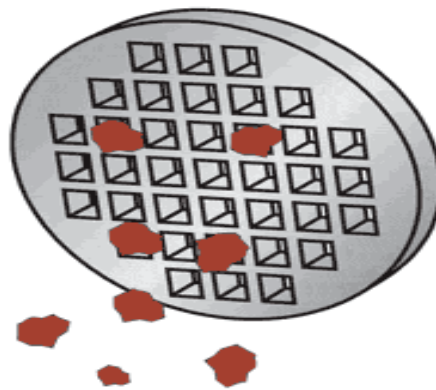


Figura 5 – Membrana bloqueada por partículas.

Fonte: NORIA CORPORATION (2016)

Ainda, no que se diz à manutenção industrial, como os custos para a aquisição de equipamentos para a contagem automática possuem valores elevados, nota-se o uso de uma variação do método de contagem de partículas manual que é feito pela comparação da amostra corrente com um atlas de partículas para fornecer

os resultados. Apesar desta abordagem não ser normatizada, ela é amplamente utilizada, pois oferece uma análise rápida que, mesmo sendo pouco precisa, satisfaz as necessidades atuais para manutenção. É importante salientar que tal satisfação do mercado se dá pela disponibilidade atual de técnicas de contagem com preços atrativos. A foto-comparação fornece um indicador da sujidade do óleo e não a real contagem das partículas, conforme a normas vigentes, justificando a necessidade da presente pesquisa. A Figura 6 ilustra uma imagem de referência e a classe correspondente nas normas ISO4406 e SAE AS4059E (2011).

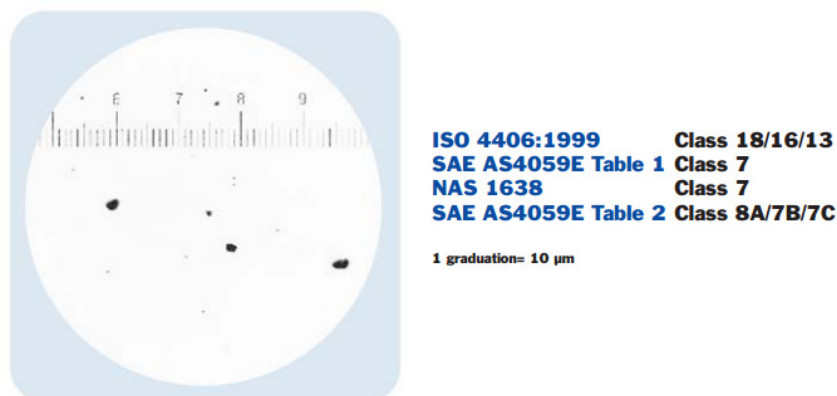


Figura 6 – Amostra de uma partícula com a classe correspondente.

Fonte: SAE AS4059E (2011)

No caso da Figura 6, por exemplo, o especialista verifica no microscópio e compara com o atlas a imagem que mais se assemelha às condições verificadas.

2.2 Análise Morfológica

Na análise morfológica, busca-se saber as origens dos desgastes e suas possíveis causas. Complementando o método de contagem e classificação por tamanho citado anteriormente, a análise morfológica permite o reconhecimento da fonte do problema de contaminação além do modo que como ela está ocorrendo, permitindo, assim, intervenção ainda mais assertiva. Os principais atributos morfológicos que são estudados para diagnóstico são: sua composição, para se obter informações quanto a sua fonte; e o formato, no qual é possível estimar o

modo do desgaste (KATO, ADASHI, 2001). Ainda, as partículas que são geradas pelo desgaste podem ser divididas em desgaste por fricção, deslizamento severo, fadiga e por abrasão, conforme ilustrado na Figura 7. A seguir serão apresentadas as características de cada uma:

- Desgaste por fricção: geradas pelo atrito normal do equipamento, essas partículas são encontradas, tipicamente, em dimensões entre 0.5 à 15µm e, tipicamente, são provenientes do envelhecimento natural do maquinário.
- Desgaste por deslizamento severo: essas partículas surgem pela falta de lubrificação ou no excesso da carga ou velocidade.
- Desgaste por fadiga: essas partículas são geradas pela concentração cíclica de tensões acima da suportada pelo material, causando em sua estrutura deformação plástica.
- Desgaste por abrasão: essas partículas são formadas pela penetração de uma superfície em outra, possuem forma de cavacos e suas dimensões variam em torno de 2-5µm de espessura por 25-200µm de comprimento.

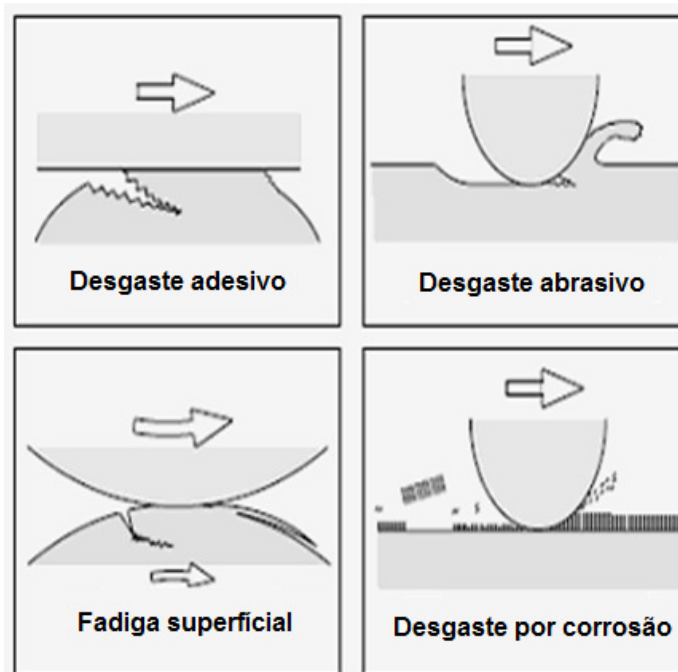


Figura 7 - Os quatro principais tipos de desgaste.

Fonte: Kato, Adashi (2001)

Reconhecer os tipos de desgastes não é uma tarefa trivial e, mesmo especialistas com bastante vivência na área enfrentam problemas na correta identificação. Trabalhos como o de Gonçalves, Almeida e Mathias (2009), Laghari e Ahmed (2009), ISA et al. (2013) estudam formas para minimizar o tempo envolvido e minimizar os custos com tal tipo de análise por meio de métodos computacionais.

A Figura 8 apresenta as possíveis análises que são possíveis para óleos industriais. A adoção de cada procedimento é vinculada às possibilidades/necessidades de cada empresa, onde seu uso dependerá principalmente de qual programa de manutenção será adotado.

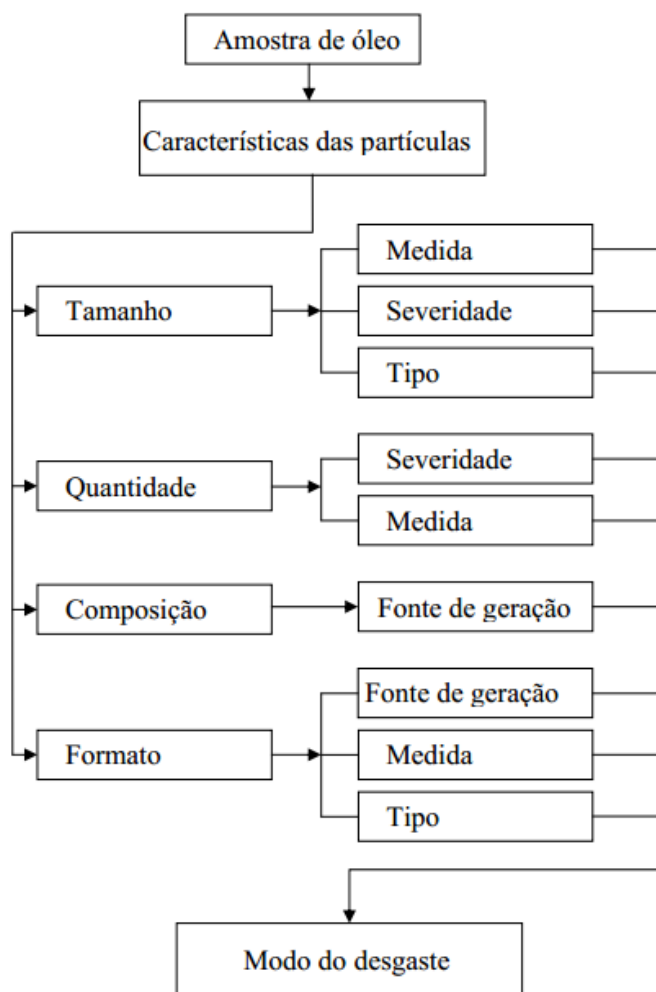


Figura 8 – As informações que são obtidas com as características das partículas.

Fonte: Gonçalves (2009)

2.3 Métodos para Análise de Óleo

Os métodos para análise de óleo lubrificante/hidráulico podem ser divididos, basicamente, em *online* e *off-line*.

Nos métodos *online*, um componente para análise é instalado no sistema hidráulico/lubrificante do equipamento mecânico que se deseja analisar, sendo a análise realizada continuamente durante o funcionamento do equipamento. Esse método de análise apresenta a vantagem da mensuração ser feita em tempo real, possibilitando que possíveis falhas sejam detectadas em seu estágio inicial. Uma das desvantagens deste método é a pouca quantidade de dados disponibilizados por este método e a maior suscetibilidade a erros de mensuração ocasionados, por exemplo, com a contagem de bolhas de água e ar (GONÇALVES, 2009, TIC, 2012).

Nos métodos de análise *off-line*, amostras de óleo precisam ser coletadas para que uma análise em laboratório seja executada. Este tipo de análise é mais detalhado e preciso, quando comparada com os métodos *on-line* (WESTIN; MARKLUND; SANDSTRÖM, 2013, LOVREC; TIC, 2012). A Figura 9 ilustra a forma de funcionamento dos métodos de análise.

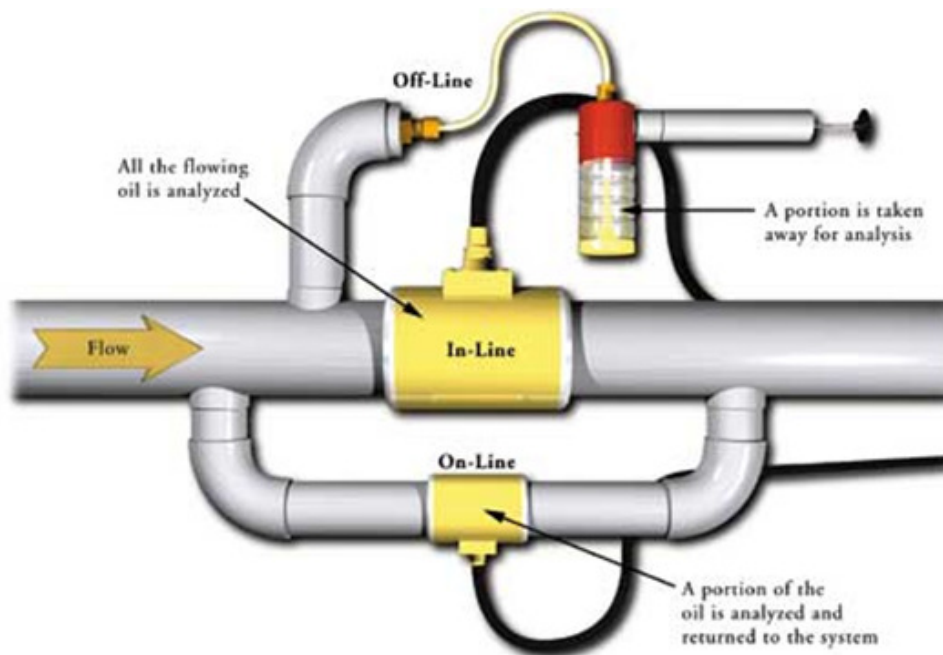


Figura 9 – Método de análise on-line e off-line.

Fonte: Gebarin (2016)

2.4 Processamento de Imagens

O uso de técnicas de processamento digital de imagens para o desenvolvimento de sistemas especialistas tem se revelado um campo de estudo promissor, pois possibilita a elaboração de ferramentas robustas com baixo investimento. Segundo Mongelo (2012) o processamento de imagens pode ser definido conforme a representação genérica da Figura 10.

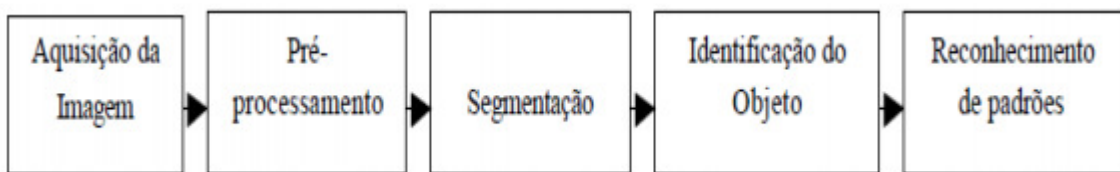


Figura 10 - Principais etapas no processamento de imagens.

Fonte: Mongelo (2012)

Para Mongelo (2012), a aquisição de imagens possui dois componentes cruciais: o *hardware* e o *software*. O *hardware* pode ser compreendido como a câmera, o computador e o sistema de iluminação. Já no *software* estão incluídos os gerenciadores que possibilitam a transdução através dos hardwares das imagens em valores passíveis de cálculos matemáticos.

No pré-processamento são realizadas operações matemáticas na imagem a fim de se padronizar os dados para a fase posterior, tais como: nitidez, correção da iluminação, remoção de faixas de frequências desnecessárias, etc.

A segmentação é responsável por salientar os objetos que serão estudados. Para essa divisão, são separados os objetos (*foreground*) do fundo da imagem (*background*).

No reconhecimento de padrão, cada objeto é processado e dele são extraídos seus principais atributos. Para se trabalhar com formas geométricas diversas geralmente são extraídos: área total, perímetro, diâmetro máximo, alongamento, circularidade, dentre outros.

Existem também diversas literaturas e plataformas livres que fornecem bases sólidas para o desenvolvimento de aplicações na área. A biblioteca ImageJ, por exemplo, do Instituto Nacional de Saúde, NIH, nos Estados Unidos possibilita a abstração das teorias do processamento de imagens clássicos, evitando em contrapartida a desenvolvimento de todo o código do zero (RASBAND, 2016). Outra vantagem de sua utilização se dá por ser uma biblioteca de código aberto, isto é, pode ser acessada e modificada livremente, além de possuir vasta literatura na área, especialmente no meio acadêmico. Toda a biblioteca foi desenvolvida em Java e possui diversas opções para integração com as necessidades específicas do desenvolvedor, seja pelo uso de plug-ins, ou pela importação de toda biblioteca para uma nova aplicação. A Figura 11 apresenta sua interface gráfica básica.

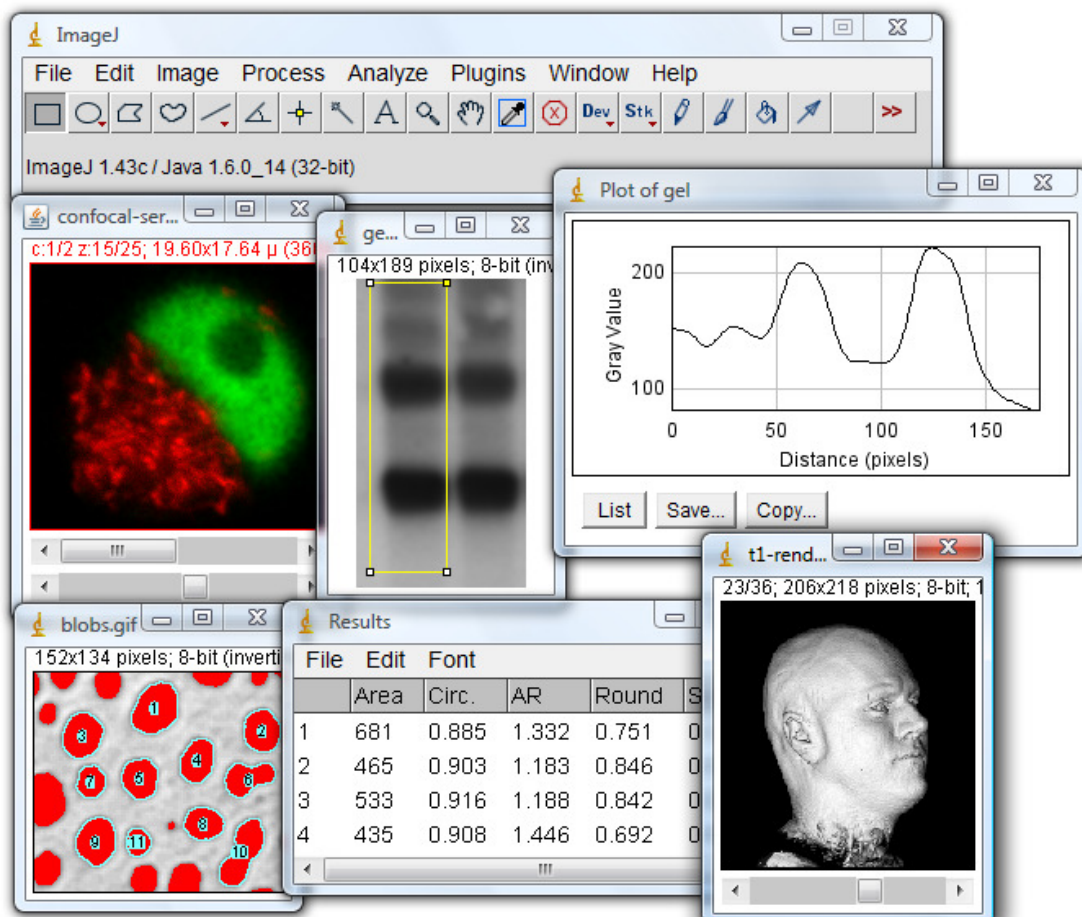


Figura 11 - Interface básica do ImageJ.

Fonte: Rasband (2016)

3 DESENVOLVIMENTO

Para facilitar o desenvolvimento e entendimento dos procedimentos utilizados, o sistema aqui proposto foi desenvolvido em duas etapas. A primeira refere-se ao *hardware*, tendo início com o óleo coletado indo até a membrana pronta para análise no microscópio. Essa primeira etapa é idêntica à usada em laboratórios para análise. A segunda etapa refere-se ao desenvolvimento do *software*, nela são abordados os requisitos de *software*, especificação da câmera para digitalização da imagem, o procedimento utilizado para a contagem e, por fim, a normatização da contagem para as normas correntes. A Figura 12 detalha os passos que foram necessários para desenvolvimento do protótipo.

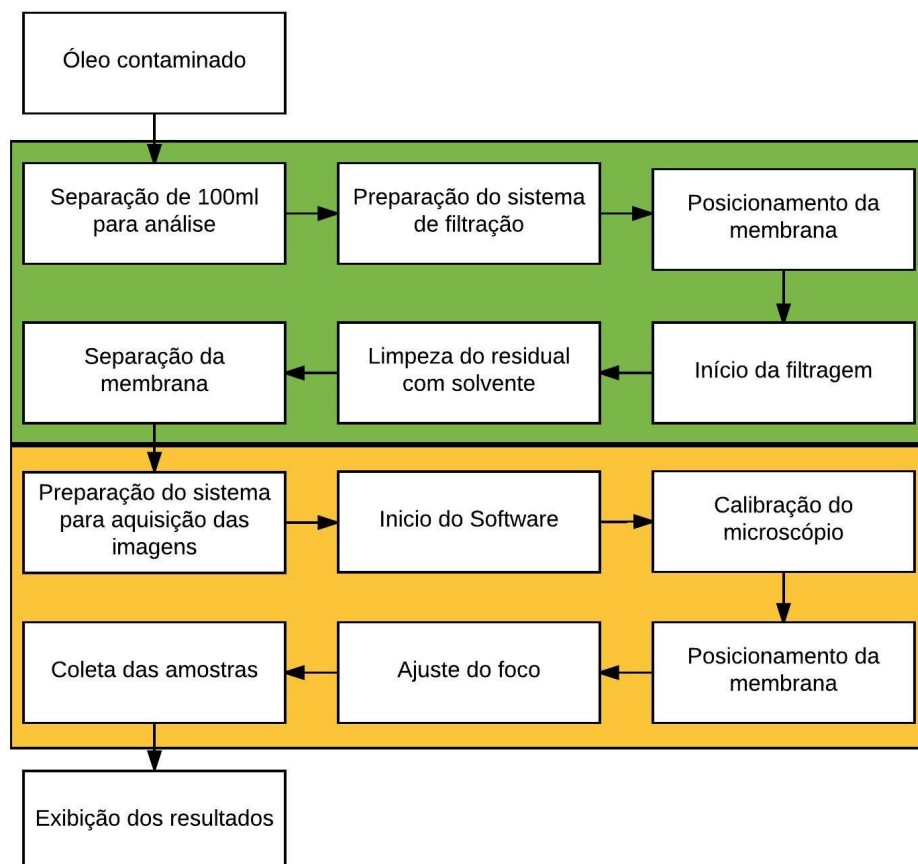


Figura 12 – Arquitetura genérica (área em verde representa as etapas de preparação da membrana; área em amarelo representa as etapas de software)

3.1 Sistema de Filtração

A preparação das membranas para as análises foram realizadas conforme norma ISO4407 (2002) e ARP598C (1999). Para isso, foi adquirido um conjunto de filtração composto por:

- Kit de filtração do tipo millipore com área útil de filtração de 900mm^2 e frasco kitasato;
- Membrana de éster de celulose lisa de 47mm de diâmetro e poros de $1.2\mu\text{m}$ da marca Sartorius;
- Bomba vácuo dois estágios da marca Dosivac modelo Dvr-II;
- Provetas da marca Unilab de $100\text{ml} \pm 1\text{ml}$.

A Figura 13 apresenta os componentes utilizados para preparação da membrana e posterior análise.

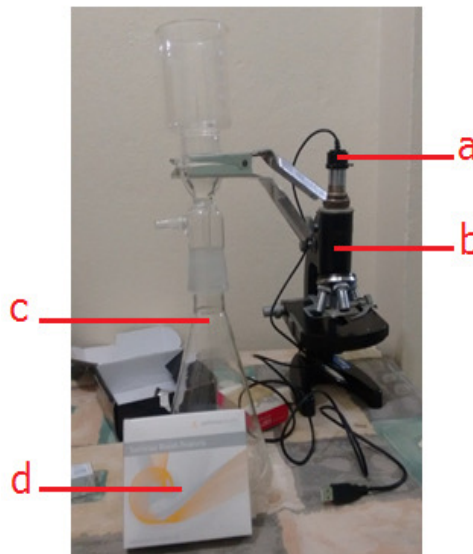


Figura 13 - Sistema para filtração e análise composto por: (a) câmera USB; (b) microscópio; (c) kit de filtração; (d) membranas

A membrana gradeada não foi empregada uma vez que o *software* define a área de contagem através do tamanho do próprio *frame*, outrossim, as grades da membrana seriam visualizadas pelo software como partículas. A Figura 14 apresenta a membrana utilizada.



Figura 14 – Membrana de éster de celulose lisa.

A preparação das amostras é uma das etapas mais delicadas em toda a análise, pois ela definirá a distribuição e representação das partículas e, caso possua contaminantes, pode comprometer toda a análise. Para sua realização, além do acompanhamento fiel aos itens das normas ISO citadas, também deverão ser tomados procedimentos que garantam a não contaminação do ambiente como, por exemplo, a adoção da ISO14644.

A membrana deverá ser posicionada no *kit* de filtração. A amostra de óleo deverá ser separada e agitada constantemente a fim de não se ter sedimentação. Uma quantidade de 100ml de amostra recém agitada é separada na proveta e depois inserida no conjunto de filtração. Ao ligar a bomba vácuo, o fluido atravessará pela membrana depositando-se no kitasato. Dependendo da viscosidade do óleo, o processo de filtração poderá ser mais demorado em alguns casos. Para auxiliar na filtração, o uso de solventes poderá ser empregado, sendo que, neste experimento, foi ministrado octano para diminuição da viscosidade. Ao final do procedimento todo o óleo presente no kitasato poderá ser descartado e a membrana deverá ser separada para posterior análise.

Foi adquirido um microscópio binocular Tasco LMSMB com amplificação entre 40x à 1600x, com retroiluminação a LED. Anteriormente foi utilizado um outro modelo de microscópio que possuía iluminação por espelho, porem a inconstância na iluminação impossibilitava em alguns casos sua binarização. Para captura das

imagens, foi acoplado ao microscópio uma câmera da marca Celestron 2MP CMOS, proporcionando zoom óptico na ocular de 10x e conexão USB2.0.

3.2 Software

O programa foi desenvolvido na plataforma Java utilizando a IDE Eclipse ambos com sistema x86 utilizando para a aquisição das imagens componentes *open-source*. Para o processamento das imagens foi utilizada a biblioteca do *software* ImageJ. A escolha se deu pela robustez, vasta literatura disponível e também por ser um *software* de código aberto.

O Intuito ao desenvolver a ferramenta foi a de torná-lo o mais prático possível para o especialista. Apesar de o sistema tratar da análise de partícula de forma autônoma, ainda assim, é necessário a experiência de um especialista em algumas etapas do processo.

Para a operação, é necessária a intervenção do usuário em três etapas:

- Na aquisição da imagem;
- No processamento básico;
- Na decisão pelo uso ou não das *características* que foram extraídas.

A Figura 15 mostra o fluxograma básico de funcionamento do protótipo e a seguir o detalhamento de cada etapa.

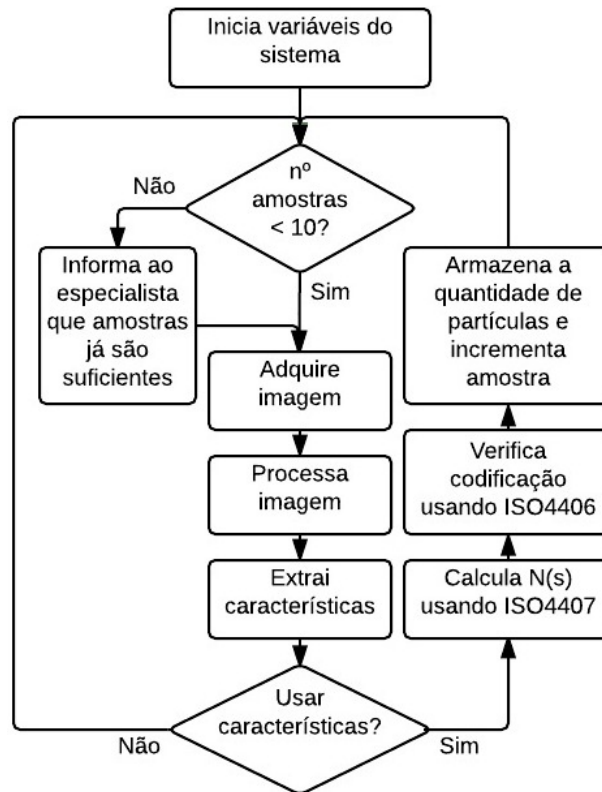


Figura 15 - Fluxograma da rotina principal do software.

3.2.1 Aquisição da Imagem

Foi utilizada a biblioteca Jmyron para a aquisição das imagens da câmera para dentro do ambiente *Java*. Através dela é gerado um *frame* com a imagem original e, ao mesmo tempo, é enviada uma cópia para o núcleo do ImageJ para binarização. Para facilitar o ajuste do limiar, foi adicionada uma barra de rolagem de modo a possibilitar também a modificação desse valor manualmente. O algoritmo para limiarização utilizado é o presente dentro da própria biblioteca do ImageJ. O especialista é responsável por ajustar o microscópio em sua melhor situação, atentando-se para o foco e a luminosidade.

Em todas as imagens processadas foi adotado como padrão *frames* de 640x480 pixels. A área útil de cada amostra é obtida pelo frame da câmera, no caso específico do *software* 640x480, multiplicado pelo quadrado do fator de calibração. Para facilitar a análise futura das membranas e a troca de informações entre os usuários, foi desenvolvido um módulo para captura de imagens e outro para carregar

tais imagens pelo *software*. Nele as imagens já são salvas com o tamanho exato necessário para análise e as informações do tipo de lente.

A Figura 16 mostra a interface com usuário para aquisição das imagens e suas principais funções. Na posição (a) a imagem original; (b) imagem binarizada; (c) botão para reinicialização da análise; (d) área de exibição das partículas reais contadas e a quantidade de áreas contadas; (e) exibição do resultado da contagem conforme norma ISO4406; (f) área de exibição das informações de calibração das lentes, área de amostragem e contagem das partículas a cada 100ml; (g) opção de seleção a partir de imagens armazenadas no computador; (h) confirmação da imagem corrente.

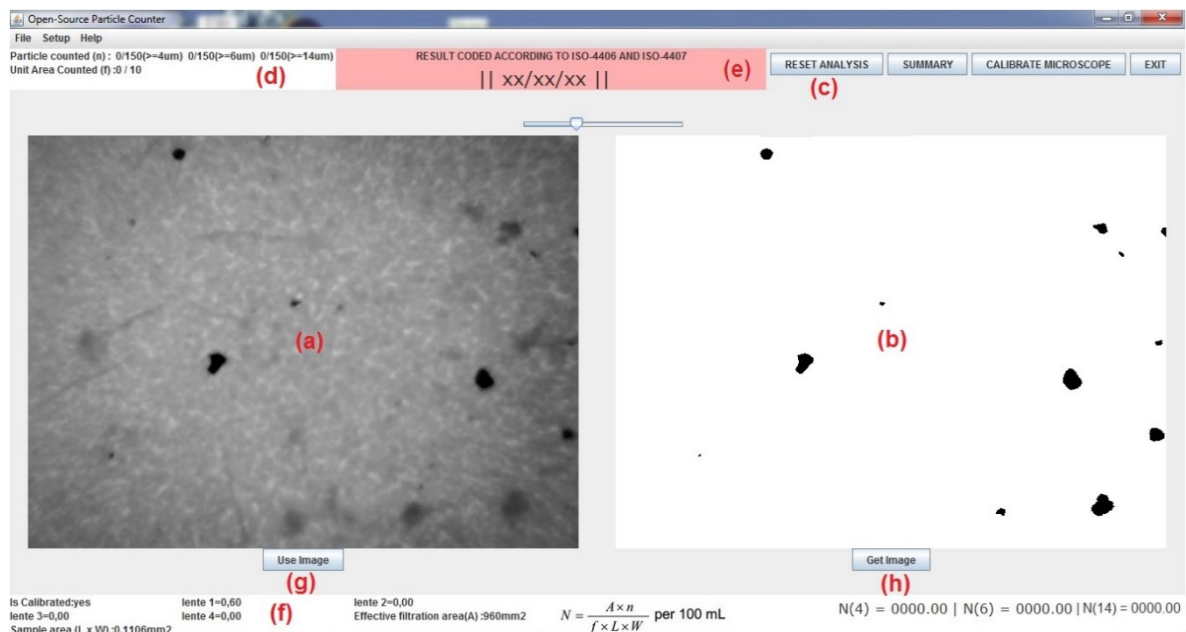


Figura 16 - Interface para aquisição das imagens.

3.2.2 Processamento Básico

Nessa etapa o especialista pode fazer pequenas correções na imagem para melhorar a qualidade das partículas obtidas na binarização antes que as mesmas sejam analisadas. As funções iniciais definidas nesse projeto são: erodir e dilatar a imagem. A Figura 17 ilustra a interface com usuário para execução do processamento básico e suas principais funções. Na posição (a) o botão para erodir

a imagem; (b) botão para dilatar a imagem; (c) botão para confirmar a imagem corrente e avançar para próxima etapa; (d) imagem após etapas do processamento.

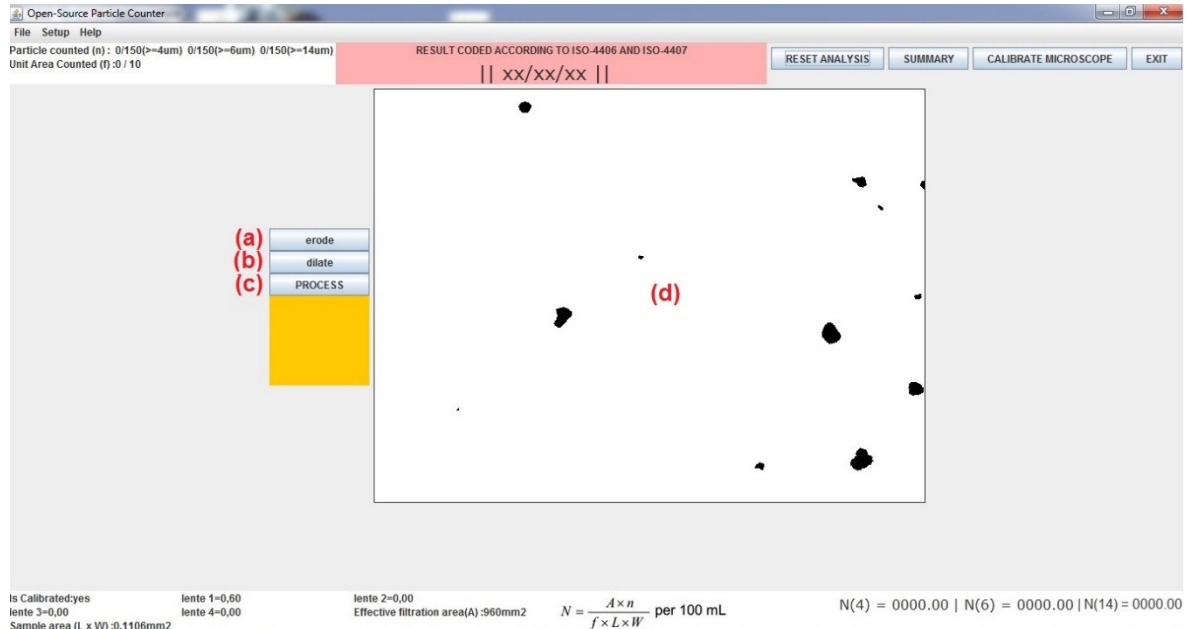


Figura 17 - Interface para processamento básico das imagens

3.2.3 Decisão pelo Uso das *Características Extraídas*

Esta é a última etapa para avaliação do usuário e, também, aquela que fornece o maior número de informações. Apesar do foco do trabalho ser na contagem de partículas e, portanto, utilizar apenas o diâmetro máximo de Feret para classificação, são fornecidas outras características que podem auxiliar o especialista na decisão do uso da amostra como:

- Número da partícula: Apresenta o número de cada partícula e sua respectiva posição na tela.
- Diâmetro mínimo e máximo de Feret: é definido como a distância entre dois planos paralelos que restringem perpendicularmente o objeto (RASBAND, 2016). A figura 18 ilustra os diâmetros máximo e mínimo de Feret para uma dada partícula.

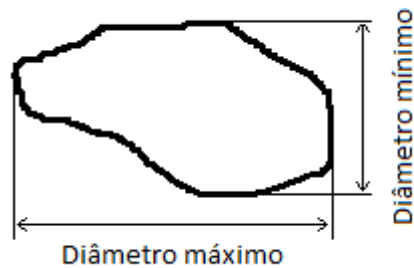


Figura 18 – Ilustração dos diâmetros máximo e mínimo de Feret.

- Área da partícula: é a área de cada partícula em μm^2 .
- Circularidade: é o quão próxima uma partícula se assemelha a um círculo. Quanto mais próximo o valor de 1 mais circular será a partícula.
- Perímetro: é a medida do comprimento do contorno de cada partícula.
- Elongação: é a relação entre o diâmetro máximo e o mínimo de uma partícula.

A Figura 19 apresenta a interface com usuário onde é possível visualizar as informações sobre as partículas contadas e suas principais funções. Na posição (a) as partículas que foram contadas e suas respectivas numerações; (b) botão para usuário decidir por utilizar a amostra; (c) botão para usuário declinar a amostra; (d) tabela com as características das partículas analisadas; (e) quantidade de partículas contadas classificadas por tamanho.

Open-Source Particle Counter

File Setup Help

Particle counted (n) : 0/150(>=4um) 0/150(>=6um) 0/150(>=14um)

Unit Area Counted (f) : 0 / 10

RESULT CODED ACCORDING TO ISO-4406 AND ISO-4407

|| xx/xx/xx ||

RESET ANALYSIS SUMMARY CALIBRATE MICROSCOPE EXIT

NUMBER	MIN FE.	FERET	AREA	CIRCUL.	PERIME	ELONG.
1	7.80	9.18	52.20	0.95	26.22	0.95
2	7.71	11.27	48.96	0.75	28.62	0.68
3	3.60	7.02	16.92	0.75	16.89	0.51
4	2.55	5.09	8.28	0.94	10.53	0.50
5	2.91	4.02	7.20	0.90	10.04	0.72
6	3.60	6.00	14.76	0.79	15.33	0.60
7	11.46	15.75	112.68	0.73	44.10	0.73
8	12.16	15.57	137.52	0.86	44.95	0.78
9	9.60	11.83	78.84	0.89	33.42	0.81
10	1.70	2.55	2.16	0.92	5.44	0.67
11	13.92	16.71	155.16	0.74	51.38	0.83
12	5.19	7.25	23.40	0.81	19.08	0.72

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

>= 4um : 11 particles
>= 6um : 9 particles
>= 14um : 3 particles

Is Calibrated:yes
lente 1=0.60
lente 3=0.00
Sample area (L x W) :0,1106mm2

lente 2=0.00
Effective filtration area(A):960mm2

$N = \frac{A \times n}{f \times L \times W}$ per 100 mL

N(4) = 0000.00 | N(6) = 0000.00 | N(14) = 0000.00

Figura 19 - Interface com informações sobre as partículas contadas.

3.2.4 Normatização

Apesar do *software* reconhecer a maior parte das partículas presente na amostra, para a classificação é importante apenas as partículas com diâmetro mínimo de: $\geq 4\mu\text{m}$, $\geq 6\mu\text{m}$ e $\geq 14\mu\text{m}$. Um ponto que gerou confusão na interpretação da norma foi a separação das partículas por categoria. A contagem das partículas não está limitada à próxima categoria. Assim, as partículas maiores que $4\mu\text{m}$, incluem as de dimensões superiores, da mesma forma como na contagem para as partículas maiores ou iguais as $6\mu\text{m}$, que incluem as partículas de $14\mu\text{m}$. A classificação é obtida por meio do total de partícula de cada dimensão, conforme pode ser visto no exemplo da Tabela 1.

Tabela 1 - Total de partículas dentro das especificações divididas em classes

PARTICLE	COUNT
$\geq 4\mu\text{m}$	40
$\geq 6\mu\text{m}$	16
$\geq 14\mu\text{m}$	8

Ao decidir por utilizar a amostra, aplica-se a seguinte equação para realizar a contagem estatística das partículas.

$$N = \frac{A \times n \times 10^5}{f \times L \times W \times V} \text{ per } 100\text{ml} \quad (1)$$

Na equação (1) tem-se as seguintes variáveis:

- A: correspondente à área útil da membrana (mm^2).
- n: correspondente ao número de partículas contadas.
- f: correspondente ao número de *frames* analisados.
- L: correspondente ao comprimento de cada *frame* analisado (mm)
- W: correspondente a largura de cada *frame* analisado (μm).
- V: correspondente ao volume de óleo utilizado (ml).

Para simplificação das variáveis e o cálculo envolvido em cada iteração, decidiu-se por usar as mesmas unidades de área nas variáveis. Como a membrana utilizada não possui grade, a mesma não perde área útil e por isso também (L x W)

foi considerado como a área de cada amostragem. Como a norma define o uso constante de 100ml para realização das amostras, decidiu-se também pela remoção da variável volume. O 10^5 da equação, que servia para a normalização dos valores, com a utilização das mesmas unidades e a desconsideração da variação no volume de óleo, pode ser removida. Assim, a fórmula da equação (1) foi reduzida a:

$$N = \frac{A \times n}{f \times a} \text{ per } 100\text{mL} \quad (2)$$

Na equação (2) tem-se a seguinte variável:

- a: correspondente à área do *frame* analisado (mm^2).

Uma vez contadas as partículas, torna-se necessária a codificação dos valores obtidos conforme norma internacional. A Tabela 2 apresenta as regras para contagem. É importante salientar que os resultados apresentados pelas equações 1 e 2 são em partículas por 100mL e a tabela segundo a norma ISO é para partículas por 1mL.

Tabela 2 – Intervalo de contagem usado para codificação das amostras

Fonte: ISO4406 (1999)

Number of particles per millilitre		Scale number
More than	Up to and including	
2 500 000		> 28
1 300 000	2 500 000	28
640 000	1 300 000	27
320 000	640 000	26
160 000	320 000	25
80 000	160 000	24
40 000	80 000	23
20 000	40 000	22
10 000	20 000	21
5 000	10 000	20
2 500	5 000	19
1 300	2 500	18
640	1 300	17
320	640	16
160	320	15
80	160	14
40	80	13
20	40	12
10	20	11
5	10	10
2,5	5	9
1,3	2,5	8
0,64	1,3	7
0,32	0,64	6
0,16	0,32	5
0,08	0,16	4
0,04	0,08	3
0,02	0,04	2
0,01	0,02	1
0,00	0,01	0

3.3 Calibração e Ajuste das Configurações do Microscópio

Para o ajuste da escala do microscópio foi utilizado uma lâmina de calibração e desenvolvido um módulo para aquisição da imagem para aferição. A finalidade é a obtenção de um fator de calibração por unidade de pixel. Os valores obtidos são salvos em um arquivo separado para que, mesmo reiniciando o software, os dados não sejam perdidos. Existe também a opção para escolha da lente evitando, assim, novos ajustes a cada troca.

A Figura 20 exibe uma partícula de 70 μ m de diâmetro, proveniente da lâmina de calibração, que foi utilizada para definição dos valores de aferição.

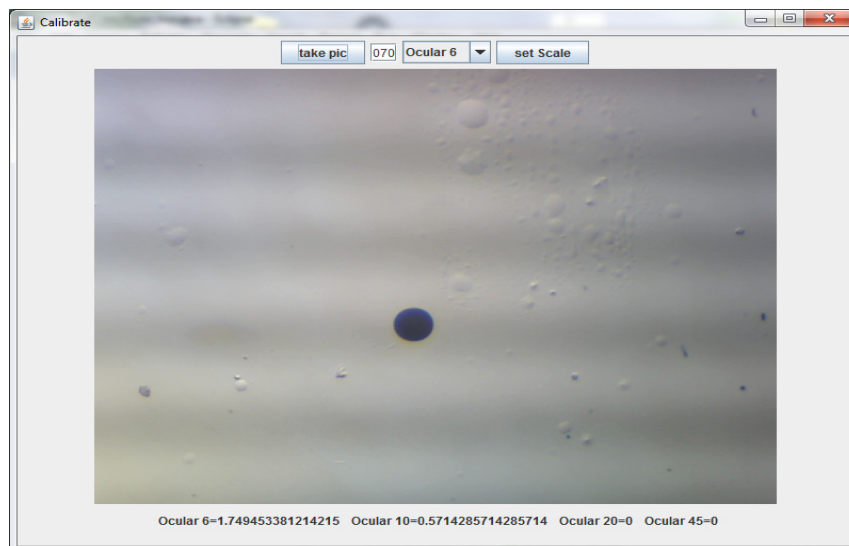


Figura 20 - Modulo para calibração do microscópio

A calibração do *software* deve ser realizada em intervalos regulares ou imediatamente quando houver a troca de qualquer parte dos equipamentos utilizados. Os procedimentos detalhados para calibração poderão ser visualizados em detalhes no Apêndice B.

Para facilitar na validação das análises e troca de informações entre os usuários, foi implementada uma área própria para a aquisição de fotos e uma função no *software* para seleção do uso das imagens provenientes da câmera digital ou de um arquivo digital. Para tal, alguns fatores devem ser levados em conta. O tamanho

da imagem deve ser sempre 640x480 e o valor do fator de calibração deve sempre ser ajustado, ou com uma amostra de referência, ou com o envio do fator em conjunto. Tais informações são vitais, pois para o cálculo do tamanho das *partículas* e posterior estatística das quantidades, o tamanho e a área das imagens são fundamentais e necessários.

Mesmo com o uso de diferentes sistemas para aquisição de imagens, notou-se nas amostras geradas a formação de áreas escuras que comprometiam sua binarização. Para contornar o problema, foi implementado um *offset* regulável que descaracteriza uma fração da borda da imagem definida pelo usuário. A escolha do melhor *offset* deve ser tomada levando-se em consideração o tipo de equipamento utilizado e a iluminação disponível. Recomenda-se contudo cautela na aplicação do *offset* pois, a área útil para contagem diminui drasticamente com seu uso, necessitando assim de mais imagens para análise. A Figura 21 exemplifica o funcionamento do *offset*.

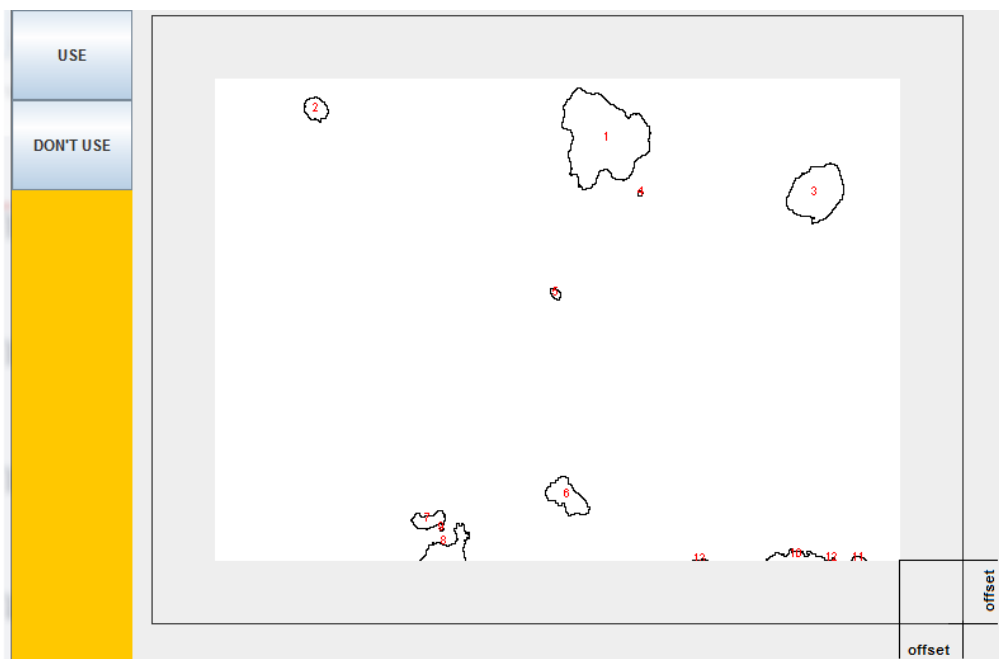


Figura 21 - Definição do offset.

4 TESTES E RESULTADOS

Os testes foram conduzidos em duas fases distintas: coleta das amostras e análise das amostras coletadas. Essas fases são descritas nas subseções seguintes.

4.1 Coleta das Amostras

Para o auxílio durante os procedimentos de preparação da membrana, a primeira etapa dos testes foi realizada dentro de um laboratório especializado em análise de óleos com o acompanhamento de um técnico. Para comparar os resultados, optou-se pela realização de duas análises do mesmo óleo, uma feita pelo técnico e analisada dentro do laboratório, e outra feita de acordo com o presente trabalho utilizando o *software* para análise. As amostras de óleo utilizadas também foram fornecidas pela empresa e, para preservar a confidencialidade de seus clientes, essas amostras consistiram na mistura de diversos óleos.

As amostras foram separadas em dois frascos com 300ml cada, contendo óleos de características diferentes. Nos dois frascos foram agregados os óleos mais límpidos disponíveis e de viscosidade variada, a fim de se obter um menor grau de particulados. Na segunda amostra, porém, adicionou-se uma fração dos óleos disponíveis com maior viscosidade e com mais contaminantes. O foco era obter dois tipos de óleos com características distintas, tanto em seu número de partículas, quanto em suas propriedades como viscosidade e tonalidade.

Após o preparo das amostras, foram preparados os sistemas para filtração, a primeira amostra de óleo foi dividida em duas frações de 100ml cada. As membranas utilizadas em ambos os sistemas de filtração foram de éster de celulose de 1,2 μ m de poro. Na análise realizada pelo laboratório foi empregada membrana quadriculada, que é o padrão geralmente utilizado, visto que fornece referências de dimensão e espaço para contagem. A membrana utilizada pela presente pesquisa foi a do tipo lisa, uma vez que o *software*, quando corretamente calibrado, utiliza o próprio *frame* da imagem coletada como referência de quadro. O óleo foi colocado

no sistema de filtração e a bomba de vácuo foi acionada. Para auxiliar na filtração, hexano foi empregado como solvente a fim de se diminuir a viscosidade. Ao final utilizou-se também o solvente para limpar o restante de óleo dos componentes e garantir que todo o particulado presente no sistema ficasse retido na membrana. A Figura 22 mostra os dois conjuntos para filtração em funcionamento.



Figura 22 – Sistemas para filtração utilizados na análise.

Após a finalização da primeira amostra de óleo, repetiu-se o mesmo procedimento para a segunda amostra. As membranas lisas foram numeradas e devidamente guardadas para análise no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté. As membranas quadriculadas foram encaminhadas a outro especialista que efetuou a classificação dentro do próprio laboratório. A Figura 23 ilustra o técnico realizando a análise.



Figura 23 – Técnico realizando análise nas membranas.

4.2 Análise das Amostras

Com as membranas para análise e os dados fornecidos pelo laboratório, iniciaram-se os testes no laboratório da universidade de Taubaté. O primeiro passo foi o ajuste do sistema de microscópio com a lâmina de calibração, cujo procedimento é apresentado em detalhes no Apêndice B. A membrana, então, foi cuidadosamente posicionada no microscópio e seu foco e iluminação ajustado da melhor forma possível. A coleta das imagens foi realizada em 10 posições aleatórias e não repetidas, de cada uma das membranas, utilizando o equipamento também citado anteriormente.

A análise foi realizada pelo fluxo normal do *software* e as principais modificações na imagem são ilustradas na Figura 24. Os únicos pontos que necessitaram da avaliação humana foram: na primeira etapa, que consiste na posição para análise e a correta limiarização; e a decisão pelo uso ou não dos valores calculados pelo *software*.

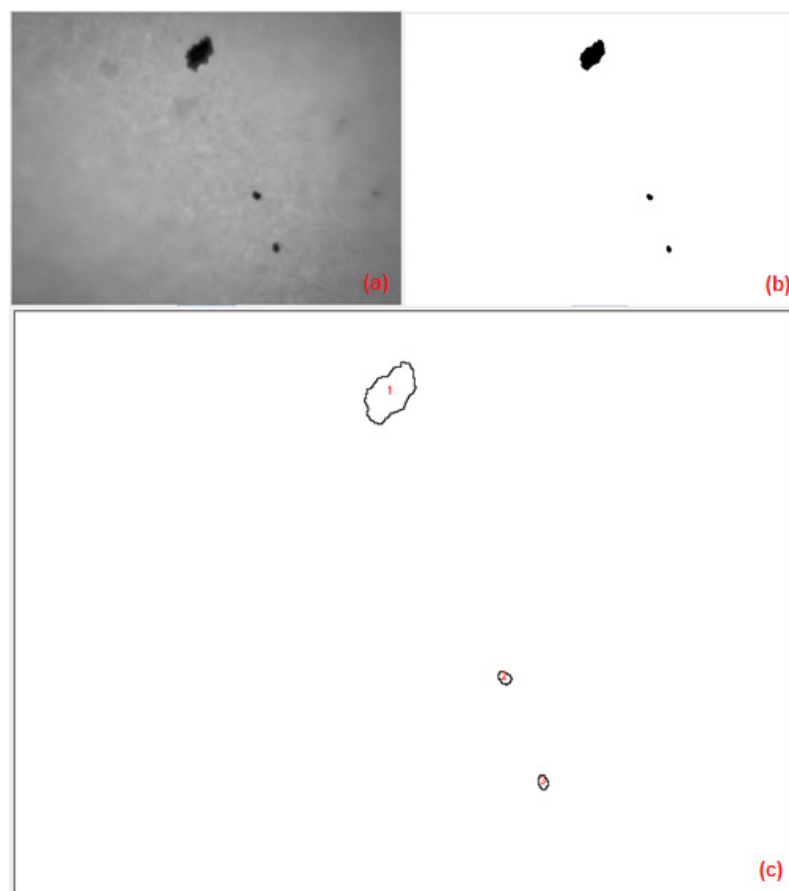


Figura 24 - (a) imagem original em 8-bits; (b) imagem binarizada; (c) partículas contadas.

Apesar de apenas o código ISO ser necessário para a classificação da amostra, o software apresenta o sumário com os principais dados, como a quantidade de partículas por 100ml e, também, as partículas presentes na membrana a cada interação. Tais informações tornam-se úteis para o entendimento de eventuais desvios abruptos nos valores, além de possibilitar a validação das fórmulas matemáticas com os dados mostrados. A Tabela 3 apresenta a classificação da primeira membrana analisada.

Tabela 3 – Classificação para a primeira membrana analisada.

Amostra	Código ISO	Partículas por 100ml			Partículas na membrana		
		(N) > 4	(N) > 6	(N) > 14	(n) > 4	(n) > 6	(n) > 14
1	15/15/14	26041	26041	8680	3	3	1
2	15/15/14	21701	21701	8680	5	5	2
3	15/15/14	23148	20254	8680	8	7	3
4	15/15/14	19531	17361	8680	9	8	4
5	15/15/13	22569	17361	6944	13	10	4
6	15/15/13	20254	15914	7234	14	11	5
7	15/15/13	21081	16121	7440	17	13	6
8	15/15/13	19531	15190	7595	18	14	7
9	15/15/13	17361	13503	6751	18	14	7
10	15/15/13	16493	13020	6076	19	15	7

Outro fator importante está relacionado à aleatoriedade nas amostras que, tendo ou não particulados, deverá ser considerada para análise. Tal afirmação é levantada, pois, tendencialmente, são escolhidos os pontos com maiores quantidades de partículas, o que constitui um erro para a preservação do critério estatístico da norma. Ao selecionar-se aleatoriamente campos com poucas, ou mesmo sem nenhuma partícula, a área correspondente a essa interação é considerada pelo *software*, minimizando o resultado final. Tal situação pode ser visualizada entre as análises 8 e 9 da primeira membrana, onde os valores das partículas na membrana permanecem constante, significando a não detecção de partícula, porém refletindo no decréscimo da contagem de todas as partículas por 100ml.

Conforme pode ser visto na Tabela 4, verificou-se comportamento semelhante do *software* para a contagem da segunda membrana, que possui mais

contaminação. Todas as imagens geradas pelo *software* durante os testes, seguindo o padrão da Figura 24, foram disponibilizadas no apêndice C.

Tabela 4 – Classificação para a segunda membrana analisada.

Amostra	Código ISO	Partículas por 100ml			Partículas na membrana		
		(N) > 4	(N) > 6	(N) > 14	(n) > 4	(n) > 6	(n) > 14
1	17/17/15	95486	78125	26041	11	9	3
2	16/16/15	56423	47743	21701	13	11	5
3	17/17/15	75231	66551	23148	26	23	8
4	17/17/15	86805	73785	23871	40	34	11
5	17/17/15	95486	79861	26041	55	46	15
6	17/17/15	95486	75231	21701	66	52	15
7	17/17/15	112847	79365	26041	91	64	21
8	17/17/15	110677	79365	27126	102	73	25
9	17/17/15	111883	81018	27006	116	84	28
10	17/17/15	111979	79861	26909	129	92	31

Observa-se em ambas as análises que, desde a primeira amostra processada, quase não existe variação no código ISO. Isso ocorre porque a fração da área analisada, desde que as partículas estejam bem distribuídas, deverá ser homogênea em toda a membrana, acarretando em mudanças sutis no código ISO final.

No decorrer do projeto, tentou-se validar os dados gerados com os obtidos no laboratório especializado. Contudo, observou-se que os métodos de contagem utilizados pela indústria, apesar de citarem as normativas, são realizados por meio da foto comparação. A primeira membrana utilizada na presente análise foi classificada em laboratório como sendo “17/15/12” enquanto o resultado obtido foi “15/15/13”, a segunda membrana foi classificada como “21/19/16” enquanto o resultado obtido foi “17/17/15”.

Um questionamento levantado, com base na divergência encontrada, é a validade da comparação dos dois tipos de resultados, uma vez que esses usam critérios completamente diferentes para a estimação dos valores. Vale salientar que os resultados pela foto comparação, conforme já discutido no Capítulo 2, apresentam-se altamente subjetivos, não ocorrendo de fato a contagem das partículas. Outrossim, é a carência de norma regulamentadora que defina os procedimentos utilizados. A principal justificativa encontrada pelo seu uso da foto-comparação está no alto esforço que tem que ser despendido para a utilização da norma convencional, inviabilizando economicamente as análises.

Para validar os resultados obtidos pelo *software*, as membranas analisadas foram contadas manualmente, de acordo com a norma ISO4407, e os resultados mostraram-se similares aos encontrados pelo *software*.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Essa dissertação abordou o desenvolvimento de uma metodologia para a análise de óleo industrial conforme as normas ISO4407 para filtragem e ISO4406 para codificação. Na parte de hardware foi montado todo o aparato necessário, conforme citado pela norma, dentro das instalações da própria universidade. Para atender às premissas contidas no projeto, foram utilizados equipamentos de baixo custo e o software desenvolvido faz toda a análise de forma simples e intuitiva.

Foram encontradas algumas dificuldades quanto ao procedimento necessário para a correta filtração do óleo, onde teve-se que recorrer ao auxílio de um laboratório especializado. Outro problema foi a falta de justificativa do porquê a foto-comparação é utilizada ao invés da norma ISO e também a sua assertividade quando comparada à normativa.

O software foi dividido em três etapas que consistem em, capturar ou escolher a imagem a ser analisada, processar a imagem para obter-se as características das partículas e, por fim, sua classificação e codificação conforme a norma. Observou-se que o procedimento para análise de cada *frame* é realizado de forma rápida e eficiente. Apesar de a norma solicitar ao menos 10 imagens aleatórias para validar uma amostra, o *software* realiza o cálculo a cada imagem aceita pelo usuário, o que dá uma noção das condições do óleo desde o primeiro quadro coletado.

Para minimizar os efeitos gerados pela borda escura na lateral das imagens do microscópio em algumas amostras, foi implementado um *offset* ajustável que descaracteriza parte da borda para análise. A escolha do melhor *offset* dependerá do tipo de sistema de aquisição utilizado.

A aquisição das imagens ainda é uma parte que pode ser melhorada, principalmente no que diz respeito ao nível de iluminação na qual as amostras são submetidas. O uso de um microscópio de melhor qualidade ou a implementação futura de novos algoritmos para binarização poderão tornar essa fase ainda mais autônoma e precisa. Para tal, far-se-á necessário o estudo mais aprofundado de formas de binarização e a inevitável correção da iluminação de forma digital para suprir a carência da maioria dos microscópios de baixo custo.

Sugere-se também, para trabalhos futuros, a implementação de um módulo específico para a análise morfológica das partículas com intuito de fornecer maiores detalhes sobre a origem dos desgastes.

Por fim, acredita-se que a ferramenta desenvolvida nessa pesquisa alcançou os resultados esperados e que a mesma ainda poderá ser aprimorada e aplicada à realidade da manutenção industrial Brasileira. Como todo o código é aberto, os custos para análise dentro das empresas ficarão limitados apenas a aquisição dos equipamentos para filtração e do microscópio com sistema de aquisição de imagens.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. F.; BIZARRIA, J. W.; BIZARRIA, F. C.; MATHIAS, M. H. Condition-based monitoring system for rolling element bearing using a generic multi-layer perceptron. *Journal of Vibration and Control*, v. 21, p. 3456-3464, 2015.

ARP598B. Aerospace Recommended Practice. The determination of particulate contamination in liquids by particle count method, 1999.

CASEY, B. Consider contamination control before buying hydraulic equipment. *Machinery Lubrication*, Junho, 2012.

FITCH, J. C. Control and management of particle contamination in hydraulic. *Handbook of Hydraulic Fluid Technology*. 2. ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press. Cap. 5. p. 220-240, 2012.

GEBARIN S. On-line and In-line Wear Debris Detectors: What's Out There?. Disponível em: < <http://www.machinerylubrication.com/Read/521/in-line-wear-> >. Acesso em: 05 jun. 2016.

GEISSMANN, Q. OpenCFU, a new free and open-source software to count cell colonies and other circular objects. *PloS One*, v. 8, n. 2, p. e54072, 2013.

GLAESER, W. A. Wear debris classification. *Modern Tribology Handbook: Volume 1*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press. Cap. 8. p. 301-309, 2001.

GONÇALVES, V. D. **Desenvolvimento de um sistema de análise de imagem para quantificação do tamanho e distribuição de partículas de desgaste**. 135 f. 2009. (Tese) Doutorado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade do Estado de São Paulo, 2009.

GONÇALVES, V. D.; ALMEIDA, L. F.; MATHIAS, M. H. Wear particle classifier system based on an artificial neural network. **Strojniški vestnik, Journal of Mechanical Engineering**, v. 56, n. 4, p. 284-288, 2010.

GONÇALVES, V. D.; ALMEIDA, L. F. DE; MATHIAS, M. H. Image analysis system for measurement of particle size distribution and for wear particle identification. **Engineering research: technical reports**, v. 5, n. 2, 2014.

GORYACHEVA, I. G.. **Contact mechanics in tribology**. Rússia: Springer-Science+Business Media. p. 1. , 1998.

HUDA, A. S. N.; TAIB, S. Application of infrared thermography for predictive/preventive maintenance of thermal defect in electrical equipment. **Applied Thermal Engineering**, v. 61, n. 2, p. 220–227, 3 nov. 2013.

ISA, M. C.; Yusoff, N.H.N.; Hasril Nain, Mohd Subhi Din Yati, M.M. Muhammad, Irwan Mohd Nor. Ferrographic analysis of wear particles of various machinery systems of a commercial marine ship. **Malaysia International Tribology Conference**, v. 68, p. 345–351, 2013.

ISO11500, **Hydraulic fluid power - Fluid**. Determination of the particulate contamination level of a liquid sample by automatic particle counting using the light-extinction principle, 2012.

ISO4406, Hydraulic fluid power – Fluids. **Method for coding the level of contamination by solid particles**. 1999.

ISO4407, Hydraulic fluid power - Fluid. **Determination of particulate contamination by the counting method using an optical microscope**, 2002.

KATO, K; ADACHI, K. **Modern tribology handbook**, Vol 1, ed., B. Bhushan, PP.273-300. 2001

LAGHARI, M. S.; AHMED, F. **Computer vision in the field of wear particles**. **Second International Conference on Computer and Electrical Engineering**, 2009. ICCEE '09., In: Second International Conference on Computer and Electrical Engineering, 2009. ICCEE '09, 2009.

LAGO, D. F. Manutenção de redutores de velocidade pela integração das técnicas preditivas de análise de vibrações e análise de óleo lubrificante. **Aleph**, p. 179, UNESP, 2007.

LOVREC, D.; TIC, V. **On-line Condition Monitoring Systems for Hydraulic Machines**. Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering, Vol.10, N^o1. Eslovênia, p. 81-89. 2012.

MALDAGUE, X. P. **Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing**. 1.ed., New York: Wiley-Interscience, 2001.

MARÇAL, R. F. M.; SUSIN, A. A. Detectando falhas incipientes em máquinas rotativas, **Revista Gestão Industrial**, v. 1, n. 2, p. 228-236, 2005.

MAYER, A. **Particle counting – peril or prize? practicing oil analysis**, Noria Corporation, Março, 2006.

NBR5462. **NBR 5462: confiabilidade e manutenibilidade**. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 1994.

NOGUEIRA, J. C. B.; REIS, V. P. Emprego da termografia na inspeção preditiva. **Bolsista de Valor**, v. 1, n. 1, p. 29–36, 2010.

NORIA CORPORATION. **The Low-Down on Particle Counters**, Disponível em: < <http://www.machinerylubrication.com/Read/351/particle-counters> >. Acesso em: 02 jun. 2016.

RASBAND, W.S. **ImageJ, National Institutes of Health**, Bethesda, Maryland, USA, Disponível em:< <http://rsb.info.nih.gov/ij/>>. Acesso em: 06 jun. 2016.

ROWE, C. N. Lubricated wear. **Handbook of lubrication: Theory and Practice of Tribology**, Volume II. Boca Raton, FL, USA: CRC Press p. 209, 1983.

SAE AS4059E, Aerospace Fluid Power – **Cleanliness Classification for Hydraulic Fluids**, 2011.

SAMANTA, B.; AL-BALUSHI, K. R. Artificial neural network based fault diagnostics of rolling element bearings using time-domain features, **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 17, n. 2, p. 317-328, 2003.

TIC, V.; LOVREC, D.; ELDER, J. Operation and accuracy of particle counters for on-line condition monitoring of hydraulic oils. **Annals Of Faculty Engineering Hunedoara: INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING**. Eslovênia, p. 425-428. 2012.

WESTIN, P.; MARKLUND, P.; SANDSTRÖM, J. **Wear detection by monitoring hydraulic oil contamination: an experimental comparison between on-line and off-line measurements**. World Tribology Congress. Torino, Itália. 2013.

ZENERGULF. **Fluke Instruments**. Disponível em: <<http://www.zenergulf.com/fluke.html>>. Acesso em: 07 Jun. 2016.

ZMITROWICZ, A. Wear Debris: A review of properties and constitutive models. **Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, 43, 1. Varsóvia, p. 3-35. 2005.

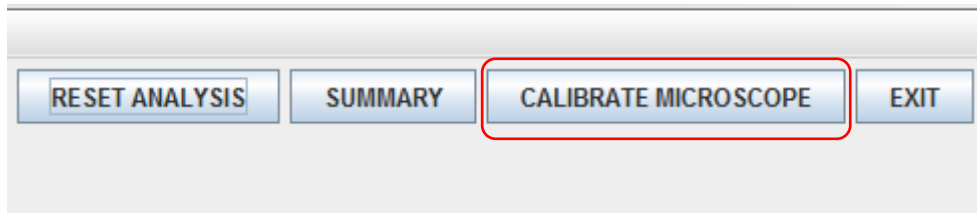
APÊNDICE A – Tabela da norma ISO4406 para codificação das amostras

Number of particles per millilitre		Scale number
More than	Up to and including	
2 500 000		> 28
1 300 000	2 500 000	28
640 000	1 300 000	27
320 000	640 000	26
160 000	320 000	25
80 000	160 000	24
40 000	80 000	23
20 000	40 000	22
10 000	20 000	21
5 000	10 000	20
2 500	5 000	19
1 300	2 500	18
640	1 300	17
320	640	16
160	320	15
80	160	14
40	80	13
20	40	12
10	20	11
5	10	10
2,5	5	9
1,3	2,5	8
0,64	1,3	7
0,32	0,64	6
0,16	0,32	5
0,08	0,16	4
0,04	0,08	3
0,02	0,04	2
0,01	0,02	1
0,00	0,01	0

APÊNDICE B – Procedimento para calibração do microscópio

No menu superior direito clicar em “calibrar microscópio”. Será requerido ao usuário confirmar a operação e logo em seguida o programa será fechado. A figura 1 apresenta a localização do botão para calibração.

Figura 1 – Localização do botão para calibração



Ao ser aberto novamente o software entrará na tela de calibração, conforme pode ser visto na figura 2.

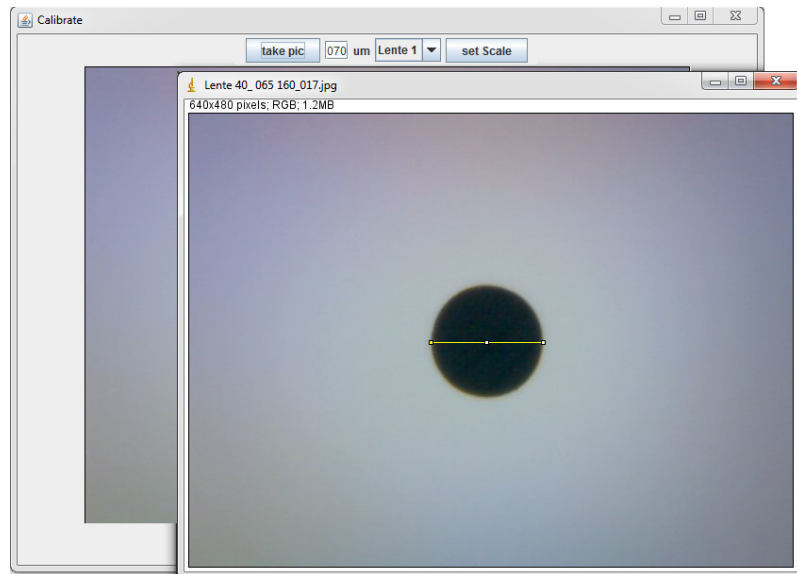
Figura 2 – Tela principal do menu de calibração



A calibração do sistema consiste na amostra de um objeto conhecido e informado ao software qual a dimensão do mesmo. Para o ajuste foi utilizada uma lamina de calibração que possui um círculo de 70 μ m de diâmetro. O primeiro

procedimento é posicionar o objeto no microscópio obtendo o melhor foco. Informar no campo de texto o valor correspondente ao objeto em micrometros e em seguida clicar em “tirar foto”. O software abrirá uma outra janela com a foto tirada e uma linha amarela, conforme pode ser visto na figura 3.

Figura 3 – Janela com a imagem tirada



Posicionar a linha na extensão do diâmetro da imagem, e clicar em “set scale”.

A seleção da lente possibilita configurações de calibração para diferentes óticas sem a necessidade de ajustar a cada troca. Após realizada a calibração a janela poderá ser fechada e então o usuário deverá reiniciar o software.

Uma estratégia para checar a calibração atual do software consiste na utilização normal da análise com a lamina posicionada. Na etapa de contagem das partículas o software deverá retorna apenas uma partícula com seu diâmetro máximo de Feret, indicando a real dimensão do objeto. A Figura 4 mostra a detecção do objeto e o diâmetro mínimo com o valor próximo do valor real. Variações mínimas podem ocorrer em razão da limiarização.

Figura 4 – Detecção do círculo de 70 μ m da lamina de calibração

NUMBER	MIN FE...	FERET	AREA	CIRCUL...	ROUND...	PERIME...	ELONG...
1	69,60	71,16	3820,68	0,90	0,99	230,89	0,98

Imagem 1

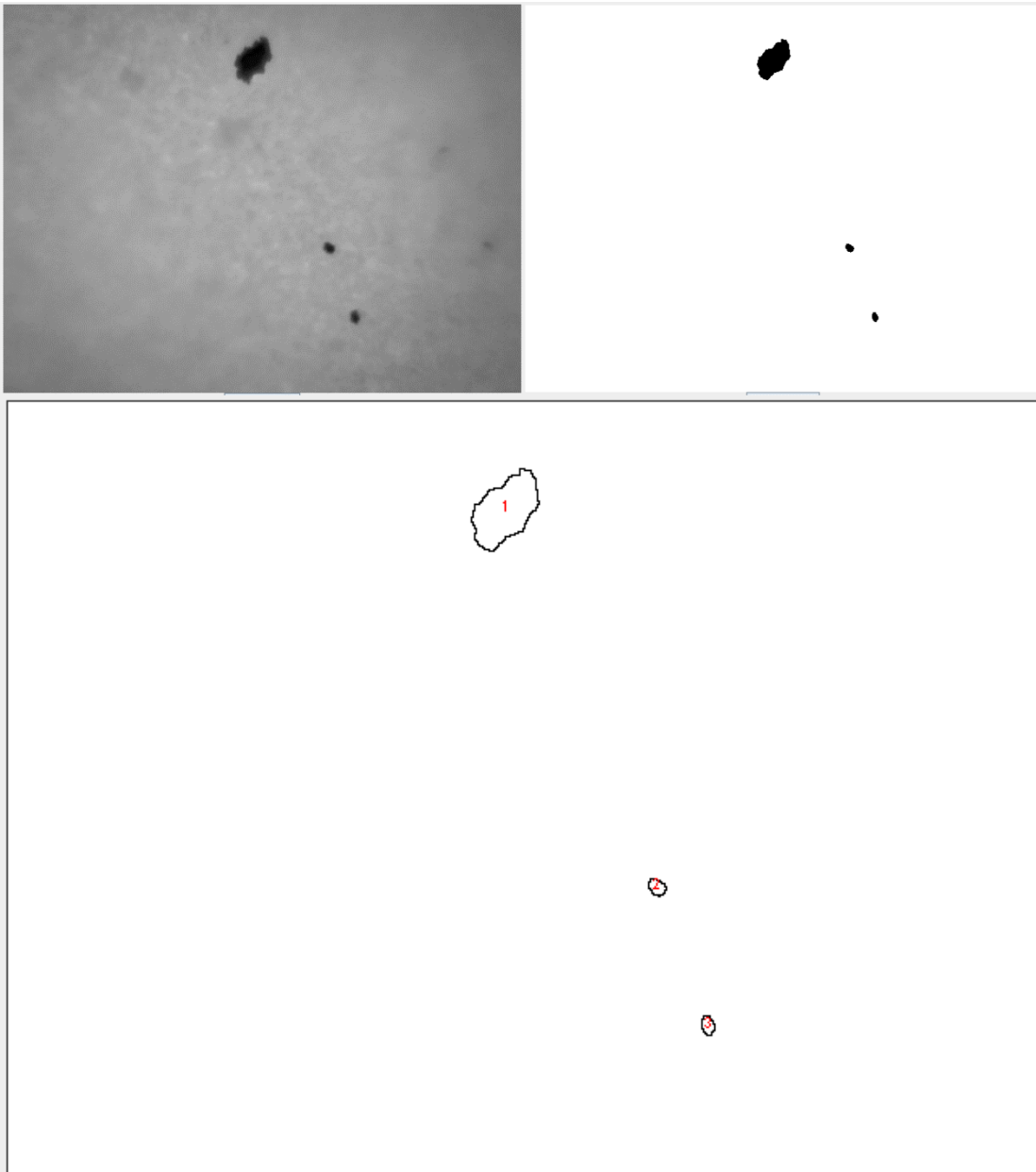


Imagem 2

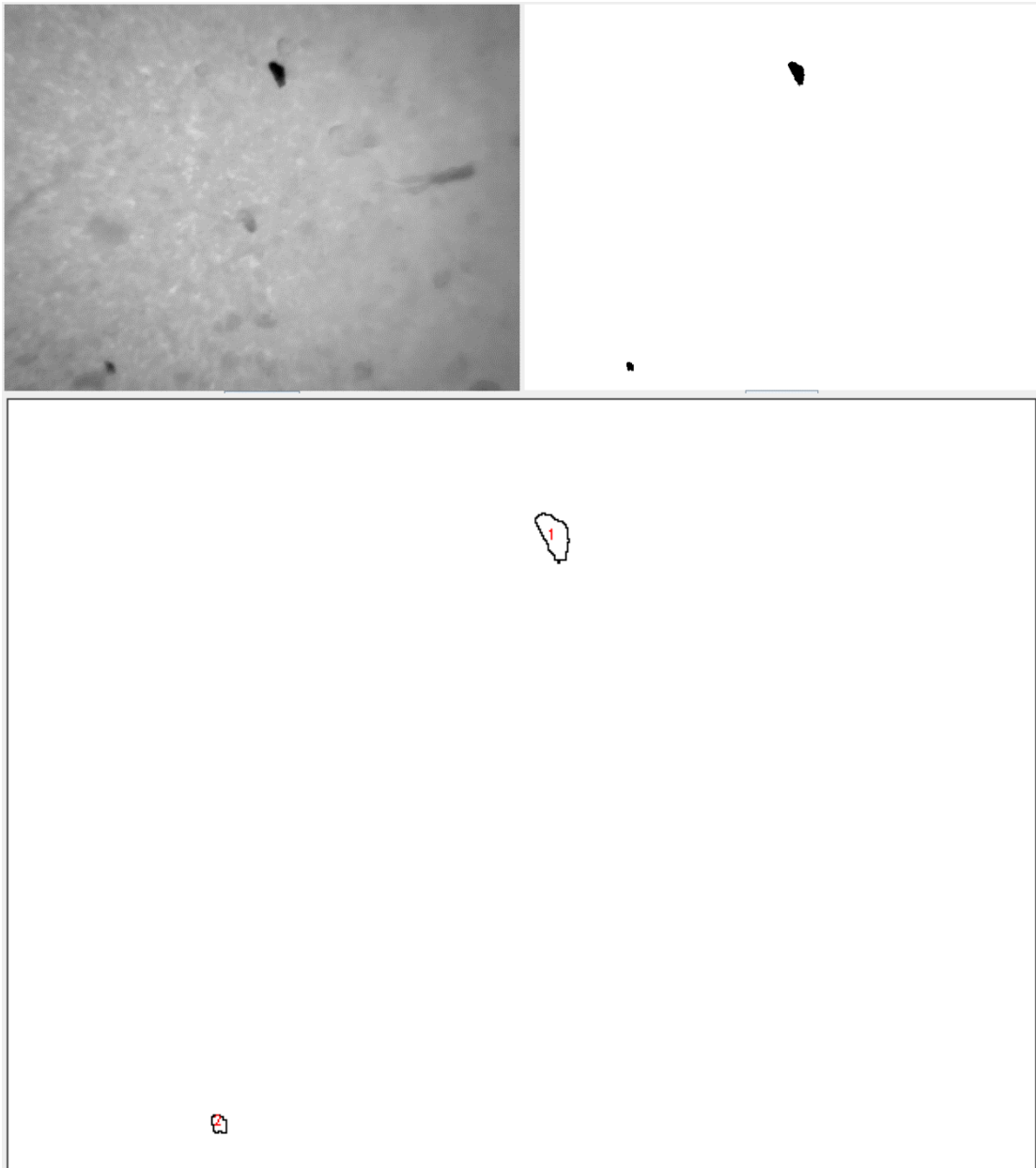


Imagem 3

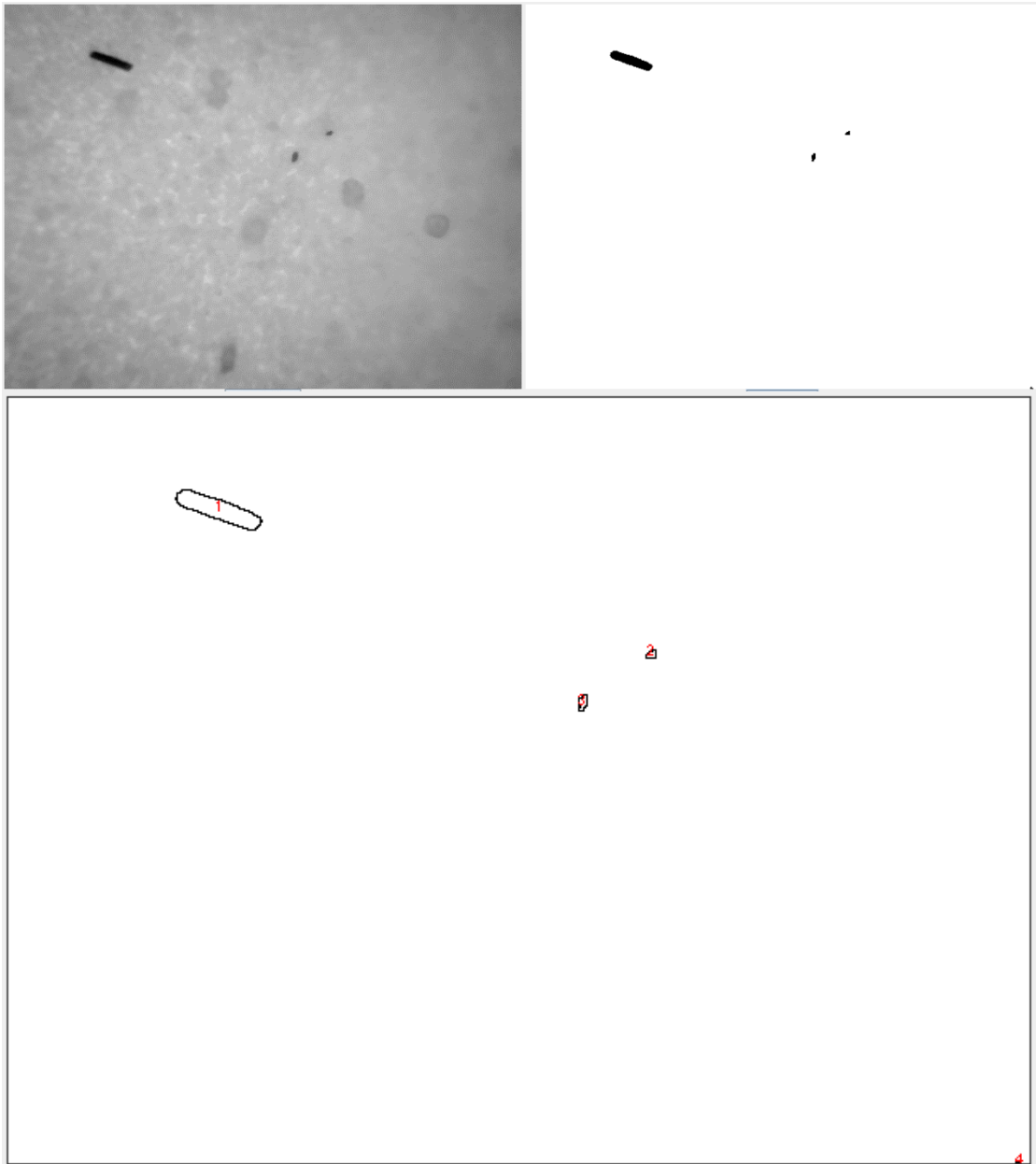


Imagem 4

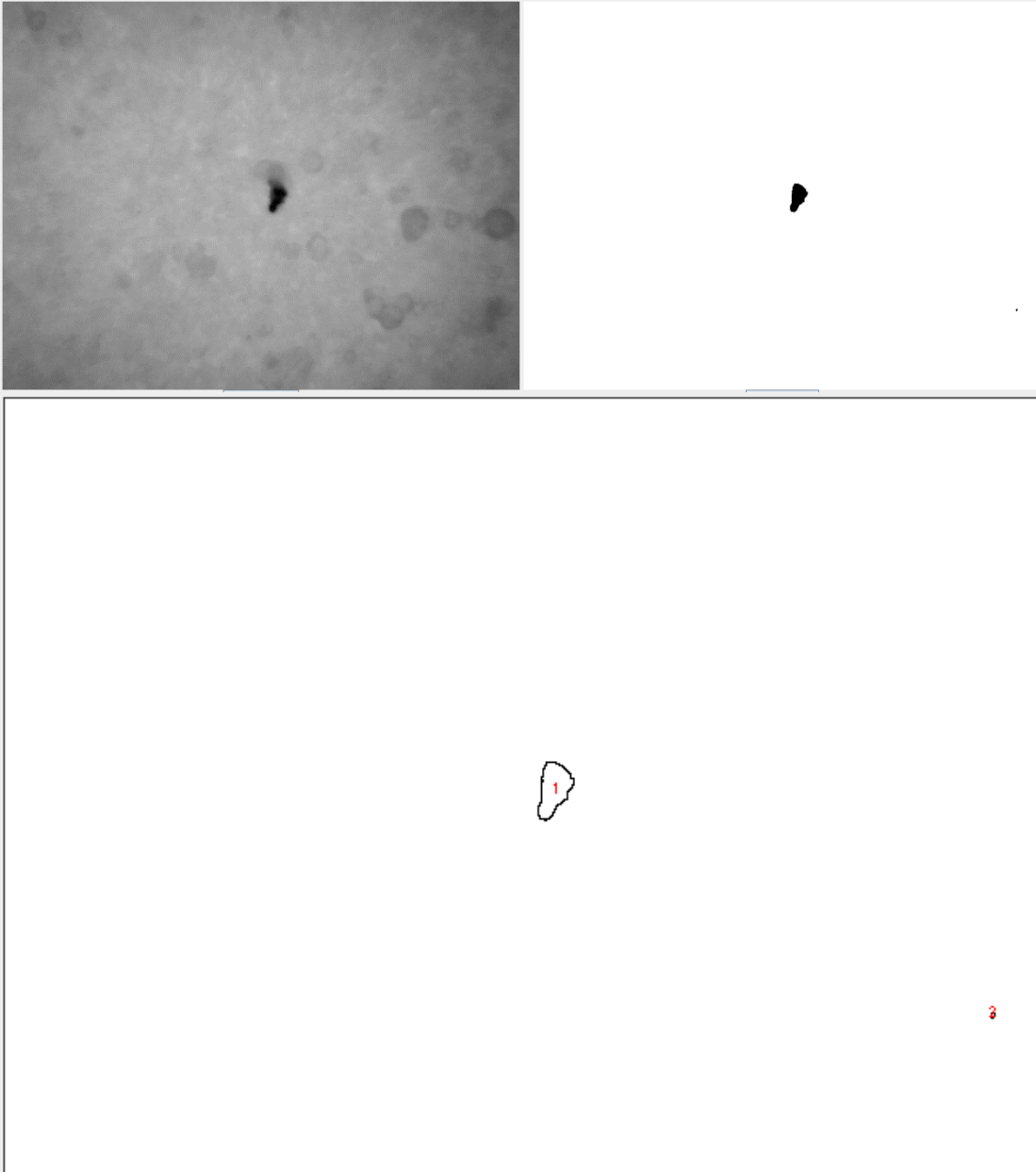


Imagem 5

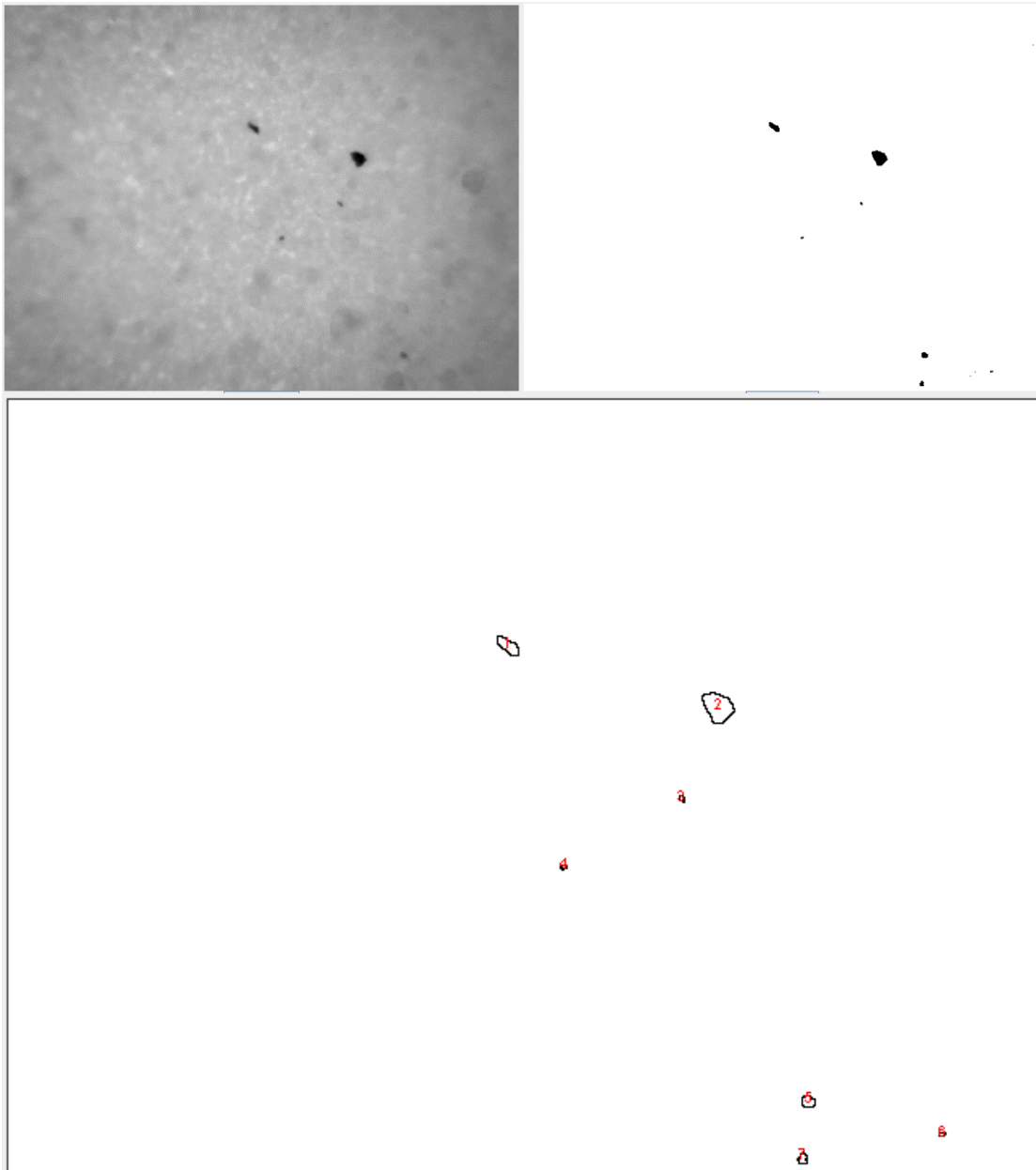


Imagem 6

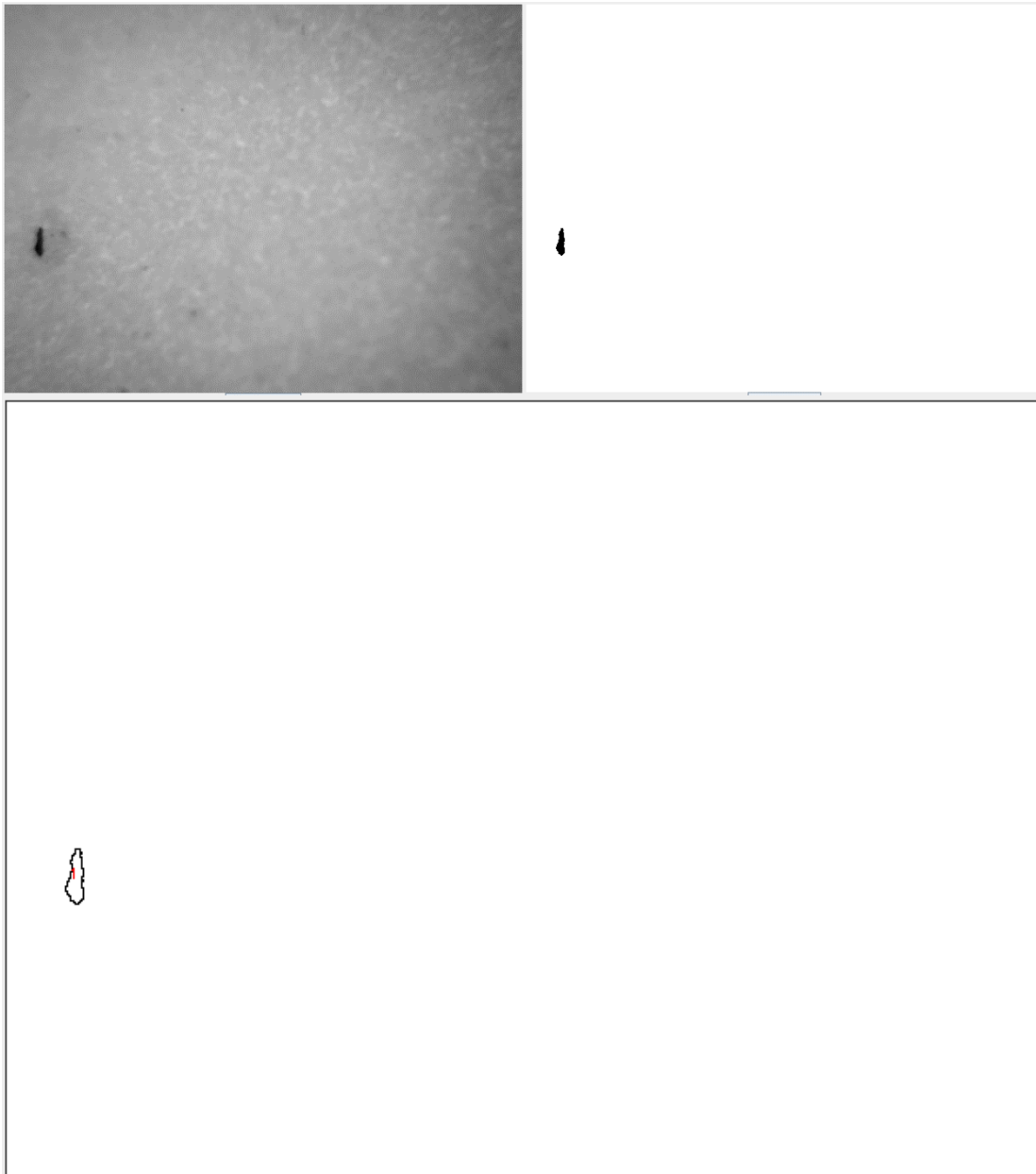


Imagem 7

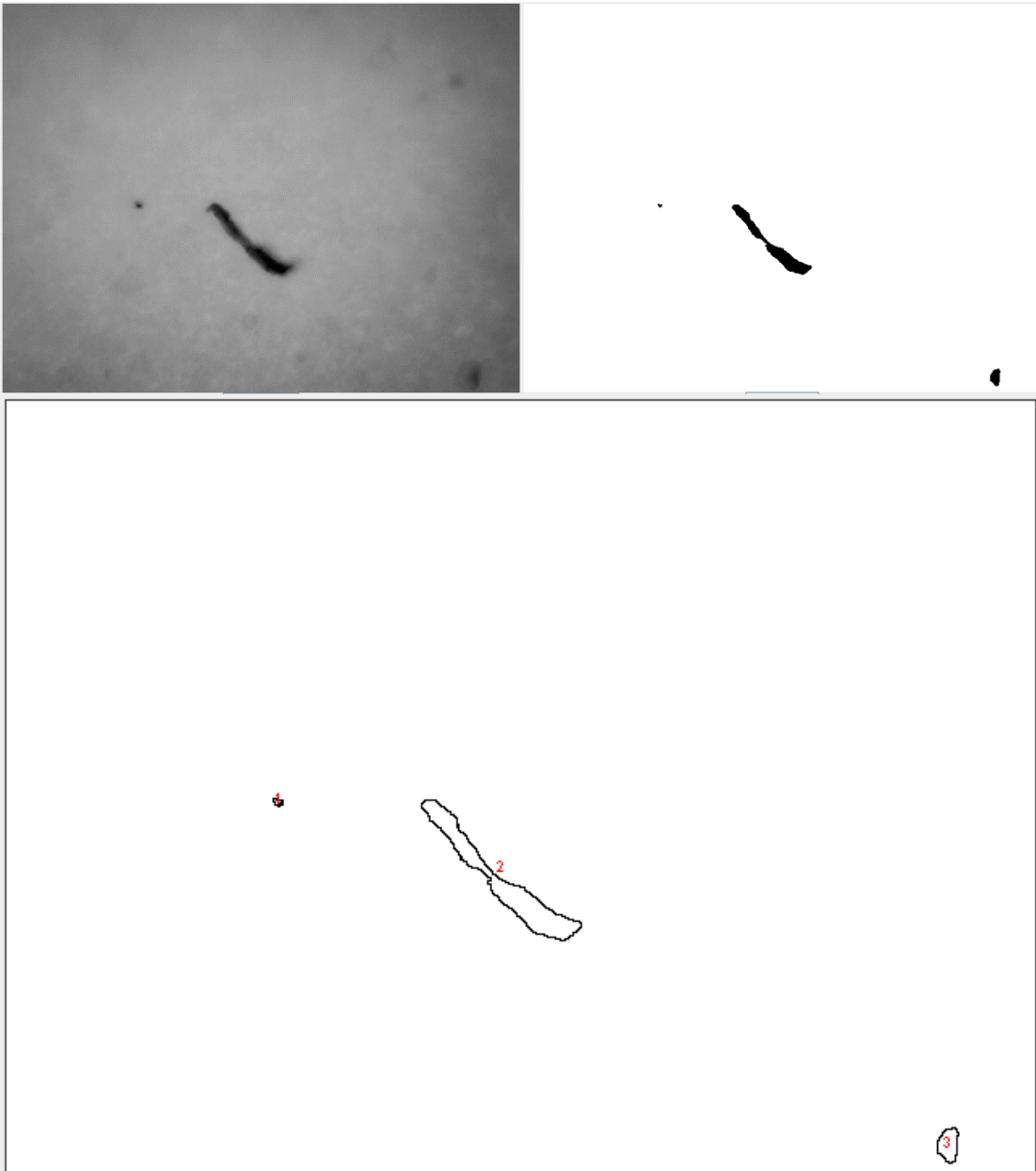


Imagem 8

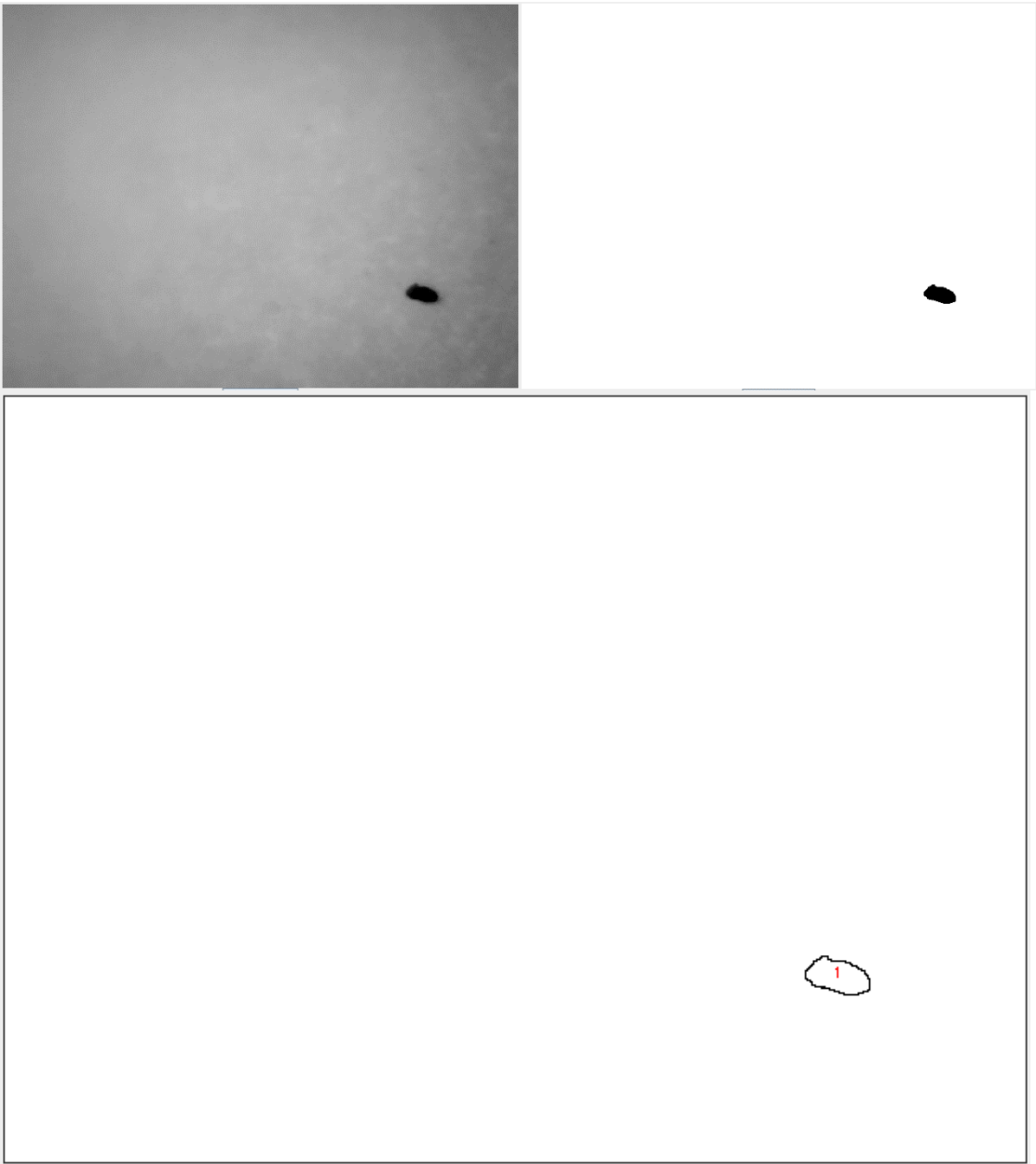


Imagem 9

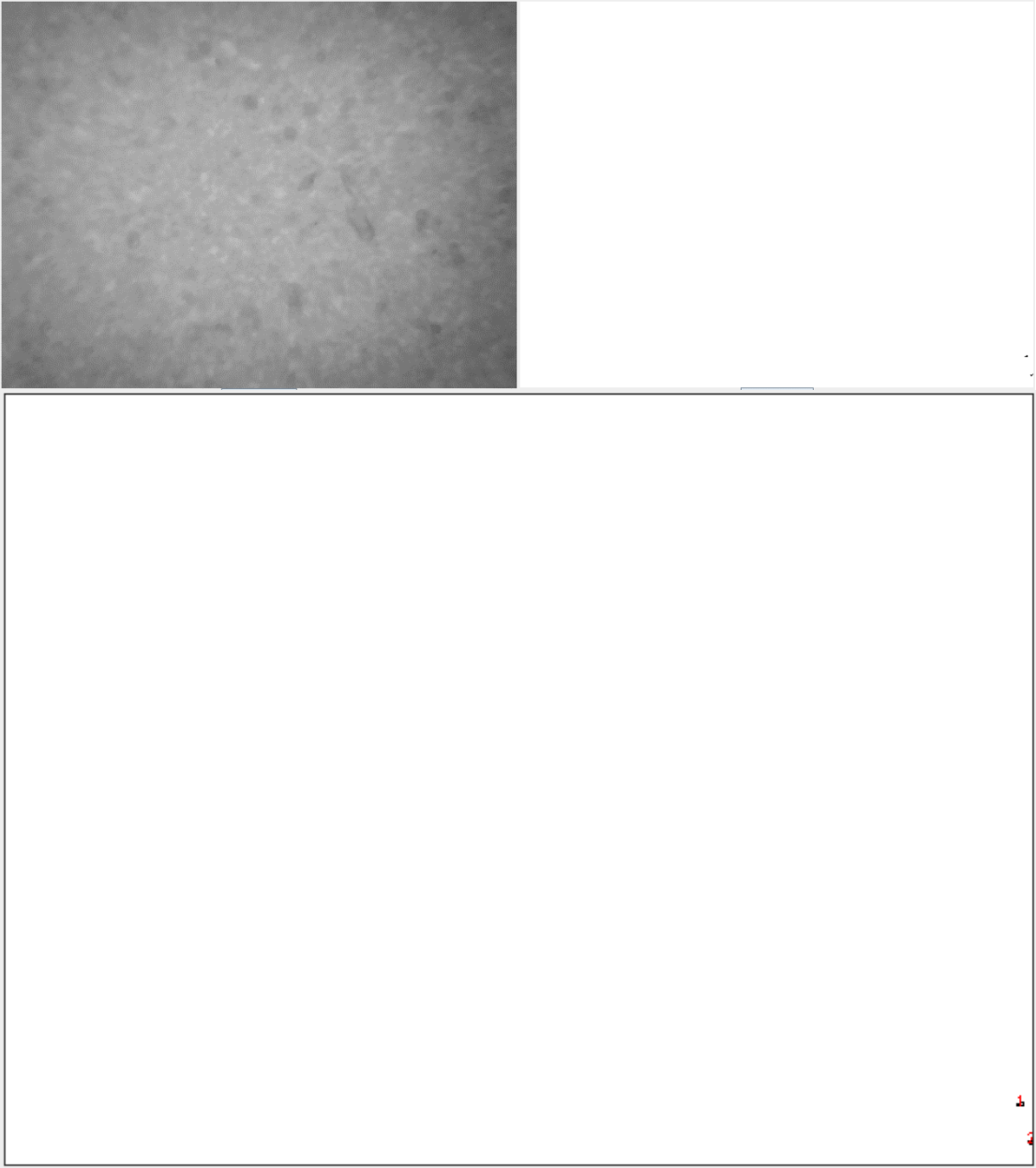


Imagem 10

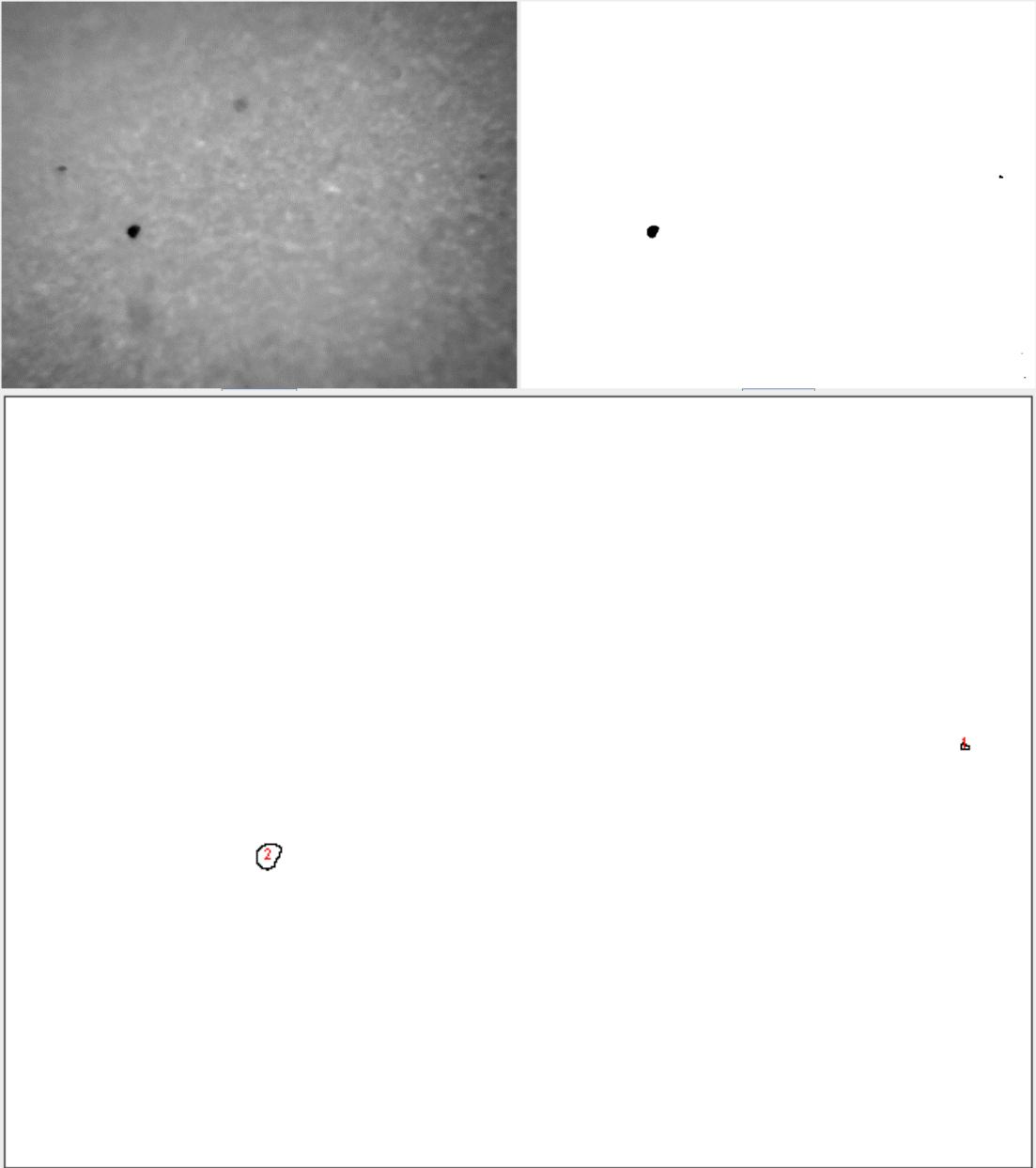


Imagem 1

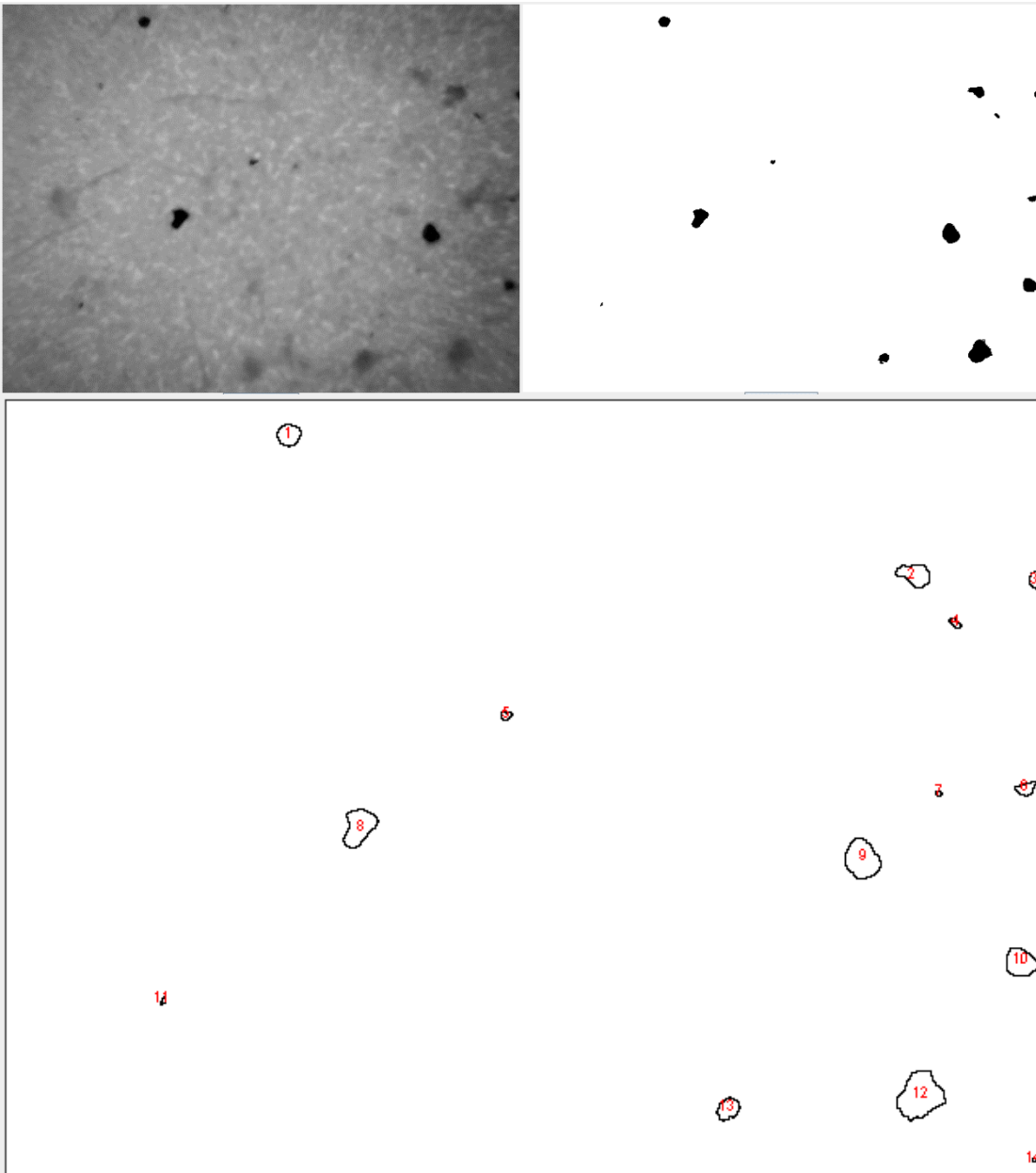


Imagem 2



Imagem 3

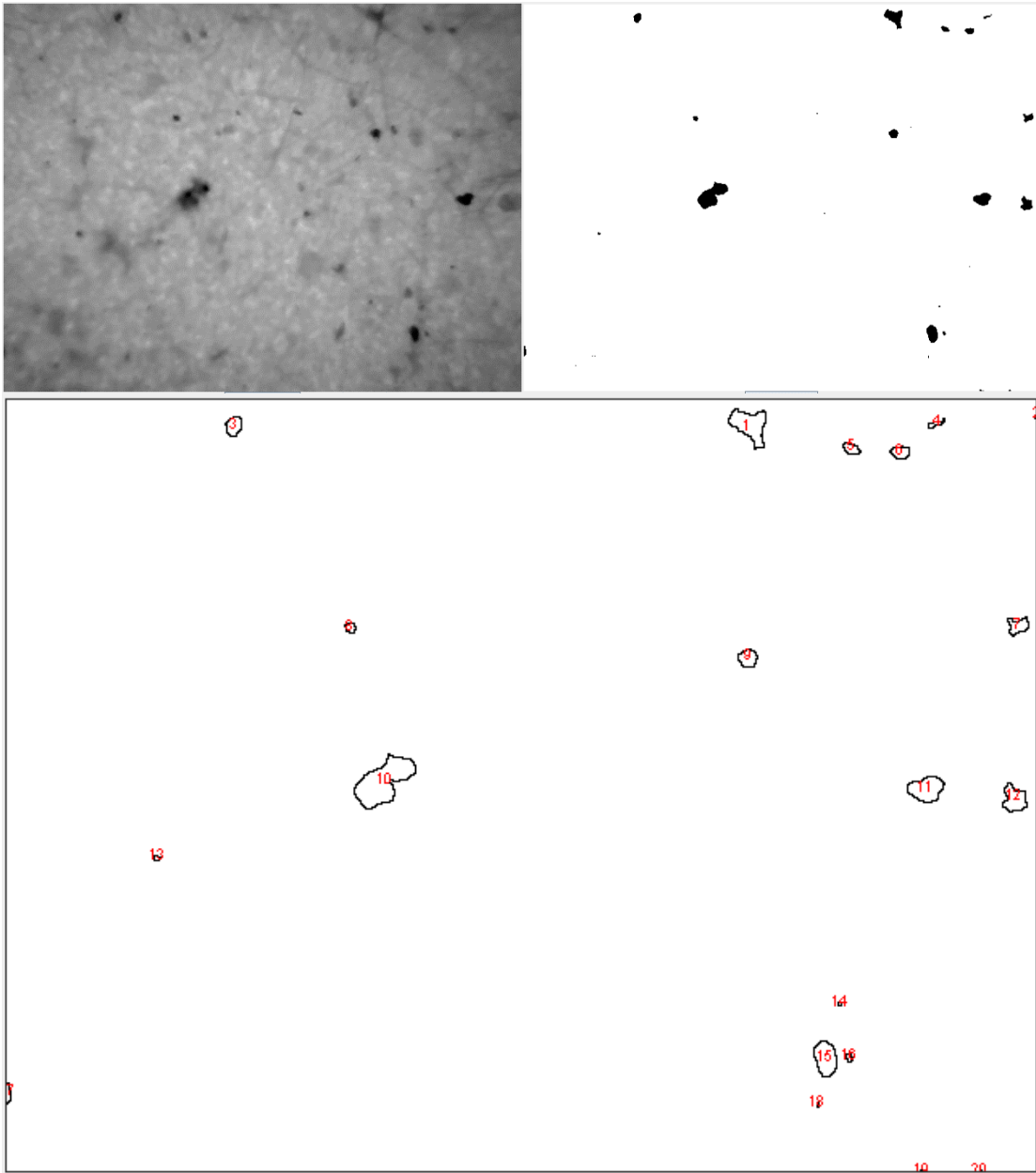


Imagem 4

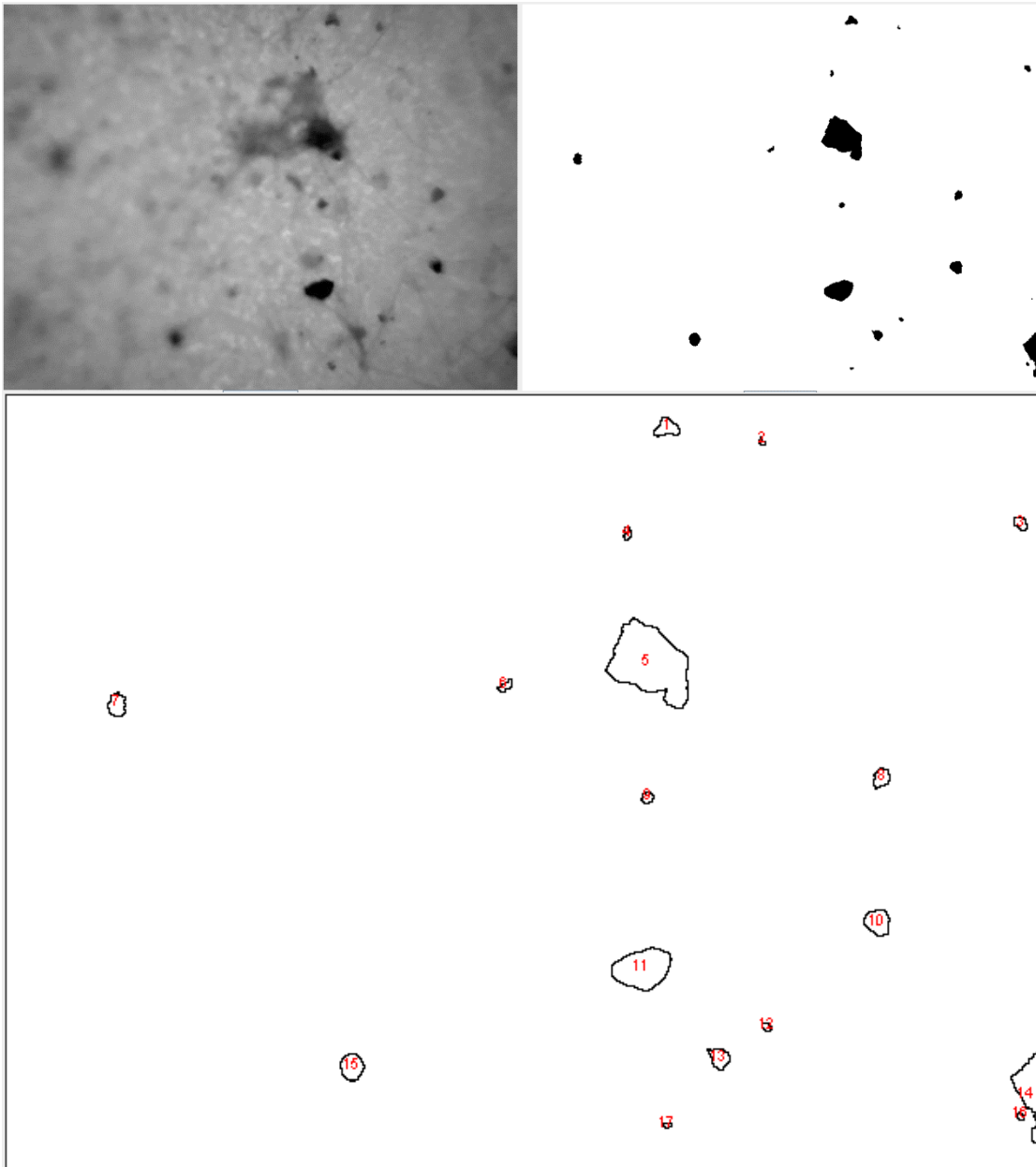


Imagem 5

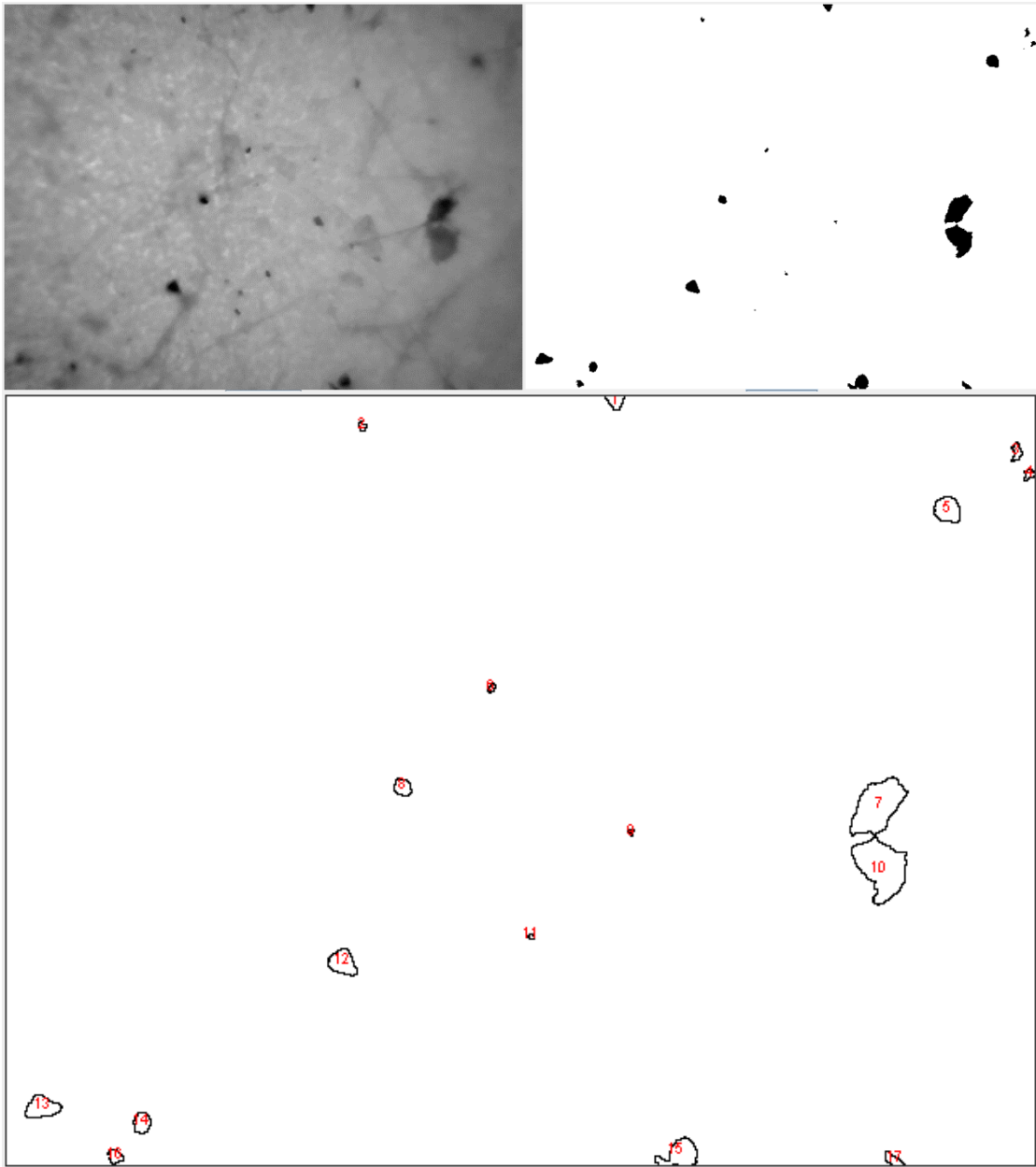


Imagem 6

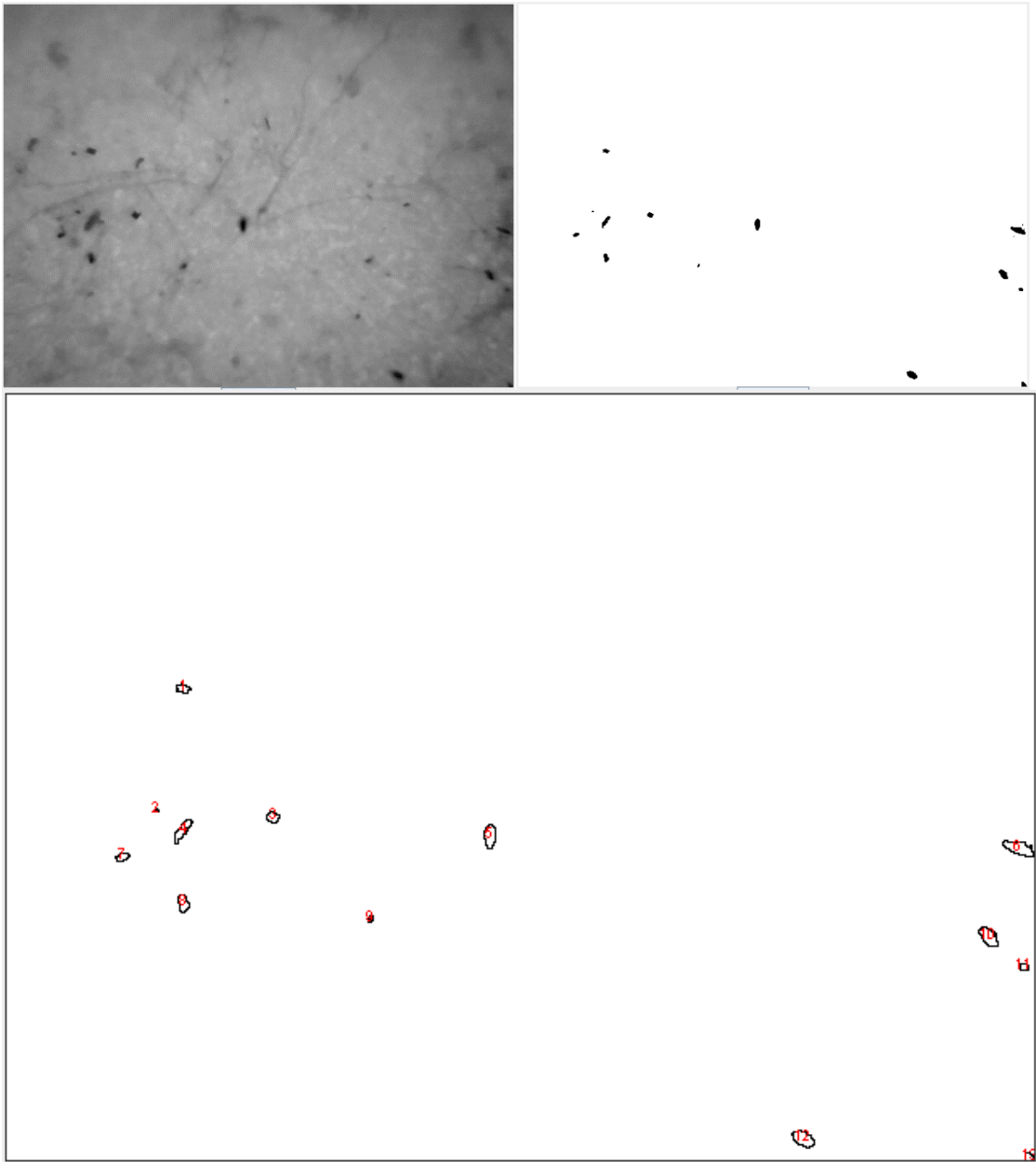


Imagem 7

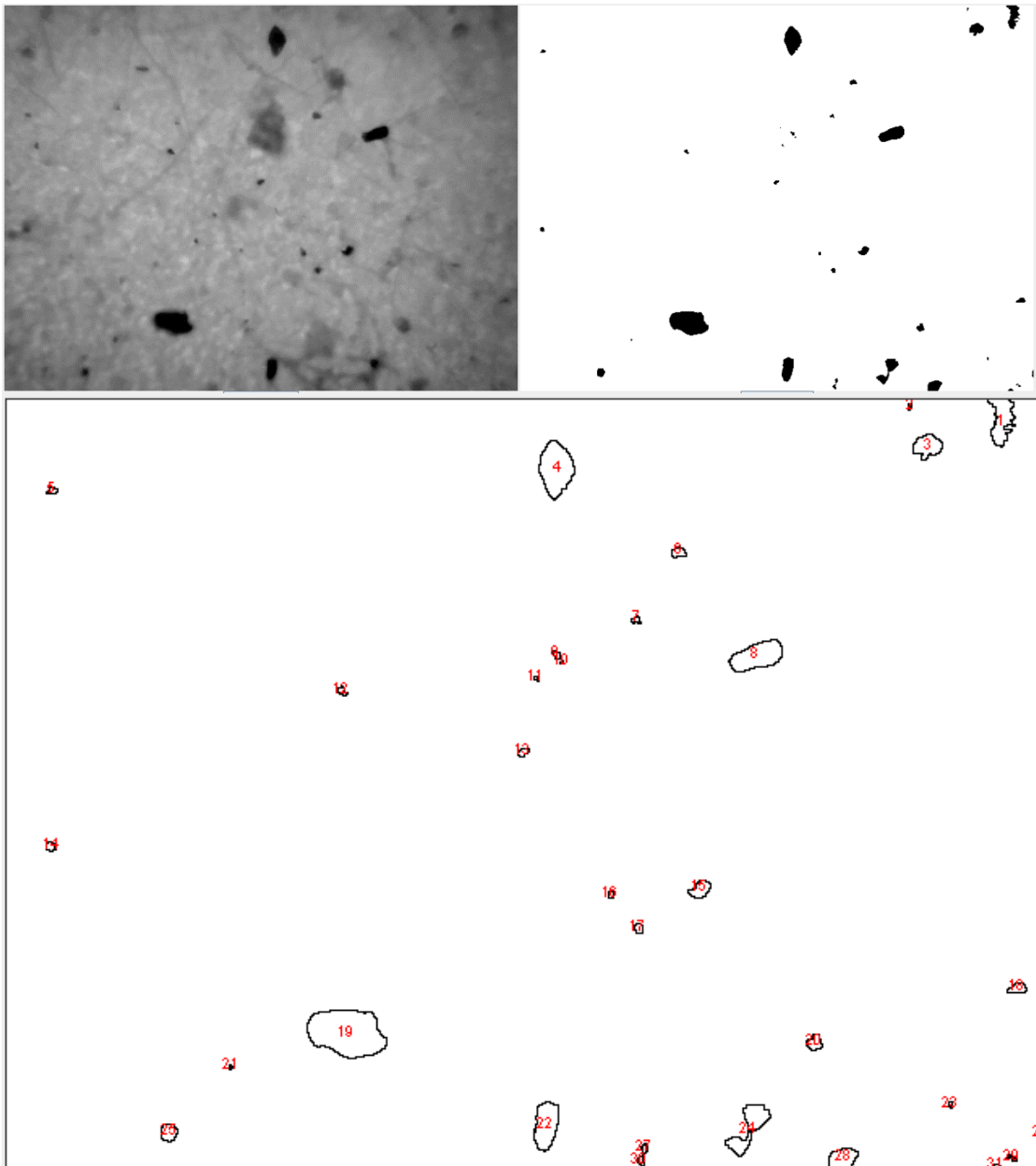


Imagem 8

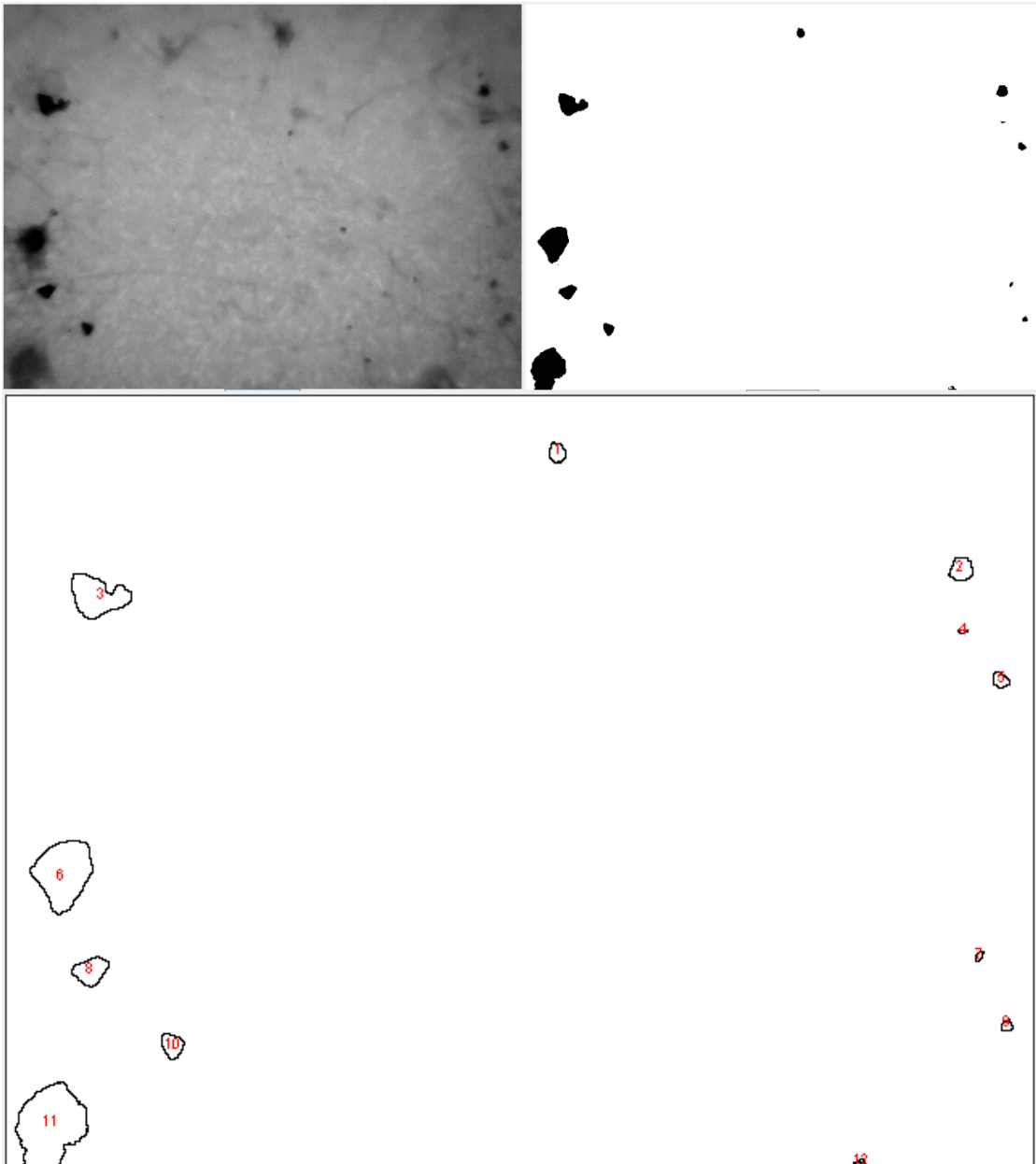


Imagem 9

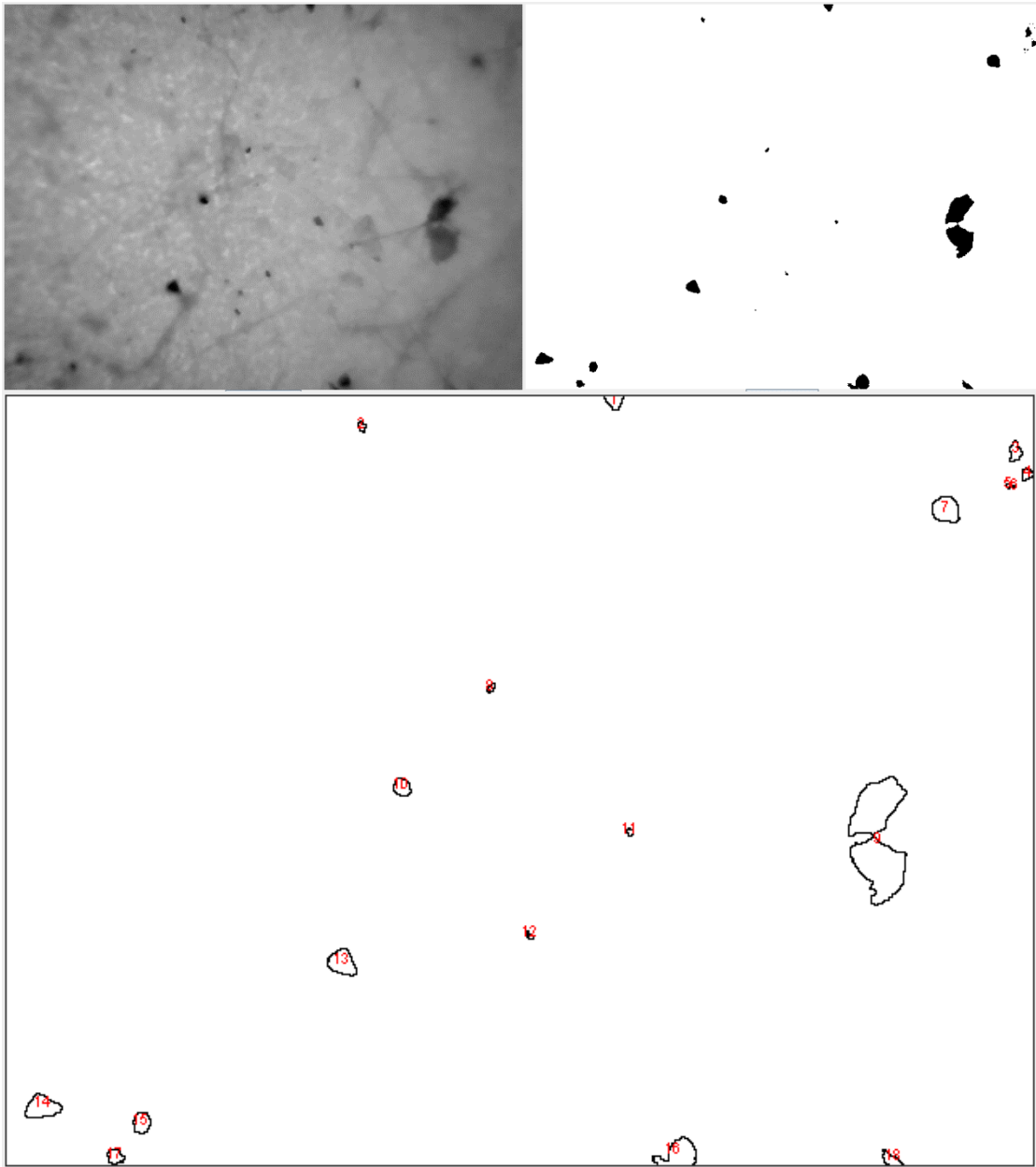


Imagem 10

