



Universidade Estadual de Maringá
Centro de Ciências Exatas
Departamento de Física

Dissertação de Mestrado

Descritores de imagens aplicados no estudo das texturas de cristais líquidos liotrópicos

Acadêmico: André Farinha Bósio

Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Evangelista

Coorientadores: Prof. Dr. Fernando Carlos Messias Freire

e Prof. Dr. Franklin César Flores

Maringá, 14 de Junho de 2021



Universidade Estadual de Maringá
Centro de Ciências Exatas
Departamento de Física

Dissertação de Mestrado

Descritores de imagens aplicados no estudo das texturas de cristais líquidos liotrópicos

Dissertação de mestrado submetida ao Departamento de Física da Universidade Estadual de Maringá, sob orientação do Prof. Dr. Luiz Roberto Evangelista como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em física.

Acadêmico: André Farinha Bósio

Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Evangelista

Coorientadores: Prof. Dr. Fernando Carlos Messias Freire

e Prof. Dr. Franklin César Flores

Maringá, 14 de Junho de 2021

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá – PR, Brasil)

B743d Bósio, André Farinha
Descritores de imagens aplicados no estudo das
texturas de cristais líquidos liotrópicos / André
Farinha Bósio. -- Maringá, PR, 2021.
70 f.: il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Evangelista.
Coorientador: Prof. Dr. Fernando Carlos Messias
Freire.
Coorientador: Prof. Dr. Franklin César Flores.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de
Maringá, Centro de Ciências Exatas, Departamento de
Física, Programa de Pós-Graduação em Física, 2021.

1. Cristais líquidos. 2. Processamento de
imagens. I. Evangelista, Luiz Roberto, orient. II.
Freire, Fernando Carlos Messias, coorient. III.
Flores, Franklin Carlos, coorient. IV. Universidade
Estadual de Maringá. Centro de Ciências Exatas.
Departamento de Física. Programa de Pós-Graduação em
Física. V. Título.

CDD 23.ed. 530.429

ANDRÉ FARINHA BÓSIO

DESCRITORES DE IMAGENS APLICADOS NO ESTUDO DAS TEXTURAS
DE CRISTAIS LÍQUIDOS LIOTRÓPICOS

Dissertação apresentada à Universidade
Estadual de Maringá, como requisito parcial
para a obtenção do título de mestre.

Aprovado em: Maringá, 22 de abril de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Roberto Evangelista
Programa de Pós-Graduação em Física – PFI/UEM

Prof. Dr. Fernando Carlos Messias Freire
Universidade Estadual de Maringá – UEM

Prof. Dr. Franklin César Flores
Universidade Estadual de Maringá – UEM

Prof.^a Dr.^a Roberta Rarumy Ribeiro de Almeida
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/Apucarana

Prof. Dr. Breno Ferraz de Oliveira
Universidade Estadual de Maringá – UEM

Conteúdo

1	Introdução	6
2	Breve introdução aos cristais líquidos	8
3	Processamento de imagens e descritores	13
3.1	Imagens digitais	13
3.2	Descritores globais	14
3.2.1	Histogramas e momentos estatísticos	15
3.2.2	Matriz de co-ocorrência	16
3.3	Morfologia matemática	18
4	Metodologia	24
5	Aplicação dos métodos	28
5.1	Mistura liotrópica ternária	28
5.1.1	Momentos estatísticos	29
5.1.2	Matriz de co-ocorrência	31
5.1.3	Morfologia	35
5.2	Misturas liotrópicas quaternárias	39
5.2.1	Momentos estatísticos	41
5.2.2	Matriz de co-ocorrência	47
5.2.3	Morfologia	52
6	Conclusões	58
A	Tabelas com efetividade dos descritores	67

Agradecimentos

Este trabalho não poderia de forma alguma ser feito sem a ajuda de várias mãos; dessa forma agradeço à CAPES, CNPq e UEM pelo apoio financeiro e equipamentos cedidos para os estudos.

Agradeço ao Prof. Luiz Roberto Evangelista, ao Prof. Fernando Carlos Messias Freire e ao Prof. Franklin César Flores pelos seus ensinamentos durante estes dois anos de trabalho, bem como ao grupo de pesquisa, em especial ao Prof. Anderson Reginaldo Sampaio, que cedeu as sequências de imagens aqui utilizadas.

Agradeço particularmente aos meus amigos presentes em alguns grupos de conversa: “vontade”, “ão esca”, e “cine discord” pelo apoio e descontração.

Agradeço minha família pelo apoio incondicional durante este trabalho, assim como toda a minha vida.

Agradeço grandiosamente à Mônica, pela atenção e dedicação para comigo e com a pós-graduação.

Por fim, agradeço aos amigos de quatro patas Platão, Vênus e Tina pelo apoio nas madrugadas de estudo.

Resumo

A microscopia de luz polarizada é uma ferramenta poderosa para a caracterização de cristais líquidos, de forma que a variação da temperatura altera as texturas observadas. Com a utilização de descritores de imagens podemos quantificar tais texturas usando momentos estatísticos, matriz de co-ocorrência assim como características morfológicas, oferecendo um leque de informações sobre a imagem. Neste trabalho, tais descritores serviram para caracterizar as fases presentes em misturas liotrópicas, assim como suas transições. Para uma mistura ternária composta de laurato de potássio, decanol e água, as transições $I \leftrightarrow N_D \leftrightarrow N_B$ e $N_C \leftrightarrow N_I$ puderam ser identificadas facilmente, enquanto que $N_B \leftrightarrow N_C$ pôde ser notada melhor por meio de alterações cromáticas e morfológicas. Nas misturas quaternárias aqui apresentadas, as transições $N_D \leftrightarrow N_{B+}$ e $N_C \leftrightarrow 2P \leftrightarrow C$ foram facilmente identificadas, enquanto que $N_B \leftrightarrow N_{B-} \leftrightarrow N_C$ tiveram comportamentos mais suaves, porém notáveis em ao menos um dos descritores.

Palavras chave: Cristal líquido, Morfologia Matemática, processamento de imagem.

Abstract

Polarized light microscopy is a powerful tool in the characterization of liquid crystals, so that variations in temperature changes the observed textures. With the use of image descriptors, we can quantify such textures using statistical moments, co-occurrence matrix and morphological characteristics, offering a range of information about the image. In this work, such descriptors were used to characterize the phases present in lyotropic mixtures, along with their transitions. For a ternary mixture composed of potassium laurate, decanol and water, the transitions $I \leftrightarrow N_D \leftrightarrow N_B$ and $N_C \leftrightarrow N_I$ could be easily identified, while $N_B \leftrightarrow N_C$ could be better noticed by chromatic and morphological changes. In the quaternary mixtures studied here, the transitions $N_D \leftrightarrow N_{B+}$ and $N_C \leftrightarrow 2P \leftrightarrow C$ were easily identified, while $N_B \leftrightarrow N_{B-} \leftrightarrow N_C$ behaved more smoothly, but notably in at least one of the descriptors.

Palavras chave: Liquid Crystal, Mathematical Morphology, Image processing.

1 Introdução

Antes de tudo, este trabalho está dividido em 6 capítulos. O primeiro, que está sendo lido agora, contém uma contextualização dos tópicos que serão abordados, assim como os objetivos do estudo. No capítulo 2, será apresentado alguns conceitos fundamentais a respeito de cristais líquidos e microscopia de luz polarizada. Seguindo a apresentação de fundamentos, o capítulo 3 terá definições à respeito de imagens digitais e espaços de cor, bem como a apresentação dos descritores que serão utilizados e algumas operações morfológicas. No capítulo 4 traremos a metodologia proposta, e alguns aspectos dos descritores previamente discutidos. No capítulo 5 traremos alguns resultados pertinentes às diferentes misturas liotrópicas. Por fim no capítulo 6 faremos algumas considerações finais e apresentaremos algumas perspectivas futuras.

Partindo para o trabalho em si, a história dos cristais líquidos começa em 1888 quando Friedrich Reinitzer observou algo incomum ao estudar o benzoato de colesterol. Ao aquecer o material, este passava de um estado sólido para um líquido turvo e, com o aumento da temperatura, para um líquido transparente. Tratava-se do primeiro cristal líquido documentado [1, 2].

Cristais líquidos são materiais que apresentam, ao mesmo tempo, ordenamento orientacional característico de sólidos cristalinos assim como também apresentam a fluidez de líquidos [3]. Esse estado na verdade é constituído por diversas mesofases, isto é, fases intermediárias [4]. Estas mesofases, que caracterizam o ordenamento microscópico, podem ser nemática, esméctica, colestérica, dentre muitas outras [5]. Para cristais líquidos termotrópicos as transições entre mesofases ocorrem, principalmente, devido a mudanças de temperatura e, em menor grau, com a variação da pressão [4]. No caso de misturas liotrópicas, as mudanças ocorrem com a variação da concentração dos constituintes assim como também com a temperatura. Esse conjunto de propriedades faz com que essas substâncias tenham um grande interesse no setor tecnológico, sendo utilizadas para a produção de mostradores (*displays*), sensores de temperatura e pressão, bem como ferramenta de estudo de interações intermoleculares e de estruturas biológicas [2, 4, 6, 7]. Dessa maneira é fundamental que a pesquisa nesse campo seja algo contínuo, e para tal é necessário utilizar diversas técnicas de caracterização, como por exemplo: medidas de viscosidade; de propriedades elétricas; de birrefringência; raios-X, espectroscopia de impedância, dentre outras [5, 8, 9, 10]. Uma técnica particularmente interessante é a microscopia de luz polarizada, que permite observar as texturas, característica própria da técnica, que pode ser usada para identificar a fase vigente bem como as transições

entre mesofases, reparando as alterações nas mesmas [11].

Com os desenvolvimentos tecnológicos nas recentes décadas, como computadores mais rápidos e acessíveis e o aprimoramento dos sensores de imagem, foi possível um aumento nos estudos relacionados a processamento de imagens. Um ramo que se sobressai deste campo é a aplicação de descritores, algoritmos que recebem uma imagem e retornam ao menos um valor contendo alguma informação da Figura, como o histograma, cor média, textura, dentre outros, e cada qual com suas particularidades. Essas ferramentas, quando aplicadas numa sequência de texturas de cristais líquidos, podem identificar e caracterizar transições de fases e fases [8, 12].

Na literatura, a aplicação de descritores de imagem em cristais líquidos já é algo conhecido e bem praticado, utilizando por exemplo, a matriz de co-ocorrência em escala cinza [12, 13, 14], momentos estatísticos do histograma [8, 15, 16], dentre outros. Entretanto, a maioria das técnicas citadas acima apresenta praticamente apenas um descritor por imagem.

Para agregar e complementar as técnicas, neste trabalho serão apresentados e aplicados diversos descritores, os já citados acima, em conjunto com descritores morfológicos. Este último, ainda ausente na literatura dos cristais líquidos. Utilizados em conjunto, estes descritores podem traçar um perfil de diferentes mesofases, bem como a identificação de suas transições.

Portanto, o objetivo deste trabalho será de instruir o leitor acerca de conceitos preliminares de cristais líquidos, assim como o método de aquisição de imagens. Apresentar alguns descritores de imagens, mostrando seus fundamentos e ressaltando quais informações podemos extrair a partir deles. Vamos ainda mostrar como tais descritores podem ser utilizados para identificar transições de fase em misturas de cristais líquidos liotrópicos, tendo como base transições conhecidas na bibliografia e apresentando, com detalhes, principalmente a morfologia matemática.

2 Breve introdução aos cristais líquidos

A concepção mais comum de que a matéria possui somente três estados fundamentais é suficiente para descrever objetos no dia a dia, onde percebemos principalmente sólidos, substâncias com volume de forma definida, líquidos e gases que podem variar tanto seu volume quanto sua forma. Entretanto, em algum ponto começamos a nos questionar sobre coisas que não têm uma definição de fase tão simplista.

"Em qual estado da matéria está a gelatina?", "O que é o fogo?", "Qualquer coisa congela se resfriada?".

Estas são perguntas joviais sobre os estados da matéria que professores de ciência já podem ter ouvido. De fato, há mais estados da matéria, como condensados de Bose-Einstein, plasmas, entre outros.

Um dos estados não usuais da matéria é a estado líquido cristalino e sua história começa em 1888, quando o botânico Friedrich Reinitzer observou que o benzoato de colesterila possuía dois pontos de fusão distintos, nos quais o material se fundia para um líquido turvo à 145°C e com o aumento da temperatura ele se alterava para um estado completamente transparente em 178°C, assim como entre as transições era observada uma breve alteração na coloração [1, 2]. Pouco tempo depois, em torno de 1889, Otto Lehmann também estudou as propriedades do benzoato de colesterila, assim como outras substâncias que tinham comportamentos semelhantes utilizando microscopia de luz polarizada e um banho térmico [2]. Dessa forma, por meio de observações sobre oleato de amônio e p-zoxil-fenetol, foi determinado um estado no qual o material possuía dois índices de refração, a birrefringência[4], assim como o estabelecimento da existência do estado líquido cristalino.

Mas, afinal, o que são os cristais líquidos? Uma das definições dos cristais líquidos pode ser a seguinte:

"um estado mesomórfico que possui ordenamento orientacional de longo alcance e/ou ordenamento posicional parcial ou desordem posicional completa"[5].

Isto é, imaginando moléculas não esfericamente simétricas, estas possuem um certo grau de ordenamento em torno de um vetor diretor $\vec{n}$, ao mesmo tempo que retêm sua mobilidade. A Figura 1 ilustra a mudança de fases de um material que apresenta uma fase líquido cristalina com o aumento da temperatura.

Dito isso, podemos classificar os cristais líquidos em dois grandes grupos:

Os termotrópicos, que sofrem transições de mesofases devido a mudanças na temperatura e pressão, e são usualmente moléculas orgânicas [4], vide o exemplo

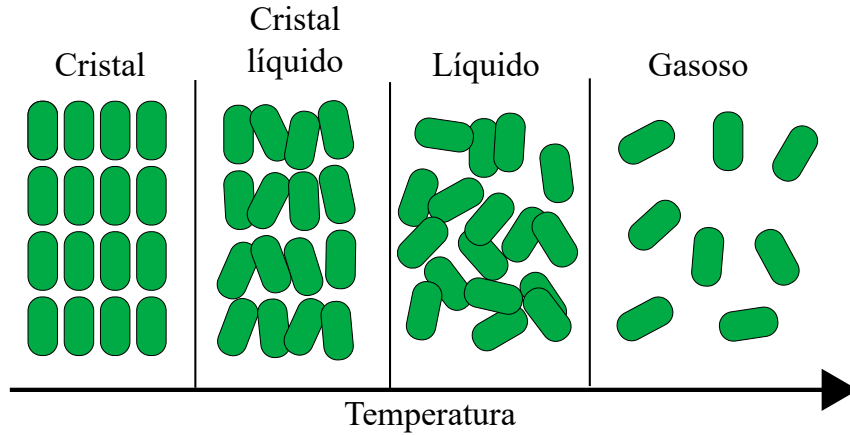


Figura 1: Diagramação do ordenamento molecular com relação à temperatura, a fase líquido cristalina apresenta um alinhamento vertical.

histórico do benzoato de colesterila. Com essa classe possuindo uma ampla aplicação na indústria, devido a sua estabilidade e facilidade de manipulação, de forma que é usado para a produção de *displays* e sensores [2].

Os liotrópicos, por sua vez, são misturas de pelo menos dois componentes: solvente, usualmente água, e um composto anfifílico, moléculas que possuem uma região hidrofílica com uma cauda hidrofóbica, geralmente de cadeia carbônica [17]. Essa mistura dá origem a estruturas internas como micelas, estruturas laminares, dentre outras, como exemplificado na Figura 2. Essa propriedade de auto organização é extremamente interessante para o estudo de estruturas biológicas, como a parede celular, mitocôndrias, filamentos musculares, misturas do sangue entre outras [7].

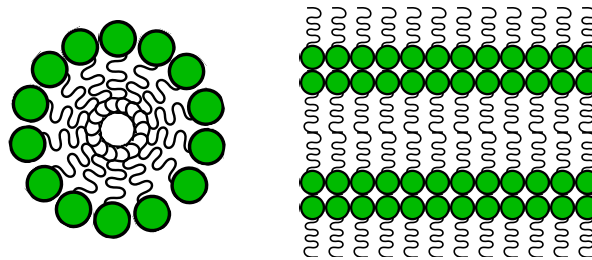


Figura 2: Exemplo de organização das moléculas, estrutura micelar e estrutura laminar respectivamente.

Entretanto é importante ressaltar que nem todos cristais líquidos são iguais. Cada um possui diferentes mesofases, podendo ser esmética, nemática, colestérica dentre outras, que especificam como as moléculas ou estruturas internas se organizam [5]. A identificação dessas mesofases por sua vez, é toda uma área de pesquisa, com diferentes métodos de caracterização, como por exemplo, varredura diferencial de calorimetria, medidas de birrefringência, microscopia óptica, etc. Com dois últimos métodos sendo consequência da anisotropia óptica do material [11].

Materiais com anisotropia ótica possuem ao menos 2 índices de refração diferentes, podendo ter até 3 provenientes das 3 dimensões espaciais. No caso de cristais líquidos uniaxiais, há somente dois índices de refração $n_{\parallel}$ e $n_{\perp}$, o primeiro correspondente ao índice de refração da luz que passa paralelo ao eixo óptico, enquanto que o segundo é perpendicular ao mesmo [9]. Um método de análise experimental que está relacionado a essa propriedade é a microscopia de luz polarizada, que dentro do contexto dos cristais líquidos, permite observar diversas texturas oriundas da diferença do vetor diretor em diferentes regiões da célula.

O procedimento que precede a microscopia é o preparo da amostra a ser analisada. Uma célula plana estreita é preenchida com o cristal líquido previamente preparado. As paredes internas da célula podem ter algum tipo de dopagem especial ou preparada para alterar as condições de ancoramento do CL. O vidro da célula ainda pode ter propriedades especiais, como condutividade para avaliar mudanças devido à campos elétricos. Após o preenchimento da célula, esta então é selada e pronta para ser posta no microscópio.

Para observar as texturas temos a montagem ilustrada esquematicamente pela Figura 3, onde uma luz branca polarizada incide na amostra, sendo que ao passar por cada região da célula, surgem dois raios de luz, o raio ordinário, referente a $n_{\parallel}$, e o raio extraordinário, referente a $n_{\perp}$. Estes dois raios atravessam o segundo polarizador, que projeta ambos os raios em uma única direção, por fim, a textura apresentada é o resultado da interferência destes dois feixes, que agora possuem uma diferença de caminho óptico oriundo da birrefringência do composto. Os demais aparatos, como condensador, foco e as lentes servem para orientar a luz e proporcionar nitidez na imagem. Outro componente importante é a base termo-controlada, que possibilita a análise da textura de um cristal líquido sujeito a uma variação térmica.

Tendo uma variedade de formas organizacionais, é esperado que células de cristais líquidos, quando vistas num microscópio de luz polarizada, tenham diferentes texturas, de maneira que uma mudança no vetor diretor altera a anisotropia e consequentemente os padrões. Dentre as diversas texturas e fases, podemos citar algumas:

A fase **isotrópica** (do grego *iso*, igual, e *tropos*, maneira) não apresenta anisotropia, isto é, há uma desordem total do meio. Como resultado, o material possui apenas um índice de refração, de forma que durante a microscopia de luz polarizada notamos apenas uma tela escura, já que, sem o fenômeno da birrefringência não há regiões claras.

Cristais líquidos nemáticos possuem moléculas, ou estruturas, em formatos cilíndricos ou ortorrômnicos que não possuem ordenamento translacional mas sim ordenamento rotacional em torno de um vetor diretor $\vec{n}$, o qual define a orientação

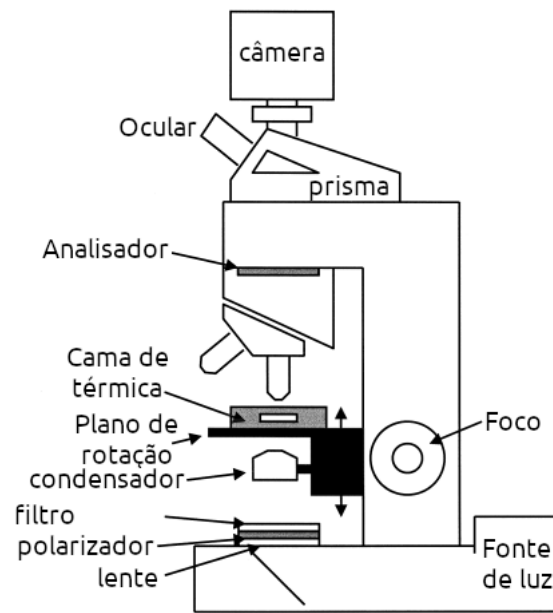


Figura 3: Esquema de um microscópio de luz polarizada usado para analisar cristais líquidos, pág. 34, [11](adaptado).

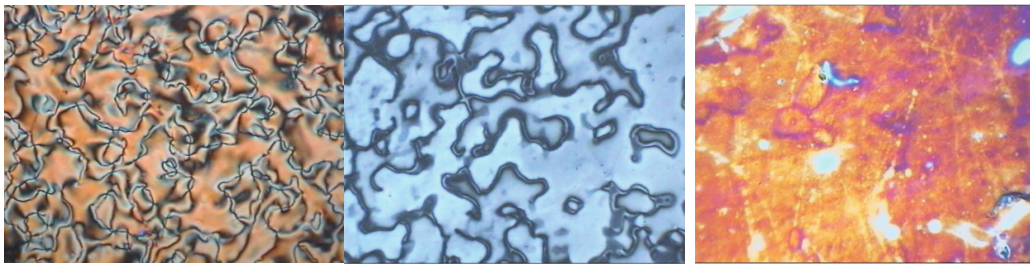
predominante das componentes. Devido à anisotropia do material, temos ao menos dois índices de refração. Se o substrato não tiver uma preparação especial, temos o planar degenerado, com o diretor variando suavemente em diferentes regiões da célula, dando origem as suas texturas características, a saber:

Textura de Schlieren, Figura 4a, onde o vetor diretor varia suavemente para diferentes regiões, em lugares escuros temos o vetor diretor paralelo ao eixo ótico ou perpendicular ao polarizador, os caminhos escuros se unem em regiões determinadas defeitos, onde há uma mudança mais abrupta do vetor diretor. Esses defeitos podem ter duas ou quatro ramificações [11].

Textura de linhas, Figura 4b, é caracterizada pelos fios que parecem correr pela textura. Em contraste com a textura de schlieren, aqui os vetores diretores são mais estáveis, com a mudança ocorrendo somente sobre as linhas [11].

Textura de marmorizada, Figura 4c, neste caso a variação do vetor diretor é mais suave que as demais. Como característica discrepante temos a presença em quantidade bem reduzida de defeitos [11].

No caso particular deste trabalho, as texturas de Schlieren e a isotrópica estão presentes.



(a) Schlieren.

(b) Fios ou *Thread like*.

(c) Marmorizada.

Figura 4: Texturas características de cristais líquidos nemáticos com ancoramento planar degenerado [11], pág. 170 e 172.

3 Processamento de imagens e descritores

3.1 Imagens digitais

Uma imagem em escala de cinza pode ser definida como uma função bidimensional, $f(x, y)$, onde x e y denotam as coordenadas espaciais e f o valor do brilho, intensidade ou nível de cinza. Para imagens analógicas, como filmes fotográficos, $f(x, y)$ é contínua. Entretanto, para que uma imagem seja digital, $f(x, y)$, assim como os valores de x e y , devem ser discretizados e finitos. Dessa maneira, a informação referente ao brilho pode ser armazenada em uma máquina, usualmente de forma matricial, com cada elemento da matriz sendo o menor elemento de uma imagem, denominado *pixel* [18].

Entretanto, o mundo como percebemos não é cinza, mas sim colorido; dessa forma, precisamos compreender o mecanismo interno da percepção de cores, e como aplicá-lo a imagens digitais. Para tal, introduziremos o conceito de espaços de cores.

O fundamento da percepção de cores vem da teoria tricromática, proposta por Thomas Young em 1802 e quantificada por Hermann von Helmholtz em 1894 [19]. Essa teoria propõe que o mecanismo pelo qual o olho humano percebe as cores vem por meio da combinação do estímulo de fotorreceptores especializados, ou cones, localizados na retina. Cada cone é sensível majoritariamente a comprimentos de onda correspondentes às cores azul, verde ou vermelho. Todas as demais cores que são percebidas vêm de uma combinação desses três estímulos. O amarelo, por exemplo, se dá quando há estímulo em proporções semelhantes de verde e vermelho, enquanto não há estímulo azul.

Segundo essa teoria, todas as cores, ou ainda, todos os estímulos visuais podem ser expressos por um estímulo triplo dos cones vermelhos, verdes e azuis. Podemos agora expressar não somente a intensidade de brilho numa imagem, mas também a sua cor utilizando um vetor de três componentes $[R, G, B]$, do inglês *red*, *green*, *blue*, o qual compõe o espaço de cor amplamente conhecido como RGB [18], que pode ser representado na Figura 5.

Esse espaço de cor mostra-se interessante para armazenamento digital, visto que os *displays* também usam a teoria tricromática para exibir imagens coloridas. Entretanto, há diversos espaços de cores, cada um com suas vantagens e desvantagens.

Um particularmente interessante é o HSV, no qual a informação da cromaticidade, isto é, a informação das cores, é separada da intensidade de luz. De maneira que o H representa *hue* a cor “pura” e S, a saturação, ou seja, o quão pura é a cor. Uma saturação máxima representa uma cor “estridente”, enquanto que uma cor pouco saturada tende a um tom desbotado. Por fim, V é o canal do valor, que

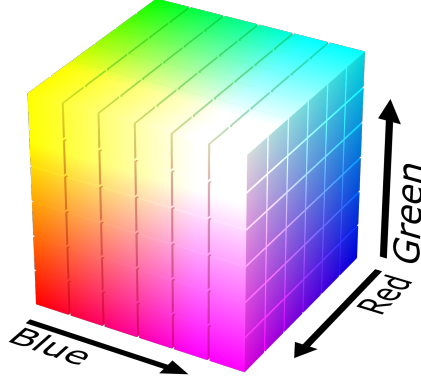


Figura 5: Visualização do espaço de cor RGB. [20]

contém a quantidade de brilho. Com a conversão do espaço de cor RGB para o HSV seguindo os passos dado pelas equações abaixo [21]:

$$V = \max(R, G, B) \quad (1)$$

$$S = \begin{cases} V - \min(R, G, B) & \text{se } V \neq 0 \\ 0 & \text{do contrário} \end{cases} \quad (2)$$

$$H = \begin{cases} 60(G - B)/(V - \min(R, G, B)) & \text{se } V = R \\ 120 + 60(B - R)/(V - \min(R, G, B)) & \text{se } V = G \\ 240 + 60(R - G)/(V - \min(R, G, B)) & \text{se } V = B \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{se } H < 0 \quad H = H + 360 \quad (4)$$

Dessa forma os limites dos canais H, S e V ficam confinados entre $[0,1]$, $[0,1]$ e $[0,360]$, respectivamente. Estes valores então são mapeados para o alcance de 0 a 255 para a saturação e valor, enquanto que a *hue* pode ter seu valor dividido por dois para poder ser arquivada em 8 bits, num intervalo $[0,180]$ [21].

3.2 Descritores globais

Para humanos a tarefa de diferenciar e caracterizar texturas e objetos é algo trivial do dia a dia; entretanto, ensinar máquinas a compreender objetos, texturas, contornos, formas, entre outros artefatos das imagens é algo difícil. Dessa maneira, há uma pesquisa contínua nesse campo.

Felizmente, uma das ferramentas para a caracterização de imagens são os des-

critores, isto é, algoritmos que determinam certas características de uma imagem. Descritores globais atribuem valores à imagem como um todo, enquanto que descritores locais fazem isso para regiões da imagem, como ilustrado na Figura 6. Essas propriedades, que podem ser dos mais variados tipos, como será mostrado a seguir, têm uma ampla importância para reconhecimento de padrões e *machine learning* [22].

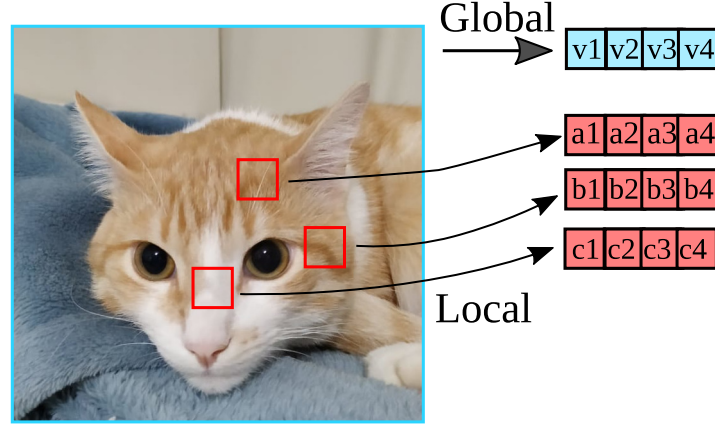


Figura 6: Diagrama da diferença entre descritores locais e globais

Neste trabalho, usaremos descritores para caracterizar texturas de cristais líquidos liotrópicos assim como avaliar o uso de cada um para a detecção de transições de fase, como já foi presente na literatura [8, 12, 15, 23].

3.2.1 Histogramas e momentos estatísticos

O histograma é o conjunto de dados que fornece a frequência com que um *pixel* de determinado valor aparece dentro da imagem. Com isso podemos aplicar alguns momentos estatísticos, μ_n , descrito pela equação (5) para extrair algumas informações com relação à distribuição de tons [24].

$$\mu_n = \sum_{x=0}^{N_g-1} x^n P(x) \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\mu_2} = \sqrt{\sum_{x=0}^{N_g-1} x^2 (P(x) - \mu_1)} \quad (6)$$

O momento de ordem 0 é identicamente 1, pois é a própria condição de normalização. μ_1 por sua vez é a média, ou valor esperado. Enquanto que σ , equação (6), é o desvio padrão, indicando a variabilidade da distribuição. Existem infinitos momentos estatísticos, entretanto a variância e a média apresentam conceitos mais

relevantes para este trabalho [24].

3.2.2 Matriz de co-ocorrência

A matriz de co-ocorrência de escala cinza, ou GLCM (do inglês *Gray Level Co-occurrence Matrix*), é um descritor de imagem proposto por Halarick [25] e tem sua aplicação principal na classificação e identificação de texturas, sendo usado amplamente na área médica, análise de cristais líquidos, geologia, entre outros [26, 13, 27].

Essa matriz especifica a frequência que um *pixel* de intensidade i aparece vizinho de um *pixel* com intensidade j , a uma distância $\Delta x, \Delta y$, como explicitado pela equação (7), com a matriz em si tendo uma dimensão $N_g \times N_g$, com N_g sendo quantidade de níveis de cinza da imagem.

$$GLCM_{\Delta x, \Delta y}(i, j) = \sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m \begin{cases} 1, & \text{se } I(x, y) = i \text{ com } I(x + \Delta x, y + \Delta y) = j \\ 0, & \text{do contrário} \end{cases} \quad (7)$$

Tal relação é exemplificada na Figura 7, onde a matriz de co-ocorrência foi calculada considerando o primeiro vizinho à direita. Logo esta matriz nos diz quantas vezes há um *pixel* de valor i ao lado de valor j , como ressaltado pelos contornos: *pixels* de valor zero aparecem ao lado de *pixels* com valor três duas vezes, assim como há dois *pixels* de valor dois, com vizinhos três e assim por diante.

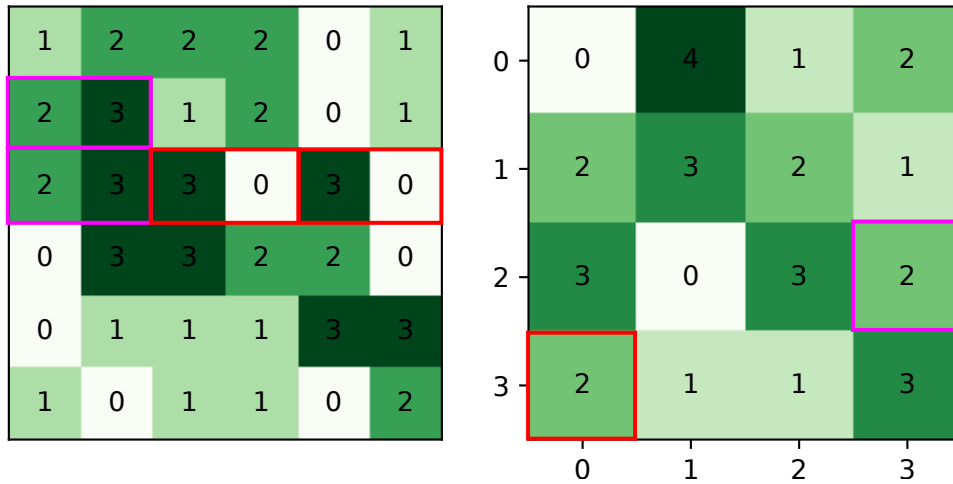


Figura 7: Uma imagem com 4 níveis de cinza (esquerda), e sua matriz com ocorrência (direita), considerando o primeiro vizinho horizontal ao lado direito, as cores ressaltam a contribuição para a GLCM.

Entretanto, a matriz por si só apresenta uma interpretação complexa. Para facilitar a análise, foram propostas 14 grandezas associadas [25], mas boa parte

delas são altamente correlacionadas, e usualmente apenas algumas são utilizadas. Neste trabalho faremos o uso dos seguintes parâmetros:

Energia, equação (8), segundo momento angular ou uniformidade, é uma medida da uniformidade da textura. Algo homogêneo, como uma tela em branco, proporciona uma energia mais alta, que uma lixa, já que há poucas opções de vizinhança entre os *pixels*.

$$\text{energia} = \sum_{i=0}^{Ng-1} \sum_{j=0}^{Ng-1} g^2(i, j) \quad (8)$$

Entropia, equação (9), uma medida da desordem da imagem. Um ruído homogêneo tem uma entropia máxima, enquanto que uma imagem que possui pouca variação de vizinhanças apresenta uma entropia mais baixa, podendo ser usado como uma medida da variabilidade da textura; tem ainda uma relação inversa com a energia [28]:

$$\text{entropia} = - \sum_{i=0}^{Ng-1} \sum_{j=0}^{Ng-1} g(i, j) \log(g(i, j)) \quad (9)$$

Contraste, equação (10), como o nome sugere, é uma medida do contraste da textura, mostrando a diferença de valor entre os *pixels* próximos, comportamento que pode ser identificado observando a equação que o define. Valores na diagonal principal têm contribuição identicamente zero, enquanto que valores das bordas temos peso maior. Duas imagens com ruídos aleatórios binários semelhantes, digamos 0 e 1 e 0 e 2, teriam a mesma entropia, e energia, mas diferentes valores de contraste [28]:

$$\text{contraste} = \sum_{i=0}^{Ng-1} \sum_{j=0}^{Ng-1} (i - j)^2 g(i, j) \quad (10)$$

Correlação, equação (11), é a medida da relação linear entre os *pixels*, ou seja regiões de crescimento ou decrescimento uniforme de tons de cinza apresentam uma correlação grande, enquanto que digamos uma textura chuviscada, como estática de televisão, ou ruídos do sensor de imagem apresentam uma correlação próxima de zero [28].

$$\text{corr} = \sum_{i=0}^{Ng-1} \sum_{j=0}^{Ng-1} (i - \mu)(j - \mu)g(i, j)/\sigma \quad (11)$$

Outro fator a ser ressaltado sobre a GLCM é a direcionalidade, de forma que,

comparando diferentes deslocamentos para a computação da matriz, pode-se identificar uma direcionalidade da textura, ou mesmo a falta dela.

3.3 Morfologia matemática

A morfologia matemática é uma área interdisciplinar, envolvendo teoria de grupos, topologia, reticulados, entre outras. No âmbito do processamento de imagens digitais, a morfologia estuda transformações envolvendo as formas, de maneira que é possível utilizar uma série de operações, que serão apresentadas a seguir, para filtrar objetos, segmentar a imagem, etc. Entretanto, para sua aplicação é necessário conhecer seus fundamentos e algumas operações básicas, como a erosão e dilatação.

Para utilizar morfologia matemática no estudo e transformações de imagens, é preciso reformular alguns conceitos previamente apresentados. Aqui trataremos a imagem com mais rigor. Digamos que um conjunto $E \subset \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$, com $x \in E$ sendo a posição de um píxel da imagem, isto é $x = (h_x, w_x)$ uma dupla de coordenadas. Façamos agora $G = [0, g] = 0, 1, 2, 3, 4, \dots, g$ um conjunto totalmente ordenado, que define os níveis de cinza. Dizemos então que $F : E \Rightarrow G$ como uma imagem em escala de cinza, ressaltando que no caso particular em que $G = \{0, 1\}$ temos ainda uma imagem binária. Consideremos ainda, um elemento estruturante K , de forma semelhante à uma imagem em escala de cinza, com k sendo um ponto do elemento estruturante. As operações morfológicas fundamentais são a erosão e a dilatação, definidas respectivamente pelas equações (12) e (13).

$$\delta_K(F)(x) = \max_{k \in E} \{F(k) + K(x - k)\} \quad (12)$$

$$\varepsilon_K(F)(x) = \min_{k \in E} \{F(k) - K(k - x)\} \quad (13)$$

Neste trabalho, o elemento estruturante é sempre plano, com $K(k) = 0, \forall k$; dessa forma as equações acima podem ser simplificadas para as equações (14) e (15) [29]:

$$\delta_K(F)(x) = \max_{k \in E, x-k \in K} \{F(k)\} \quad (14)$$

$$\varepsilon_K(F)(x) = \min_{k \in E, k-x \in K} \{F(k)\} \quad (15)$$

O impacto desses operadores básicos pode ser observado na Figura 8. Nela, as imagens sofreram dilatação e erosão usando um elemento estruturante plano, em formato de cruz. A dilatação alargou o traço do rosto e aumentou todos os objetos, enquanto que a erosão reduziu o tamanho de todos, assim como removeu o rostinho.

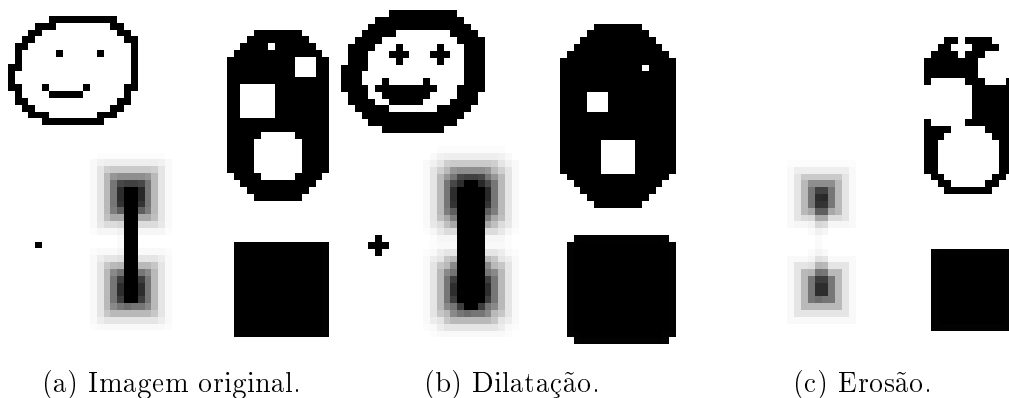


Figura 8: Transformações de dilatação e erosão aplicadas a uma imagem de exemplo, usando um elemento estruturante de cruz; *pixels* escuros possuem valor maior.

Com a erosão e a dilatação definidas, podemos criar alguns filtros. Na morfologia matemática, o termo filtro é formalmente definido como um operador monótono e idempotente. Um operador Ψ é monótono se o ordenamento dos elementos se mantém constante após a aplicação do operador, $x \geq y \Rightarrow \Psi(x) \geq \Psi(y)$. Uma operação ser idempotente afirma repetidas operações de um mesmo operador não causam alteração, $\Psi(\Psi(F)) = \Psi(F)$, ou ainda $\Psi^m(F) = \Psi(F)$.

Mantendo-se um elemento estruturante K e uma imagem F , duas operações de filtragem são a abertura e o fechamento. A abertura é um filtro anti-extensivo, composta da erosão seguida da dilatação, $\gamma_K(F) = \delta_K(\varepsilon_K(F))$, a qual remove regiões menores que o elemento estruturante, como pequenos pontos e linhas. O fechamento, por sua vez, é extensivo e é composto de uma dilatação seguida de erosão, $\varphi_K(F) = \varepsilon_K(\delta_K(F))$, que preenche buracos menores que o elemento estruturante [29]. Os efeitos de tais filtragens podem ser notados na Figura 9, de forma que a abertura removeu completamente o rostinho, já que seu traço é menor que o elemento estruturante, enquanto que o fechamento preencheu algumas regiões do objeto à direita.

Entretanto, é necessário observar que esse tipo de filtragem altera os elementos não filtrados da imagem para o formato do elemento estruturante [29], como observado nos buracos da Figura 9. Se K fosse um disco, a imagem teria diversas regiões arredondadas. Para contornar esse problema podemos definir a abertura e o fechamento por reconstrução, que preservam melhor as estruturas que não foram filtradas.

A dilatação condicional de um conjunto F por um elemento estruturante pequeno K (usualmente uma cruz elementar), tendo como referência um conjunto R (uma imagem em escala de cinza), é definida como $\delta_{R,K}(F) = \delta_K \cap R$. Dessa maneira, a abertura por reconstrução de uma imagem se dá por meio da erosão por um primeiro

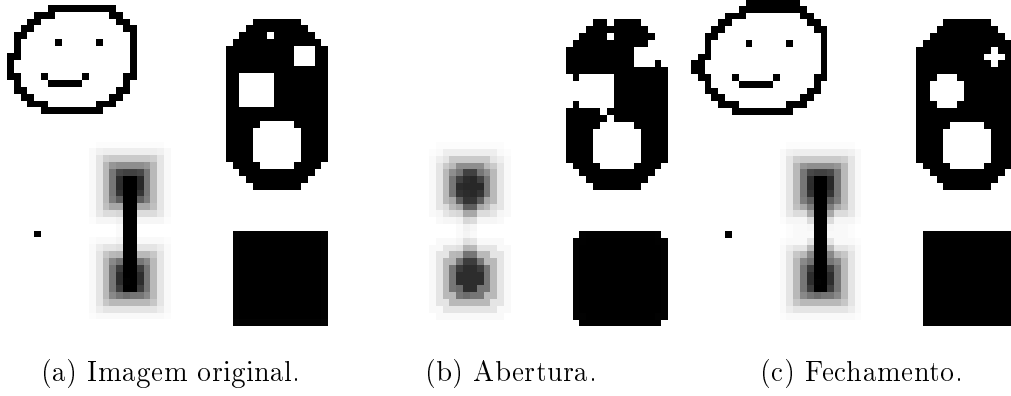


Figura 9: Operações de filtragem básica, usando uma cruz como elemento estruturante; *pixels* escuros possuem valor maior.

elemento estruturante, seguido de sucessivas dilatações condicionais, equação (16), até que $\delta_{R,K}^{n+1}(F) = \delta_{R,K}^n(F)$.

$$\delta_{R,K}^{n+1}(F) = \delta_K(\delta_{R,K}^n(F)) \cap R \quad (16)$$

Seus efeitos podem ser bem notados na Figura 13, onde ambas as filtragens removeram objetos menores que o elemento estruturante, mas a abertura simples deformou completamente a parte não filtrada, enquanto que a abertura por reconstrução preservou perfeitamente os aspectos originais.

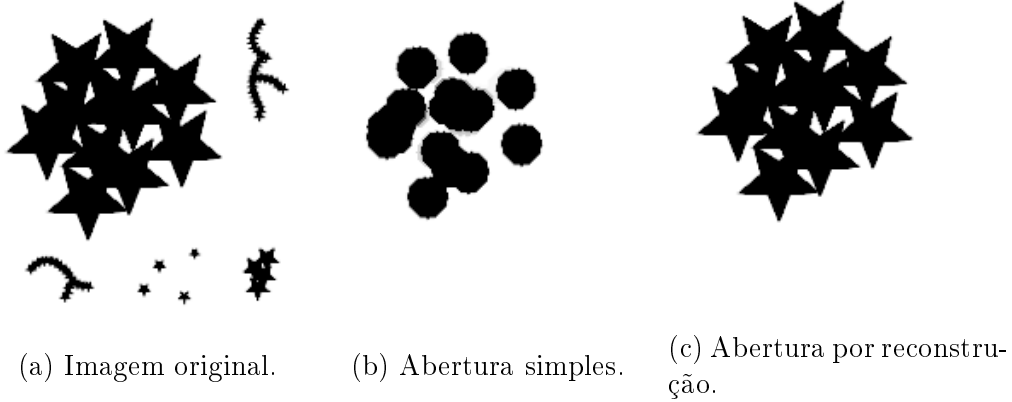


Figura 10: Diferença entre abertura simples e por reconstrução, a forma é muito mais bem preservada; *pixels* escuros possuem valor maior e elemento estruturante da erosão é um disco de raio 9.

Outra filtragem que preserva a estrutura fina da imagem é a abertura e o fechamento por área, no qual a primeira remove elementos menores que um certo parâmetro de área n , enquanto que o fechamento preenche buracos menores que o dito parâmetro [29].

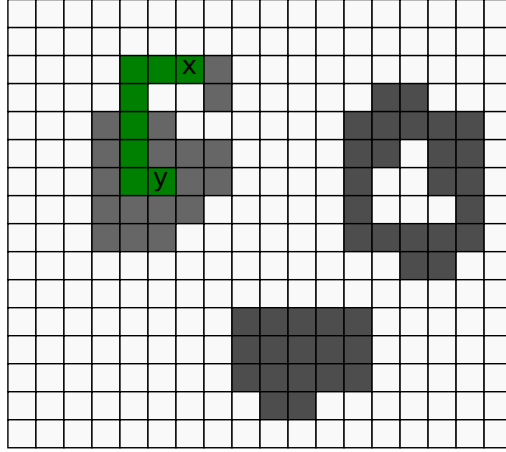


Figura 11: Uma imagem binária, com 3 elementos conexos, seguindo a 4-conectividade, exemplificando um caminho entre x e y dentro de uma das componentes.

Antes de seguir para a próxima transformação morfológica, precisamos estabelecer o conceito de elemento conexo. Numa imagem binária, o conjunto $N(x)|x \in E$ define a vizinhança de x , uma vizinhanças comumente utilizadas é a 4-conexas, que engloba os píxels acima, abaixo, à esquerda e à direita. Ou seja, um píxel $x = (h, w)$, tem um conjunto $N(x) = \{(h + 1, w), (h - 1, w), (h, w + 1), (h, w - 1)\}$. Dizemos ainda que um caminho que liga dois pontos x e y é definido como $P(x, y) = \{p_0, p_1, p_2, \dots, p_n\}$, sendo $p_0 = x$ e $p_n = y$ e $i = [0, n - 1]$ e $p_i \in p_{i+1}$. Dizemos então que se $X \subset E$ de maneira que $\forall x, y \in X$ há um caminho que conecte x e y , X é um elemento conexo, e que $\#X$ é sua cardinalidade, ou seja, a quantidade de elementos presentes dentro do elemento, a Figura 11.

A abertura por área numa imagem binária pode ser definida pela equação (17), isto é a união de todos os elementos conexos (F_i) que possuem uma área maior que o parâmetro n , com $F_i \subset F$. Para estender essa operação para níveis de cinza precisamos de uma função de *threshold*, como mostrado na equação (19); com ela, extraímos todos os pontos da imagem que possuem valores maiores que o parâmetro h . A definição da abertura por área de uma imagem F no ponto x é apresentada na equação (18).

$$\gamma_n^{\text{area}}(F) = \bigcup_i \{F_i : \#F_i \geq n\}. \quad (17)$$

$$\Gamma_n^{\text{area}}(F)(x) = \max\{h \leq F(x) | x \in \gamma_n^{\text{area}}(T_h(F))\} \quad (18)$$

$$T_h(F) = \{x \in E : F(x) \geq h\} \quad (19)$$

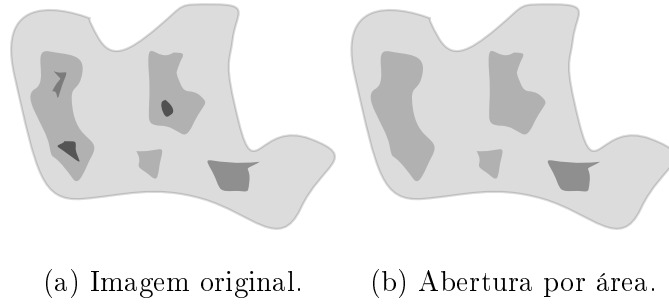


Figura 12: Aplicação da abertura por área usando um parâmetro pequeno; *pixels* escuros possuem valor maior.

Operações de *top-hat* consistem no resíduo obtido por meio de aberturas e fechamentos. Tais resíduos são úteis para obter regiões de interesse. No caso do *top-hat* por abertura obtemos regiões menores que o elemento estruturante, ou o parâmetro de área n para um *top-hat* de abertura por área, ambas operações podem ser observadas nas equações (20) e (21), respectivamente. De forma análoga, os *top-hat* por fechamento retornam buracos menores que o elemento estruturante [29], como pode ser observado na Figura 13 [30].

$$T_\gamma = F - \gamma(F) \quad (20)$$

$$T_\varphi = \varphi(F) - F \quad (21)$$

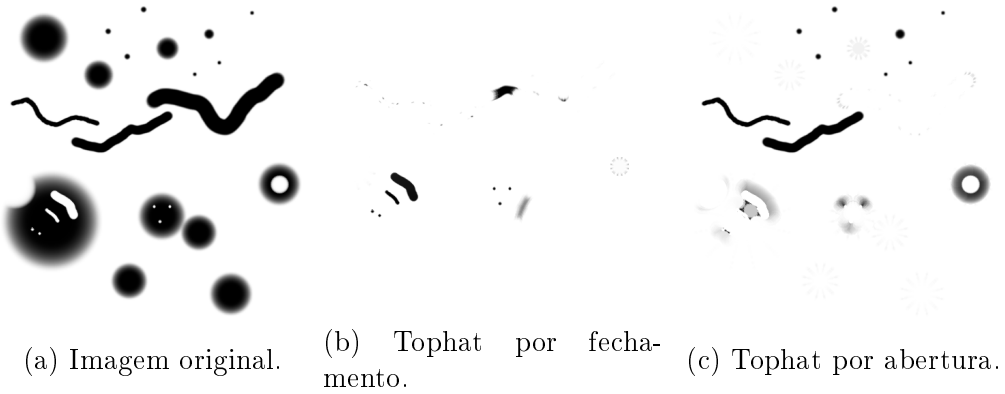


Figura 13: Diferença entre a aplicação de *top-hat* por abertura e fechamento por reconstrução; *pixels* escuros possuem valor maior.

A implementação de *top-hats* com diferentes parâmetros dá a possibilidade de definirmos uma curva granulométrica, $G_I(\lambda)$, dada pela equação (22) [29], com F sendo a imagem original e $\gamma_\lambda(F)$ é uma abertura com parâmetro λ , que pode ser

referente ao elemento estruturante ou a um parâmetro de área [29]. Essa curva nos informa a distribuição do tamanho dos elementos conexos presentes numa imagem através de diversas aberturas com parâmetros diferentes.

$$G_F(\lambda) = \sum F - \sum \gamma_\lambda(F) \quad (22)$$

Dizemos que um elemento da imagem é um fecho convexo se todos os pontos do dito elemento podem ser unidos por um segmento de reta, com este segmento pertencendo completamente ao objeto. Caso haja ao menos um *pixel* não pertencente à imagem, mas que pertença a uma reta que liga dois pontos, este elemento não é convexo.

Há diversos algoritmos para converter um elemento não convexo em seu fecho, com diferentes vantagens para cada método [31]. Neste trabalho, a obtenção do fecho convexo foi utilizando o *scikit-image*, como ilustrado na Figura 14.

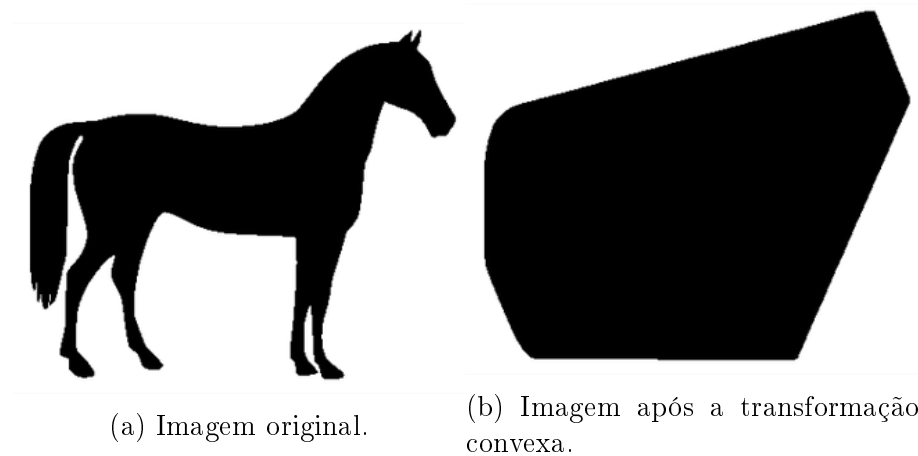


Figura 14: Exemplo da convexação de uma imagem binária [32], adaptado; *pixels* escuros possuem valor maior.

4 Metodologia

Neste capítulo, será mostrado a rotina de trabalho seguida, detalhando cada passo tomado, como uma forma de auxiliar a reprodução. Como esquematizado na Figura 15, o trabalho possui essencialmente 5 etapas para cada sequência ou amostra de cristal líquido analisada.

O primeiro passo é o preparo da mistura em si e seu confinamento em um capilar transparente, podendo haver espaçadores, diferentes substratos, etc. É necessário o mínimo de defeitos no capilar, sem riscos, ou sujeira, favorecendo assim uma imagem límpida.

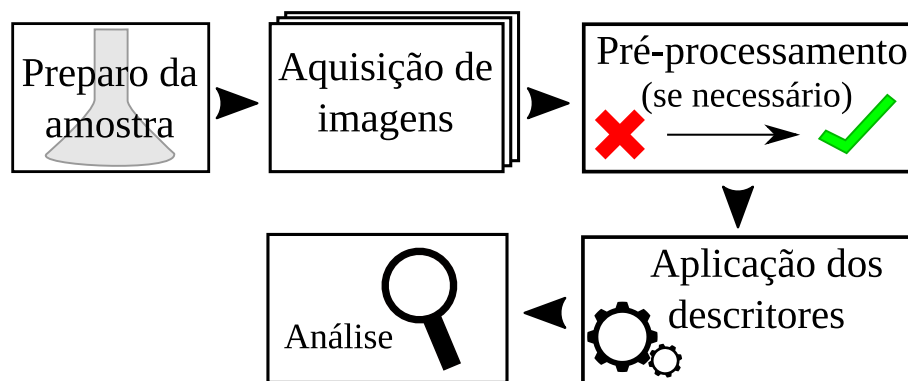


Figura 15: Esquematização da rotina geral do trabalho.

Com a amostra em mãos, o segundo passo é a aquisição da sequência de imagens com o auxílio de um microscópio de luz polarizada. Aqui, as sequências apresentam uma variação na temperatura, embora outras condições possam ser variadas [11]. As imagens, preferencialmente, devem ser arquivadas sem nenhuma compressão. Outro fator relevante é a padronização ao longo de uma sequência de fotos, isto é, manter sempre a mesma abertura, sensibilidade da câmera, brilho, luz ambiente, etc...

O terceiro passo é o pré-processamento, recortes de uma região desejada, mudança do espaço de cor, separação de canais, filtragem de ruído, etc.

O quarto passo consiste em aplicar efetivamente os descritores. As rotinas foram implementadas utilizando a linguagem de programação *Python 3* [33], com auxílio dos pacotes *scikit-image* e *openCV* [32, 21], com scripts disponíveis no repositório https://github.com/pg402004/proc_CL. Neste trabalho foram aplicados, relacionados ao histograma no espaço de cor HSV, à matriz de co-ocorrência, e à morfologia. Podemos então destacar algumas características dos descritores apresentados:

Nos **momentos estatísticos**, para cada imagem deu-se a conversão do espaço de cor RGB para HSV, e a partir daí o histograma de cada canal foi utilizado para determinar seus valores médios e seus desvios associados. Este descritor é um dos

mais simples possíveis, com fácil implementação e interpretação de resultados, que oferecem informações sobre o brilho geral e cromaticidade da imagem. Uma possível falha deste descritor é com imagens que sofreram compressão, ou são majoritariamente escuras, neste caso os canais da HUE e saturação passam a ficar degenerados ou sofrem grande influência de ruídos e compressões do arquivo [34].

A **Matriz de co-ocorrência** teve como pré processamento a conversão do espaço de cor para o HSV, sendo canal do valor utilizado para o cálculo da GLCM visto que este sofre menos influência das mudanças cromáticas, embora o canal verde seja utilizando de forma comum na literatura [14, 12]. A matriz de co-ocorrência foi computada usando 4 direções, correspondendo ao primeiro vizinho direito, superior direito, superior e superior esquerdo. Com a matriz correspondente para cada ângulo, foram calculados as grandezas associadas: contraste, entropia, energia e correlação para as 4 direções. Com as grandezas associadas em mãos, deu-se a análise de curvas e de direcionalidades.

Por fim, na **morfologia matemática** deu-se primeiro com a criação de uma nova imagem, com o valor de cada *pixel* correspondendo à soma dos canais verde, vermelho e azul, de forma a ampliar o contraste da imagem. Na nova imagem foi feita uma filtragem morfológica com uma abertura seguida de fechamento, ambas com reconstrução, utilizando um disco de raio pequeno, este passo é importante para agilizar o processamento em passos seguintes, além de remover ruído e pequenos elementos indesejados. Com a imagem filtrada, nesta é feita uma abertura por área com parâmetro n . Por fim o top-hat é feito entre a imagem filtrada e a abertura por área, e os elementos conexos extraídos após um corte binário, onde todos valores superiores a um são atribuídos valor unitário, passos que podem ser visualizados na Figura 16.

Ressaltando que o tamanho do elemento estruturante da filtragem, que não deve ser tão pequeno a ponto de não remover ruído nem pequenos elementos, mas nem tão grande a ponto de não preservar a textura, como demonstra casos extremos na Figura 17.

O parâmetro de área utilizada na abertura muda o tamanho das regiões extraídas alterando assim a segmentação. Se este valor for pequeno, apenas regiões pequenas serão rotulados, e regiões grandes serão descartadas. Um parâmetro de área grande pode aglutinar dois picos próximos numa única região, como mostra a comparação extrema na Figura 18, sendo assim ambos os parâmetros devem ser determinados a partir de uma inspeção superficial da sobreposição dos elementos com a imagem original para obter resultados satisfatórios.

Com os elementos conexos extraídos, as seguintes grandezas foram calculadas e

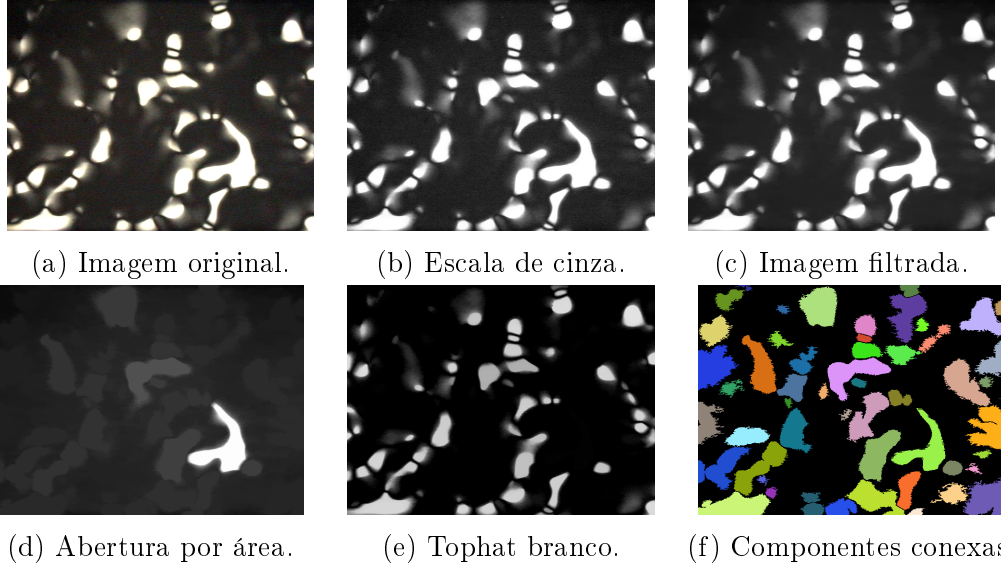


Figura 16: Passos para a extração das componentes conexas utilizando o top-hat por área.

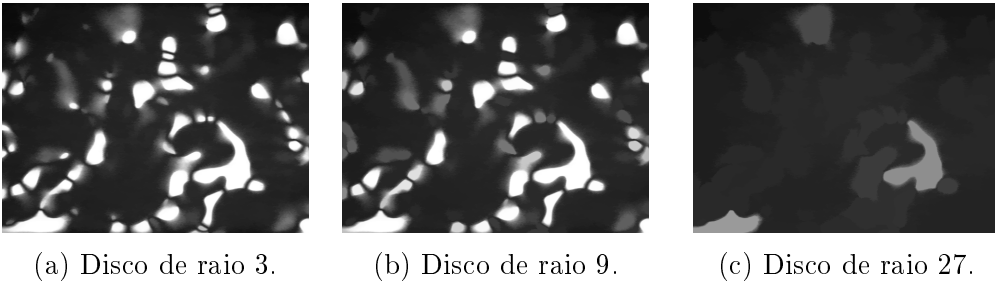


Figura 17: Resultado da filtragem usando discos de diferentes raios como elemento estruturante.

analisadas:

- Número de elementos, a quantidade total de elementos conexos
- Área média. Área é o número de *pixels* pertencentes à um elemento
- Perímetro médio. Perímetro é a quantidade de *pixels* na borda de cada elemento
- Volume médio. Sobre a área de cada elemento no *tophat*, o volume é o cumulativo dos *pixels*, como ilustrado na figura 19.
- Razão V/A média. V/A diz respeito à razão entre o volume do elemento e sua área
- Razão $C.A./A$ média. Sendo $C.A$ a área convexa do elemento e A , sua área nominal

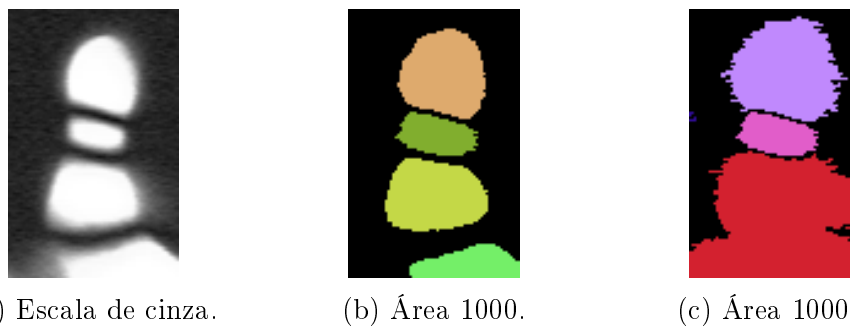


Figura 18: Resultado da segmentação com diferentes parâmetros de área com um mesmo disco de filtragem.

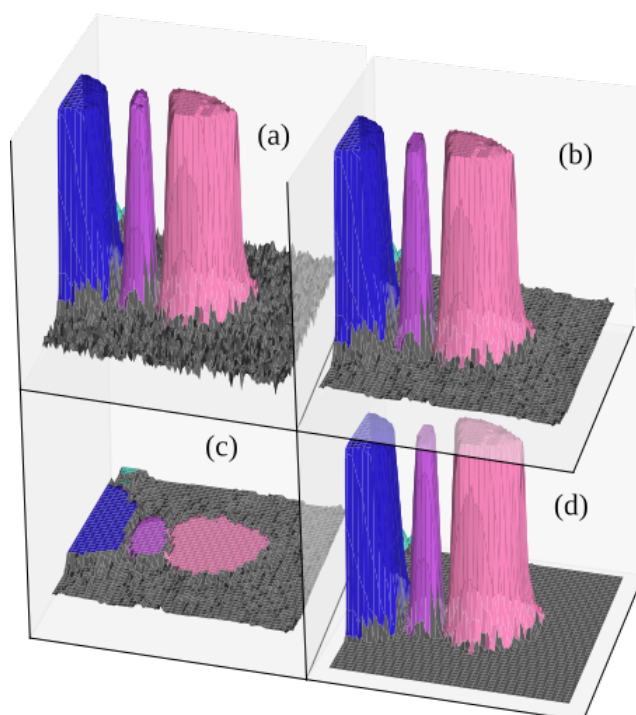


Figura 19: Visualização do relevo da imagem seguindo os passos para a segmentação.

- Diferença granulométrica. A diferença entre as curvas granulométricas de duas imagens consecutivas

5 Aplicação dos métodos

Nesta seção, serão apresentados alguns resultados da aplicação dos descritores apresentados previamente, com o objetivo de identificar transições de fase bem como descrever as texturas de forma quantitativa. Serão usados dois conjuntos de amostras de cristais líquidos: um de mistura ternária e três de mistura quaternária.

5.1 Mistura liotrópica ternária

Aqui temos um cristal líquido liotrópico, composto de uma mistura ternária de: Laurato de potássio (KL), obtido através da neutralização de ácido láurico (Sigma) com hidróxido de potássio (Merck) e purificado através de recristalização em etanol aquecido repetidas vezes; decanol e água pesada (Sigma). Com proporção por peso de 25,30% de KL, 6,24% decanol e 68,46% água. A mistura foi então confinada em uma célula com paredes de 0,2 mm e 0,1 mm de caminho óptico. A amostra sofreu aquecimento em passos térmicos de 0,01°C [8].

As fases presentes já são amplamente conhecidas na literatura [35, 36], como explicitado no diagrama de fases na Figura 20. Com a transição isotrópica para nemática discótica em 13,8°C, seguida de uma transição para nemática biaxial em 18,6°C e então para nemática calamítica, 21,2°C e por fim para isotrópica em 40,3°C [37].

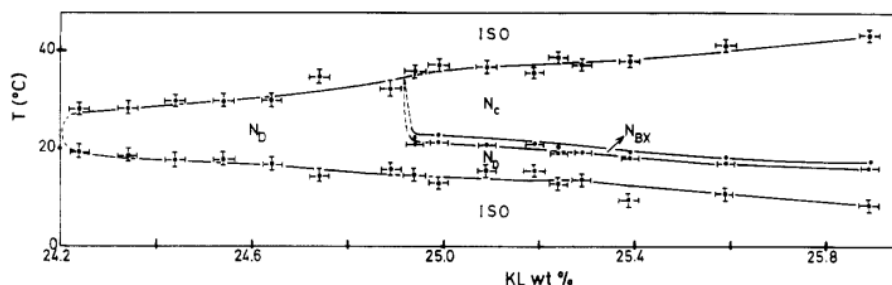


Figura 20: Fases presentes na mistura com 6.24% de decanol variando com a proporção de água pesada/laurato de potássio e a temperatura [36].

Visualmente as fases isotrópicas apresentam texturas homogêneas e escuras devido à falta de anisotropia na amostra, havendo somente o ruído do sensor. A discótica, por sua vez apresenta regiões claras e escuras com o limite entre elas moderadamente bem definidos; por fim há um aspecto de cor pouco saturado. As regiões nemática biaxial e calamítica apresentam a conhecida textura de *Schlieren* com uma cor amarelada, assim como uma grande quantidade de defeitos, os quais reduzem gradativamente com o aumento da temperatura, como ressaltado na Figura 21.

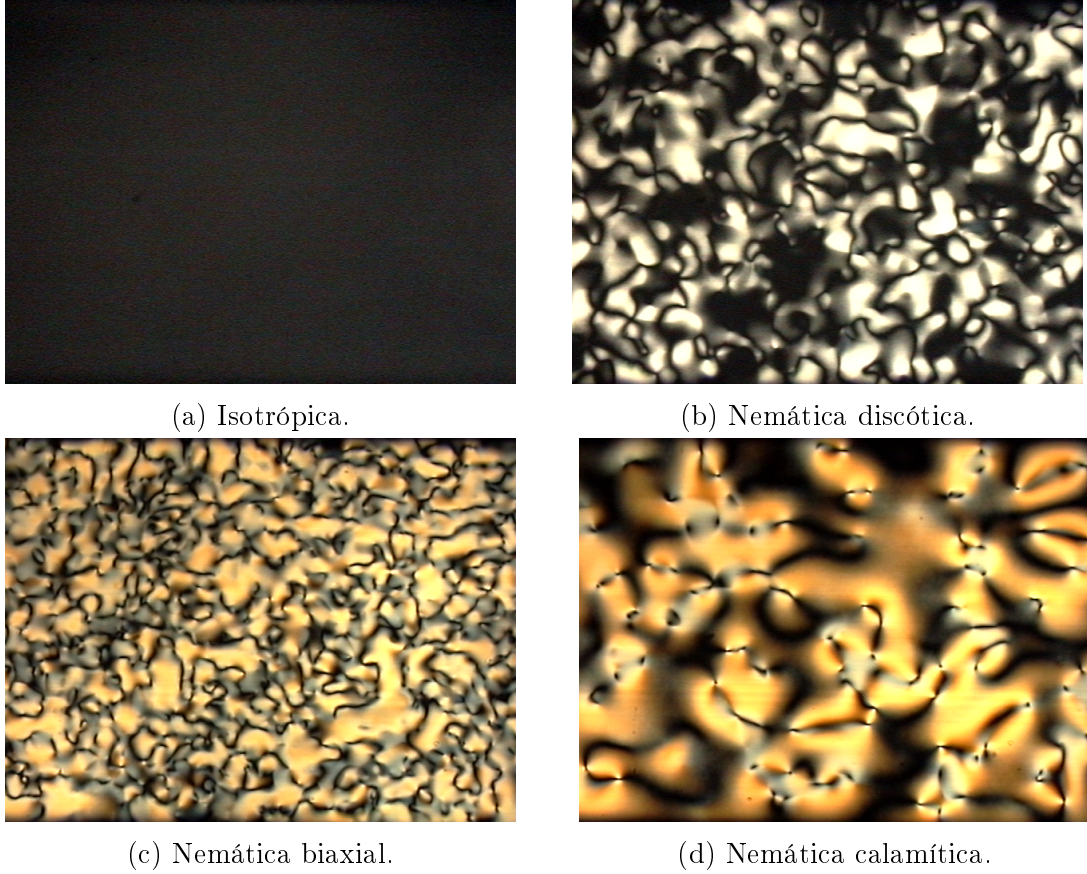


Figura 21: Texturas gerais das fases presentes na sequência.

5.1.1 Momentos estatísticos

Os momentos estatísticos foram avaliados usando o espaço de cor HSV, devido a separação da cromaticidade e do brilho.

Começando pelos valores médios, mostrados na Figura 22, no canal V, notamos que nas fases isotrópicas, V é extremamente baixo, em torno de 40, como esperado, devido a escuridão da imagem causada pela isotropia do material. Com o aquecimento temos a transição $I_{RE} \leftrightarrow N_D$ bem notável devido ao craqueamento da textura com o surgimento de regiões claras, que vão se reduzindo à partir de um brilho máximo de 120 até um segundo craqueamento na transição $N_D \leftrightarrow N_B$, onde vemos o mesmo comportamento do aumento abrupto, com máximo do canal V coincidindo com o máximo da birrefringência como aferindo previamente [8], assim como a transição $N_B \leftrightarrow N_C$. Por fim, o aumento da temperatura reduz o brilho da amostra até uma queda brusca para o segundo regime isotrópico.

Em relação a cromaticidade, a *hue* e a saturação para as fases isotrópicas não revelam muita informação da textura em si, mas sim do ruído presente na imagem, que “puxa” a *hue* para um tom esverdeado ainda que pouco vibrante, devido a sen-

sibilidade do canal verde ser superior aos demais. Na região discótica, a saturação apresenta valores baixos, como esperado, devido à aparência esbranquiçada. Com o aumento da temperatura, a predominância de regiões escuras favorece o ruído, jogando o valor da HUE para próximo dos valores das fases isotrópicas. Após a transição $N_D \leftrightarrow N_B$ há um aumento da saturação média em conjunto com o surgimento de um patamar na *hue*, correspondendo à cor amarela. A transição $N_B \leftrightarrow N_C$ não pode ser detectada pelas médias da cromaticidade.

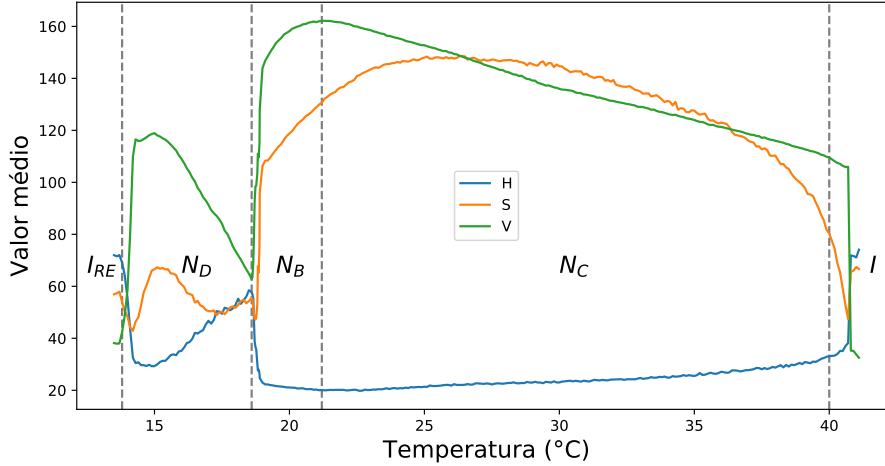


Figura 22: Valor médio de cada canal, lembrando que a *hue* tem seu intervalo de 0 à 180.

No desvio padrão, apresentado na Figura 23. Começamos novamente pelo canal V, nas regiões isotrópicas, temos desvios extremamente baixos, devido à homogeneidade do brilho da textura. As regiões de transição $I_{RE} \leftrightarrow N_D$ por sua vez apresentam um aumento abrupto, assim como um máximo próximo da temperatura intermediária dessa região, comportamento devido à mudança das regiões de fronteira dos domínios, que se reduzem com o aquecimento. A transição $N_D \leftrightarrow N_B$ é facilmente identificada, também devido ao craqueamento; entretanto, a transição $N_B \leftrightarrow N_C$, não corresponde exatamente ao mínimo local, mas um processo de identificação de mudança de fase por momentos estatísticos aprimorados obteve resultados semelhantes [8].

Com relação cromaticidade, a variabilidade da *hue* nas fases isotrópicas se dá devido ao ruído da imagem, sendo consistente nas regiões I e I_{RE} . Na região discótica temos um desvio quase constante para a saturação, indicando um tom fixo e, embora o aumento da variabilidade do canal *hue* seja presente, este é resultado do aumento de regiões escuras, que favorecem o ruído, tanto que o valor final é extremamente próximo do das regiões isotrópicas. O aquecimento da amostra torna nítida a transição $N_D \leftrightarrow N_B$, tanto pela saturação, que forma um novo patamar que se mantém

até o final da região calamítica, quanto pela *hue*, que agora tem um valor baixo, indicando pouca variabilidade de cor. Entretanto, a partir da transição $N_B \leftrightarrow N_C$ temos um aumento regular do desvio, indicando um aumento da variabilidade de tons com o aquecimento, que se dá com o surgimento de novas regiões escuras.

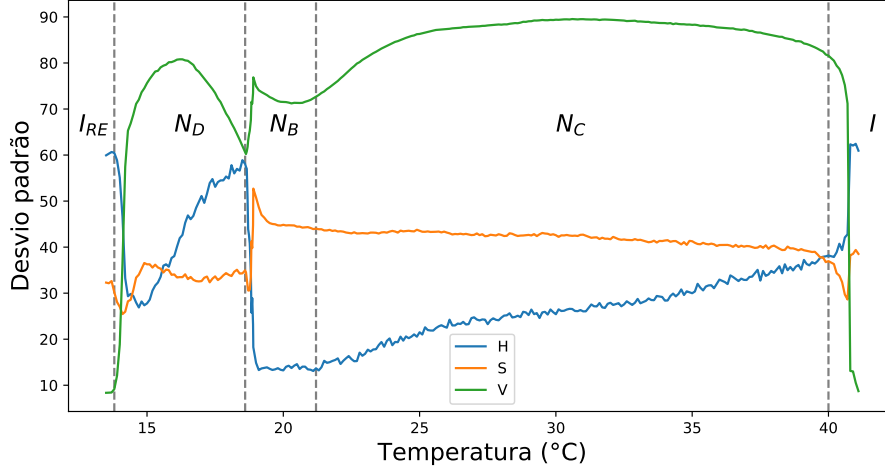


Figura 23: Desvio padrão para cada canal.

5.1.2 Matriz de co-ocorrência

Para esta sequência, a matriz de co-ocorrência foi calculada utilizando somente o canal V de forma a remover possíveis influências cromáticas da textura, bem como a utilização dos vizinhos a direita, acima, e superior direita e superior esquerda, como forma de identificar possíveis direcionalidades da imagem.

Para se ter um panorama geral da distribuição da textura, podemos olhar a própria matriz de co-ocorrência para diferentes fases, como mostrado na Figura 24. Nas fases isotrópicas temos um agrupamento próximo em torno do ponto $[50,50]$, visto que a imagem é predominantemente escura, havendo somente *pixels* escuros próximos de vizinhos escuros, essa região está condizente com o valor médio do canal V notado previamente. Na fase discótica ainda há uma certa hegemonia de regiões escuras embora domínios claros com fronteiras suaves contribuam para a diagonalização da matriz. De forma análoga, na fase biaxial regiões claras e saturadas se sobressaem, dessa forma há uma aumento da frequência entre vizinhos claros, favorecendo um aumento do valor da matriz GLCM próxima de $[255,255]$. Por fim, com o aumento da temperatura temos agora uma diagonal estreita na fase nemática calamítica, devido ao pouco contraste da imagem.

Embora seja possível fazer uma análise de forma geral da textura utilizando a matriz de co-ocorrência, é complicado determinar com precisão onde ocorre uma

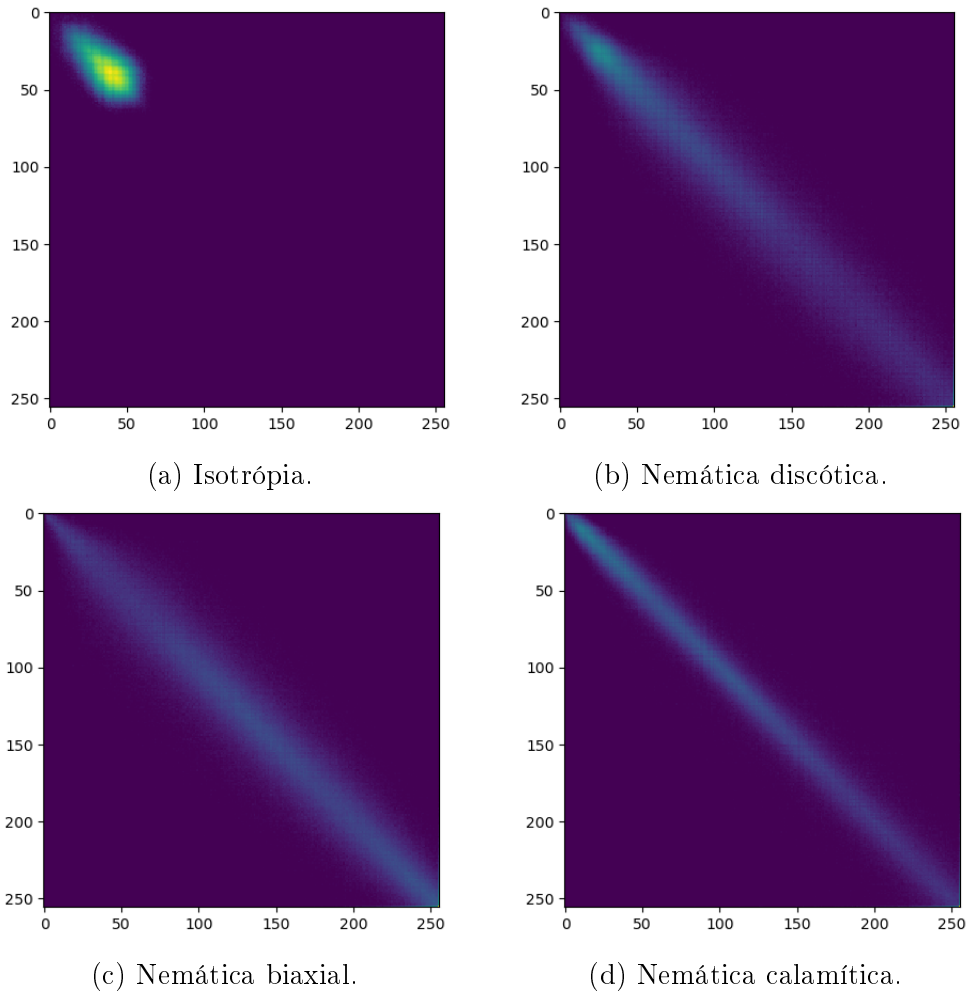


Figura 24: Gráfico do log da matriz de co-ocorrência média, considerando as 4 direções usadas, e distância 1. O logaritmo se dá apenas para melhor visualização.

alteração do comportamento, indicando uma possível transição de fase. Sendo assim, olharemos para as grandezas associadas.

Com relação ao contraste, a fases isotrópicas, temperaturas inferiores a 13,8 ou superiores a 40,0°C, temos valores extremamente baixos, resultado da homogeneidade de tons. As transições mais notáveis ocorrem em 16,8 e 21,2 graus Celsius, com picos no contraste, oriundos do craqueamento da textura. Após essas transições com o aumento da temperatura vemos uma redução do contraste. Isso se dá devido ao aumento dos domínios claros assim como das regiões escuras, isto é, as regiões de alto contraste se reduzem. Outro comentário que pode ser feito com relação à transição $N_B \leftrightarrow N_C$ é que, embora tenhamos uma mudança da estrutura interna do cristal líquido, não vemos uma mudança abrupta do contraste, mas sim o início de um patamar mais estável da fase N_C , que por sinal apresenta um valor baixo, visto que as regiões claras escurecem de forma suave.

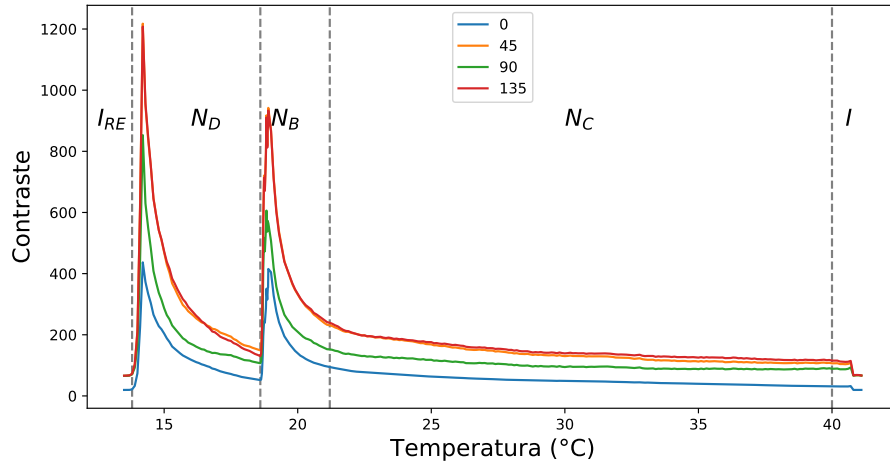


Figura 25: Valor de contraste nas quatro direções, respectivamente.

Embora o valor da energia nos dê certa informação sobre o ordenamento da textura, é importante lembrar que para a região isotrópica, embora seja esperado um valor alto para essas fases, a realidade é um valor baixo, originário do ruído das fotos adquiridas. Com a mudança de fase $I_{RE} \leftrightarrow N_D$, temos um aumento da energia, resultando do surgimento de regiões de brilho homogêneo contínuo, que se sobressai ao ruído nos domínios escuros, os quais passam a desaparecer na mesma fase, reduzindo assim o valor da energia a partir de 17°C. Na transição $N_D \leftrightarrow N_B$ temos um aumento abrupto da energia, oriundo do segundo craqueamento e subsequente estabilização. A transição $N_B \leftrightarrow N_C$ é marcada por um aumento da energia, que atinge um máximo próximo de 27°C, e aí passa a se reduzir, devido à ampliação de regiões na qual o ruído é predominante, até uma queda final na segunda transição isotrópica.

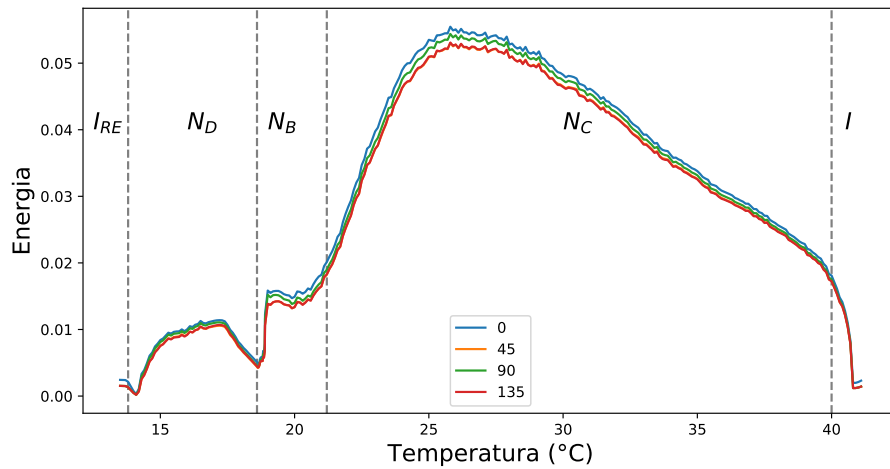


Figura 26: Valores de energia.

Olhando agora para a entropia, temos valores baixos para as fases isotrópicas, pois estas têm uma distribuição pouco espalhada na matriz de co ocorrência, como consequência de sua uniformidade, enquanto que para as transições $I_{RE} \leftrightarrow N_D$ e $N_D \leftrightarrow N_B$ há um aumento abrupto da entropia como resultado do craqueamento nessas temperaturas, espalhando mais a distribuição na GLCM; quanto à transição $N_B \rightarrow N_C$, vemos uma suave mudança na curva, mas nada conclusivo. Por fim, a partir de N_B a entropia decresce, com o afinamento da diagonal da matriz até próximo de 27°C . A segunda transição isotrópica pode ser facilmente identificada, com comportamento semelhante à primeira

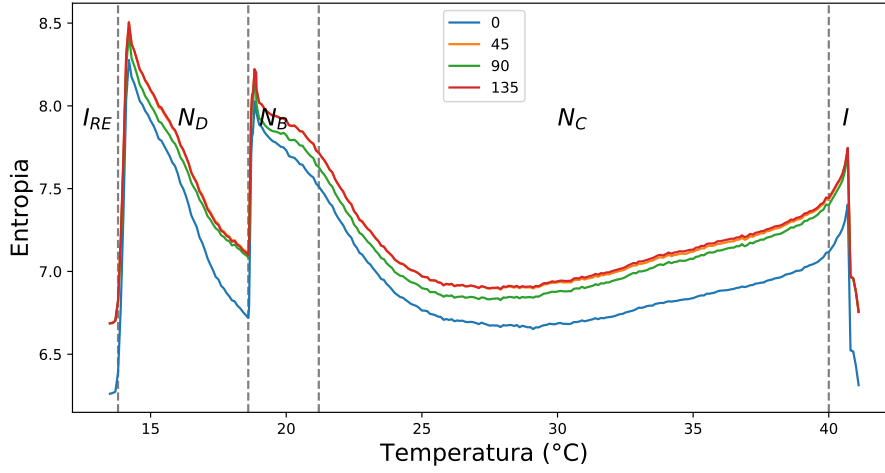


Figura 27: Valores de entropia.

Relembrando a definição da correlação, podemos pensar nela como a predicabilidade entre *pixels*. Como nas regiões isotrópicas temos apenas ruído, é esperado que valores de correlação sejam menores, enquanto que para qualquer outra região, temos valores maiores, já que há de fato uma imagem que altera a distribuição das vizinhanças e impõe predicabilidade. As fases N_D e N_C apresentam um valor de correlação alto devido à continuidade da imagem. Na mudança $N_D \leftrightarrow N_B$ vemos uma redução da correlação, devido a uma queda momentânea em função do craqueamento. O baixo valor da correlação nos regimes isotrópicos reforça as afirmações sobre os valores de energia e entropia.

Como finalização da análise da matriz de co-ocorrência, notamos que o ruído durante a aquisição das imagens desempenha um papel relevante e deve ser levado em consideração. Notamos ainda que algumas grandezas são mais suscetíveis a mudanças. O contraste mostra-se um excelente marcador de regiões de craqueamento e identificação de fases isotrópicas. A energia e a entropia se relacionam, por sua, vez numa via de mão dupla, dando informações da variabilidade de tons de vizinhança

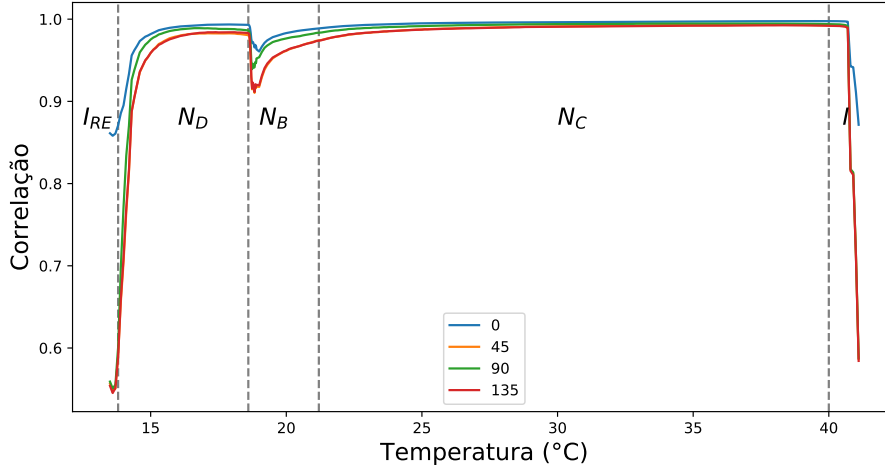


Figura 28: Valores da correlação.

da GLCM; e, por fim, a correlação pode ser usada para identificar regiões com ruído, em conjunto com o contraste e o brilho médio.

5.1.3 Morfologia

Seguindo a metodologia apresentada previamente, para esta sequência, o elemento estruturante da filtragem é um disco de raio 3, e o parâmetro de área da abertura igual a 5000 mostram-se efetivos, ou seja, a filtragem é baixa de forma a preservar as nuances da imagem, e uma área 5000 é satisfatória para dar uma boa separação entre os domínios claros. Os valores foram escolhidos via inspeção visual dos elementos conexos sobrepostos com a imagem após examinar diferentes raios de filtragem (1, 3, 5, 7) e diferentes parâmetros de área (100, 500, 5000, 10000).

Com os elementos em mão, as grandezas observadas foram a quantidade de elementos, bem como área, volume, perímetro, assim como área convexa/área nominal, razão volume/área e diferença granulométrica.

Como esperado e observado na Figura 29, nas regiões isotrópicas não há elementos conexos, enquanto que regiões de craqueamento nas transições $I \leftrightarrow N_D$ e $N_D \leftrightarrow N_B$ são facilmente observadas devido ao surgimento de uma grande quantidade de regiões claras, quantia que decai rapidamente até uma estabilização, caso não haja outra alteração de mesofase. Como última ressalva do número de elementos, notamos que na transição $N_B \leftrightarrow N_C$ há, ainda que suave, um segundo patamar.

Com relação a área média, temos no craqueamento do início da fase discótica uma queda abrupta, onde surgem muitas regiões claras pequenas, que crescem até um valor médio de 3000 *pixel*. Cruzando esta informação com a queda dos número de elementos podemos concluir que os domínios da célula de cristal líquido crescem,

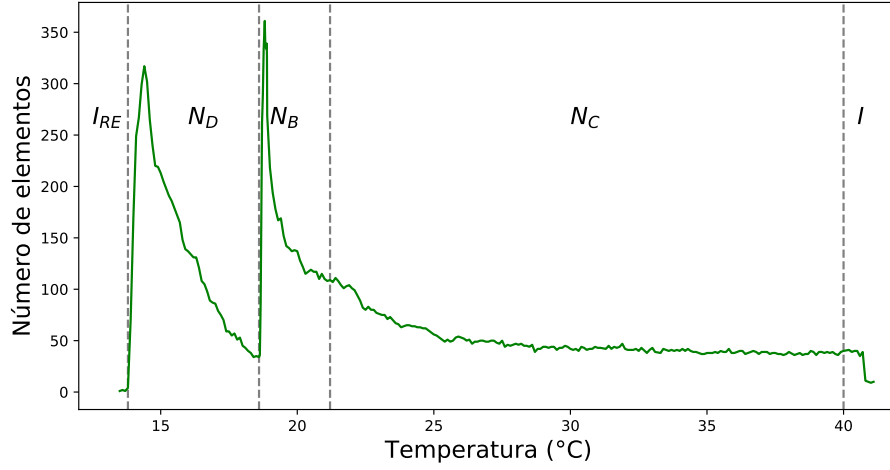


Figura 29: O número de elementos conexos para cada temperatura.

somem, se aniquilam e se aglutinam de forma a maximizar seus tamanhos com o aumento da temperatura nesta fase. A transição $N_D \leftrightarrow N_B$ é caracterizada por uma queda brusca no tamanho dos elementos, o qual retorna até um breve patamar próximo da mudança $N_B \leftrightarrow N_C$ e, a partir daí, temos um crescimento regular. Há ainda o que aparenta ser um limite para os domínios mais claros, que gira em torno de 3000 *pixels*, máximo atingido próximo da segunda transição.

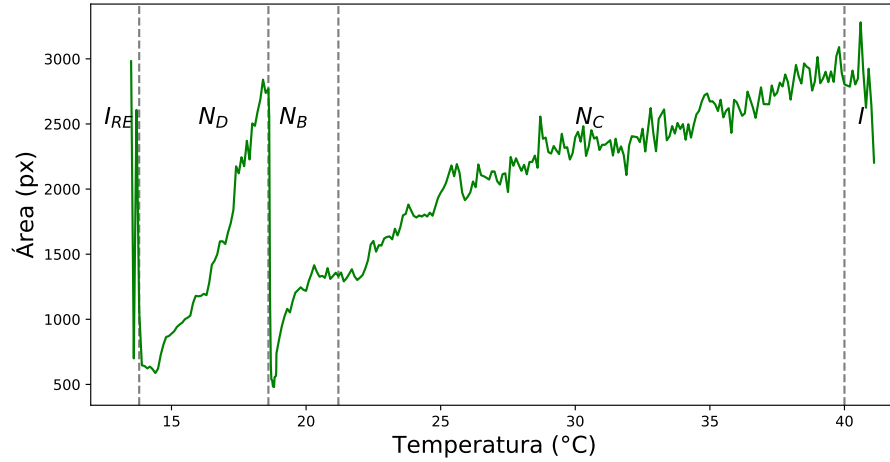


Figura 30: Área média com relação à temperatura.

A Figura 31 nos mostra como o perímetro se altera com o aumento da temperatura. A transição $I_{RE} \leftrightarrow N_D$ é marcada por uma queda dos perímetros devido ao craqueamento. Durante o regime N_D , temos um crescimento regular até a mudança $N_D \leftrightarrow N_B$, de forma análoga à primeira. Nas temperaturas correspondentes a N_B e N_C , o comportamento é regular e quase constante, sofrendo alterações somente na transição $N_C \leftrightarrow I$.

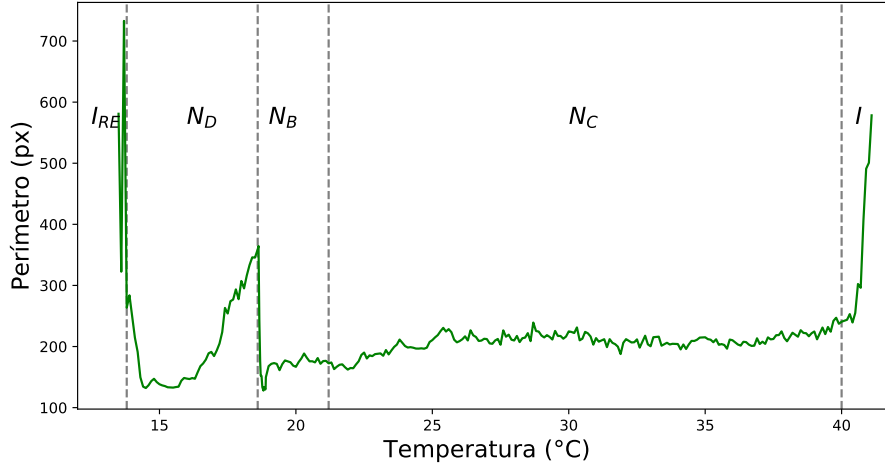


Figura 31: Comportamento do perímetro médio em relação à temperatura.

Mais uma vez as regiões isotrópicas mostram-se previsíveis, com volumes extremamente baixos, resultado do brilho reduzido. O aquecimento da amostra na região discótica gera um aumento no volume médio, que coincide com o aumento do brilho observado nas texturas, onde, embora haja uma redução do número de elementos, os remanescentes são mais claros e maiores. O craqueamento em 18,6°C causa uma queda nos volumes; estes permanecem estáveis até a transição $N_B \leftrightarrow N_C$, onde passam a crescer em conjunto das áreas. Outro evento que ocorre aqui é uma minimalização dos volumes próximo da transição $N_B \leftrightarrow N_C$, isto é, há menos brilho nos domínios presentes nessa transição.

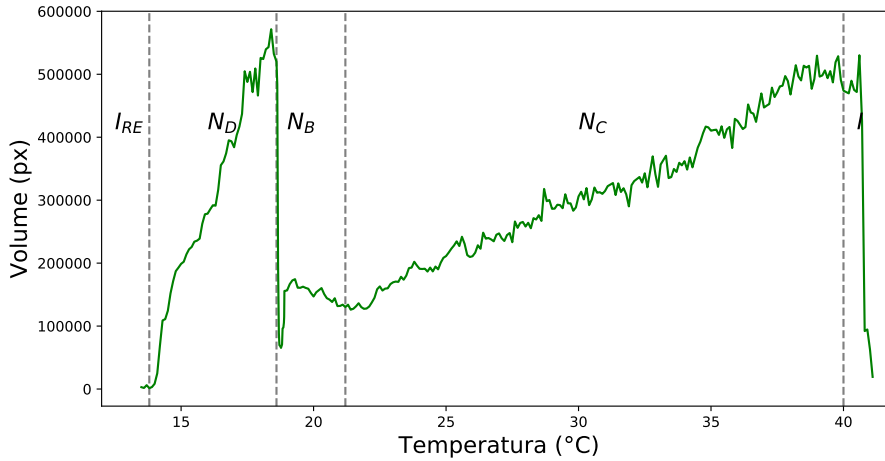


Figura 32: Variação do volume médio em relação à temperatura.

Na razão volume/área, notamos nas regiões isotrópicas um valor extremamente baixo, oriundo da escuridão dos elementos encontrados. A razão V/A mantém um crescimento regular na fase N_D , com a transição $N_D \leftrightarrow N_B$ marcada por uma rápida

queda, causada pelo craqueamento; novamente, a transição $N_B \leftrightarrow N_C$ é marcada por um mínimo suave, de forma que há um crescimento regular na fase N_C até momentos antes da entrada na fase isotrópica.

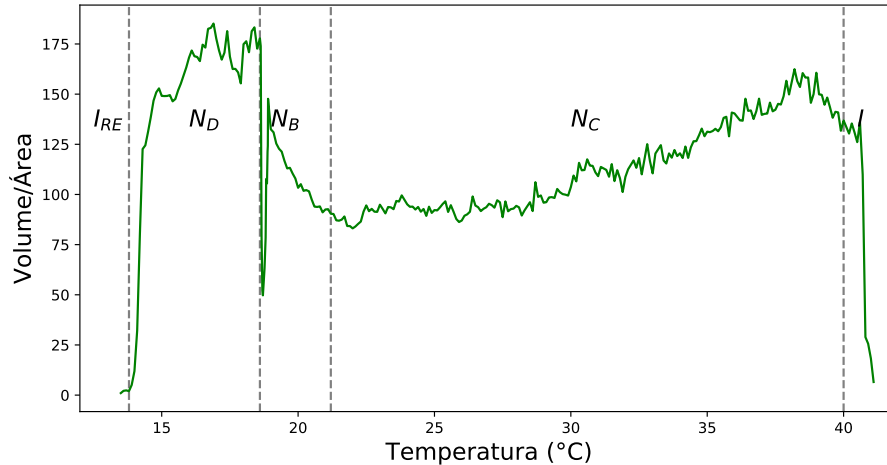


Figura 33: Razão Volume/área média para cada temperatura.

Uma informação em relação à forma é encontrada com razão entre a área convexa e a área nominal. Na Figura 34 inicialmente vemos que no craqueamento temos estruturas irregulares, oriunda do aglutinamento de pequenas regiões claras, mas com o aumento da temperatura na região discótica, há estabilização com valores em torno de 1,3, indicando formatos levemente irregulares. A transição $N_D \leftrightarrow N_B$ é marcada por um pico, pela mesma razão que o primeiro craqueamento, que então se estabiliza próximo de 1,4; por fim, a mudança $N_B \leftrightarrow N_C$ não pode ser observada, embora uma redução regular mostra-se presente até a transição isotrópica, ou seja, com o aumento da temperatura na fase calamítica temos regiões mais regulares, condizentes com as texturas apresentadas.

Finalizamos a análise morfológica com diferença granulométrica, de maneira que para cada par de imagens tomamos a diferença total das curvas de granulometrias dos volumes, com resultado apresentado na Figura 35, onde as regiões de picos e vales correspondem à temperaturas nas quais as curvas se diferenciam mais; neste caso, as transições $I_{RE} \leftrightarrow N_D$, $N_D \leftrightarrow N_B$ e $N_C \leftrightarrow I$ foram facilmente identificadas.

Como ressalvas temos que as transições em 13,8°C e 18,6°C e 40,0°C foram facilmente identificadas, especialmente com a utilização do número de elementos conexos, enquanto que a mudança biaxial para calamítica mostrou-se difícil, devido à pouca mudança dos domínios claros, embora seja notável uma alteração suave em comportamentos envolvendo volumes.

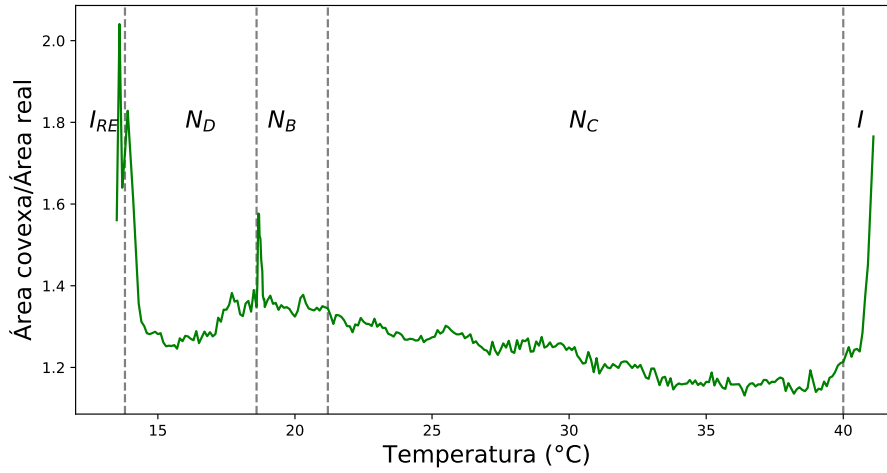


Figura 34: Razão média entre a área convexa e a área nominal de cada elemento.

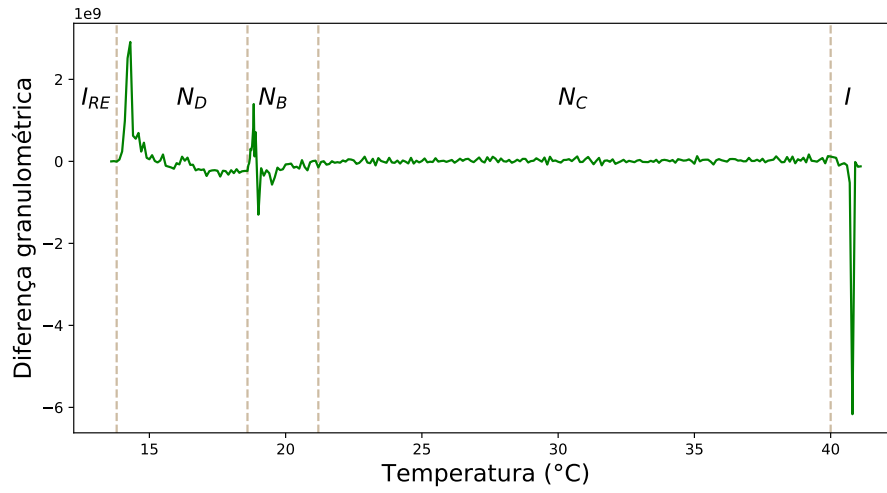


Figura 35: Distância granulométrica dos volumes em relação à temperatura.

5.2 Misturas liotrópicas quaternárias

As sequências, nomeadas aqui como n10, n11 e n12, dizem respeito a misturas quaternárias de água, laurato de potássio, sulfato de potássio e um álcool, com o último correspondente ao decanol, undecanol e dodecanol, respectivamente para as sequências n10, n11 e n12, com concentrações molares que constam na Tabela 1. As imagens foram adquiridas num microscópio Leica, com ampliação de 5x, ganho 0 e 45 ms de tempo de exposição.

O laurato de potássio foi obtido através da neutralização de ácido láurico com hidróxido de potássio em etanol quente, com sua purificação se dando através de recristalizações em etanol. Os demais componentes são de pureza analítica Sigma Audrich.

Como forma de verificação das transições observadas por processamento de ima-

Tabela 1: Concentrações molares das misturas utilizadas.

mistura	[kl]	[K_2SO_4]	[H_2O]	[alcohol]
n10	0,0383	0,006	0,9443	0,114
n11	0,0383	0,006	0,9443	0,114
n12	0,0383	0,006	0,9443	0,114

gens temos referências da literatura [38], mostrando as temperaturas de transição bem como as fases presentes, como ressaltado na Figura 36. As misturas foram submetidas a um resfriamento em passos de $0,2^\circ\text{C}$, para n11 e n12, e de $0,1^\circ\text{C}$ para n10.

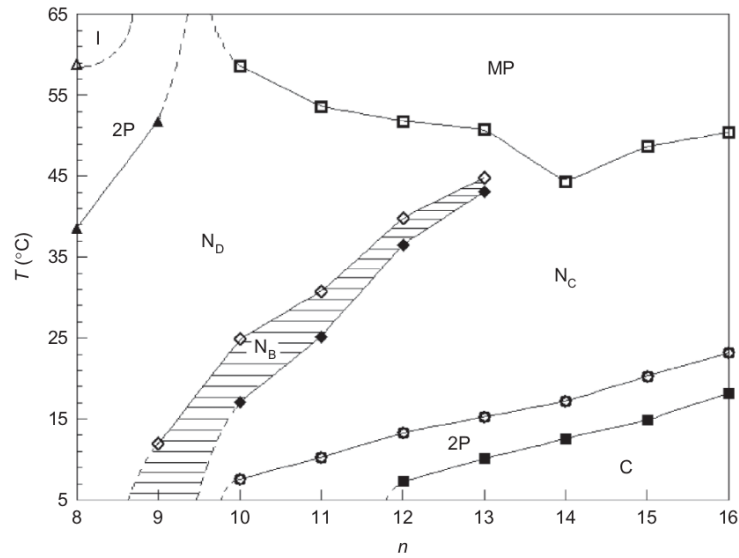


Figura 36: Transições de fases das misturas utilizadas variando a cadeia carbônica alcoólica [38].

As 3 misturas apresentam fases nemáticas, com variações calamíticas, biaxiais e discóticas, apresentando ainda a fase 2P, com os compostos n11 e 12 apresentando região cristalina.

Podemos observar a aparência geral das texturas mostradas pela Figura 37. A textura discótica é predominantemente escura, com algumas regiões amareladas levemente claras. A transição para o regime biaxial+ se dá através de um craqueamento do cristal líquido, sendo que após isso há a formação da textura de Schlieren que permanece na fase biaxial-; a transição é praticamente imperceptível, visualmente. Por fim, a alteração para a fase calamítica também é suave, mas nota-se que com o resfriamento as regiões claras se tornam maiores, bem como o aumento de regiões avermelhadas. Ao fim temos o aparecimento de uma textura aveludada na fase 2P,

e com o subsequente resfriamento e cristalização da amostra, para n11 e n12.

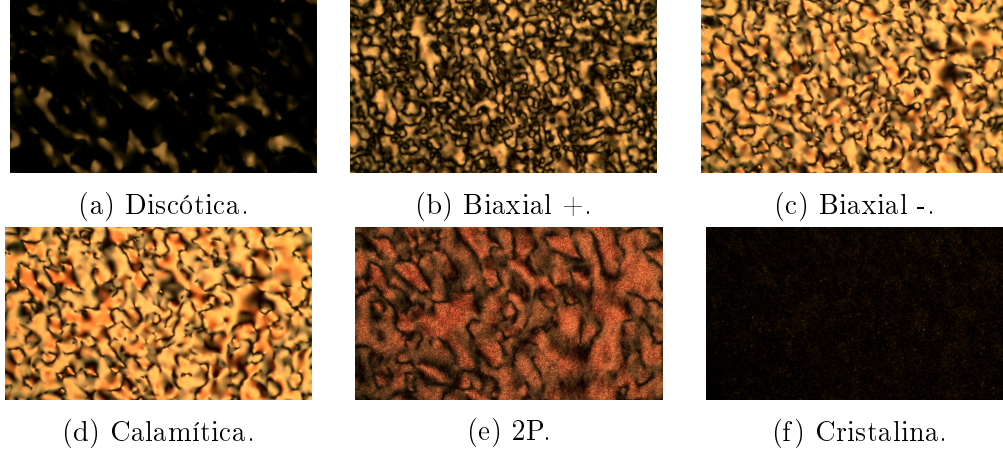


Figura 37: Imagens de microscopia de luz polarizada das 6 fases presentes na sequência n12.

Tendo em vista que os três cristais líquidos apresentados são da mesma natureza, faremos uma análise comparativa entre eles.

5.2.1 Momentos estatísticos

A Figura 38 representa a média do canal V com relação à temperatura. Durante o resfriamento, todas as sequências apresentam valores próximos de zero na região discótica, com a transição para a fase biaxial marcada pelo aumento do brilho. Para a sequência n10 temos um crescimento regular até a transição $N_{B-} \leftrightarrow N_C$, na qual temos um máximo, de forma que a inversão biaxial não pode ser registrada. Em contraste, a variação do brilho para n11 e n12 tem crescimento regular durante a fase Biaxial+ até a mudança $N_{B+} \leftrightarrow N_{B-}$, de forma que para n12 há uma estabilização do brilho, enquanto que n11 demonstra uma quebra na mesma transição com uma segunda subida até a interface $N_{B-} \leftrightarrow N_C$. A região calamítica tem valores semelhantes para as três sequências (em torno de 200), indicando um alto brilho desta fase correspondente com uma alta birrefringência [38]. Em temperaturas mais baixas ocorre, a transição para a fase 2P, notável em todas as sequências com comportamento semelhante, no qual há a redução do brilho com escurecimento gradual até a entrada no regime cristalino onde temos uma imagem predominantemente preta.

No canal V, o desvio padrão observado na Figura 39, vemos que as fases discóticas apresentam um desvio padrão baixo, resultado da homogeneidade. Para a mistura n11, elevadas temperaturas favorecem uma maior variabilidade de tons. A transição $N_D \leftrightarrow N_{B+}$ é marcada por um aumento do desvio até seu valor máximo

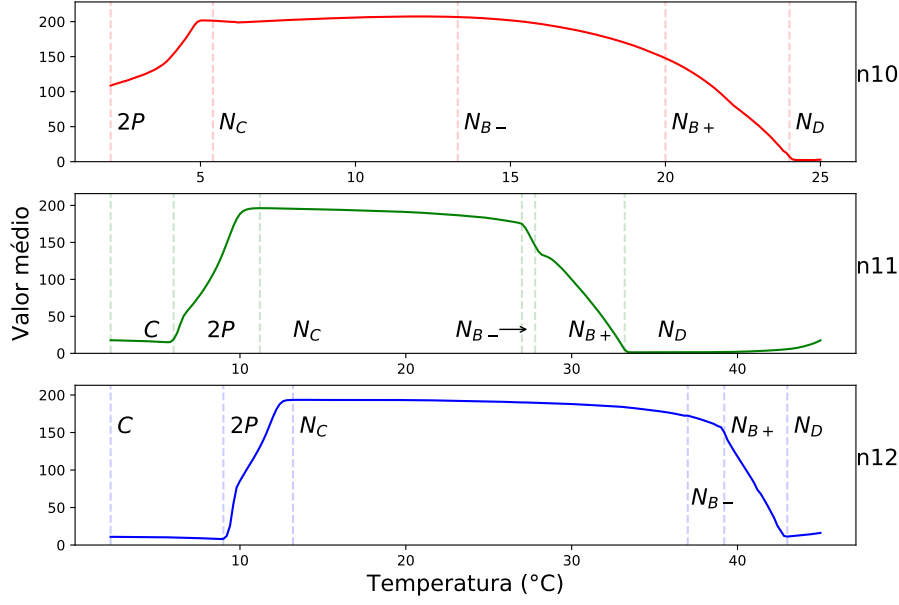


Figura 38: média do canal do V para as misturas quaternárias com relação à temperatura.

próximo da transição $N_{B+} \leftrightarrow N_{B-}$ para todas as misturas. A passagem para o regime calamítico é semelhante em todas as sequências com uma queda suave do desvio, que se estabiliza até a mudança para a fase $2P$, onde, após um aumento momentâneo, temos uma redução contínua até a região cristalina, um comportamento condizente, tendo em vista que com o escurecimento da imagem há um estreitamento do histograma e, como consequência, uma redução da variabilidade de tons.

Com as informações cromáticas notamos que a saturação para as regiões discóticas apresentam valores altos, resultado do ruído do sensor de imagem¹. A transição $N_D \leftrightarrow N_{B+}$ é marcada por uma redução da saturação com o surgimento da textura de Schliern, até a transição $N_{B+} \leftrightarrow N_{B-}$, de maneira que a partir desta temos um patamar consistente com valores próximos de 190 para todas as misturas, comportamento que se mantém até a mudança para a fase $2P$, na qual temos um aumento regular até a transição cristalina nas temperaturas mais baixas.

Em contrapartida à média, o desvio da saturação apresenta um comportamento mais variado. Na fase discótica, temperaturas altas, particularmente para n11, geram um desvio maior. Próximo à transição $N_D \leftrightarrow N_{B+}$, a região discótica apresenta desvio mínimo, com a transição em si marcada por um aumento abrupto nas três sequências, causado pela formação de uma textura com regiões coloridas claras; entre essas transições temos o valor máximo do desvio, resultado do craqueamento. Após

¹Para triplas RGB do tipo $[0,5,5],[5,4,1]$ frequente em ruídos tem uma saturação alta, vide equação (2).

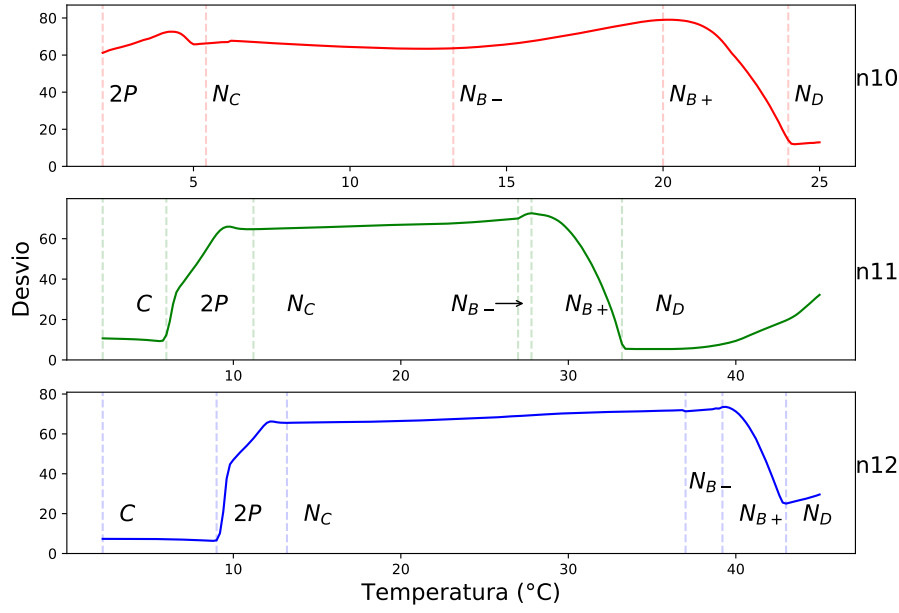


Figura 39: Desvio do canal do canal V para as misturas quaternárias, com relação à temperatura.

isso, o desvio sofre uma pequena redução na transição $N_{B+} \leftrightarrow N_{B-}$, na qual surgem regiões laranja escuro e amarelas claras com comportamento mais notável para n10, já que há um intervalo de temperatura menor. Após a entrada da fase calamítica, dada pelo início de um patamar com desvio próximo de 25 para as três sequências, que embora haja uma mudança na textura, como o crescimento das regiões, a variabilidade da saturação não se altera. Seguindo o resfriamento das amostras, temos a transição $N_C \leftrightarrow 2P$, que é marcada por uma alteração no comportamento, embora este seja diferente para cada uma das sequências, por fim temos na fase cristalina uma estabilização do valor do desvio em torno de 30 para n11 e n12.

Para o canal da *hue*, começamos pelos valores médios apresentados pela Figura 42b. Nela podemos observar que para todas as sequências há uma grande estabilidade, com valor permanecendo em torno de 20, correspondendo a um amarelo alaranjado². Entretanto temos a peculiaridade das regiões discóticas, especialmente próxima à transição para biaxial+. O valor da *hue* mostra um comportamento anômalo que se deve a artefatos de compressão, como a imagem comparativa 42a revela, através do aumento do brilho e saturação.

Finalizando a análise dos histogramas com o desvio padrão da *hue* temos o reforço da influência da compressão dentro do regime discótico, pois nessa fase temos uma grande variabilidade de tons, enquanto que na região que contém da fase nemática biaxial+ até o final da fase 2P temos um desvio extremamente baixo, indicando que,

²Valores de *hue* utilizados neste trabalho vão de 0 à 180 invés de 0 à 360

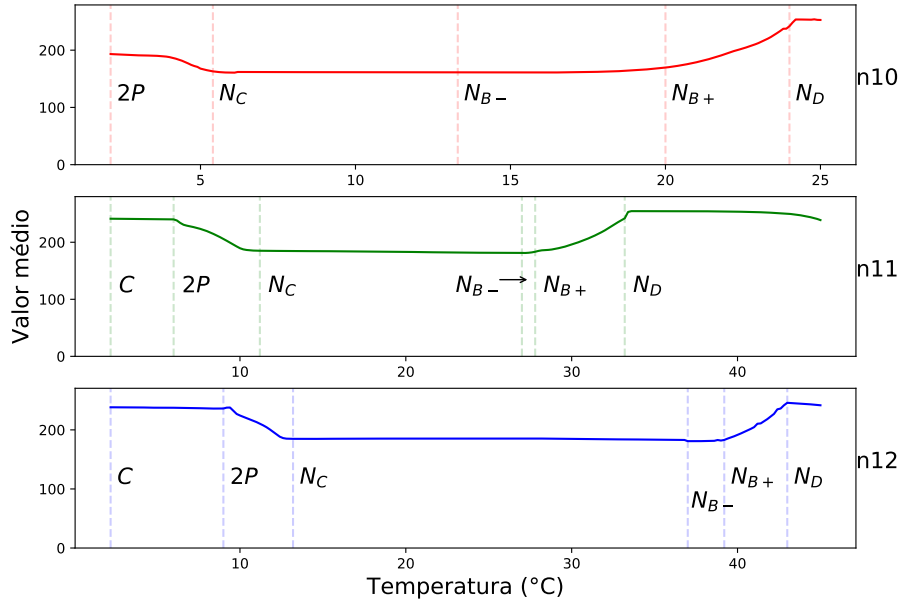


Figura 40: Saturação média para as misturas quaternárias, para cada temperatura.

além da cor predominante da imagem não se alterar, como discutido anteriormente, essa cor não apresenta grandes variações. As fases cristalinas ainda apresentam uma certa quantidade de interferência da compressão, embora seja menor que no regime discótico próximo à transição.

Podemos agora cruzar as informações apresentadas quanto aos histogramas HSV, para resumir as propriedades de algumas fases. A região cristalina é facilmente caracterizada pela alta saturação, pouco brilho e uma *hue* bem definida, em torno de 20, com as mesmas apresentando ainda um desvio baixo. A fase discótica apresenta um brilho médio baixo, assim como o desvio padrão, embora ambos tenham valor superior ao da fase cristalina, a *hue* real observada seria correspondente a um amarelo, embora o ruído atrapalhe essa medida. A fase nemática calamítica apresenta um brilho alto com valor médio em torno de 200, com desvio 70; uma *hue* bem definida também em torno de 20, com um desvio quase nulo, assim como uma saturação próxima de 200. As fases N_{B+} formam uma região transitória, marcada pelo craqueamento e como consequência aumento do brilho, assim como do seu desvio. A fase N_{B-} , por fim, apresenta características semelhantes à fase calamítica.

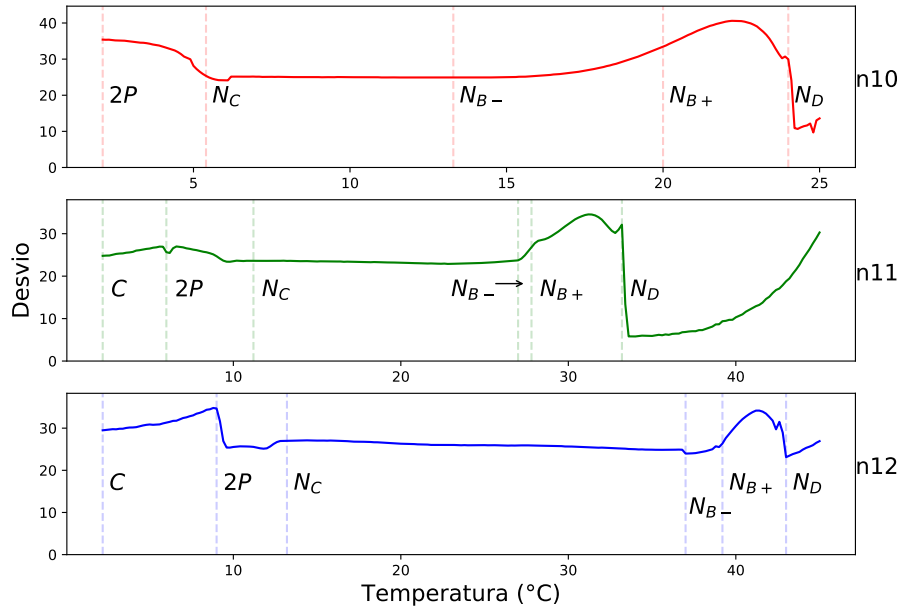
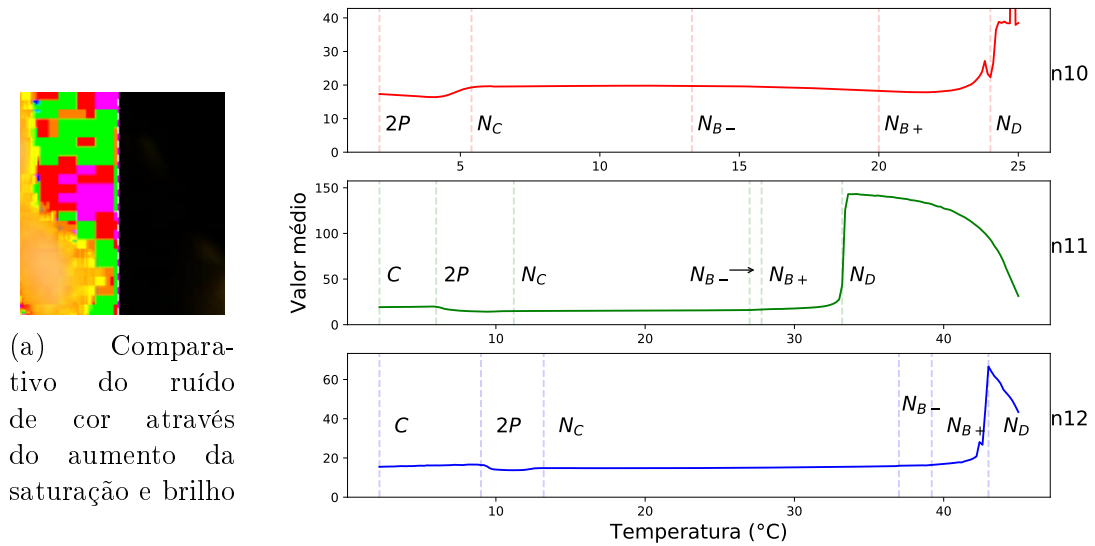


Figura 41: Desvio padrão da saturação para as misturas quaternárias com relação à temperatura.



(a) Comparativo do ruído de cor através do aumento da saturação e brilho

(b) Valor médio do canal da *hue*.

Figura 42: Valor médio da *hue* com relação à temperatura, e origem das anomalias.

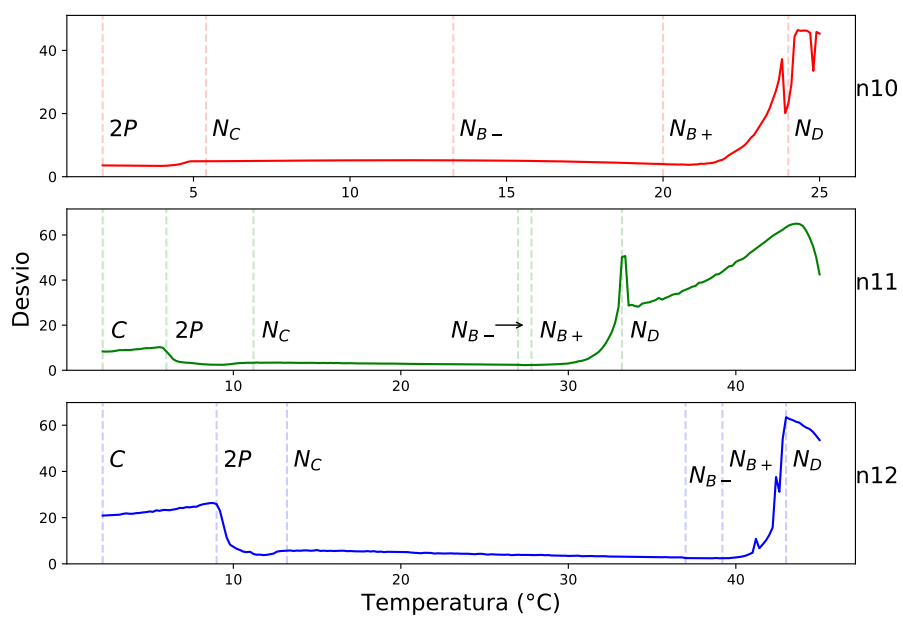


Figura 43: Desvio padrão da *hue* para as misturas quaternárias, com relação à temperatura.

5.2.2 Matriz de co-ocorrência

A primeira análise que pode ser feita é usando a matriz de co-ocorrência em si. Nela vemos a predominância de 6 perfis, mostrados na Figura 44. Na fase cristalina temos uma textura escura e homogênea com a presença de pequenos pontos claros, colocando valores altos no canto superior esquerdo da matriz. Para a fase 2P, a imagem apresenta uma textura de pelagem, ainda com um perfil escuro, mas há um contraste maior entre *pixels* vizinhos, de maneira que a linha diagonal da GLCM está mais alargada. No regime calamítico, com o aumento do brilho, geral a diagonal da GLCM se estende até o valor máximo e, nota-se ainda que, embora haja uma distribuição razoável das vizinhanças entre *pixels* de todas intensidades, *pixels* claros vizinhos de claros mostram-se um pouco mais presentes. Na fase biaxial- temos uma aparência semelhante à da fase calamítica, o que esperado, visto que mesmo que esta seja uma transição suave visualmente. Na fase biaxial+, entretanto, um aumento das regiões escuras joga os valores da matriz de co-ocorrência mais próxima da origem, embora ainda tenhamos regiões claras em menor quantidade, já que a região da GLCM que caracteriza partes claras contínuas ainda tem uma significância. Por fim, na fase discótica, regiões escuras predominam, entretanto, ainda há partes levemente claras, estendendo a diagonal da GLCM até valores próximos do elemento [200,200].

Mais uma vez temos uma falta de direcionalidade nas texturas, visto que todas as grandezas têm comportamento semelhante, independentemente da orientação, havendo ainda um valor de correlação próximo de 1, entre as curvas em direções diferentes. Dessa maneira, para melhor visualização, serão exibidas apenas às quantidades referentes à GLCM na direção de 0 graus, ou seja, o primeiro vizinho à direita.

Pelo comportamento do contraste, exibido pela Figura 45. Na fase discótica, todas as misturas apresentam um contraste baixo, esperado visto que a textura é predominantemente escura com regiões claras suaves; entretanto, na transição $N_D \leftrightarrow N_{B+}$, ocorre um aumento devido ao craqueamento, comportamento presente nas três sequências. Entretanto, notamos agora a primeira diferença em N_{B+} : para n10 há um patamar, enquanto que para n11, o início de um crescimento; e para n12, há um máximo local do contraste. A mudança $N_{B-} \leftrightarrow N_C$ é imperceptível para a mistura com álcoois de menor e maior cadeia; já para n11 a mudança é facilmente observada. A próxima transição marca o início do pico que engloba completamente a fase 2P, esta apresentando o contraste máximo para todas as sequências de imagens, devido a aparência granulada. Por fim, nas regiões cristalinas de n11 e n12 temos novamente um contraste reduzido, porém maior do que o da região discótica devido

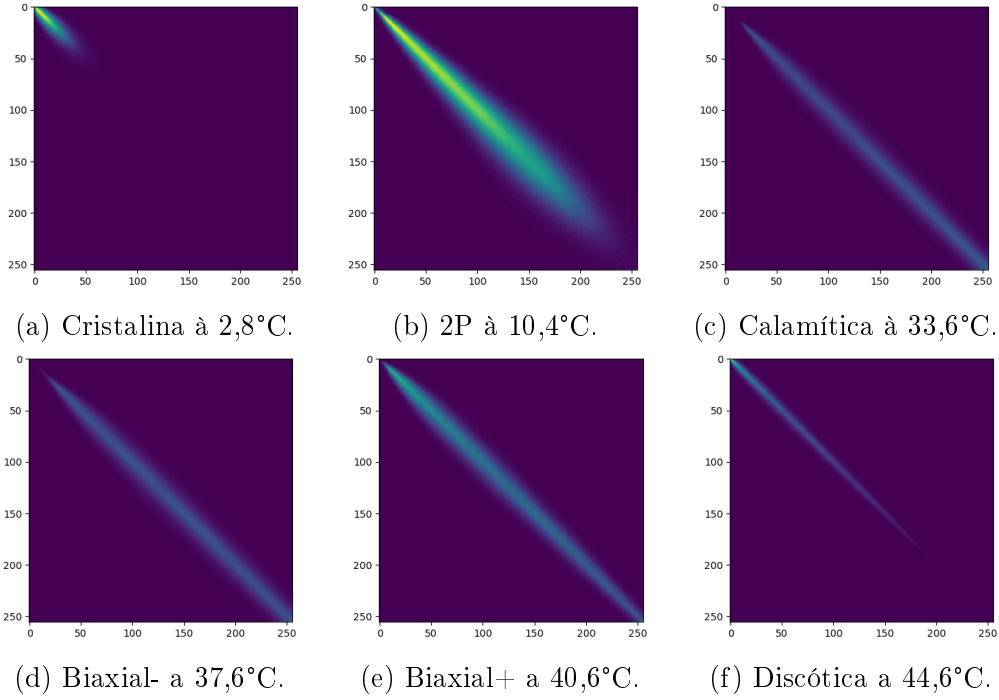


Figura 44: Log da matriz de co-ocorrência média para a sequência n12, considerando as 4 direções usadas, e distância 1. O logaritmo é usado apenas para melhor visualização.

a pequenas regiões cintilantes.

Na Figura 46 vemos o comportamento da entropia. Mais uma vez, regiões homogeneamente escuras como próximo à $N_D \leftrightarrow N_{B+}$, apresentam uma entropia baixa devido à pouca variedade de tons. Nessa transição, há um aumento abrupto da entropia, devido ao craqueamento da textura, que se estabiliza após a transição $N_{B+} \leftrightarrow N_{B-}$ e assim se mantém quase constante nas três sequências. Passando a ter uma mudança significativa apenas em $N_C \leftrightarrow 2P$, onde temos um crescimento devido ao surgimento da textura $2P$, agora sem regiões contínuas, temos ainda o máximo da entropia coincidindo nas temperaturas com valor máximo do contraste, durante a fase $2P$. Para as misturas que apresentam cristalização, o valor da entropia decai novamente, embora a presença de pequenas regiões de alto brilho favoreçam um valor um pouco maior do que o das regiões discóticas.

Na energia, Figura 47, a primeira coisa a se notar é com relação às regiões escuras, como próxima da região da mudança $N_D \leftrightarrow N_{B+}$. Nela temos um valor extremamente alto, resultado da pouquíssima variabilidade de tons e como consequência uma imagem homogênea, com n11 apresentando quase o valor máximo possível. As transições $N_D \leftrightarrow N_{B+}$ e $N_C \leftrightarrow 2P$ podem ser observadas para n10 e n11, mas não para n12. Por fim, a transição cristalina é observada somente para a

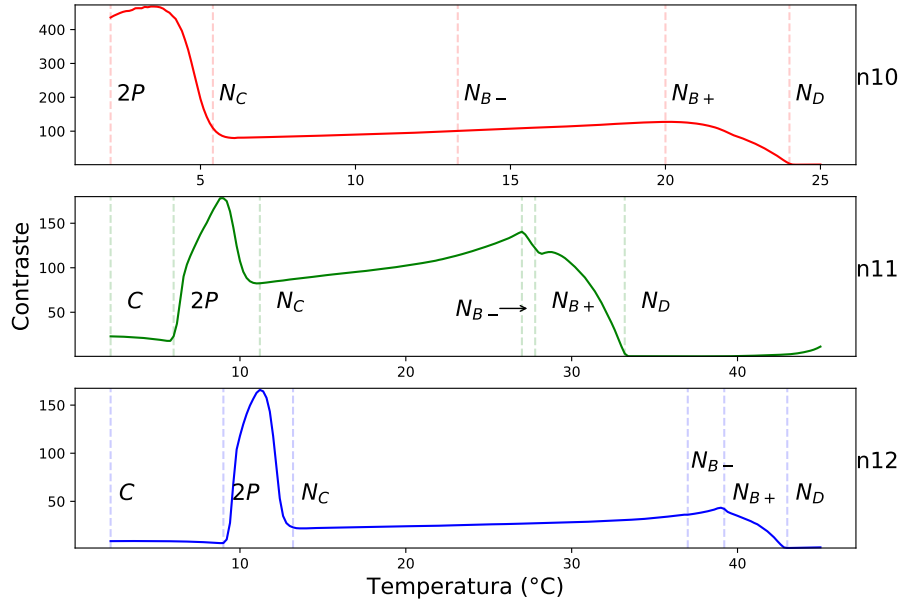


Figura 45: Contraste para as misturas n10,n11 e n12 com relação ao vizinho direito.

última sequência.

Na curva da correlação, apresentada na Figura 48, nota-se inicialmente que, na fase N_D , temos valores altos de correlação devido a sua continuidade. Na transição para N_{B+} , ocorre uma pequena queda; isso se dá devido ao craqueamento. Com a redução da temperatura, os valores de correlação retornam a um valor alto próximo da transição $N_{B+} \leftrightarrow N_{B-}$ e, a partir daí, os valores praticamente não se alteram até a mudança $N_C \leftrightarrow 2P$. O surgimento da textura da fase $2P$ quebra as regiões contínuas e suaves, diminuindo a correlação entre os *pixels*. Em todas as sequências há uma redução rápida pouco antes da transição para a fase cristalina; nas sequências n11 e n12 há um breve pico, a fase cristalina é marcada pelo mínimo do contraste para todas as misturas.

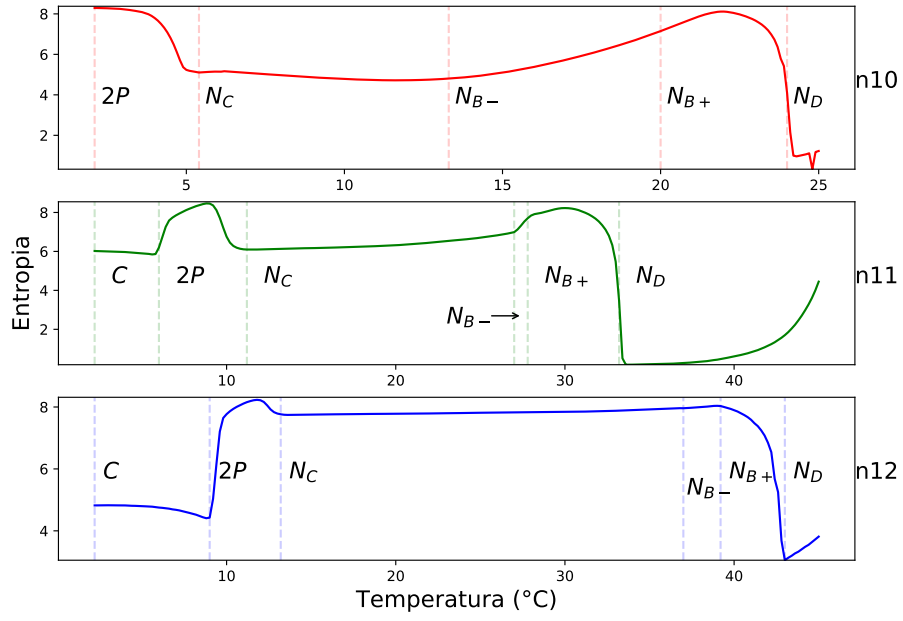


Figura 46: Entropia para as sequências n10,n11 e n12 na direção horizontal.

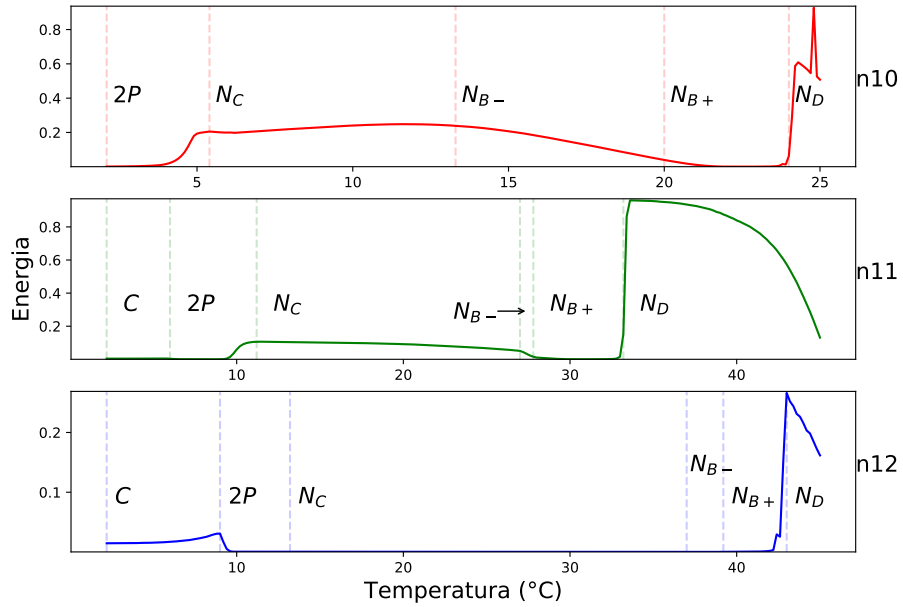


Figura 47: Energia para as sequências n10,n11 e n12 na direção horizontal.

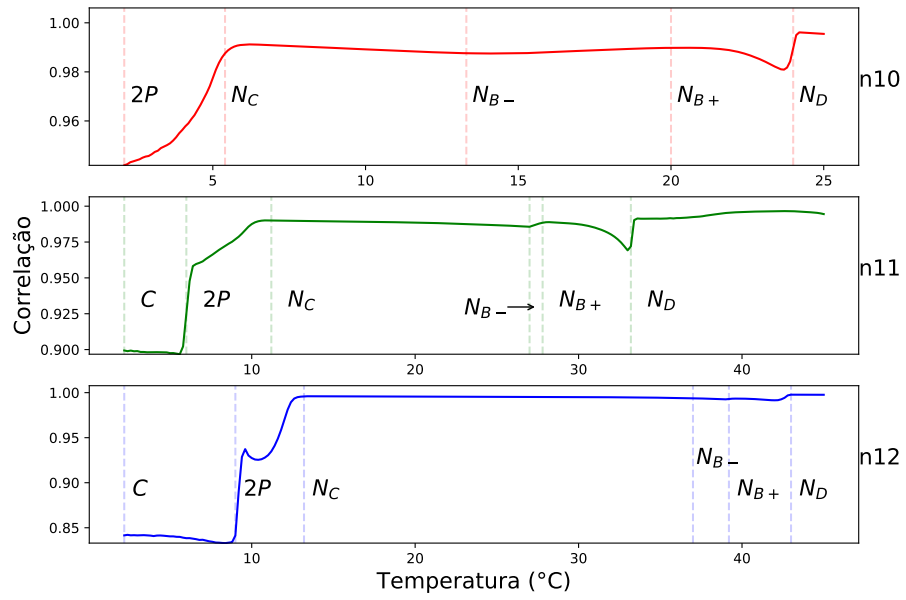


Figura 48: Correlação para as sequências n10,n11 e n12 na direção horizontal.

5.2.3 Morfologia

O processamento e a descrição com morfologia matemática deram-se da mesma forma que para a mistura ternária, seguindo a metodologia proposta: Variando o parâmetro de área e o raio do disco da filtragem e, através de inspeção visual, foi determinado que um disco de raio 5 e uma área de 10000 apresentam uma segmentação satisfatória.

Como ressalvas sobre o pré processamento das sequências temos a presença de artefatos na imagem que enganam o algoritmo de segmentação, indicando que há uma região de interesse quando na realidade ela não está presente, como mostra a Figura 49a. As regiões desejadas são detectadas, mas junto delas temos regiões Suspeitosamente quadradas, características de compressão do formato *.jpeg*. Para eliminar este problema proveniente da compressão, foi realizado um corte simples após a soma dos canais vermelho, verde e azul, de forma que todos os *pixels* com valores inferiores a 30 passam a ter valor nulo, com resultados finais da segmentação apresentados na Figura 49b. Embora pareça haver uma grande perda de informação, é importante ressaltar que nos passos morfológicos o alcance do brilho vai de 0 a 765, resultando numa perda de apenas 3% dos níveis de cinza, ainda mais se pensarmos que regiões claras facilmente têm valores superiores a este.

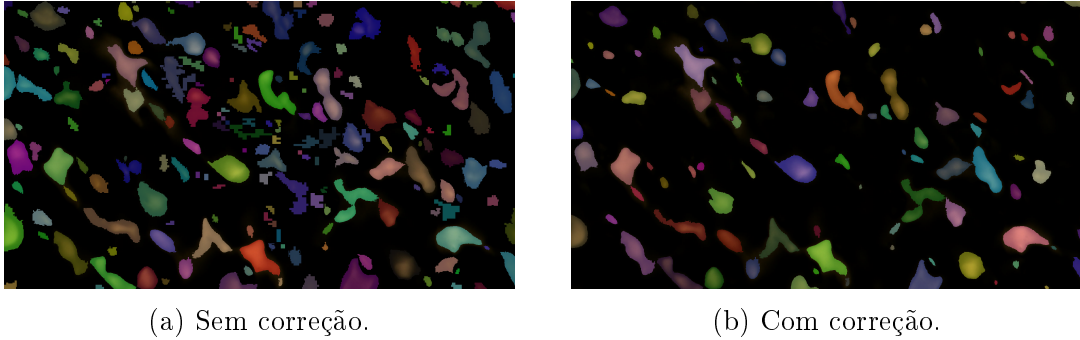


Figura 49: Diferença entre as componentes conexas com e sem a correção.

O primeiro descritor morfológico que vamos avaliar é com relação ao número de elementos conexos. Todas as misturas apresentam poucos elementos na fase discótica, de maneira que a transição $N_D \leftrightarrow N_{B+}$ é facilmente identificada através do aumento abrupto do número de elementos, resultado do craqueamento. Embora as transições $N_{B+} \leftrightarrow N_{B-}$ e $N_{B-} \leftrightarrow N_C$ não possam ser identificadas nitidamente, notamos que com a redução da temperatura há uma redução regular do número de elementos com o resfriamento a partir da fase nemática biaxial+. Outra ressalva é que para n12, a transição $2P \leftrightarrow C$ é mais significativa em relação à n11.

Nos valores médios, explicitados pela Figura 51, na fase discótica notamos que

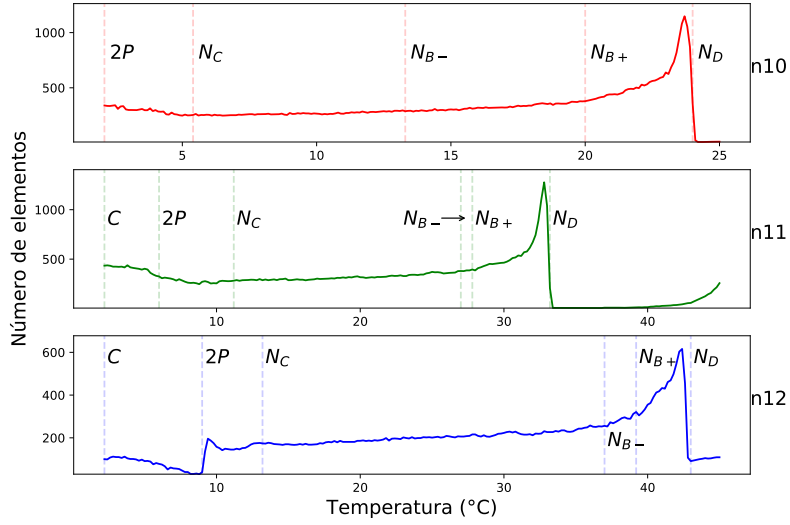


Figura 50: Quantidade de elementos conexos em relação à temperatura para as misturas quaternárias.

as três sequências apresentam uma média em torno de 2000, 2500 e 3000 para as sequências n11, n10 e n12, respectivamente. Considerando que a imagem total tem resolução de 1920×1080 , e há poucos elementos conexos como previamente apresentado, podemos caracterizar a fase nemática discótica como uma imagem escura que apresenta poucas regiões claras, porém extensas. Na transição $N_D \leftrightarrow N_{B+}$, com o surgimento abrupto de várias regiões pequenas, há redução no tamanho médio das componentes, comportamento presente para todas as misturas. Seguindo o resfriamento, a área média aumenta regularmente até a região próxima da mudança $N_{B+} \leftrightarrow N_{B-}$ e se estabiliza. A partir daí todas as sequências apresentam regiões com área de 3000 a 4000 *pixels*. Por fim, há divergências das sequências n11 e n12 em relação à n10, onde temos um aumento momentâneo do tamanho dos elementos para a fase $2P$, e uma subsequente queda em $2P \leftrightarrow C$, com a perda de grande parte dos elementos, com os remanescentes possuindo uma área pequena.

A variação do volume médio mostrado pela Figura 52, nos oferece informações sobre o brilho total de cada elemento. Mais uma vez, começando pelo regime discótico, temos na sequência n10 volumes próximos de 500000 *pixels*, enquanto que n11 e n12, respectivamente, apresentam volumes de 200000 e 250000 *pixels*. Há ainda uma queda drástica na transição $N_D \leftrightarrow N_{B+}$, esperado já que temos regiões menores, logo não há possibilidade de grandes volumes. A transição $N_{B+} \leftrightarrow N_{B-}$ é bem marcada nas três sequências como o máximo global. A entrada na fase calamítica é marcada pelo início de um patamar com volumes em torno de 2000000 para todas as misturas, embora que para n12 esse patamar se estabeleça mais suavemente. Dessa forma temos na fase calamítica a maior estabilidade com relação ao brilho, consistente com

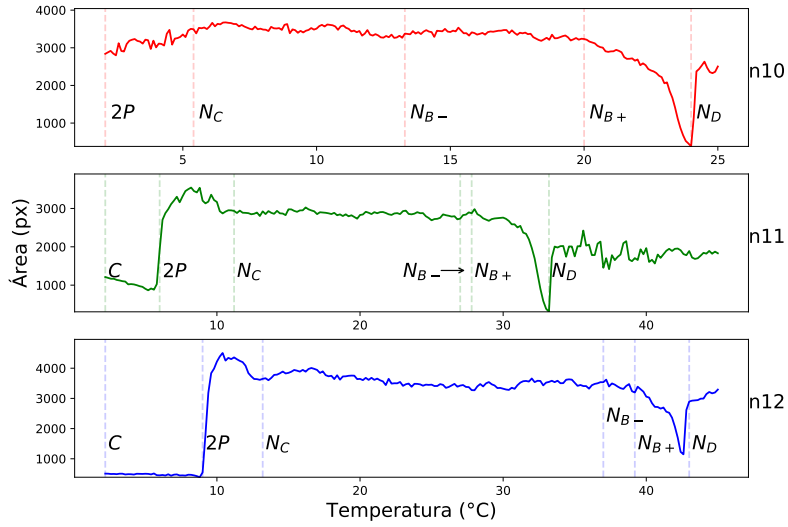


Figura 51: Área média dos elementos conexos em relação à temperatura para as misturas quaternárias.

o comportamento da Figura 38. Por fim nas regiões de transição $N_C \leftrightarrow 2P$ temos poucas alterações, com uma queda momentânea para n10, uma subida suave para n11 e quase nenhuma mudança para n12. A transição final para a região cristalina é marcada por uma queda brusca nos volumes, resultado da diminuição no tamanho dos elementos, bem como seus brilhos associados.

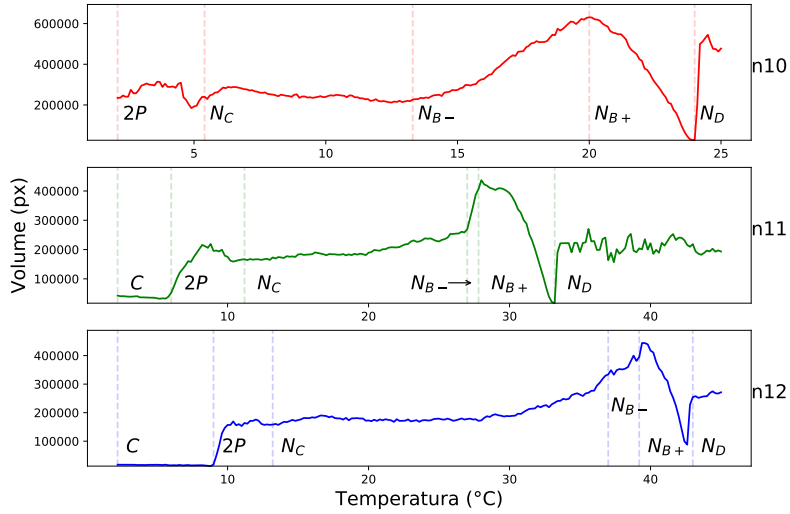


Figura 52: Volume médio dos elementos conexos em relação à temperatura para as misturas quaternárias.

Com relação ao perímetro médio, todas as misturas apresentam comportamentos semelhantes, como explicitado pela Figura 53. Na fase discótica, o perímetro tem valores próximos de 200, com a transição $N_D \leftrightarrow N_{B+}$ marcada por uma quebra da curva nesta temperatura. A partir de N_{B+} há um crescimento suave e regular

até a transição $N_C \leftrightarrow 2P$, onde notamos um aumento abrupto, comportamento relacionado ao aumento das áreas. Por fim, a região cristalina é marcada por uma queda dos valores em relação à $2P$.

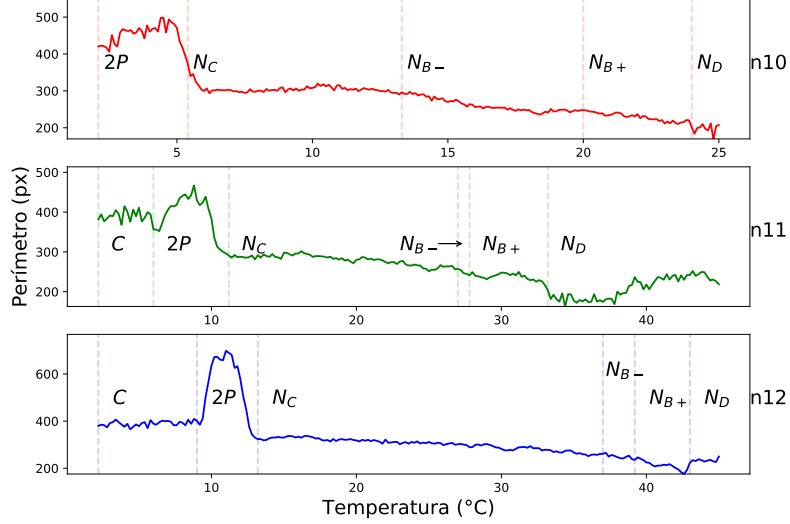


Figura 53: Perímetro médio dos elementos em relação à temperatura para as misturas quaternárias.

A média da razão V/A , ilustrada na Figura 54, mostra-nos que para todas as sequências a transição $N_D \leftrightarrow N_{B+}$ é facilmente observada devido ao crescimento rápido ao entrar na fase N_{B+} . A inversão biaxial é marcada pelo valor máximo nas três misturas. A entrada na fase N_C é marcada pelo início de um patamar para n10, uma mudança na inclinação da curva para n11 e não é notável para n12. Por fim a transição $N_C \leftrightarrow 2P$ não é notável para n11 e n12, na fase haja uma queda até o início da região cristalina.

Realizando uma comparação entre a área convexa e a área original. Como vemos na Figura 55, nas fases discóticas, temos razão próxima de 1 para as três sequências; dessa forma, as regiões conexas apresentam pouquíssimas concavidades e mostram-se regulares. Na transição para a fase nemática biaxial+, ocorre um aumento dessa razão, resultado do craqueamento, com o surgimento de regiões irregulares. Seguindo o resfriamento das amostras, todas apresentam um comportamento suavemente crescente da razão V/A , com valor próximo de 1,4. Entretanto, n11 apresenta uma quebra mais notável durante a fase N_{B-} . Outra região onde temos uma quebra é com a transição $N_C \leftrightarrow 2P$, marcada por um degrau, com o aumento da razão. A transição para a fase cristalina é diferente entre n11 e n12, sendo que na primeira temos um degrau, enquanto que para a segunda a alteração é uma queda suave.

Como últimas curvas de morfologia temos a distância entre as granulometrias dos volumes, explicitado na Figura 56, nela notamos que dentro do regime discótico

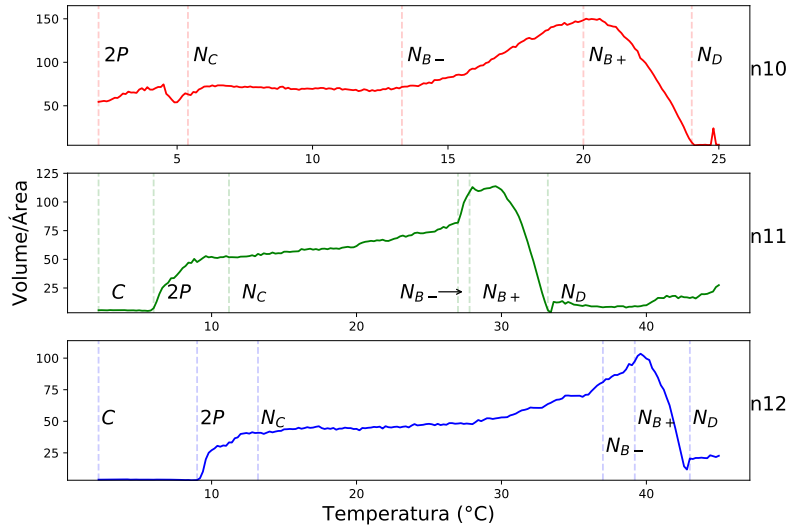


Figura 54: Razão entre o volume e a área média dos elementos conexos em relação à temperatura para as misturas quaternárias.

não há muita variação das curvas granulométricas, exceto apenas para temperaturas muito elevadas como experimentadas por n11. A transição $N_D \leftrightarrow N_{B+}$ é facilmente observada para todas as misturas, assim como uma redução da diferença logo após essa mudança, de forma que a inversão $N_{B+} \leftrightarrow N_{B-}$ é marcada por um máximo local para as três misturas. A mudança para a região nemática calamítica é suave e praticamente imperceptível, embora a sequência n11 apresente o início de um patamar; devido à faixa estreita de temperatura da fase N_{B-} , o pico acaba tomando conta desta região. O regime calamítico mostra-se estável, alterando-se somente com a mudança para a fase $2P$, onde as curvas apresentam mudanças diferentes para cada mistura. Por fim, a transição cristalina é marcada para n11 e n12 de forma clara.

Como ressalvas da caracterização das fases através da morfologia podemos concluir que as fases discóticas apresentam poucas regiões claras, sendo estas arredondadas. Transições com presença de craqueamentos são facilmente identificadas através do número de elementos conexos. As transições entre as fases biaxiais puderam ser identificadas com alguns descritores morfológicos, estes envolvendo volumes e as diferenças granulométricas. A região calamítica não apresentou muitas alterações com a variação da temperatura, mantendo um volume e uma área quase que constante, embora suas convexidades se alterem suavemente. A transição cristalina, por sua vez, é mais bem observada pela diferença granulométrica, número de elementos e volume.

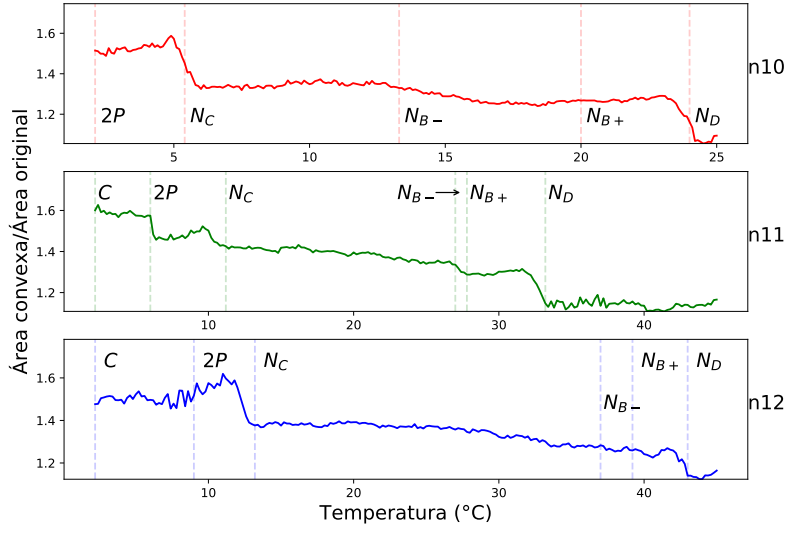


Figura 55: Razão média entre a área convexa e a área normal de cada elemento conexo em relação à temperatura.

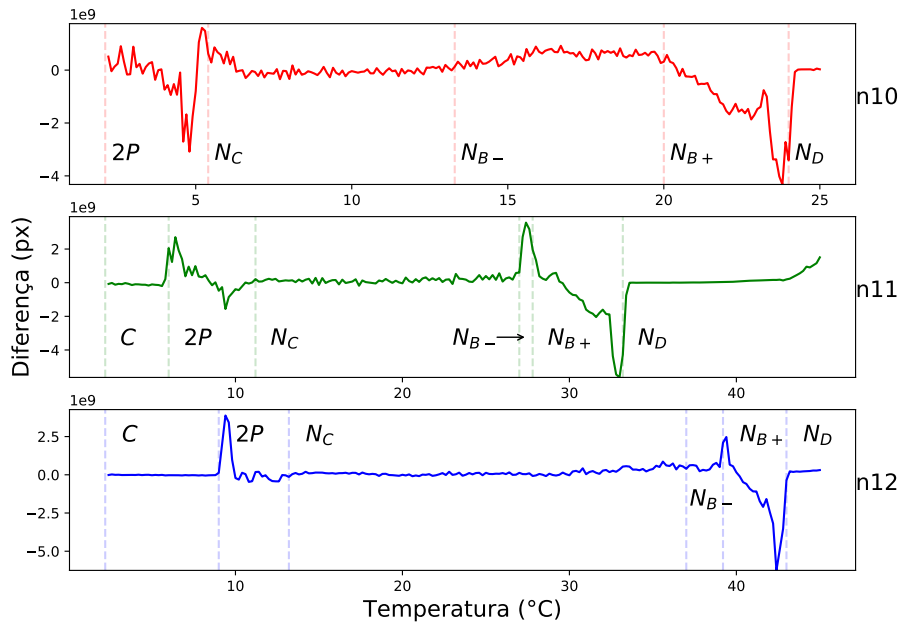


Figura 56: Diferença granulométrica para as sequências n10, n11 e n12, com relação à temperatura.

6 Conclusões

Considerando o apresentado neste trabalho, a revisão bibliográfica, o método e suas aplicações, podemos concluir que descritores de imagens aplicados a texturas de cristais líquidos podem ser utilizados para quantificar e descrever as fases observadas, bem como identificar transições.

Primeiramente temos a ressalva de que o espaço de cor HSV mostra-se particularmente interessante devido à separação da informação do brilho e informação cromática, favorecendo uma quantificação de cores e maior facilidade de interpretação.

Como notado para a sequência referente à mistura ternária, o valor médio do espaço V pôde identificar facilmente três das 4 transições presentes com mudanças abruptas, sendo a mais suave marcada por um máximo, que coincide com a birrefringência máxima. O canal da *hue* e saturação fornecem informações sobre mudanças da cor do cristal líquido, assim como identifica todas as transições das misturas ternárias. Da mesma forma, nas misturas quaternárias, todas as transições apresentaram uma mudança do comportamento dos histogramas nesse espaço de cor.

A matriz de co-ocorrência por si mostra-se uma ferramenta eficaz para a descrição das texturas gerais, algo já presente na literatura, embora a utilização do canal V seja menos presente. O conjunto de grandezas associadas oferece uma descrição e quantização das texturas de forma inteligível, utilizando contraste, entropia, energia e correlação. Para a mistura ternária foi possível identificar mudanças de comportamento destas grandezas nas transições presentes, assim como para as misturas quaternárias.

As transformações morfológicas, embora não sejam descritores por si só, são ferramentas poderosas para tratamento de imagens, como redução de ruído e filtragem, podendo servir de base para descritores através da segmentação de imagens. Ainda na morfologia podemos usar o número de elementos conexos, perímetro, área, volume, área convexa e curvas granulométricas para caracterizar fases e identificar transições.

Dos resultados obtidos neste trabalho, em comparação com ampla literatura sobre a mistura de cristais líquidos liotrópicos, temos que o conjunto dos descritores pode identificar diferentes transições, assim como ressaltar a inversão biaxial $+$ $\leftrightarrow$ $-$ presente na mistura quaternária.

Das sequências apresentadas, as fases isotrópicas são caracterizadas por um baixos valores no canal V assim como pouca variabilidade de tons, homogeneidade da

textura, com baixa entropia e baixo contraste e uma correlação inferior em relação as demais fases presentes, relevando sempre que o ruído da aquisição deve ser levado em consideração. Morfologicamente temos ausência, ou presença extremamente reduzida de elementos conexos.

As fases nemáticas, por sua vez, são claras, apresentam uma predominância da cor amarela, indicada pela *hue* próxima de 20, uma saturação por volta de 120 para as sequências, ambas tendo pouco desvio. As grandezas da GLCM apresentaram uma grande variação de comportamento entre a mistura ternária e quaternária, mas elas puderam identificar todas as transições nemáticas presentes nas misturas. Morfologicamente as alterações nemáticas foram mais bem observadas usando volumes, como explicitado pela curva V/A e de granulometria.

A fase 2P apresenta uma grande variação no canal V, enquanto que sua coloração permanece estável e com pouco desvio, tendendo para um tom amarelado. Através da matriz de co-ocorrência notamos um pico presente no contraste, uma entropia próxima a 8, baixos valores de energia e uma correlação decrescente com a redução da temperatura. Morfologicamente a fase 2P apresenta poucos elementos conexos, em torno de 200, com a área média entre 3000 e 4000 *pixels*, volume médio entre 200000 e 300000 *pixels*, uma razão área por perímetro em torno de 6 e uma razão entre a área convexa e a área real por volta de 1,6, com um comportamento particular na granulometria dos volumes para cada sequência.

Por fim, a fase cristalina se assemelha com a fase isotrópica no que concerne aos momentos estatísticos e texturas, embora tenhamos um brilho e uma homogeneidade reduzida.

No anexo A consta um resumo da efetividade dos descritores para a identificação das transições de fase, para as misturas aqui estudadas.

Como perspectivas futuras, temos a implementação deste método em diferentes cristais líquidos. Observando como as grandezas obtidas pelos descritores se comportam para diferentes misturas, sob diferentes condições, como campos elétricos, preparos especiais do capilar e perturbações. Tendo em vista que o foco foi o método em si, outro trabalho a ser feito é uma melhor conexão entre as texturas e a estrutura interna do cristal líquido.

Lista de Figuras

1	Diagramação do ordenamento molecular com relação à temperatura, a fase líquido cristalina apresenta um alinhamento vertical.	9
2	Exemplo de organização das moléculas, estrutura micelar e estrutura laminar respectivamente.	9
3	Esquema de um microscópio de luz polarizada usado para analisar cristais líquidos, pág. 34, [11](adaptado).	11
4	Texturas características de cristais líquidos nemáticos com ancoramento planar degenerado [11], pág. 170 e 172.	12
5	Visualização do espaço de cor RGB. [20]	14
6	Diagrama da diferença entre descritores locais e globais	15
7	Uma imagem com 4 níveis de cinza (esquerda), e sua matriz com ocorrência (direita), considerando o primeiro vizinho horizontal ao lado direito, as cores ressaltam a contribuição para a GLCM.	16
8	Transformações de dilatação e erosão aplicadas a uma imagem de exemplo, usando um elemento estruturante de cruz; <i>pixels</i> escuros possuem valor maior.	19
9	Operações de filtragem básica, usando uma cruz como elemento estruturante; <i>pixels</i> escuros possuem valor maior.	20
10	Diferença entre abertura simples e por reconstrução, a forma é muito mais bem preservada; <i>pixels</i> escuros possuem valor maior e elemento estruturante da erosão é um disco de raio 9.	20
11	Uma imagem binária, com 3 elementos conexos, seguindo a 4-conectividade, exemplificando um caminho entre x e y dentro de uma das componentes.	21
12	Aplicação da abertura por área usando um parâmetro pequeno; <i>pixels</i> escuros possuem valor maior.	22
13	Diferença entre a aplicação de <i>top-hat</i> por abertura e fechamento por reconstrução; <i>pixels</i> escuros possuem valor maior.	22
14	Exemplo da convexação de uma imagem binária [32], adaptado; <i>pixels</i> escuros possuem valor maior.	23
15	Esquematização da rotina geral do trabalho.	24
16	Passos para a extração das componentes conexas utilizando o top-hat por área.	26
17	Resultado da filtragem usando discos de diferentes raios como elemento estruturante.	26

18	Resultado da segmentação com diferentes parâmetros de área com um mesmo disco de filtragem.	27
19	Visualização do relevo da imagem seguindo os passos para a segmentação.	27
20	Fases presentes na mistura com 6.24% de decanol variando com a proporção de água pesada/laurato de potássio e a temperatura [36]. .	28
21	Texturas gerais das fases presentes na sequência.	29
22	Valor médio de cada canal, lembrando que a <i>hue</i> tem seu intervalo de 0 à 180.	30
23	Desvio padrão para cada canal.	31
24	Gráfico do log da matriz de co-ocorrência média, considerando as 4 direções usadas, e distância 1. O logaritmo se dá apenas para melhor visualização.	32
25	Valor de contraste nas quatro direções, respectivamente.	33
26	Valores de energia.	33
27	Valores de entropia.	34
28	Valores da correlação.	35
29	O número de elementos conexos para cada temperatura.	36
30	Área média com relação à temperatura.	36
31	Comportamento do perímetro médio em relação à temperatura. . . .	37
32	Variação do volume médio em relação à temperatura.	37
33	Razão Volume/área média para cada temperatura.	38
34	Razão média entre a área convexa e a área nominal de cada elemento.	39
35	Distância granulométrica dos volumes em relação à temperatura. . . .	39
36	Transições de fases das misturas utilizadas variando a cadeia carbônica alcoólica [38].	40
37	Imagens de microscopia de luz polarizada das 6 fases presentes na sequência n12.	41
38	média do canal do V para as misturas quaternárias com relação à temperatura.	42
39	Desvio do canal do canal V para as misturas quaternárias, com relação à temperatura.	43
40	Saturação média para as misturas quaternárias, para cada temperatura.	44
41	Desvio padrão da saturação para as misturas quaternárias com relação à temperatura.	45
42	Valor médio da <i>hue</i> com relação à temperatura, e origem das anomalias.	45

43	Desvio padrão da <i>hue</i> para as misturas quaternárias, com relação à temperatura.	46
44	Log da matriz de co-ocorrência média para a sequência n12, considerando as 4 direções usadas, e distância 1. O logaritmo é usado apenas para melhor visualização.	48
45	Contraste para as misturas n10,n11 e n12 com relação ao vizinho direito.	49
46	Entropia para as sequências n10,n11 e n12 na direção horizontal.	50
47	Energia para as sequências n10,n11 e n12 na direção horizontal.	50
48	Correlação para as sequências n10,n11 e n12 na direção horizontal.	51
49	Diferença entre as componentes conexas com e sem a correção.	52
50	Quantidade de elementos conexas em relação à temperatura para as misturas quaternárias.	53
51	Área média dos elementos conexas em relação à temperatura para as misturas quaternárias.	54
52	Volume médio dos elementos conexas em relação à temperatura para as misturas quaternárias.	54
53	Perímetro médio dos elementos em relação à temperatura para as misturas quaternárias.	55
54	Razão entre o volume e a área média dos elementos conexas em relação à temperatura para as misturas quaternárias.	56
55	Razão média entre a área convexa e a área normal de cada elemento conexo em relação à temperatura.	57
56	Diferença granulométrica para as sequências n10, n11 e n12, com relação à temperatura.	57

Referências

- [1] J. A. Castellano, *Liquid gold: the story of liquid crystal displays and the creation of an industry*. World Scientific, 2005.
- [2] D. Dunmur and T. Sluckin, *Soap, science, and flat-screen TVs: a history of liquid crystals*. Oxford University Press, 2014.
- [3] P. Raynes, “Liquid crystals—second edition, by s chandrasekhar, cambridge university press,(1992), isbn 0-521-41747-3 (hb), isbn 0-521-42741-x (pb),” 1993.
- [4] I. H. Bechtold, “Cristais líquidos: um sistema complexo de simples aplicação,” *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 27, no. 3, pp. 333–342, 2005.
- [5] D. Demus, J. W. Goodby, G. W. Gray, H. W. Spiess, and V. Vill, “Handbook of liquid crystals, handbook of liquid crystals: four volume set,” *hlch*, p. 2180, 1998.
- [6] X. Bi, D. Hartono, and K.-L. Yang, “Real-time liquid crystal ph sensor for monitoring enzymatic activities of penicillinase,” *Advanced Functional Materials*, vol. 19, no. 23, pp. 3760–3765, 2009.
- [7] P. J. Collings and J. W. Goodby, *Introduction to liquid crystals: chemistry and physics*. Crc Press, 2019.
- [8] A. Sampaio, N. Kimura, R. Viscovini, P. Fernandes, and A. Palangana, “Digital image processing study of a reentrant isotropic-discotic nematic phase transition,” *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, vol. 422, no. 1, pp. 57–63, 2004.
- [9] D. Andrienko, “Introduction to liquid crystals,” *Journal of Molecular Liquids*, vol. 267, pp. 520–541, 2018.
- [10] A. Sampaio, P. Fernandes, M. Simoes, and A. Palangana, “Viscosity of lyotropic nematic calamitic liquid crystals,” *Molecular Crystals and Liquid Crystals Science and Technology. Section A. Molecular Crystals and Liquid Crystals*, vol. 359, no. 1, pp. 269–275, 2001.
- [11] I. Dierking, *Textures of liquid crystals*. John Wiley & Sons, 2003.
- [12] S. S. Sastry, B. Rao, K. Mahalakshmi, K. Mallika, C. N. Rao, and H. S. Tiong, “Image analysis studies for phase transitions of ferroelectric liquid crystals,” *International Scholarly Research Notices*, vol. 2012, 2012.

- [13] C. N. Rao, S. S. Sastry, K. Mallika, H. S. Tiong, and K. Mahalakshmi, “Co-occurrence matrix and its statistical features as an approach for identification of phase transitions of mesogens,” *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol*, vol. 2, no. 9, pp. 4531–4538, 2013.
- [14] S. S. Sastry, K. Mallika, B. G. S. Rao, H. S. Tiong, and S. Lakshminarayana, “Identification of phase transition temperatures by statistical image analysis,” *Liquid Crystals*, vol. 39, no. 6, pp. 695–700, 2012.
- [15] A. R. Sampaio, A. J. Palangana, and R. C. Viscovini, “Investigation of uniaxial and biaxial lyotropic nematic phase transitions by means of digital image processing,” *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, vol. 408, no. 1, pp. 45–51, 2004.
- [16] B. Montrucchio, A. Sparavigna, and A. Strigazzi, “A new image processing method for enhancing the detection sensitivity of smooth transitions in liquid crystals,” *Liquid crystals*, vol. 24, no. 6, pp. 841–852, 1998.
- [17] S. Singh and D. A. Dunmur, *Liquid crystals: fundamentals*. World Scientific, 2002.
- [18] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Processamento de imagens digitais*. Editora Blucher, 2000.
- [19] N. Ohta and A. Robertson, *Colorimetry: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons, 2006.
- [20] “MS Windows NT kernel description.” <https://www.pngwing.com/en/free-png-ztgge>. Accessed: 2021-03-04.
- [21] Itseez, *The OpenCV Reference Manual*, 2.4.9.0 ed., April 2014.
- [22] M. Hassaballah, A. A. Abdelmgeid, and H. A. Alshazly, “Image features detection, description and matching,” in *Image Feature Detectors and Descriptors*, pp. 11–45, Springer, 2016.
- [23] G. E. E. de Carvalho, F. C. Flores, F. C. M. Freire, and A. R. Sampaio, “Liquid crystal image analysis by image descriptors,” in *2014 International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP)*, vol. 1, pp. 531–537, IEEE, 2014.
- [24] C. Walck *et al.*, “Hand-book on statistical distributions for experimentalists,” *University of Stockholm*, vol. 10, 2007.

- [25] R. M. Haralick, K. Shanmugam, and I. H. Dinstein, “Textural features for image classification,” *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, no. 6, pp. 610–621, 1973.
- [26] M. Partio, B. Cramariuc, M. Gabbouj, and A. Visa, “Rock texture retrieval using gray level co-occurrence matrix,” in *Proc. of 5th Nordic Signal Processing Symposium*, vol. 75, Citeseer, 2002.
- [27] X. Yang, S. Tridandapani, J. J. Beitler, D. S. Yu, E. J. Yoshida, W. J. Curran, and T. Liu, “Ultrasound glcm texture analysis of radiation-induced parotid-gland injury in head-and-neck cancer radiotherapy: An in vivo study of late toxicity,” *Medical physics*, vol. 39, no. 9, pp. 5732–5739, 2012.
- [28] A. Baraldi and F. Pannigiani, “An investigation of the textural characteristics associated with gray level cooccurrence matrix statistical parameters,” *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 33, no. 2, pp. 293–304, 1995.
- [29] L. Najman and H. Talbot, *Mathematical morphology: from theory to applications*. John Wiley & Sons, 2013.
- [30] R. M. Haralick, S. R. Sternberg, and X. Zhuang, “Image analysis using mathematical morphology,” *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, no. 4, pp. 532–550, 1987.
- [31] M. Jayaram and H. Fleyeh, “Convex hulls in image processing: a scoping review,” *American Journal of Intelligent Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 48–58, 2016.
- [32] S. Van der Walt, J. L. Schönberger, J. Nunez-Iglesias, F. Boulogne, J. D. Warner, N. Yager, E. Gouillart, and T. Yu, “scikit-image: image processing in python,” *PeerJ*, vol. 2, p. e453, 2014.
- [33] G. Van Rossum and F. L. Drake, *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley, CA: CreateSpace, 2009.
- [34] R. M. Kumar and K. Sreekumar, “A survey on image feature descriptors,” *Int J Comput Sci Inf Technol*, vol. 5, pp. 7668–7673, 2014.
- [35] L. Yu and A. Saupe, “Observation of a biaxial nematic phase in potassium laurate-1-decanol-water mixtures,” *Physical Review Letters*, vol. 45, no. 12, p. 1000, 1980.

- [36] A. Figueiredo Neto, L. Liebert, and Y. Galerne, “Temperature and concentration range of the biaxial nematic lyomesophase in the mixture potassium laurate/1-decanol/deuterium oxide,” *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 89, no. 17, pp. 3737–3739, 1985.
- [37] W. Braga, N. Kimura, D. Luders, A. Sampaio, P. Santoro, and A. Palangana, “Reentrant isotropic-calamitic nematic phase transition in potassium laurate-decanol-d 2 o mixtures,” *The European Physical Journal E*, vol. 24, no. 3, pp. 247–250, 2007.
- [38] E. Akpınar, D. Reis, and A. M. F. Neto, “Effect of alkyl chain length of alcohols on nematic uniaxial-to-biaxial phase transitions in a potassium laurate/alcohol/k₂so₄/water lyotropic mixture,” *Liquid Crystals*, vol. 39, no. 7, pp. 881–888, 2012.

A Tabelas com efetividade dos descritores

Nas tabelas apresentadas abaixo, constam a efetividade dos descritores em identificar as transições presentes em cada mistura. A efetividade será avaliada como “Excelente”, quando houver uma mudança abrupta de comportamento; “Bom” se houver uma alteração do comportamento da curva, embora suave; “Inefetivo” se a mudança não puder ser notável.

Tabela 2: Efetividade dos descritores para as transições da mistura ternária

Descritor	$I_{RE} \leftrightarrow N_D$	$N_D \leftrightarrow N_B$	$N_B \leftrightarrow N_C$	$N_C \leftrightarrow I$
Média V	Excelente	Excelente	Bom	Excelente
Média S	Excelente	Excelente	Inefetivo	Excelente
Média H	Excelente	Excelente	Inefetivo	Excelente
Desvio V	Excelente	Excelente	Bom	Excelente
Desvio S	Excelente	Excelente	Inefetivo	Excelente
Desvio H	Excelente	Excelente	Bom	Excelente
Contraste	Excelente	Excelente	Inefetivo	Excelente
Energia	Excelente	Excelente	Bom	Excelente
Entropia	Excelente	Excelente	Inefetivo	Excelente
Correlação	Excelente	Excelente	Inefetivo	Excelente
Elementos	Excelente	Excelente	Inefetivo	Excelente
Área	Excelente	Excelente	Bom	Excelente
Perímetro	Excelente	Excelente	Inefetivo	Excelente
Volume	Excelente	Excelente	Bom	Excelente
V/A	Excelente	Excelente	Bom	Excelente
C.A./A.	Excelente	Excelente	Inefetivo	Excelente
Granulometria	Excelente	Excelente	Inefetivo	Excelente

Tabela 3: Efetividade dos descritores para as transições da quaternária n10

Descritor	$2P \leftrightarrow N_C$	$N_C \leftrightarrow N_{B-}$	$N_{B-} \leftrightarrow N_{B+}$	$N_{B+} \leftrightarrow N_D$
Média V	Excelente	Inefetiva	Inefetiva	Excelente
Média S	Bom	Inefetivo	Inefetivo	Excelente
Média H	Bom	Inefetivo	Inefetivo	Excelente
Desvio V	Bom	Inefetivo	Bom	Excelente
Desvio S	Bom	Inefetivo	Inefetivo	Excelente
Desvio H	Bom	Inefetivo	Inefetivo	Excelente
Contraste	Excelente	Inefetivo	Bom	Excelente
Energia	Excelente	Inefetivo	Inefetivo	Excelente
Entropia	Excelente	Inefetivo	Inefetivo	Excelente
Correlação	Excelente	Inefetivo	Inefetivo	Excelente
Elementos	Inefetivo	Inefetivo	Inefetivo	Excelente
Área	Inefetivo	Inefetivo	Bom	Excelente
Perímetro	Excelente	Inefetivo	Inefetivo	Inefetivo
Volume	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
V/A	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
C.A./A.	Excelente	Inefetivo	Inefetivo	Excelente
Granulometria	Excelente	Inefetivo	Inefetivo	Excelente

Tabela 4: Efetividade dos descritores para as transições da quaternária n11

Descritor	$C \leftrightarrow 2P$	$2P \leftrightarrow N_C$	$N_C \leftrightarrow N_{B-}$	$N_{B-} \leftrightarrow N_{B+}$	$N_{B+} \leftrightarrow N_D$
Média V	Excelente	Excelente	Bom	Bom	Excelente
Média S	Bom	Bom	Inefetivo	Bom	Excelente
Média H	Inefetivo	Inefetivo	Inefetivo	Inefetivo	Excelente
Desvio V	Excelente	Bom	Bom	Bom	Excelente
Desvio S	Bom	Inefetivo	Bom	Inefetivo	Excelente
Desvio H	Bom	Inefetivo	Inefetivo	Inefetivo	Excelente
Contraste	Excelente	Excelente	Bom	Bom	Excelente
Energia	Inefetivo	Bom	Inefetivo	Bom	Excelente
Entropia	Excelente	Excelente	Bom	Bom	Excelente
Correlação	Excelente	Excelente	Bom	Bom	Excelente
Elementos	Inefetivo	Inefetivo	Inefetivo	Inefetivo	Excelente
Área	Excelente	Excelente	Inefetivo	Inefetivo	Excelente
Perímetro	Bom	Excelente	Inefetivo	Inefetivo	Bom
Volume	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
V/A	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
C.A./A.	Excelente	Excelente	Inefetivo	Inefetivo	Bom
Granulometria	Excelente	Bom	Excelente	Excelente	Excelente

Tabela 5: Efetividade dos descritores para as transições da quaternária n12

Descritor	$C \leftrightarrow 2P$	$2P \leftrightarrow N_C$	$N_C \leftrightarrow N_{B-}$	$N_{B-} \leftrightarrow N_{B+}$	$N_{B+} \leftrightarrow N_D$
Média V	Excelente	Excelente	Inefetivo	Bom	Excelente
Média S	Bom	Bom	Inefetivo	Bom	Excelente
Média H	Inefetivo	Inefetivo	Inefetivo	Inefetivo	Excelente
Desvio V	Excelente	Bom	Inefetivo	Bom	Excelente
Desvio S	Bom	Inefetivo	Bom	Inefetivo	Excelente
Desvio H	Bom	Inefetivo	Inefetivo	Inefetivo	Excelente
Contraste	Excelente	Excelente	Inefetivo	Bom	Excelente
Energia	Inefetivo	Inefetivo	Inefetivo	Inefetivo	Excelente
Entropia	Excelente	Excelente	Inefetivo	Bom	Excelente
Correlação	Excelente	Excelente	Inefetivo	Inefetivo	Bom
Elementos	Excelente	Inefetivo	Inefetivo	Inefetivo	Excelente
Área	Excelente	Excelente	Inefetivo	Inefetivo	Excelente
Perímetro	Excelente	Excelente	Inefetivo	Inefetivo	Bom
Volume	Excelente	Excelente	Inefetivo	Excelente	Excelente
V/A	Excelente	Excelente	Inefetivo	Excelente	Excelente
C.A./A.	Inefetivo	Excelente	Inefetivo	Inefetivo	Bom
Granulometria	Excelente	Bom	Inefetivo	Excelente	Excelente