

AMADO EMANOEL RIBEIRO

**MÉTODOS DE ANÁLISE DE MICROSCOPIA DO CLÍNQUER
USANDO MORFOLOGIA MATEMÁTICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Ciência da Computação.

UNIVERSIDADE PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS

Orientador: Prof. Marcelo Coelho.

BARBACENA

2003

AMADO EMANOEL RIBEIRO

**MÉTODOS DE ANÁLISE DE MICROSCOPIA DO CLÍNQUER
USANDO MORFOLOGIA MATEMÁTICA**

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado à obtenção do grau de Bacharel em Ciência da Computação e aprovado em sua forma final pelo Curso de Ciência da Computação da Universidade Presidente Antônio Carlos.

Barbacena – MG, dia de mês de ano.

Prof. Marcelo Coelho - Orientador do Trabalho

Prof. Frederico Coelho - Membro da Banca Examinadora

Prof. Emerson Tavares - Membro da Banca Examinadora

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram para a elaboração deste trabalho. Especialmente ao Centro de Ensino Superior Aprendiz pelos recursos oferecidos.

RESUMO

O clínquer de cimento portland pode ser definido como um produto granulado, obtido por tratamento térmico até o abrandamento e sinterização de mistura adequada de calcário e argila. As micrografias de clínquer apresentam informações importantíssimas sobre o processo de produção, levando a um melhor controle do processo de produção e redução de custos envolvidos.

Este trabalho apresenta alguns métodos para a identificação de cristais em micrografias de clínquer. Os cristais são analisados diretamente da imagem em níveis de cinza ou a partir de imagens binarizadas. Todas as operações utilizadas são fundamentadas nos conceitos da morfologia matemática.

O ensaio visual de microscopia consiste na verificação das amostras por um analista de laboratório, de modo a obter a quantificação, distribuição, e tamanho de cristais. Devido a ação humana é possível a ocorrência de erros nesta análise, o que pode comprometer todo processo. Estes novos métodos visam auxiliar o analista durante todo processo de verificação da amostra, filtrando as imagens e fornecendo uma resposta mais exata das informações contidas nas mesmas.

Palavras-chave: clínquer, morfologia matemática, processamento de imagens, realce de imagem.

SUMÁRIO

FIGURAS.....	6
1 INTRODUÇÃO.....	7
1.1 OBJETIVOS	8
1.2 MOTIVAÇÕES	8
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1 MICROSCOPIA DO CLÍNQUER	10
2.2 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS.....	14
2.2.1 <i>MODELAGEM E REPRESENTAÇÃO DE IMAGEM</i>	14
2.2.2 <i>REALCE DE IMAGEM</i>	15
2.2.3 <i>ANÁLISE DE IMAGEM</i>	17
2.2.4 <i>Subtração de imagens</i>	17
2.3 MORFOLOGIA MATEMÁTICA.....	18
2.3.1 <i>Tipos de Operações Morfológicas</i>	18
2.3.2 <i>Dilatação Binária (\oplus)</i>	19
2.3.2.1 Exemplo: $A \oplus B$	20
2.3.3 <i>Erosão Binária (\ominus)</i>	21
2.3.3.1 Exemplo de $A \ominus B$	21
3 DESENVOLVIMENTO	23
3.1 CONVERSÃO EM ESCALA DE CINZA.....	24
3.2 QUANTIFICAÇÃO POR PADRÕES PRÉ-DEFINIDOS	25
3.3 BINARIZAÇÃO DE IMAGENS	27
3.4 TRATAMENTO MORFOLÓGICO DA IMAGEM	28
3.4.1 <i>Tratamento de bordas</i>	28
3.4.1.1 Abertura da imagem binarizada	29
3.4.2 <i>Binarização por padrões PRÉ-DEFINIDOS</i>	33
3.5 RESULTADOS OBTIDOS	37
3.5.1 <i>Identificação do C_3S</i>	37
3.5.2 <i>Identificação do C_2S</i>	40
3.6 QUANTIFICAÇÃO DOS CRISTAIS	41
4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	42
4.1 CONCLUSÕES	42
4.2 TRABALHOS FUTUROS	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44
ANEXO A – COMPONENTES DO CLÍNQUER DE CIMENTO PORTLAND	45

FIGURAS

Fig.1) Exemplo de Micrografia de Clínquer	12
Fig. 2) Modelo Esquemático para Reconstituição das Condições de Fabricação por Microscopia	13
Fig. 3) Conceito de contraste.....	16
Fig. 4) Exemplo de conversão para escala de 256 tons cinza	25
Fig. 5) (1) amostra sem ataque químico, (2) $MgSO_4$ - 5% em água - 10s, (3) HNO_3 1% em álcool + 1/3 água - 1s, (4) HNO_3 0,1% em álcool - 10s + NH_4Cl 0,1% em água 10s	26
Fig. 6) imagem original e imagem binarizada.....	28
Fig. 7) a) elemento estruturante 3x3 com translação em (1,1) , b)elemento estruturante 5x5 com translação em (2,2)	29
Fig. 8) imagem binarizada original.....	30
Fig. 9) imagem após abertura com elemento estruturante 3x3.....	30
Fig. 10) imagem após abertura com elemento estruturante 5x5.....	31
Fig. 11) imagem original colorida	32
Fig. 12) Imagem convertida para 256 tons de cinza.....	32
Fig. 13) Imagem binarizada.....	33
Fig. 14) imagem colorida original	34
Fig. 15) a) Padrão C_3S , b) Padrão C_2S , c) Padrão base	34
Fig. 16) imagem binarizada pelo padrão C_3S , destacando este cristal	34
Fig. 17) Imagem binarizada pelo algoritmo antigo	36
Fig. 18) Imagem binarizada pelo algoritmo novo	36
Fig. 19) Imagem original. Padrões carregados A) C_3S B) C_2S E) base (contraste)	37
Fig. 20) Imagem binarizada pelo padrão C_3S	38
Fig. 21) Abertura da imagem com elemento estruturante 5x5 translação em (2,2)	38
Fig. 22) Imagem original subtraída da imagem processada.....	39
Fig. 23) Imagem original. Padrões carregados A) C_3S B) C_2S E) base (contraste)	40
Fig. 24) imagem original subtraída da imagem processada.....	40
Fig. 25) tela de contagem do cristal C_3S	41

1 INTRODUÇÃO

As imagens de microscópio geradas a partir de amostras de clínquer precisam ser analisadas de modo a oferecer uma melhor visão do processo de fabricação envolvido. As micrografias de clínquer são formadas por cristais, cuja distribuição de tamanhos, formatos e proporção da ocorrência precisam ser determinadas na etapa de controle de qualidade. Para isso, os cristais precisam ser corretamente analisados. No entanto, as micrografias de clínquer possuem diferentes formações dos cristais que impedem a sua correta análise pelos principais algoritmos existentes na literatura. Estes diferentes formatos variam de cristal para cristal. Devido a esta variação, algoritmos como de detecção de bordas e segmentação não conseguem obter bons resultados por não serem específicos para este tipo de material. [And 93].

As imagens utilizadas neste projeto foram obtidas junto a material de treinamento da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), órgão responsável pela normatização dos padrões e técnicas de análise laboratoriais existentes para indústria cimenteira. Dentre elas a microscopia de clínquer.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo determinar métodos para o reconhecimento automático destes cristais em micrografias de clínquer. Todas as operações utilizadas são fundamentadas nos conceitos da morfologia matemática de modo que se reconheçam as variações existentes em imagens de micrografias de clínquer, como por exemplo, a diversidade de formato dos cristais. Vários métodos serão estudados, tanto na identificação dos cristais na própria imagem, quanto em imagens binarizadas.

Usando uma parametrização de acordo com as normas da ABCP espera-se orientar o analista de processos sobre as falhas que estão ocorrendo na linha de produção.

1.2 MOTIVAÇÕES

Análises visuais, rotineiramente utilizadas nos laboratórios de análise na indústria cimenteira, podem ser substituídas pelo uso de analisadores de imagens, quer pela maior confiabilidade oferecida, quer pelo ganho de produtividade resultante do uso de procedimentos automatizados. A conveniência de se desenvolver analisadores de imagens de propósito específico, que possibilitem as adaptações requeridas pela aplicação, têm motivado alguns pesquisadores a optar pelo desenvolvimento de analisadores próprios, dedicados às suas necessidades.

Com o uso de equipamentos de custos relativamente baixos, pode-se melhorar, o processo de produção do clínquer de cimento portland, reduzindo significativamente os custos envolvidos, com detecção de falhas em etapas de fabricação de difícil controle.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: o capítulo 1 introduz o problema. Cita as motivações que levaram à elaboração deste trabalho e os seus objetivos.

O Capítulo 2 fornece a base necessária para o entendimento dos métodos utilizados para a automatização da microscopia do clínquer, explicando os principais conceitos do processamento digital de imagens, da morfologia matemática para imagens binárias.

O Capítulo 3 descreve os métodos utilizados para a binarização e correção da imagem. Este trabalho apresenta métodos para automação da microscopia de clínquer, tanto em imagens coloridas quanto para imagens binarizadas. Este capítulo enfoca a abordagem utilizada para binarizar a imagem e algoritmos utilizados para minimizar os efeitos causados por essa operação. Apresenta e analisa os resultados obtidos.

Finalmente, o Capítulo 4 apresenta as conclusões e dá algumas diretrizes para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MICROSCOPIA DO CLÍNQUER

Clínquer de cimento portland pode ser definido como um produto granulado, obtido por tratamento térmico até o abrandamento e sinterização de mistura adequada de calcário e argila. É um produto constituído em sua maior parte por silicatos (75%) e em proporções menores de aluminatos e ferro-aluminatos cálcicos. Essas fases são obtidas a partir do aquecimento até a fusão parcial (clínquerização) da mistura de argila e calcário, dosada de maneira a constituir uma proporção conveniente de cal (CaO), sílica (SiO₂), e de proporções menores de alumina (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃).[Div 00].

O clínquer compõe-se principalmente de três fases (cristais), que são identificados com as abreviaturas de C₃S, C₂S, CaO.[DIV 00].

O C₃S, Silicato Tricálcico, abreviação de Ca₃SiO₅ é o principal mineral de clínquer, ele regula no produto final a resistência inicial (resistência obtida nos primeiros dias da mistura com água) do cimento obtido. A morfologia mais freqüente de aparecimento do

C_3S e sob forma de cristais tabulares compactos que em seções transversais são hexagonais. Essa forma é denominada idiomórfica. O formato, tamanho, e grau de aparecimento destes cristais permite a análise de diversos problemas que ocorrem no processo de produção. As diferentes formas polimórficas e suas soluções sólidas (variações de estrutura e quimismo), comuns e clínqueres comerciais, são chamadas, genericamente, de alitas, reservando-se o termo C_3S para o composto de composição definida Ca_3SiO_5 .**[DIV00]**.

O C_2S Silicato Bicálcico (belita), abreviação de Ca_2SiO_4 , é responsável pela resistência em idades mais avançadas da mistura, apresenta morfologia mais freqüente e desejável de cristais sob forma de uma esfera que em seções transversais são bastante regulares.**[DIV 00]**.

O CaO livre é o calcário que não reagiu com os outros minerais de modo a formar compostos mais complexos. Indicador de falhas do processo de fabricação de grande eficiência, ocorre como cristais residuais geralmente escuros nas proximidades dos cristais de alita e belita.**[DIV 00]**.

Esses três cristais serão o objetivo principal deste trabalho devido ocorrerem em maior quantidade no clínquer e os dados obtidos a partir de suas variações fornecerem maiores informações sobre todo o processo envolvido. Na figura 1 poderemos identificar cada um destes cristais. O cristal A de cor marrom escura é ocorrência de alita ou C_3S , o cristal B de cor bege mostra a ocorrência de belita ou C_2S , o elemento apontado por E é uma ocorrência de CaO livre.

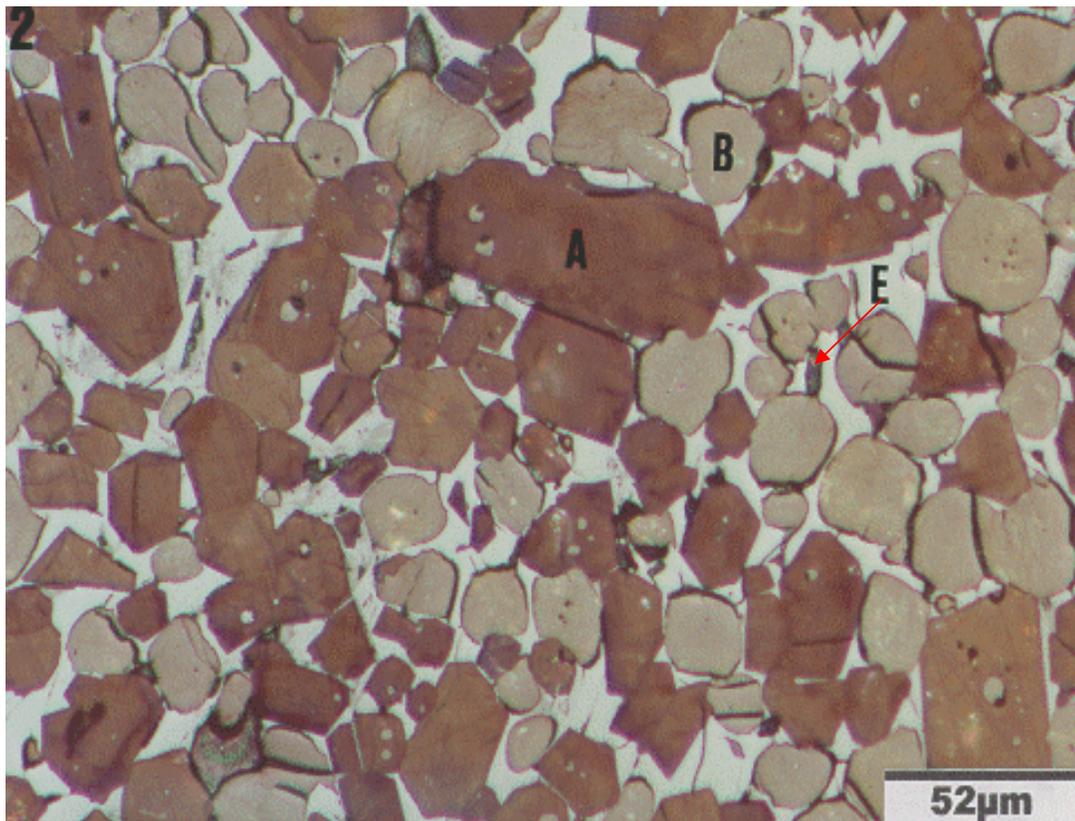


Fig.1) Exemplo de Micrografia de Clínquer

Na figura 2 é apresentado um modelo esquemático das condições de fabricação do clínquer. Onde se observa os problemas que podem ser relacionados a partir do ensaio de microscopia em cada um dos estágios do processo de produção. Este rápido modelo traz informações sobre a fabricação de clínquer desde a moagem do calcário e argila até o produto final obtido. [Met 93],[Cent 99].

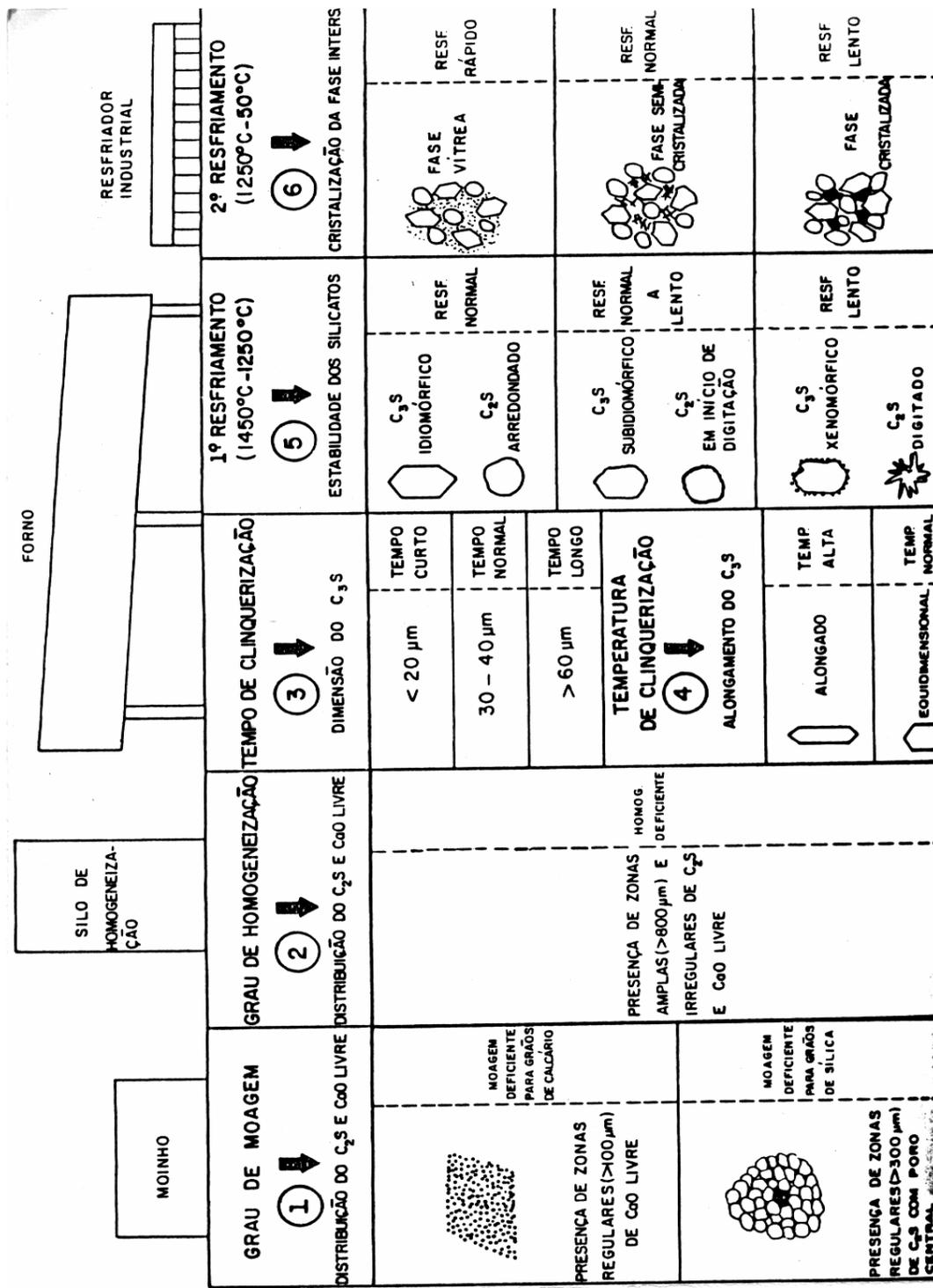


Fig. 2) Modelo Esquemático para Reconstituição das Condições de Fabricação por Microscopia

2.2 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Processamento Digital de Imagens entende-se a manipulação de uma imagem por computador de modo que a entrada e a saída do processo sejam imagens. O objetivo de se usar processamento digital de imagens, é melhorar o aspecto visual de certas feições estruturais para o analista humano e fornecer outros subsídios para a sua interpretação, inclusive gerando produtos que possam ser posteriormente submetidos a outros processamentos. [Gon 92].

O processamento digital de imagens tem um largo espectro de aplicações, como sensoriamento remoto por satélites e outras aeronaves, transmissão de imagem e armazenamento para aplicações empresariais, processo médico, radar, sonar, e processamento acústico de imagens, robótica e inspeção automatizada de partes industriais.[Rus 95].

Embora existam muitas aplicações e problemas no processamento de imagens, neste texto serão consideradas as seguintes classes básicas de problemas.

1. Modelagem e representação de imagem. (2.2.1)
2. Realce de imagem (2.2.2)
3. Análise de imagem. (2.2.3)

2.2.1 MODELAGEM E REPRESENTAÇÃO DE IMAGEM

Em representação de imagem se está preocupado com a caracterização da quantidade que cada elemento da imagem (também chamado pixel ou pel) representa. Uma imagem poderia representar luminâncias de objetos em uma cena (como quadros levados por máquina fotográfica), as características de absorção do tecido do corpo (imagem de Radiografia), no radar, a seção atravessada de um objetivo (imagem de radar), o perfil de temperatura de uma região (imagem infravermelho), ou o campo gravitacional em uma área

(em imagem geofísica). Em geral, qualquer função bi-dimensional que contenha informação pode ser considerada uma imagem. Modelos de imagem dão uma descrição lógica ou quantitativa das propriedades desta função. **[Rus 95]**

Uma consideração importante em representação de imagem é a fidelidade ou critérios de inteligibilidade, por medir a qualidade de uma imagem ou o desempenho de uma técnica de processo. A partir deste pontos é possível a comparação por exemplo de algoritmos aplicados sobre a imagem. A especificação de tais medidas requer modelos de percepção de contraste, frequências de espaço, coloração, e assim por diante. Conhecimento de um critério de fidelidade ajuda no projeto do sensor de imagem, porque nos conta as variáveis que deveriam ser medidas com precisão.

A exigência fundamental do processo digital é que imagens sejam amostradas e quantizadas. A taxa de amostragem (número de pixels por unidade de área) tem que ser grande o bastante para preservar a informação útil em uma imagem. É determinado pelo largura de banda da imagem (bandwidth). Por exemplo, o bandwidth raster scan de um sinal de televisão comum é aproximadamente 4 MHz. Do teorema de prova, isto requer uma taxa de amostragem mínima de 8 MHz. A 30 frames/s, isto significa que cada frame deveria conter aproximadamente 266,000 pixels. Assim para um raster de 512 linhas, isto significa cada frame de imagem contém aproximadamente 512 x 512 pixels.**[RUS 95]**.

2.2.2 REALCE DE IMAGEM

A interpretação de imagens é, muitas vezes, dificultada pelas degradações inseridas nos processos de geração e visualização da imagem. As técnicas de realce visam melhorar a qualidade visual destas imagens e enfatizar alguma característica de interesse para uma aplicação específica. Essas técnicas são, na sua maioria, heurísticas e orientadas para o problema; por exemplo um método que é muito útil para realçar imagens de raios-X, não necessariamente, deve ser o melhor para realçar imagens de recursos naturais.**[Par 97]**

No realce de imagem, a meta é acentuar certa imagem para análise subsequente ou para sua exibição. Por exemplo pode se incluir contraste e realce de extremidade,

pseudocoloração, filtro de ruído, recortes, e ampliações. Realce de imagem é muito útil na extração de característica, análise de imagem, e exibição de informação visual.

O próprio processo de realce não aumenta o conteúdo de informação inerente nos dados. Enfatiza certas características da imagem especificada simplesmente

Técnicas de realce de imagem, como a manipulação de contrastes, traçam cada nível de cinza em outro nível de cinza por uma transformação predeterminada. Um exemplo é o método de equalização de histograma. Uma imagem com bom contraste possui um histograma cujas barras estão razoavelmente espalhadas ao longo de todo o intervalo da escala. Observando os exemplos de imagens e seus histogramas nas Figuras 3(a), (b) e (c). Os valores de níveis de cinza da imagem na Figura 3 (a), estão concentrados nos níveis mais baixos da escala de cinza, isto faz com que a imagem pareça escura e com baixo contraste. O contraste da imagem 3 (b) também é baixo, mudando somente a concentração dos níveis de cinza para valores mais altos, indicando que a imagem é mais clara. O contraste destas imagens pode ser melhorado modificando o histograma para que os níveis de cinza se espalhem em todo intervalo possível da escala de cinza (Fig.3 (c)).

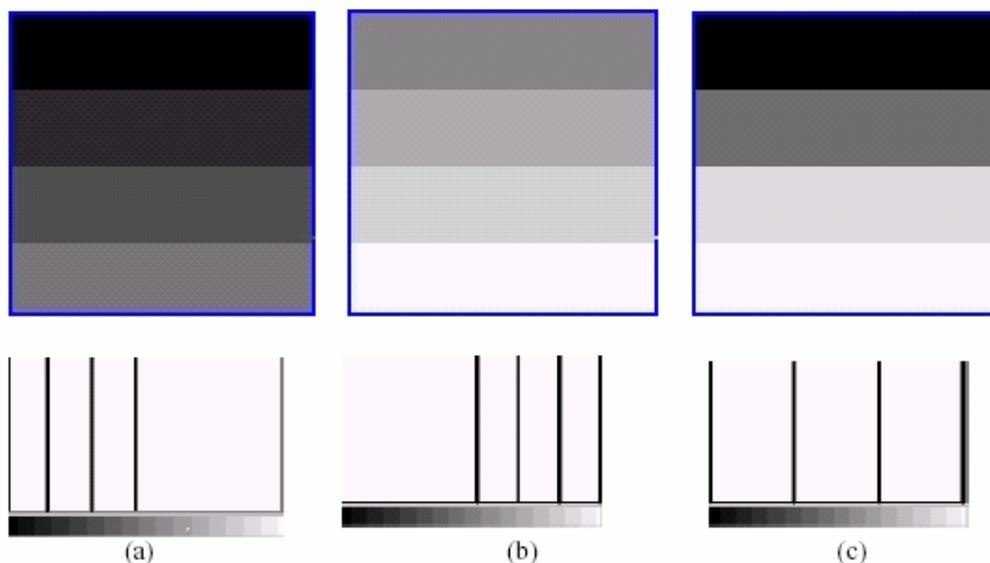


Fig. 3) Conceito de contraste

2.2.3 ANÁLISE DE IMAGEM

Está relacionada com a extração de informação de imagens. Inclui a segmentação (partição da imagem em regiões com características diferentes) e classificação de imagens (segmentação específica usando técnicas de reconhecimento de padrões). O resultado de uma operação de análise de imagem é uma descrição da imagem de entrada (lista de propriedades do objeto: posição, tamanho, formato), um campo vetorial representando o movimento de objetos em uma seqüência de imagens, mapas, ou uma representação gráfica. A descrição pode ser simplesmente o nome da classe a que o objeto pertence. [Gon 92].

2.2.4 SUBTRAÇÃO DE IMAGENS

Utiliza-se a subtração de imagens ou de bandas de uma mesma imagem para realçar diferenças espectrais. Esta operação constitui uma relação linear. [Par 97]

A diferença de duas imagens $f(x,y)$ e $h(x,y)$ pode ser expressa como $g(x,y) = f(x,y) - h(x,y)$ sendo obtida do cálculo da diferença de todos os pares de pixels correspondentes de f e h . [Gon 00].

Exemplos de aplicação da subtração de bandas:

- identificação de diferentes tipos de cobertura vegetal;
- identificação de minerais formados por óxido de ferro;
- detecção do padrão de mudança de cobertura, como uso do solo, expansão urbana, desmatamento.

Quando, na imagem, a média e desvio padrão dos histogramas a serem subtraídos não coincidirem, aconselha-se a equalização de sua média e do desvio padrão, antes da subtração, através de um aumento de contraste adequado em ambas imagens. Caso não seja adotado este procedimento, o resultado da subtração entre as imagens não corresponderá à diferença real entre elas. [Rus 95].

2.3 MORFOLOGIA MATEMÁTICA

Morfologia digital é um caminho para descrever ou analisar a forma de um objeto digitalizado. A morfologia digital é uma ciência relativamente recente, pois só os computadores digitais permitiram seu uso na prática [Fac 03]. Por outro lado os matemáticos a consideram um ramo da teoria de conjuntos, que é uma área bem estudada.

A idéia de morfologia digital é que uma imagem consiste de um conjunto de "picture elements" (pixels) que são reunidos em grupos tendo uma estrutura bidimensional (forma). Certas operações matemáticas em conjuntos de pixels podem ser usadas para ressaltar aspectos específicos das formas permitindo que sejam contadas ou reconhecidas. A base da morfologia consiste em extrair de uma imagem desconhecida a sua geometria através da utilização da transformação de uma outra imagem completamente definida, ou seja, consiste em extrair as informações relativas à geometria e a topologia de um conjunto desconhecido (no caso uma imagem) pela transformação através de outro conjunto bem-definido, chamado *elemento estruturante* [Fac 96].

As operações básicas da morfologia digital são a *erosão*, em que pixels que não atendem a um dado padrão são apagados da imagem, e *dilatação*, em que uma pequena área relacionada a um pixel é alterada para um dado padrão. Todavia, dependendo do tipo de imagem sendo processada (binária, tons de cinza ou colorida) a definição destas operações muda, assim cada tipo deve ser considerado separadamente.

2.3.1 TIPOS DE OPERAÇÕES MORFOLÓGICAS

Estão divididas em operações morfológicas binárias e operações morfológicas sobre imagens coloridas ou de tons de cinza [Fac 96]. Há uma diferença de enfoque nos dois grupos.

Operações morfológicas binárias são definidas em imagens com pixels pretos e brancos somente. Um objeto é considerado ser um conjunto matemático de pixels pretos, cada

pixel é identificado pelos seus índices de linha e coluna sendo chamado de um ponto no espaço bidimensional [Fac 03].

Nas operações morfológicas sobre imagens com tons de cinza ou cores, as operações de conjunto realizadas não implicam na retirada ou inclusão de um pixel (substituição de seu valor por preto ou branco), mas sim na modificação parcial de seu valor [Fac 96].

2.3.2 DILATAÇÃO BINÁRIA (\oplus)

A dilatação, também às vezes chamada de *dilação*, é uma transformação morfológica que combina dois conjuntos usando adição vetorial. Seu símbolo é \oplus . Como o nome diz, o resultado será uma imagem “engordada”. [Fac 96].

A dilatação de um conjunto A pelo conjunto B é definida por:

$$A \oplus B = \{ c \mid c = a + b, a \in A, b \in B \}$$

Onde A representa a imagem sendo operada e B é um segundo conjunto onde é chamado *elemento estrutural* e sua composição define a natureza específica da dilatação, sendo assim a dilatação expande uma imagem. [Fac 03]

Ela pode ser representada pela união $A \oplus B = A \cup B$.

Seja o conjunto $A = \{ (0,1), (1,1), (2,1), (2,2), (3,0) \}$ e $B = \{ (0,0), (0,1) \}$ então o resultante da dilatação é :

$$A \oplus B = \{ A + \{(x_1 \in B)\} \cup A + \{(x_2 \in B)\} \}$$

$$A \oplus B = \{ (0,1), (1,1), (2,1), (3,0), (0,2), (1,2), (2,2), (2,3), (3,1) \}$$

logo:

$$A \oplus B = [A + \{(0,0)\}] \cup [A + \{(1,0)\}] \text{ resulta em:}$$

$$A \oplus B = \{(1,1), (1,2), (2,1), (2,2), (3,1), (3,2)\}$$

2.3.2.1 Exemplo: $A \oplus B$

$$A = \{(1,1), (1,2), (2,1), (2,2)\} = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \otimes & \circ & \circ & \circ \\ \hline \circ & \bullet & \bullet & \circ \\ \hline \circ & \bullet & \bullet & \circ \\ \hline \circ & \circ & \circ & \circ \\ \hline \end{array} \quad B = \{(0,0), (1,0)\} = \begin{array}{|c|c|} \hline \otimes & \bullet \\ \hline \end{array}$$

Para este caso a equação pode ser reescrita como:

$$A \oplus B = [A + \{(0,0)\}] \cup [A + \{(1,0)\}]$$

$$A + \{(0,0)\} = \{(1,1), (1,2), (2,1), (2,2)\} = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \circ & \circ & \circ & \circ \\ \hline \circ & \bullet & \bullet & \circ \\ \hline \circ & \bullet & \bullet & \circ \\ \hline \circ & \circ & \circ & \circ \\ \hline \end{array}$$

$$(1,1) + (0,0) = (1,1)$$

$$(1,2) + (0,0) = (1,2)$$

$$(2,1) + (0,0) = (2,1)$$

$$(2,2) + (0,0) = (2,2)$$

A translação de qualquer pixel por $(0,0)$ não altera sua posição.

$$A + \{(1,0)\} = \{(2,1), (2,2), (3,1), (3,2)\} = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \circ & \circ & \circ & \circ \\ \hline \circ & \circ & \bullet & \bullet \\ \hline \circ & \circ & \bullet & \bullet \\ \hline \circ & \circ & \circ & \circ \\ \hline \end{array}$$

$$(1,1) + (1,0) = (2,1)$$

$$(1,2) + (1,0) = (2,2)$$

$$(2,1) + (1,0) = (3,1)$$

$$(2,2) + (1,0) = (3,2)$$

$$A \oplus B = \{(1,1), (1,2), (2,1), (2,2), (3,1), (3,2)\} = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \circ & \circ & \circ & \circ \\ \hline \circ & \bullet & \bullet & \circ \\ \hline \circ & \bullet & \bullet & \circ \\ \hline \circ & \circ & \circ & \circ \\ \hline \end{array}$$

O pixel marcado com um “x” representa a origem (0,0) de cada imagem. A localização da origem é muito importante; no exemplo anterior se a origem do conjunto B fosse o pixel da direita, $\{(-1,0), (0,0)\}$, a dilatação acrescentaria pixels à esquerda na imagem A.

2.3.3 EROÇÃO BINÁRIA (\ominus)

A erosão basicamente encolhe uma imagem e pode ser vista como uma transformação morfológica que combina dois conjuntos usando vetores de subtração. Ela é expressa como a interseção de A e B. Assim é definido $A \ominus B = B \cap A$. [Fac 96].

A erosão da imagem A pelo elemento estruturante B pode ser definida como:

$$A \ominus B = \{ x \mid x + b \in A \text{ para todo } b \in B \}$$

ou

$$A \ominus B = \{ c \mid B' \subseteq A \} \text{ definição de Matheron (1967).}$$

Assim define-se que a erosão é o conjunto de todos os pixels, e o elemento estruturante B e transladado pelo C corresponde a um conjunto de pixel em A. Podemos visualizar a erosão através do exemplo dado a seguir. Assim verifica-se que cada elemento de B é um elemento de A ou seja B está contido em A. [Fac 03]

2.3.3.1 Exemplo de $A \ominus B$

$$A = \{(1,1), (1,2), (2,1), (2,2)\} = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \otimes & \circ & \circ & \circ \\ \hline \circ & \bullet & \bullet & \bullet \\ \hline \circ & \bullet & \bullet & \bullet \\ \hline \circ & \circ & \circ & \circ \\ \hline \end{array} \quad B = \{(0,0), (1,0)\} = \begin{array}{|c|c|} \hline \otimes & \bullet \\ \hline \end{array}$$

O conjunto $A \ominus B$ é o conjunto de translações de B que alinham B sobre o conjunto de pixels pretos em A. Isso significa que nem todas as translações necessitam ser

consideradas, mas somente aquelas que inicialmente localizam sua origem de B em um membro de A. Existem quatro dessas translações:

$$B_{(1,1)} = \{(1,1), (2,1)\}$$

Como os pixels (1,1) e (2,1) são pretos na imagem A.



O pixel (1,1) no resultado será preto.

$$B_{(1,2)} = \{(1,2), (2,2)\}$$

Como os pixels (1,2) e (2,2) são pretos na imagem A.



O pixel (1,2) no resultado será preto.

$$B_{(2,1)} = \{(2,1), (3,1)\}$$

Como o pixel (3,1) não é preto na imagem A.



O pixel (2,1) no resultado não será preto.

$$B_{(4,4)} = \{(4,4), (5,4)\}$$

Como o pixel (5,4) não é pretos na imagem A.



O pixel (4,4) no resultado não será preto.

$$A \ominus B = \{ (1,1) \mid B_{(1,1)} \subseteq A \} \cup \{ (1,2) \mid B_{(1,2)} \subseteq A \}$$



Os efeitos obtidos pela erosão são:

1. Diminuir as partículas;
2. Eliminar grãos de tamanho inferior ao tamanho do elemento estruturante;

3. Aumentar buracos;
4. Permitir a separação de grãos próximos.

3 DESENVOLVIMENTO

Aqui será abordado a implementação de um analisador digital de imagens, com o objetivo de obter informações de micrografias de clínquer. O processo de desenvolvimento consiste na utilização de técnicas de processamento digital de imagens e algumas propriedades químicas da amostra analisada.

Os métodos abordados, foram descritos segundo a necessidade de cada um durante o processo de desenvolvimento e estão divididos em quatro tópicos:

1. Conversão em escala de cinza;
2. Quantificação por padrões pré definidos;
3. Binarização de imagens;
4. Tratamento morfológico da imagem.

A partir dos problemas apresentados por um determinado método surgiu a necessidade da implementação do outro. No último tópico deste capítulo é apresentado os resultados obtidos pelo analisador.

3.1 CONVERSÃO EM ESCALA DE CINZA

Devido a grandes dificuldades na manipulação de imagens com suas características originais (colorizadas), as imagens a serem analisadas irão passar por um processo de conversão para escala de cinza. Fato este que aumenta a carga computacional dos filtros utilizados bem como a complexidade dos mesmos, dado que o número de informações existentes nas imagens coloridas, devido a sua profundidade de cor, aumenta o número de bits a serem processados significativamente.

O processo de conversão para escala de 256 tons de cinza leva a utilização do padrão RGB (*Red, Green, Blue*) das imagens analisadas, onde, cada pixel será analisado, resgatando seu padrão de cor e comparando com uma Lookup Table (LUT), de modo a obter a nova cor a ser aplicada. O padrão RGB nos leva a montar uma LUT, onde, os valores atribuídos a cada um dos componentes R, G, B será atribuído à mesma intensidade de cor que varia entre 0 e 255 gerando uma cor cinza entre os 256 tons disponíveis.

Abaixo um exemplo de um algoritmo para conversão da escala de cinza 256 tons (não utilizando LUT).

```

largura := Image1.Picture.Width;
altura := Image1.Picture.Height;
for w:=0 to largura do { percorre a imagem pixel a pixel)
  for h:=0 to altura do
    begin
      aux:=image1.Picture.Bitmap.Canvas.Pixels[w,h]; {Capta cor do pixel)
      aux2:=aux mod 256; ( reduz o numero de cores)
      image1.Picture.Bitmap.Canvas.Pixels[w,h]:=rgb(aux2,aux2,aux2)
      { Aplica padrão RGB }
    end;

```

Como resultado deste algoritmo iremos obter uma imagem convertida em escala de 256 tons de cinza, conforme a figura 4:

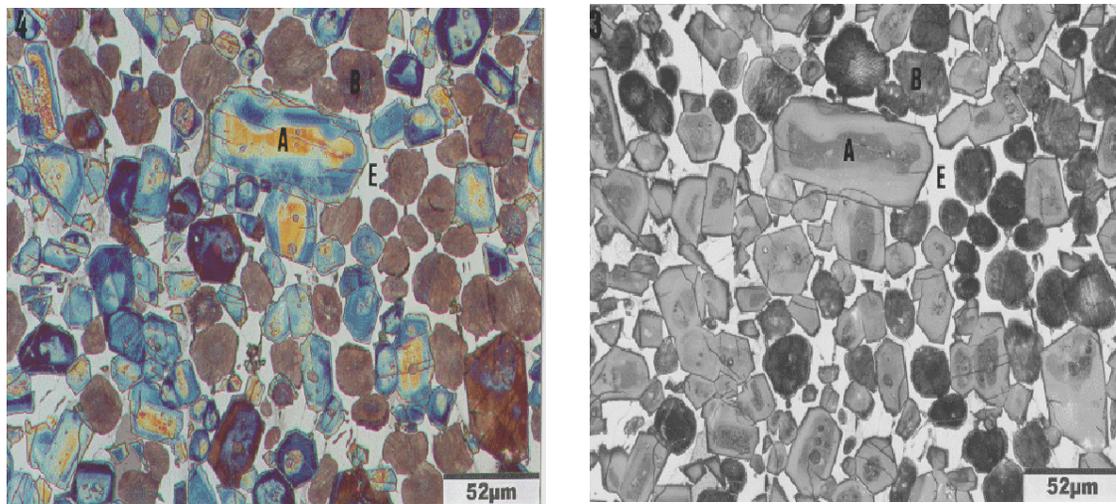


Fig. 4) Exemplo de conversão para escala de 256 tons cinza

3.2 QUANTIFICAÇÃO POR PADRÕES PRÉ-DEFINIDOS

Com base na imagem de amostra transformada pode-se obter uma quantificação da ocorrência dos cristais na amostra, a partir da obtenção do conjunto de cores que existirem na seleção de um intervalo onde esteja contido este cristal. Pode-se observar na figura 5 que os cristais possuem características de cor bem definidas. Esta propriedade se deve ao fato de que a amostra tratada quimicamente pode gerar uma discrepância maior de um cristal para outro.

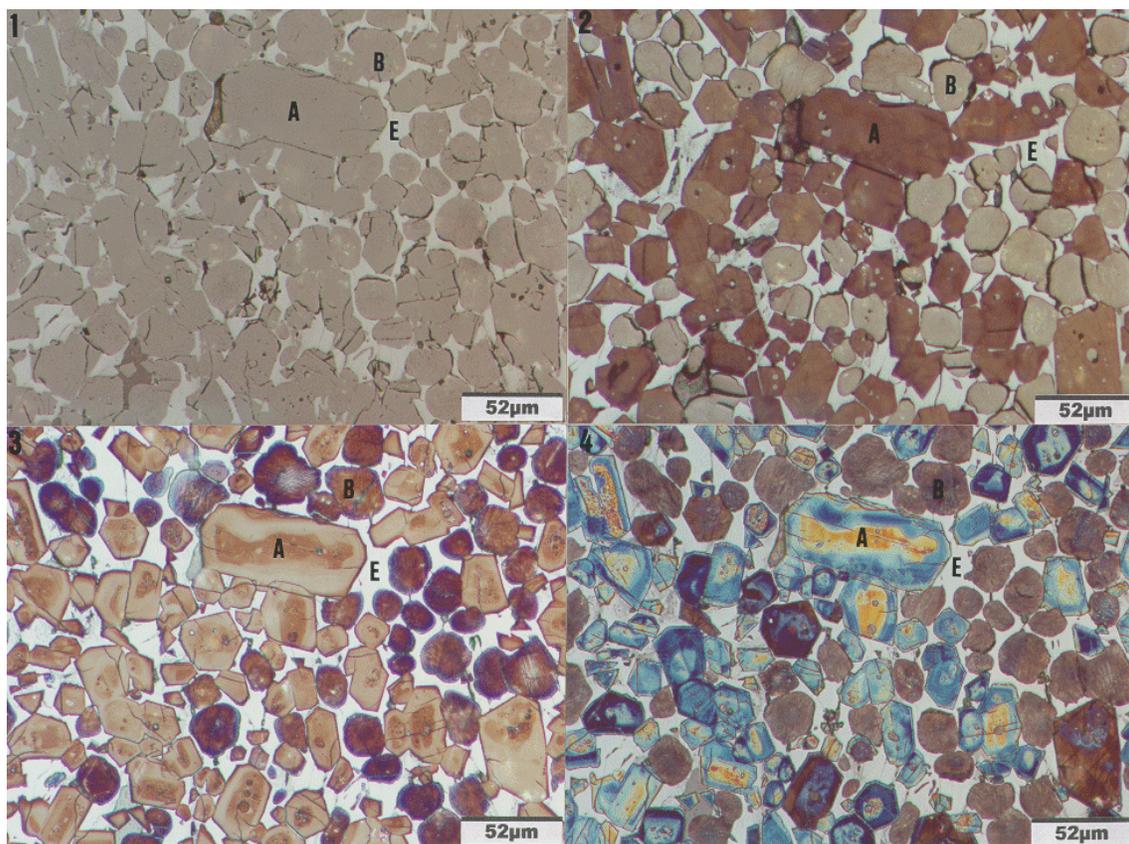


Fig. 5) (1) amostra sem ataque químico, (2) MgSO_4 - 5% em água - 10s, (3) HNO_3 1% em álcool + 1/3 água - 1s, (4) HNO_3 0,1% em álcool - 10s + NH_4Cl 0,1% em água 10s

Observa-se que na figura 5.1 que não se pode distinguir os cristais a serem analisados, mas devido as suas propriedades químicas serem diferentes ao entrar em contato com outras substâncias estes passam a adquirir discrepâncias mais visíveis que podem ser agora analisadas. Na imagem 2 da figura 5 os cristais de Alita (A) ficam com uma tonalidade de cor própria o que facilita a sua quantificação. Bem como a Belita (B) na imagem 3.

Mas o cristal não é homogêneo na sua coloração conforme se pode observar nas imagens, o que impossibilita a obtenção uma quantificação real de cada um. Devido a este

problema a imagem terá que ser tratada por filtros próprios de maneira a minimizar esta ocorrência ou mesmo eliminar completamente este problema.

Devido a problema anteriormente dito, faz-se a necessidade da implementação de tratadores de imagens mais complexos. Estes novos algoritmos irão utilizar a morfologia matemática de imagens binárias com principal ferramenta de correção de variância de tons.

3.3 BINARIZAÇÃO DE IMAGENS

Antes de se implementar processadores morfológicos de imagens, torna-se necessária mais uma conversão de imagem, a conversão de 256 tons de cinza para imagens binárias. As imagens binárias como próprio nome diz possuem apenas duas profundidades de cor preto ou branco que diminui em muito a carga computacional envolvida, dado que operadores morfológicos, mesmo os mais simples, exigem alta carga de processamento.

A operação de conversão para imagens binárias consiste em se delimitar o grau tom que a cor possui e atribuir a ela uma das opções disponíveis preto ou branco. [Ban 94]

Através de um algoritmo bem simples pode-se gerar facilmente imagem binarizadas a partir de imagens cinzas. Conforme exemplo abaixo:

```

largura := Image1.Picture.Width;
altura := Image1.Picture.Height;
for ax:=0 to largura do {percorre a imagem pixel a pixel}
  for ay:=0 to altura do
    begin
      aux:=image1.Picture.Bitmap.Canvas.Pixels[ax,ay];{capta cor do pixel}
      aux2:=aux mod 256; {retira o tom de cinza}
      if aux2<128 then {limiar de conversão}
        image1.Picture.Bitmap.Canvas.Pixels[ax,ay]:=clWhite {aplica branco}
      else
        image1.Picture.Bitmap.Canvas.Pixels[ax,ay]:=clBlack; {aplica preto}
      end;
    end;
  end;
end;

```

Onde os pixels que estão acima do limiar 128 em cinza são considerados brancos e os outros pretos. De modo a exemplificar esta conversão a figura 6 demonstra esta transformação:

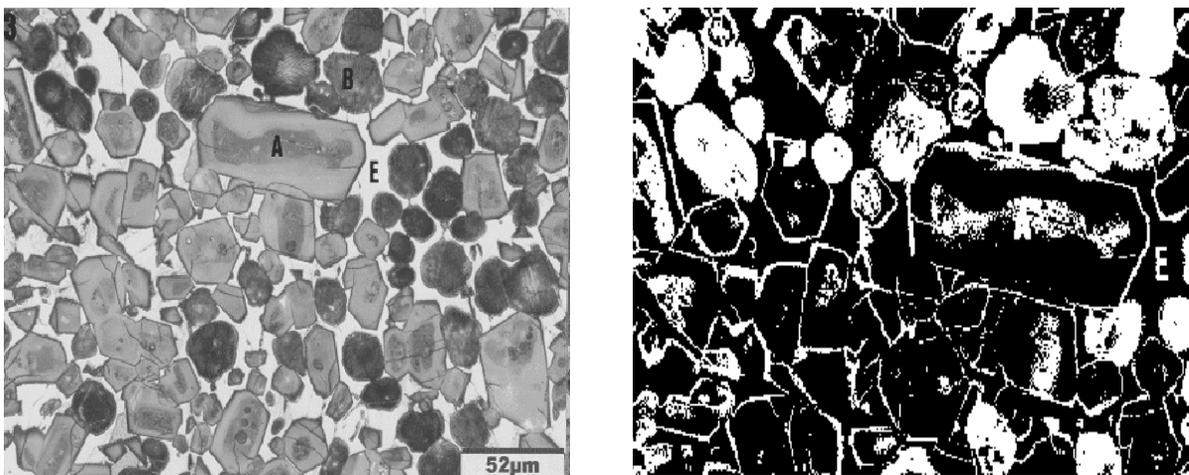


Fig. 6) imagem original e imagem binarizada

3.4 TRATAMENTO MORFOLÓGICO DA IMAGEM

Neste tópico será tratada a implementação dos algoritmos para correção das imagens binarizadas. Com o uso das operações de erosão e dilatação vistas anteriormente o um determinado tipo de cristal será destacado, e com isto poderá se ter um melhor levantamento das informações relevantes da imagem.

3.4.1 TRATAMENTO DE BORDAS

Devido à proximidade dos cristais existentes na amostra analisada, suas bordas encontram-se muitas vezes embutidas umas nas outras, o que dificulta a determinação de sua posição, tamanho ou estrutura. Este fato obriga ao analisador o uso de algoritmos de realce de imagem, para minimizar este problema. Estes algoritmos foram implementados usando os

conceito de morfologia matemática anteriormente citados como erosão e dilatação. [Fac 96][Fac 03].

3.4.1.1 Abertura da imagem binarizada

A abertura em geral suaviza o contorno de uma imagem, quebra estreitos e elimina elevações pequenas. A operação de abertura é usada também para remover ruídos da imagem. A abertura de um conjunto A por elemento estruturante B e denotado $A \circ B$ e definida como:

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B$$

A aplicação de uma erosão seguida imediatamente de uma dilatação usando o mesmo elemento estruturante é uma operação de abertura, ela tende a abrir pequenos vazios ou espaços entre objetos próximos numa imagem. Em outras palavras uma abertura é uma erosão seguida de uma dilatação usando um mesmo elemento estruturante, lembrando que a erosão acha todos os lugares onde o ajuste do elemento estruturante esta dentro a imagem.

Porém uma erosão seguido por uma dilatação, enche de brancos os lugares onde ao região de ajuste do elemento estruturante estiver dentro do objeto. O objetivo é destruir a conexão sem modificar o tamanho e a forma dos cristais.

Na figura 7 é apresentado os elementos estruturantes utilizados no sistema, o ponto em vermelho é o pixel relevante utilizado para a translação (transportar o elemento estruturante para verificação na imagem).

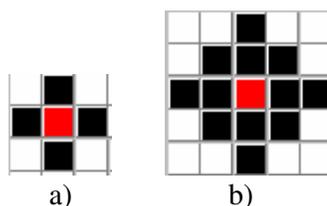


Fig. 7) a) elemento estruturante 3x3 com translação em (1,1) , b) elemento estruturante 5x5 com translação em (2,2)



Fig. 8) imagem binarizada original

O elemento estruturante é colocado sobre a imagem, verificando nos intervalos igual a seu tamanho a sua ocorrência ou não de acordo com os conceitos da morfologia matemática.

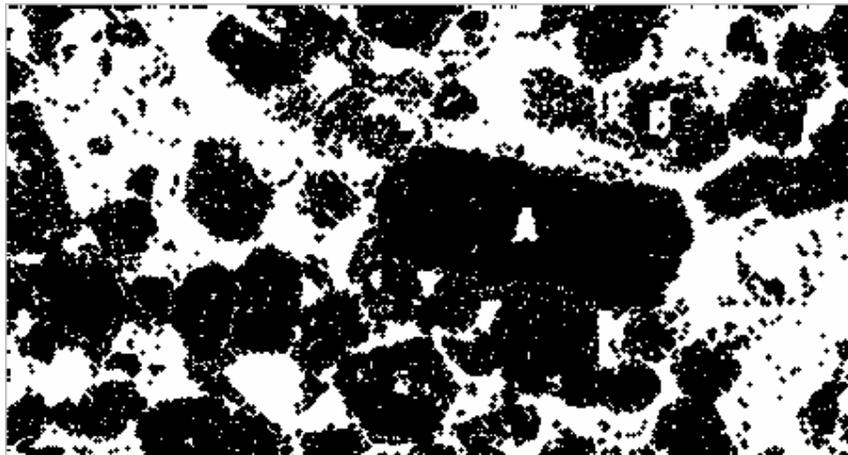


Fig. 9) imagem após abertura com elemento estruturante 3x3

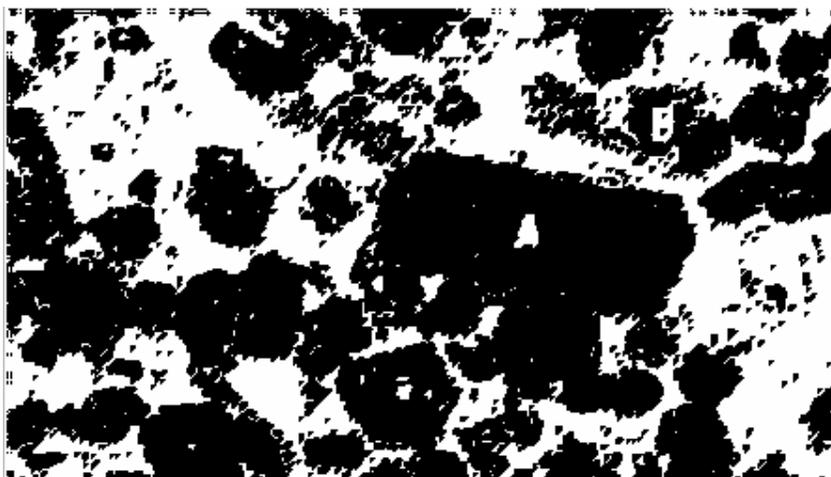


Fig. 10) imagem após abertura com elemento estruturante 5x5

Como se pode observar nas figuras 7, 8 , 9, 10 o elemento estruturante é fator altamente relevante no resultado final. Para cada cristal o elemento estruturante deve ser cuidadosamente escolhido para a obtenção da melhor imagem final possível.

Mesmo com a operação de abertura a imagem gerada não é precisa o suficiente para a retirada de informações relevantes sobre os cristais que ela possui. Este fato ocorre devido a perda de informações nas conversões colorido→cinza e cinza→binário. As figuras 11, 12 e 13 mostram estas conversões, sendo fácil denotar as grandes perdas de informações que ocorrem.

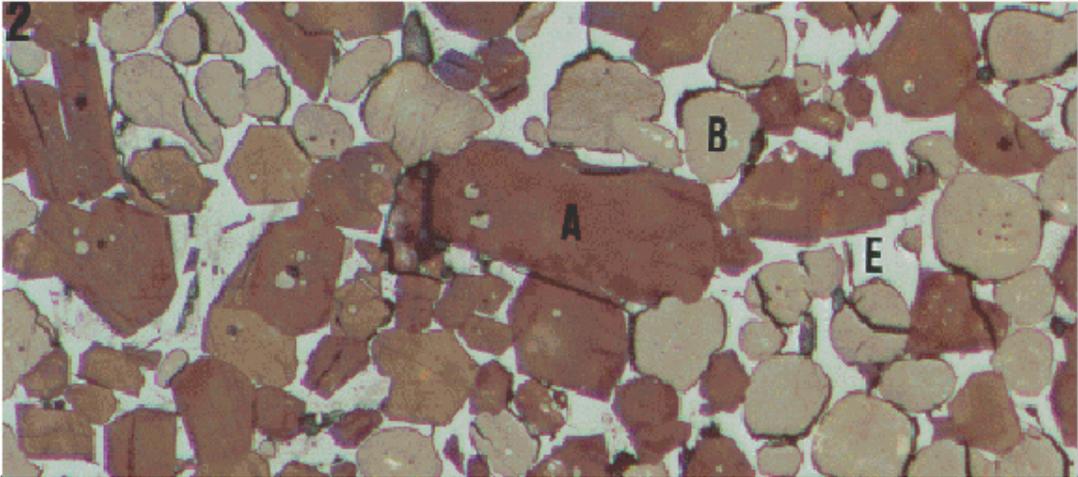


Fig. 11) imagem original colorida

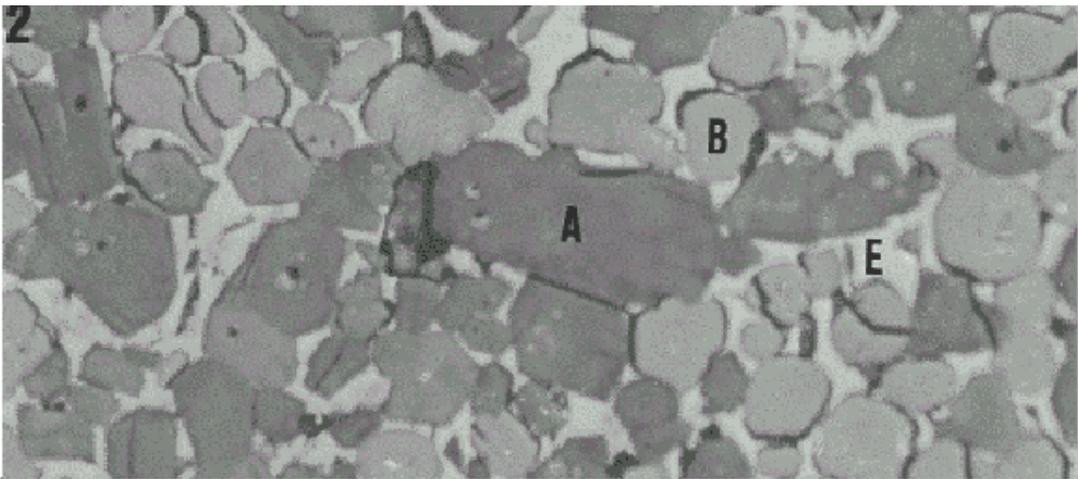


Fig. 12) Imagem convertida para 256 tons de cinza



Fig. 13) Imagem binarizada

Como solução a este problema a binarização da imagem será gerada diretamente da imagem colorida através do uso da idéia da quantificação por padrões pré definidos. Onde o processo será controlado por um conjunto de padrões escolhidos na imagem.

3.4.2 BINARIZAÇÃO POR PADRÕES PRÉ-DEFINIDOS

O processo de binarização se torna mais eficiente com a verificação das cores existentes na amostra em relação a três padrões definidos no momento da análise. Estes padrões identificam os principais componentes analisados, no caso o cristal de Belita (C_3S), de Alita (C_2S) e o material base onde se encontra o mineral analisado (contraste).

Este método consiste em primeiramente se criar um histograma de cada padrão e verificar a existência ou não deste na imagem. Por exemplo: para se destacar o padrão C_3S , verifica-se a sua ocorrência na imagem original, excluindo a ocorrência dos outros padrões. Este conceito fica mais claro nas figuras 14, 15 e 16:

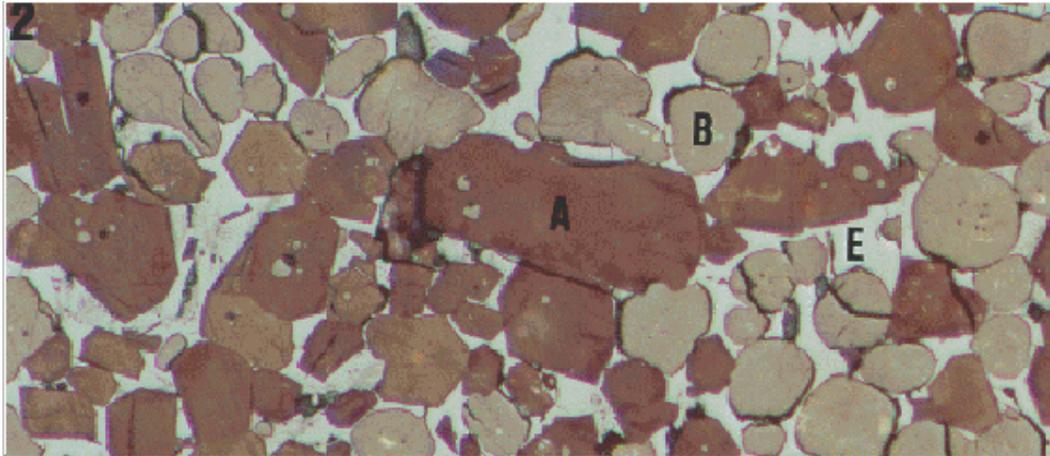


Fig. 14) imagem colorida original

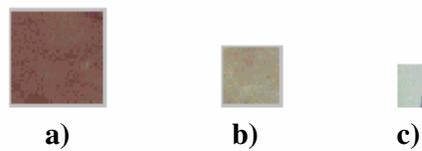


Fig. 15) a) Padrão C_3S , b) Padrão C_2S , c) Padrão base



Fig. 16) imagem binarizada pelo padrão C_3S , destacando este cristal

O algoritmo de binarização foi adaptado de modo a melhorar os resultados obtidos na conversão direta da escala de cinza, resultados estes, que impossibilitavam a correta segmentação dos cristais desejados, gerando um nível de ruído muito alto e criando uma deformação muito grande na forma do cristal.

O algoritmo abaixo analisa a imagem pixel a pixel comparando a sua magnitude com um padrão pré definido pelo usuário. Existindo a ocorrência deste pixel no padrão, ele é convertido para preto, ou seja, um ponto relevante da imagem, caso contrário, é analisado a vizinhança deste ponto usando uma conectividade de 8 pontos (oito pontos que circundam o pixel analisado) , se o nível de ocorrência do padrão for satisfatório na vizinhança, o pixel será preto, caso contrário, ele será descartado recebendo o valor branco. [Hir 97].

```

x := Image1.Picture.Width;
y := Image1.Picture.Height;
for ax:=0 to x do
for ay:=0 to y do
begin
  aux:=image1.Picture.Bitmap.Canvas.Pixels[ax,ay];
  aux2:=aux mod 65536;
  if (vec2[aux2]<>0) and (vec3[aux2]=0) and (vec4[aux2]=0) then
    image6.Picture.Bitmap.Canvas.Pixels[ax,ay]:=clblack
  else
    begin
      a:=(vec2[(image1.Picture.Bitmap.Canvas.Pixels[ax-1,ay] mod 65536)]<>0);
      b:=(vec2[(image1.Picture.Bitmap.Canvas.Pixels[ax+1,ay] mod 65536)]<>0);
      c:=(vec2[(image1.Picture.Bitmap.Canvas.Pixels[ax,ay-1] mod 65536)]<>0);
      d:=(vec2[(image1.Picture.Bitmap.Canvas.Pixels[ax,ay+1] mod 65536)]<>0);
      e:=(vec2[(image1.Picture.Bitmap.Canvas.Pixels[ax-1,ay] mod 65536)]<>0);
      f:=(vec2[(image1.Picture.Bitmap.Canvas.Pixels[ax+1,ay] mod 65536)]<>0);
      g:=(vec2[(image1.Picture.Bitmap.Canvas.Pixels[ax,ay-1] mod 65536)]<>0);
      h:=(vec2[(image1.Picture.Bitmap.Canvas.Pixels[ax,ay+1] mod 65536)]<>0);
      if ((a or b) or (c or d)) or ((e or f) or (g or h)) then
        image6.Picture.Bitmap.Canvas.Pixels[ax,ay]:=clblack
      else
        image6.Picture.Bitmap.Canvas.Pixels[ax,ay]:=clwhite;
    end;
end;
end;

```

Desta forma pixels que seriam desprezados pelo conversor passam a ser relevantes de acordo com a sua vizinhança. Esta conversão é comparada ao método antigo nas figuras 17 e 18 abaixo apresentadas.

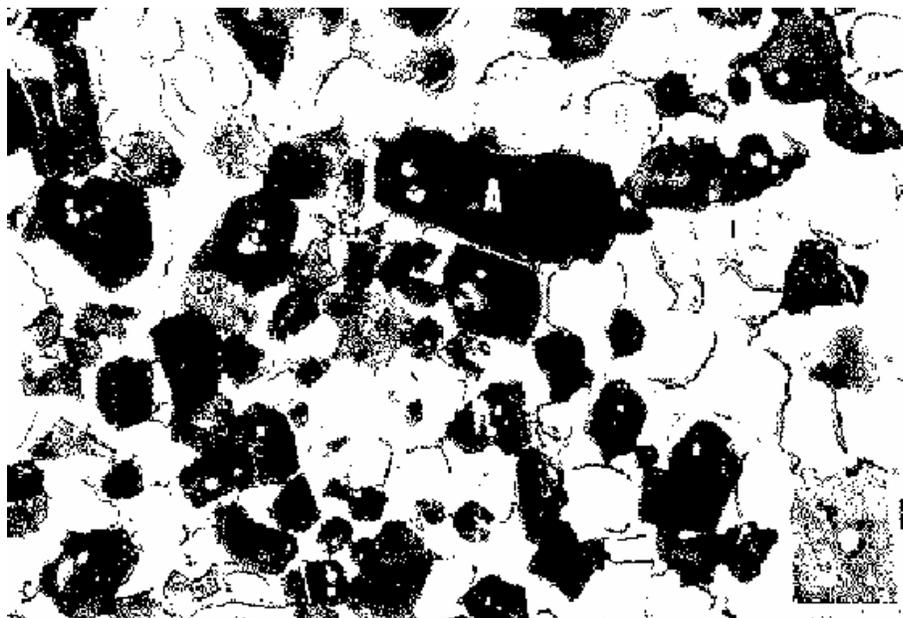


Fig. 17) Imagem binarizada pelo algoritmo antigo

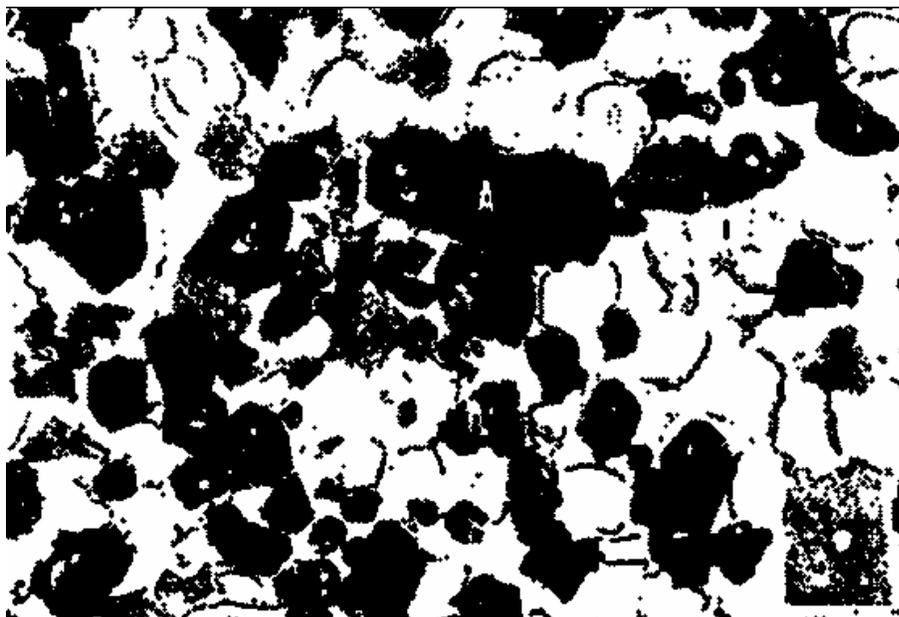


Fig. 18) Imagem binarizada pelo algoritmo novo

Pode se observar uma melhor representação do cristal, bem como, um ruído interno menor.

3.5 RESULTADOS OBTIDOS

A partir dos métodos acima apresentadas o sistema proposto consegue filtrar na imagem um dos cristais existentes na amostra, permitindo uma melhor análise de sua estrutura e quantificação mais precisa. Todo o processamento da imagem será demonstrado logo abaixo com a detecção primeiramente do cristal de C_3S (figuras 19, 20, 21 e 22) e depois o cristal de C_2S (figuras 23 e 24).

3.5.1 IDENTIFICAÇÃO DO C_3S

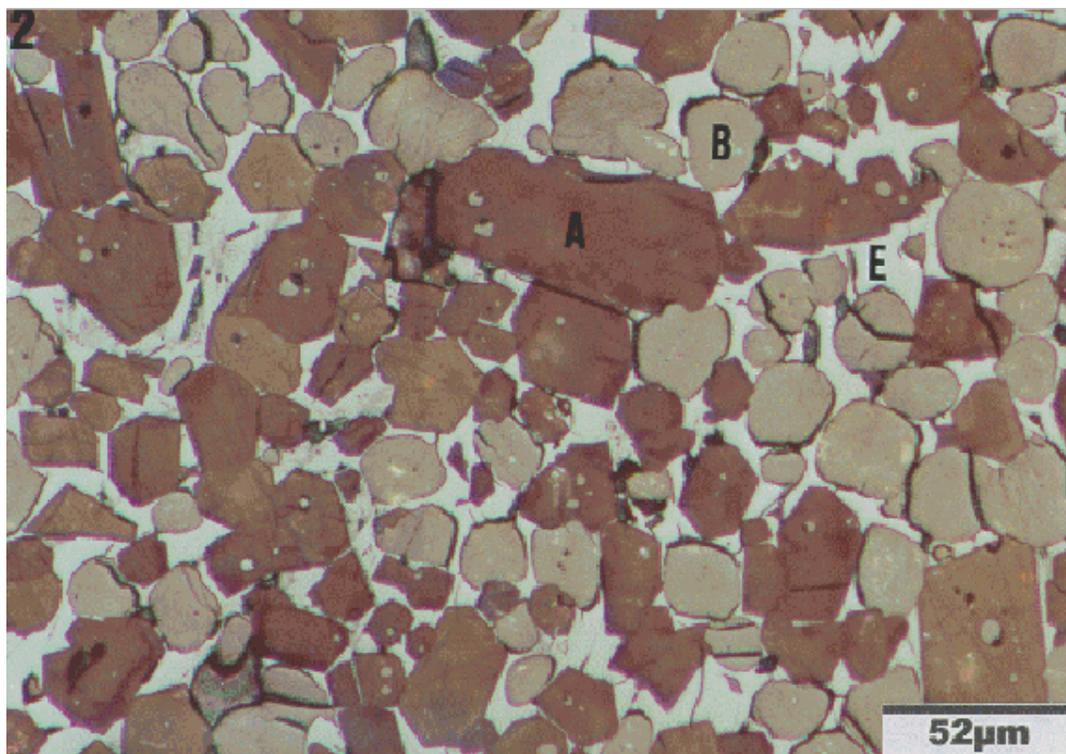


Fig. 19) Imagem original. Padrões carregados A) C_3S B) C_2S E) base (contraste)

A figura 19 mostra a imagem a ser analisa bem como os padrões carregados pelo usuário.

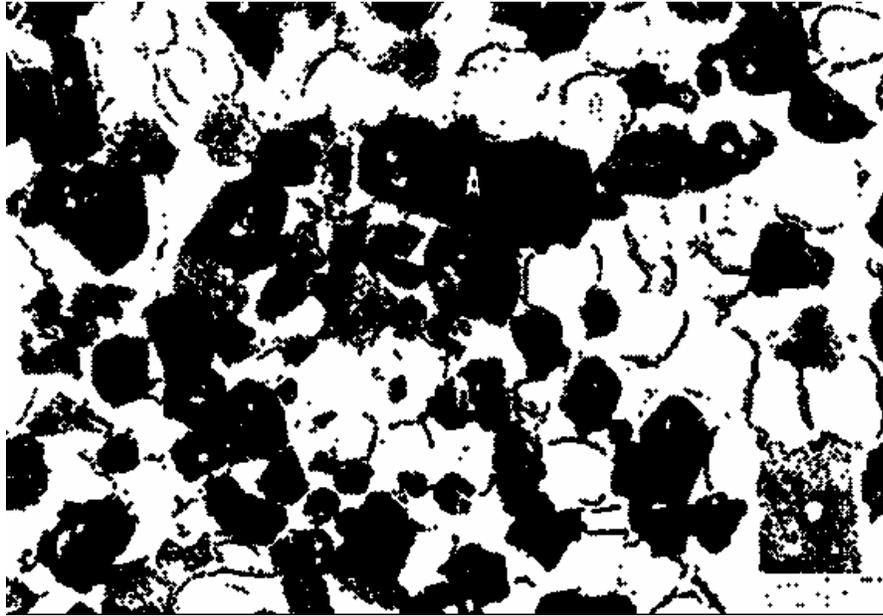


Fig. 20) Imagem binarizada pelo padrão C_3S

A figura 20 traz a imagem binarizada pelo algoritmo de padrões pré definidos usando como limiar a região representada pelo cristal A, Alita.

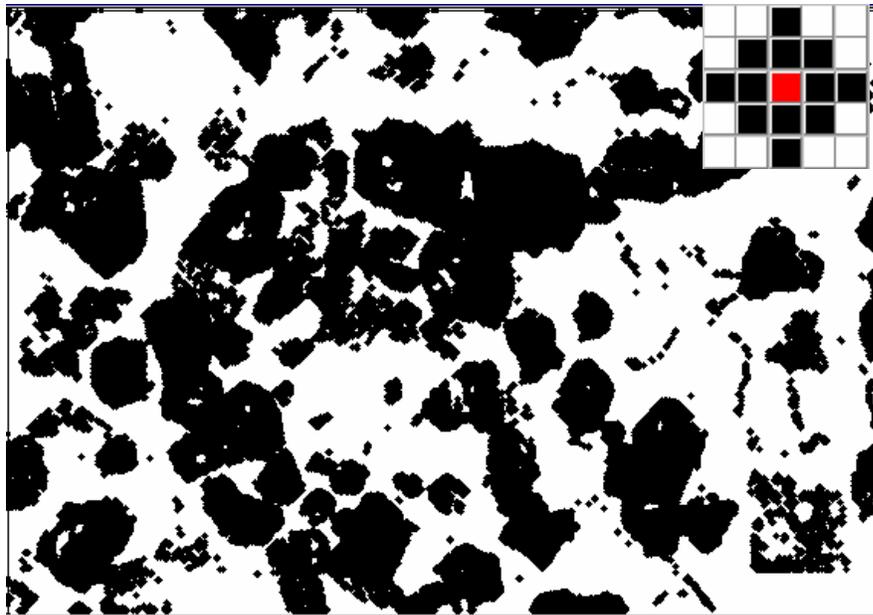


Fig. 21) Abertura da imagem com elemento estruturante 5x5 translação em (2,2)

A figura 21 traz a imagem da figura 20 após uma abertura com elemento estruturante de 5x5 usando o conceito demonstrado no tópico relacionado ao tratamento de bordas.

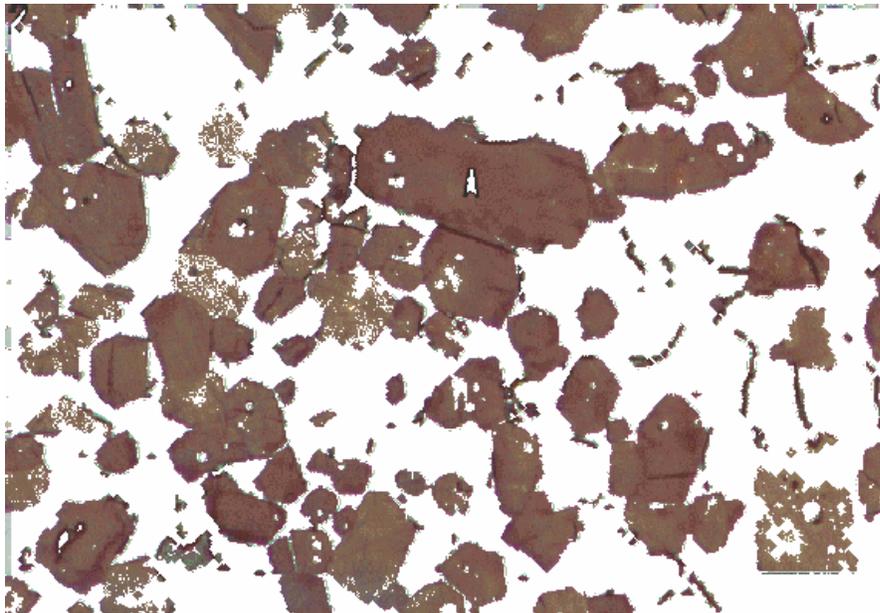


Fig. 22) Imagem original subtraída da imagem processada

A figura 22 traz a imagem representada pela figura 19 subtraída da figura 21, Observa-se que a detecção do cristal de C_3S , obteve um resultado visual satisfatório tendo em vista que o elemento estruturante não foi otimizado para este tipo de análise.

Com uma melhora no elemento estruturante o resultado final pode ser melhorado com a eliminação dos ruídos que ocorrem na imagem (cristais menores que 5x5 pixels).

3.5.2 IDENTIFICAÇÃO DO C₂S

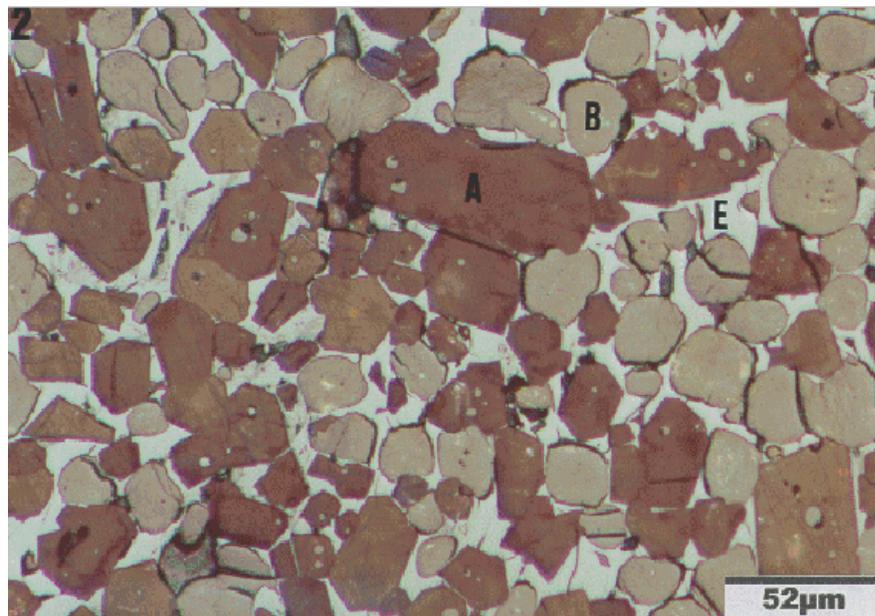


Fig. 23) Imagem original. Padrões carregados A) C₃S B) C₂S E) base (contraste)

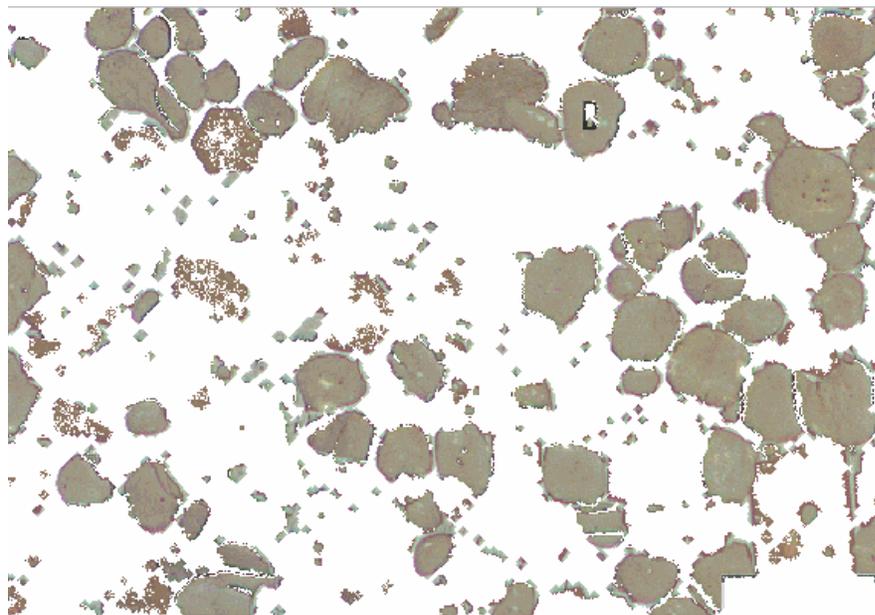


Fig. 24) imagem original subtraída da imagem processada

As figuras 23 e 24 apresentam a identificação do C_2S , seguindo a mesma seqüência de passos para detecção do C_3S . Alterando apenas o padrão carregado para a binarização.

3.6 QUANTIFICAÇÃO DOS CRISTAIS

A partir das figuras 22 e 24, é possível saber a porcentagem de ocorrência de cada cristal na amostra. Usando um algoritmo para contagem dos pixels brancos e não brancos se consegue a uma aproximação dos valores de ocorrência de cada um deles.



Fig. 25) tela de contagem do cristal C_3S

4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo apresenta as conclusões finais e sugere alguns trabalhos futuros que podem ser realizados. Este trabalho teve o enfoque na morfologia matemática, entretanto, outras ferramentas podem ser utilizadas para resolver o mesmo problema.

4.1 CONCLUSÕES

Se observa, nos resultados obtidos a grande dificuldade de se isolar os cristais analisados, devido a proximidade das bordas dos mesmos, bem como a variação de cores dentro do próprio cristal ser muito grande. Uma solução para isto seria uma melhor preparação do material para análise. Durante todo projeto houve uma grande dificuldade de obtenção de amostras para testes com o sistema, fato este se deve a competição entre as indústrias cimenteiras e a necessidade de pagamento para levantamento de informações em outros órgãos como a ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) e ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

Mas apesar de todas as dificuldades, foi possível uma separação razoável dos cristais, o que permitiu a verificação da porcentagem aproximada da ocorrência de cada um deles. Este tipo de parâmetro nos permite verificar a qualidade do processo de queima do clínquer. Amostras com um baixo nível de C_3S , apresentam deficiências com relação as áreas do forno cuja as temperaturas estão entre $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperaturas que permitem a fusão dos cristais de C_2S com a CaO livre. Um alto nível de C_3S , representa um consumo alto de combustíveis no forno e um grande gasto de energia nos moinhos de cimento pois o clínquer fica mais duro. Cimentos de clínqueres com alto teor de C_2S , apresentam baixa resistência mecânica nas idades mais novas (antes de 28 dias). A proporção ideal no clínquer, de C_3S é na faixa de 45 – 60 %, e de C_2S é de 30 – 10 % , ficando o sua soma no patamar de 75%, ou seja, o aumento de um implica na diminuição do outro.**[Div 00]**.

As amostras analisadas obtiveram em média 45% de C_3S e 32% de C_2S . resultado este próximo dos valores obtidos pelo método tradicional de análise. O que indica apesar dos problemas apresentados, o sistema cumpre satisfatoriamente as funções implementadas.

4.2 TRABALHOS FUTUROS

O sistema foi desenvolvido em Delphi, o que ocasiona uma demora maior no processamento dos algoritmos, sendo necessária à conversão do código fonte para outra linguagem mais apropriada com C ou C++.

Com o uso da segmentação por regiões é possível uma melhora significativa na detecção dos cristais analisados. Pois a segmentação permite uma melhor correção de descontinuidades na imagem, como buracos e linhas que não pertençam ao elemento estudado, e a obtenção de resultados mais completos. Estes resultados podem ser por exemplo: Tamanho e formato dos cristais, detecção das zonas de formação e tipo de cristalização da amostra. O que permite uma melhor análise do processo de produção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [And 93] Andrade, M. C. **Imageamento Microscópico**. Dissertação de mestrado, Departamento de Ciência da Computação – UFMG, 1993.
- [Ban 94] Banon, G., Barrera, J. **Bases da Morfologia Matemática para a Análise de Imagens Binárias**. IX Escola de Computação, Recife, 1994.
- [Cent 99] Centurione, Sergio Luiz, **A mineralização do clínquer portland e seus benefícios tecnológicos**. Tese (Doutorado) São Paulo, 1999.
- [Div 00] Diversos. **Manual de Treinamento. Controle de Qualidade da Fabricação de Cimento**. Cimento Tupi s/a, 2000.
- [Fac 03] Facon, J. **Morfologia Matemática**. www.ppgia.pucpr.br/~facon/IndexPrincipalBrMorfologia.htm acessado em 10 Mar. 2003
- [Fac 96] Facon, J. **Morfologia Matemática: Teoria e Exemplos**. Curitiba, Brasil, 1996
- [Gon 92] Gonzalez, R. C., Woods, R. E. **Digital Image Processing. Reading**. Addison-Wesley, 1992.
- [Gon 00] Gonzalez, R. C., Woods, R. E. **Processamento Digital de Imagens**. EDG 2000.
- [Hir 97] Hirata Jr. R. **Segmentação de imagens por morfologia matemática**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Matemática e Estatística - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- [Par 97] Parker, J. R. **Algorithms for Image Processing and Computer Vision**. New York, John Wiley & Sons, 1997.
- [Met 93] Metzker, W. B., Diniz, D. P., Centurione S. L. **Importância da Microscopia para Aperfeiçoamento do Clínquer na Fabricação de Cimento 35ª REIBRAC - Controle da Qualidade do Concreto - Processos Construtivos em Obras de Concreto Brasília, jun/93**
- [Rus 95] Russ, J. C. **The image processing handbook**. 2 ed., Boca Raton, CRC Press, 1995.

ANEXO A – COMPONENTES DO CLÍNQUER DE CIMENTO PORTLAND

1. SILICATO TRICÁLCICO – C3S

- Desenvolve um grande calor de hidratação;
- Desenvolve elevadas resistências a curto prazo
- Libera grande quantidade de cal (Hidróxido de cal – Cal livre)

1. Cimentos ricos em C3S (45 a 60%) desprendem grande quantidade de calor, em consequência para peças de concreto de grandes massas, onde existe uma pequena relação superfície x volume, essas massas aquecem demasiadamente e, submetidas a um choque térmico, podem contrair-se dando lugar a fissurações ou agretamentos por causa de uma retração térmica.

2. O elevado calor de hidratação na massa de concreto provoca uma auto secagem, se não se evitar com uma cura adequada, ocorrerá a retração hidráulica que somada a retração térmica, intensifica a fissuração.

3. Com relação a grande quantidade de cal liberada na hidratação do C3S, esta cal é sensível ao ataque e dissolução por águas ácidas, puras e carbônicas agressivas. Por este motivo, a durabilidade (resistência química), dos concretos com cimentos ricos em C3S, que acham-se submergidos em tais águas é menor que os mesmos concretos com cimentos que contenham menos C3S.

4. A grande quantidade de cal liberada na hidratação do C3S, confere aos concretos um alto grau de basicidade (pH 12 a 13) ou alcalinidade. Assim com uma grande

reserva alcalina, circunstancia-se favoravelmente a evitar ou retardar a corrosão das armaduras, no caso de concretos armados ou protendidos. Em consequência é aconselhável o uso de cimentos com alto conteúdo de C3S.

5. Como é fácil perceber pelo exposto anteriormente, existe uma espécie de incompatibilidade entre:

FATORES POSITIVOS	Resistências elevadas a curto prazo Ação protetora das armaduras
FATORES NEGATIVOS	Retração; fissuração e agretamentos Pouca durabilidade frente a águas agressivas

CONCLUSÃO:

A escolha do cimento em relação ao teor de C3S, será fundamentada segundo os seguintes parâmetros:

ALTO TEOR	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prefabricados ▪ Protendidos ▪ Clima frio
MEDIO TEOR	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Obras ordinarias (comuns)
BAIXO TEOR	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grandes massas de concreto <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pouca retração ▪ Baixo Calor de hidratação

2. SILICATO BICÁLCICO – C2S

- Desenvolve muito menos calor de hidratação que o C3S.
- Dá menores resistências a prazos mais curtos, e quase tão elevadas quanto as proporcionadas pelo C3S, a prazos mais longos.

1. É o constituinte principal dos cimentos portland chamados normais ou lentos.

2. Nos cimentos portland, os silicatos C2S e C3S, se podem considerar como valores “conjugados”, cuja soma é constante (» 70%), de tal maneira que o aumento de um implica na correspondente diminuição do outro.

3. Assim, se compreende que as indicações e contradições do emprego dos cimentos ricos em C3S e pobres em C2S ou vice-versa, se entrecruzam, deduzindo-se delas as correspondentes conseqüências práticas de cada caso.

3. ALUMINATO TRICÁLCICO – C3A

- Possui uma grande velocidade de hidratação, portanto, desenvolve muito calor de hidratação ($\gg 207$ cal/g.)
- Colabora moderadamente com as resistências, e num prazo muito curto.
- Não libera cal em sua hidratação, ao contrário, pode fixar uma certa proporção de cal livre, liberado pelos silicatos.
- É o constituinte causador da pega rápida do cimento, exige, portanto, a adição de gesso para retardar, regular e normalizar a pega.
- É muito sensível aos sulfatos em geral (terrenos sulfatados) com os quais reaciona dando lugar a produtos expansivos: Ettringita, Sal de Candlot – “o bacilo do cimento” – os quais provocam a destruição do concreto – perda de durabilidade.
- Em resumo, os cimentos ricos em C3A, não se deve empregar em obras, estruturas ou elementos de concreto que irão em contato com meios agressivos. Devendo-se então utilizar cimentos com baixo teor de C3A, chamados RESISTENTES A SULFATOS (RS).

4. FERRO ALUMINATO TETRACÁLCICO – C4AF

- Possui lenta velocidade de hidratação.
- Desenvolve pouco calor de hidratação.
- Contribui com pequena parcela para as resistências mecânicas a qualquer idade.

- Possui boa resistência química, frente ao ataque químicos de sulfatos.
- Os cimentos ricos em C4AF e, simultaneamente em C2S, são aptos em épocas ou climas muito quentes, ou para executar obras com grandes massas de concreto, tais com barragens, etc.

5. CAL LIVRE (CaO)

ORIGEM:

Provém da reação incompleta entre a calcário e os argilos-minerais, durante a queima no forno, ou devido à decomposição do C3S e C2S mais CaO. Este último fenômeno acontece quanto o teor de C3S é extremamente alto, o resfriamento no forno é muito lento.

EFEITOS PRINCIPAIS:

- Hidratação da cal livre é lenta e está acompanhada de um aumento expressivo de volume.
- O aumento de volume gera tensões de tração que podem produzir fissuras consideráveis.
- Teores alto de cal livre, distribuídos uniformemente em partículas bem finas, é menos grave que teores baixos concentrados em poucos pontos de tamanhos grandes.