



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

HUGO RICARDO MORAES

**MICROSCOPIA PETROGRÁFICA: APLICAÇÃO DA TÉCNICA PARA
INVESTIGAÇÃO DA POROSIDADE DO CONCRETO**

MACEIÓ/AL

2021

HUGO RICARDO MORAES

**MICROSCOPIA PETROGRÁFICA: APLICAÇÃO DA TÉCNICA PARA
INVESTIGAÇÃO DA POROSIDADE DO CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Correia Gomes
Coorientador: Prof. MSc. Alexandre Nascimento Lima

MACEIÓ/AL

2021

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale CRB-4/661

M827m Moraes, Hugo Ricardo.

Microscopia petrográfica : aplicação da técnica para investigação da porosidade do concreto / Hugo Ricardo Moraes. – 2021.

81 f. : il.

Orientador: Paulo Cesar Correia Gomes.

Coorientador: Alexandre Nascimento Lima

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia, Maceió, 2021.

Bibliografia: f. 69-72

Apêndices: f. 73-81.

1. Microscopia petrográfica. 2. Processamento e análise digital de imagens.
3. Concreto celular - Porosidade. I. Título.

CDU: 624.01



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

HUGO RICARDO MORAES

**MICROSCOPIA PETROGRÁFICA: APLICAÇÃO DA TÉCNICA PARA
INVESTIGAÇÃO DA POROSIDADE DO CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Aprovado em 02 de fevereiro de 2021.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Cesar Correia Gomes

Universidade Federal de Alagoas
Orientador

Prof. MSc. Alexandre Nascimento de Lima

Universidade Federal de Alagoas
Coorientador

Prof. Dra. Karoline Alves de Melo Moraes

Universidade Federal de Alagoas

Prof. Dr. Flávio Barboza de Lima

Universidade Federal de Alagoas

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela oportunidade de realizar esta pesquisa, dando-me muita força, perseverança e saúde para alcançar o tão almejado sonho de tornar-me um engenheiro civil;

Ao Prof. Dr. Paulo Cesar Correia Gomes, pela dedicação, orientação e confiança depositada em mim para a realização deste trabalho;

Ao Prof. MSc. Alexandre Nascimento Lima, pelo apoio e assistência fornecida ao longo da realização desta pesquisa, bem como pelos ensinamentos sobre o concreto celular;

Ao meu pai, Iveraldo Moraes, e à minha mãe, Maria Rubilene Ricardo Moraes, por serem minha fonte de sustentação, aqueles que sempre colocaram meus sonhos em primeiro lugar e que me apoiaram constantemente em todas as minhas decisões;

À minha filha, Amelie Sabino Moraes, que inundou meu coração de amor quando veio ao mundo;

À minha esposa, Andressa Rodrigues Sabino Ricardo Moraes, fonte de ensinamentos, admiração e apoio em literalmente todas as etapas da minha graduação, estando sempre ao meu lado nos momentos de aflição e de felicidade;

Aos meus irmãos, Hudson Ricardo Moraes e Mayara Ricardo Moraes, aos quais tive a oportunidade de compartilhar a minha história desde o início da vida;

Ao meu grande amigo de trabalho e da vida, Rafael Pereira de Lima, por toda a atenção e suporte disponibilizado na reta final da minha graduação;

Ao amigo João Felipe Barbosa Baía, a quem tive a oportunidade de conhecer e admirar desde o início, aprendendo e compartilhando momentos de desafios e de alegrias;

Aos amigos, Bruno Conde e Gabriel Wanderley, pela parceria, apoio e amizade durante os últimos anos do curso.

A todos os funcionários e colegas de trabalho desta instituição de ensino, pela assistência prestada durante a minha graduação;

Aos meus professores, por todos os conselhos, ajuda e paciência durante meu processo de aprendizagem.

RESUMO

A Microscopia Petrográfica é uma das técnicas ópticas utilizadas para o estudo da porosidade de materiais que fora desenvolvida originalmente para a identificação de minerais formadores de rochas e vários trabalhos revelam seu potencial para a análise da porosidade do concreto. Tal técnica ainda é pouco explorada no Brasil, porém bastante desenvolvida ao redor do mundo. Este Trabalho tem como objetivo analisar o potencial da técnica de Microscopia Petrográfica na determinação da porosidade de amostras de concreto. O concreto com diferentes teor de ar incorporado fora utilizado para verificar a potencialidade do método, logo fora produzido um concreto celular com diferentes percentuais de espuma: 0%, 20%, 30% e 40%. As lâminas Petrográficas de seção delgada estudadas foram retiradas de amostras de concreto celular impregnadas com um corante epóxi azul, posteriormente fotografadas com o auxílio de um microscópio Petrográfico e em seguida analisadas através de um software de Processamento e Análise Digital de Imagens (PADI). Esta pesquisa revelou que a impregnação ocorre somente em macroporos e mesoporos, não penetrando na microporosidade e ultramicroporosidade da argamassa, porém com o auxílio das técnicas PADI é possível contornar o problema e realizar a detecção dos poros com eficiência. A qualidade da distribuição dos poros, homogeneidade ou heterogeneidade, é analisada através do estudo da coeficiente de variação. O trabalho demonstra a eficácia da técnica para a investigação da porosidade do concreto.

Palavras-chave: Microscopia Petrográfica. PADI. Porosidade. Concreto Celular.

ABSTRACT

Petrographic microscopy is one of the optical techniques used to study the porosity of materials that is processed for the identification of rock-forming minerals and several studies reveal its potential for the analysis of concrete. Such a technique is still little explored in Brazil, but quite developed around the world. The purpose of the present work is to verify the use of petrographic microscopy techniques in determining the porosity of cellular concrete samples. Concretes were analyzed with different percentages of air content to verify the potential of the method. Thus, it was produced a cellular concrete with different foam percentages: 0%, 20%, 30% and 40%. The thin section slides taken from cellular concrete samples are impregnated with a blue epoxy dye, subsequently photographed with the usage of a petrographic microscope and then analyzed using an Image Processing and Analysis and Digital (PADI) software. It was revealed by this study that the impregnation occurs only in macropores and mesopores, which it does not penetrate in the microporosity and ultramicroporosity of the paste. However, with help of PADI techniques it is possible to it is possible to work around the problem and perform pore detection efficiently. The quality of the pore distribution, homogeneity or heterogeneity, is analyzed by studying the coefficient of variation. This work demonstrates the effectiveness of the technique for investigating the porosity of concrete.

Keywords: Petrographic Microscopy. PADI. Porosity. Cellular Concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Relação entre a resistência à compressão e a relação a/c do concreto	17
Figura 02 – (A) Relação entre a Resistência à compressão X Relação a/c do concreto e (B) Resistência à compressão X Consumo de cimento	18
Figura 03 – Esquema representativo de poros com diferentes tamanhos e formas: (a) e (b) poros fechados; (c) poro aberto; (d) e (e) poros abertos e interconectados; (f) rugosidade da superfície.....	20
Figura 04 – Princípio da porosimetria por intrusão de mercúrio.....	22
Figura 05 – Diagrama esquemático dos componentes mais importantes do microscópio eletrônico de transmissão	23
Figura 06 – Esquema do princípio de funcionamento do MET	24
Figura 07 – Desenho esquemático do princípio de funcionamento do Microscópio Eletrônico de Varredura	25
Figura 08 – Volume de interação: A) localização dos sinais emitidos pela amostra; B) relação da voltagem para elementos leves e pesados	25
Figura 09 – Esquema de etapas para aquisição de imagens tridimensionais no tomógrafo de Raios-X	26
Figura 10 – Resultados de uma análise simples de porosidade por micro-CT e microscopia óptica em mármore.....	27
Figura 12 – Malha do caminho da digitalização das imagens.....	30
Figura 13 – Dois exemplos de preparação de superfície de concreto adequada para contagem de pontos vazios de ar de acordo com ASTM C457 / C457M-16	30
Figura 14 – Esquema do reticulado de 66 imagens de uma lâmina petrográfica de seção delgada de concreto celular com um teor de espuma de 40% e o nicol cruzado	31
Figura 15 – Espectro eletromagnético	32
Figura 16 – (A) Representação gráfica de uma onda eletromagnética com as direções de vibração representadas pelos vetores de campo elétrico e magnético. (B) Trem de onda mostrando a distância equivalente a um comprimento de onda (λ) e amplitude (A).....	32
Figura 17 – Experimento do disco de Newton	33
Figura 18 – Esquema do prisma de Nicol	34
Figura 19 – Superfície de onda em meio anisotrópico	35
Figura 20 – Princípio de Huygens aplicado à reflexão.....	36
Figura 21 – O princípio de Huygens aplicado à reflexão.....	36
Figura 22 – Esquema representativo das técnicas de microscopia de luz refletida (A) e transmitida (B)	37
Figura 23 – Principais componentes de um microscópio	37
Figura 24 – Representação esquemática das propriedades de uma objetiva, em que AA = abertura angular e dt = distância de trabalho ou frontal, para as objetivas de aumentos lineares de 45, 10 e 3,2 vezes.....	38
Figura 25 – Esquemas de sistemas de observação microscópica	39
Figura 26 – Esquema da associação entre a platina graduada e os retículos da ocular, sendo essas graduações utilizadas como linhas de referência na medida de ângulos entre unidades lineares	40
Figura 27 – Representação do paralelismo dos retículos da ocular com as direções de vibração do polarizador (P-P) e do analisador (A – A). As direções de vibração não necessariamente serão sempre coincidentes como as representadas na figura	

.....	41
Figura 28 – A função do analisador no sistema óptico de um microscópio, em que P – P = direção de vibração do polarizador, A – A = direção de vibração do analisador e r1 e r2 = os dois raios que surgem devido ao fenômeno da dupla refração. A obtenção do raio resultante da soma vetorial dos raios r1 e r2 segundo a direção do analisador e a consequente transmissão da luz através desse analisador.....	42
Figura 29 – Uma imagem digital e sua representação numérica.....	44
Figura 30 – Componentes de iluminância I e refletância R de uma imagem.....	45
Figura 31 – Histograma com valores mais baixos de cinza (A) e sua imagem correspondente (B)	47
Figura 32 – Histograma com valores no limite superior da escala de cinza (A) e sua imagem correspondente (B)	48
Figura 33 – Histograma com valores médios da escala de cinza (A) e sua imagem correspondente (B)	48
Figura 34 – Histograma com valores ao longo de toda a escala de cinza (A) e sua imagem correspondente (B)	49
Figura 35 – Histograma com valores bimodal (A) e sua imagem correspondente (B)	49
Figura 36 – Processo de inundação no método Watershed.....	50
Figura 12 – Seção de corte para confecção das lâminas delgadas.....	56
Figura 13 – Lâminas delgadas de concreto celular, percentuais de espuma: 0%, 20%, 30% e 40%	57
Figura 14 – Segmentação da lâmina delgada em seções e sequência de leitura	57
Figura 40 – (A) Imagem sem nicol cruzado em formato TFT; (B) Imagem com nicol cruzado em formato TFT e (C) imagem com nicol cruzado em formato JPEG	58
Figura 41 – (A) Imagem sem nicol cruzado em formato TFT; (B) Imagem em escala de tons de cinza; (C) imagem binarizada e (D) Aplicação da função de segmentação e contagem Watershed.....	59
Figura 42 – Exemplo de aplicação do método OTSU Brigh a imagem da (B) da figura 17....	59
Figura 43 – Imagem tridimensional gerada através da função Surface Plot do Software OPTICAM OPTHD 3.7	60
Figura 44 – Exemplo do processo de binarização e identificação da porosidade	61
Figura 45 - Gráfico de Resistência à compressão (Mpa) X Porosidade média (%), aos 28 e 56 dias	65
Figura 46 - Gráfico de Resistência à tração axial (Mpa) X Porosidade média (%), aos 28 e 56 dias	65
Figura 47 - Gráfico de Retração (mm/m) X Porosidade média (%), aos 28 e 56 dias	66
Figura 48 – Malha com 66 imagens da lâmina 0% com nicol cruzado.....	74
Figura 49 – Malha com 66 imagens da lâmina 0%, após a conversão para escala de cinza	74
Figura 50 – Malha com 66 imagens da lâmina 0%, após o processo de binarização.....	75
Figura 51 – Malha com 66 imagens da lâmina 0%, após o processo de segmentação Watershed	75
Figura 52 – Malha com 66 imagens da lâmina 20% com nicol cruzado.....	76
Figura 53 – Malha com 66 imagens da lâmina 20%, após a conversão para escala de cinza ..	76
Figura 54 – Malha com 66 imagens da lâmina 20%, após o processo de binarização.....	77
Figura 55 – Malha com 66 imagens da lâmina 20%, após o processo de segmentação Watershed	77
Figura 56 – Malha com 66 imagens da lâmina 30% com nicol cruzado.....	78
Figura 57 – Malha com 66 imagens da lâmina 30%, após a conversão para escala de cinza ..	78
Figura 58 – Malha com 66 imagens da lâmina 30%, após o processo de binarização.....	79

Figura 59 – Malha com 66 imagens da lâmina 30%, após o processo de segmentação Watershed	79
Figura 60 – Malha com 66 imagens da lâmina 40% com nicol cruzado.....	80
Figura 61 – Malha com 66 imagens da lâmina 40%, após a conversão para escala de cinza..	80
Figura 62 – Malha com 66 imagens da lâmina 40%, após o processo de binarização.....	81
Figura 63 – Malha com 66 imagens da lâmina 40%, após o processo de segmentação Watershed	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 - Caracterização do Cimento Portland.....	53
Quadro 02 - Dosagem do concreto celular para produção de 1,0 m ³	54
Quadro 03 - Dados do concreto no estado fresco.....	55
Quadro 04 - Dados de resistência dos corpos de prova prismáticos aos 28 e 56 dias.....	55
Quadro 05 - Valores da porosidade obtidos da análise das 66 imagens da lâmina de 0%	61
Quadro 06 - Valores da porosidade obtidos da análise das 66 imagens da lâmina de 20%	62
Quadro 07 - Valores da porosidade obtidos da análise das 66 imagens da lâmina de 30%	62
Quadro 08 - Valores da porosidade obtidos da análise das 66 imagens da lâmina de 40%	63
Quadro 09 – Utilização do coeficiente de variação (CV) para análise da homogeneidade ou heterogeneidade da distribuição dos poros	63
Quadro 10- Relação entre a porosidade, resistência a compressão e tração axial aos 28 e 56 dias	64
Quadro 11 – Relação entre a porosidade e a retração aos 28 e 56 dias	65
Quadro 12 – Relação entre o percentual de espuma e o seu peso específico	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Relação entre os tipos e tamanhos de poros	19
Tabela 02 – Técnicas de visualização do microscópio Petrográfico.....	43
Tabela 03 - Lista de normas utilizadas para caracterizar a areia	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFM – Microscópio de Força Atômica;
ASTM – American Society for Testing and Materials
LEMA – Laboratório de Estrutura e Materiais
MECOEFICON – Materiais Ecoeficientes para Construção Civil
MEV – Microscopia Eletrônica por Varredura
MET – Microscópio Eletrônico de Transmissão
NBR – Norma Brasileira Regulamentadora
PADI – Processamento e Análise Digital de Imagens
TCC – Trabalho de Conclusão de Curso
UFAL – Universidade Federal de Alagoas
UFPE - Universidade Federal de Pernambuco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA	15
1.2 JUSTIFICATIVA	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 POROSIDADE DO CONCRETO.....	17
2.1.1 CLASSIFICAÇÃO DOS POROS.....	19
2.1.2 TÉCNICAS APLICADAS PARA DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE DO CONCRETO	20
2.2 TÉCNICAS PETROGRÁFICAS PARA DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE	29
2.2.1 CONCEITOS BÁSICOS DA LUZ	31
2.2.2 TIPOS DE ARRANJOS PARA ANÁLISES EM MICROSCÓPIO PETROGRÁFICO	36
2.2.3 IMAGENS DIGITAIS.....	43
2.2.4 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DIGITAL DE IMAGENS (PADI)	46
2.2.5 HISTOGRAMA E ESCALA DE CINZA	46
2.2.6 SEGMENTAÇÃO	49
2.3 COEFICIENTE DE VARIAÇÃO COMO MEDIDA DA HOMEONEIDADE OU HETEROGENEIDADE DA DISTRIBUIÇÃO DE POROS	51
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	52
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO CELULAR	52
3.1.1 DOSAGEM CONCRETO CELULAR.....	54
3.1.1 PRODUÇÃO DO CONCRETO CELULAR E CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	54
3.1.2 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NOS ESTADOS FRESCO E ENDURECIDO.....	55
3.2 CONFECÇÃO E DETALHE DAS LÂMINAS PETROGRÁFICAS	56
3.3 AS POSIÇÕES DO POLARIZADOR DO MICROSCÓPIO E A OBTENÇÃO DAS IMAGENS DIGITAIS	57
3.4 PROCESSO DE SEGMENTAÇÃO DAS IMAGENS PARA DETECÇÃO DA POROSIDADE	58
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	60
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
REFERÊNCIAS	69
APÊNDICES	73
APÊNDICE A – IMAGENS DA LÂMINA PETROGRÁFICA DO CORPO DE PROVA COM 0% DE VOLUME DE ESPUMA.....	74
APÊNDICE B – IMAGENS DA LÂMINA PETROGRÁFICA DO CORPO DE PROVA COM 20% DE VOLUME DE ESPUMA.....	76
APÊNDICE C – IMAGENS DA LÂMINA PETROGRÁFICA DO CORPO DE PROVA COM 30% DE VOLUME DE ESPUMA.....	78
APÊNDICE D – IMAGENS DA LÂMINA PETROGRÁFICA DO CORPO DE PROVA	

COM 40% DE VOLUME DE ESPUMA.80

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais utilizado, ao longo do tempo, na construção civil. A vasta utilização do material está relacionada, entre outros benefícios, à sua excelente versatilidade, durabilidade e resistência à água. A porosidade possui influência direta nas propriedades finais do concreto, positiva ou negativamente. Esta característica ainda é vista como um fator limitante para o desempenho do concreto, visto que, acima de determinada porcentagem, reduz largamente sua resistência mecânica e durabilidade.

De acordo com Neville e Brooks (2013), o concreto obedece à lei clássica da Ciência dos Materiais, que estabelece uma relação inversamente proporcional entre resistência e porosidade. Tal relação é relevante, apesar de ser um material complexo para realizar a estimativa exata da resistência através de uma correlação com sua porosidade, pois a porosidade torna-se um fator limitante da resistência, como mencionado na Lei de Abrams (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo Duarte (2017), existem várias técnicas analíticas que são utilizadas na investigação quantitativa e qualitativa da porosidade, muitas delas invasivas e que podem danificar o material, falseando os resultados, dentre elas podem ser citadas o picnômetro de mercúrio, injeção por gás e a norma NBR 9778 (ABNT, 2009), que são de baixo custo, porém possuem limitações quanto às informações que podem fornecer sobre a amostra, geralmente fornecendo apenas o valor da porosidade.

Outras técnicas possuem custos elevados, que podem inviabilizar a realização de estudos como, por exemplo, as técnicas de imagem, tais como a Microtomografia computadorizada de raios X (micro-CT) e a microscopia eletrônica de varredura (MEV). Uma exceção quanto ao custo é a Microscopia Petrográfica. Ressalta-se também que as técnicas de imagem possuem um maior grau de sofisticação, pois contêm a capacidade de fornecer outras grandezas e características relacionadas ao material, tais como: formato do poro, distribuição, diâmetro, perímetro, área, índice de vazios e o próprio valor da porosidade, conforme Lopes et al (2012). A escolha dos métodos dependerá dos objetivos particulares do problema que está sendo investigado e, em parte, de fatores econômicos. A consideração cuidadosa das técnicas disponíveis permitirá que a seleção mais econômica seja feita e atinja os objetivos desejados.

Como o concreto é uma rocha artificial que possui resistência similar às das rochas naturais, este trabalho realiza uma adaptação de uma técnica utilizada na geologia para contornar o problema da determinação da porosidade do concreto. Tal técnica é a análise

microscópica de rochas ou microscopia petrográfica que, em 1840, fora realizada pelo inglês Henry Clifton Sorby, considerado o pai da Petrografia microscópica (MACHADO; NARDY, 2016).

O microscópio petrográfico foi concebido originalmente para a identificação e estudo de minerais formadores de rocha, mas os primeiros pesquisadores logo estabeleceram a importância do microscópio petrográfico para a análise de materiais e minerais artificiais, como os produtos de origem cimentícia, através da análise de lâminas delgadas de uma rocha, solo ou mineral, extremamente finas, com espessura da ordem de 0,03 mm. A técnica consiste na obtenção de imagens de alta qualidade para a análise das grandezas associadas às mesmas, através de técnicas de Processamento e Análise Digital de Imagens (PADI).

As técnicas voltadas para a análise de dados multidimensionais, adquiridos por diversos tipos de sensores, recebem o nome de PADI, ou seja, é a manipulação de uma imagem por algoritmos computacionais que fornecem informações relevantes sobre as mesmas, de modo que a entrada e a saída do processamento são imagens e fornecem informações sobre a amostra em estudo.

Os procedimentos PADI possuem a capacidade de melhorar o aspecto visual de certas feições estruturais do material para o analista humano e oferece outros subsídios para a sua interpretação, inclusive gerando produtos que possam ser posteriormente submetidos a outros processamentos, além de permitirem analisar uma cena nas várias regiões do espectro eletromagnético e possibilitar a integração de vários tipos de dados.

Para analisar a homogeneidade e heterogeneidade da distribuição dos poros na amostra através dos dados gerados pelas técnicas PADI, algumas ferramentas estatísticas podem ser utilizadas. O coeficiente de variação é uma destas técnicas empregada para estimar a precisão de experimentos e representa o desvio-padrão expresso como porcentagem da média. Tal determinação da distribuição dos poros está diretamente relacionada às características de desempenho do concreto, tais como: resistência ao fogo, resistência à compressão, acústica e térmica.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) tem como objetivo geral analisar o potencial da aplicação da técnica de Microscopia Petrográfica na determinação da porosidade de amostras de concreto com diferentes teores de ar incorporado.

Os objetivos específicos são:

- Analisar a homogeneidade e heterogeneidade das distribuições dos poros;

- Demonstrar a correlação entre resistência, retração e porosidade do concreto.

1.2 JUSTIFICATIVA

A porosidade influencia diretamente nas propriedades finais de um material, positiva ou negativamente, a depender da utilização. Neville e Brooks (2013) dizem que o concreto obedece à lei clássica da Ciência dos Materiais, que estabelece uma relação inversamente proporcional entre resistência e porosidade. A porosidade ainda é vista como um fator limitante para o desempenho do concreto, visto que, acima de determinada porcentagem, reduz largamente sua resistência mecânica e durabilidade.

De acordo com Callister (2007), a análise microscópica é uma ferramenta extremamente útil no estudo e na caracterização dos materiais. Ainda de acordo com esse autor, importantes aplicações das análises microestruturais são: assegurar que as associações entre as propriedades e a estrutura sejam compreendidas da forma correta e prever as propriedades dos materiais, uma vez que as relações tenham sido estabelecidas.

Para concretos leves, com baixo peso específico, como o concreto celular estudado em pesquisas do grupo de Materiais Ecoeficientes para Construção Civil (MECOEFICON), encontram-se dificuldades para determinar a sua porosidade pelo ensaio convencional da NBR 9778 (ABNT, 2009), pois o material tende a flutuar, não permitindo a leitura da balança hidrostática e conseqüentemente a determinação da porosidade, falseando resultados para concretos com uma densidade abaixo de 1000 kg/m^3 .

O presente trabalho realiza uma adaptação da técnica utilizada em Microscopia Petrográfica e Processamento e Análise Digital de Imagens (PADI), amplamente estudada em outros países, porém com pouco material para pesquisa e consulta bibliográfica no Brasil, para determinar a porosidade de amostras de corpos de provas prismáticos de concreto celular, se constituindo como mais uma ferramenta para os estudos das características da porosidade deste material.

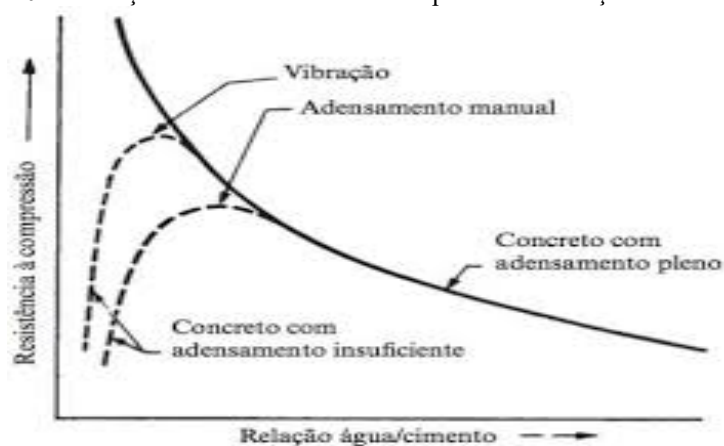
2 REFERENCIAL TEÓRICO

O concreto é uma mistura proporcional (C:A:P) de cimento, agregado miúdo e agregado graúdo, uma relação água cimento (a/c) e um volume de ar aprisionado. O volume total de vazios no concreto é dado por uma soma do volume de vazios de água de gel, água capilar, poros capilares vazios e ar (NEVILLE; BROOKS, 2013). Os defeitos da microestrutura do concreto são, possivelmente, os mais importantes e os mais estudados, variando de milímetros (mm) a tamanhos menores que nanômetros (nm).

2.1 POROSIDADE DO CONCRETO

A estrutura do concreto é definida por sua matriz sólida e porosa. Para concretos convencionais não é possível expulsar todo o ar incorporado. Supondo que o concreto está em estado de adensamento total, a resistência é inversamente proporcional à relação água/cimento para determinada idade e condição de temperatura normal. Tal relação é denominada Lei de Abrams, como mostra a figura 01, que apresenta os efeitos do adensamento parcial na resistência do concreto (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Figura 01 – Relação entre a resistência à compressão e a relação a/c do concreto



Fonte: Neville e Brooks (2013)

A Lei de Abrams é um caso especial para uma regra geral formulada empiricamente por René Feret, em 1896 (NEVILLE; BROOKS, 2013). Feret sugeriu uma parábola como o melhor modelo matemático de correlação entre resistência à compressão e volume de água mais ar do concreto, conforme Equação (01):

$$f_c = K \left[\frac{v_e}{v_e + v_w + ar} \right]^2 \quad (\text{eq. 01})$$

Onde:

f_c = resistência do concreto;

V_c , V_w e ar = são respectivamente, os volumes absolutos de cimento, água e ar aprisionado;

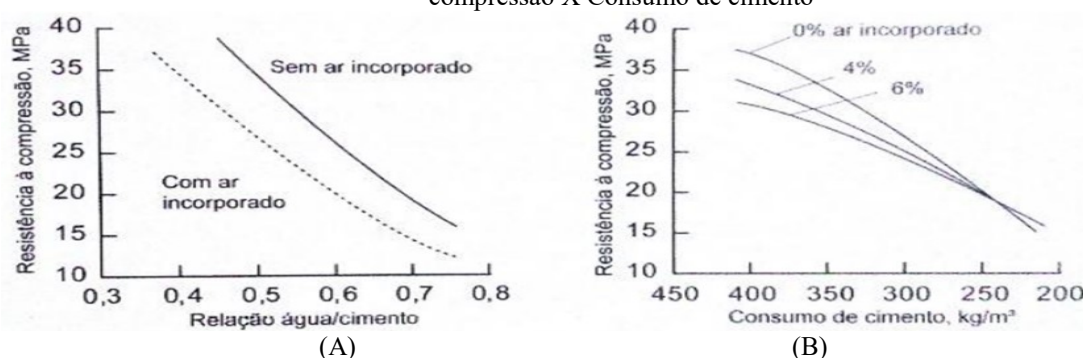
K = constante.

É necessário recordar que em um determinado grau de hidratação, a relação água/cimento determina a porosidade da pasta de cimento. Assim, a equação acima considera a influência do volume total de vazios na resistência, ou seja, poros de gel, poros capilares e ar aprisionado para concretos convencionais (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Ainda que o concreto seja um material intrincado demais para realizar a previsão da resistência por uma correlação exata entre resistência e porosidade, essa relação deve ser considerada, pois a porosidade no concreto torna-se um limitador da resistência, uma vez que a resistência do concreto é influenciada principalmente pelo volume de vazios contido nele, como mencionado na Lei de Abrams (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Ainda de acordo com esses autores, embora a relação a/c, na maior parte dos casos, determine a porosidade da matriz da pasta de cimento hidratada, quando vazios de ar são incorporados no concreto, pelo uso de aditivos químicos ou pelo adensamento inadequado, a porosidade da mesma forma aumenta e a resistência do concreto diminui. Tal fato pode estar correlacionado ao nível geral da resistência do concreto, dado que o nível de perda não depende somente da relação a/c, mas também do consumo de cimento, conforme pode ser visto na Figura 02 (A) e (B).

Figura 02 – (A) Relação entre a Resistência à compressão X Relação a/c do concreto e (B) Resistência à compressão X Consumo de cimento



Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

Observou-se que o nível de perda de resistência como resultado do ar incorporado não depende apenas da relação água/ cimento da mistura de concreto, como mostra a Figura 02 (A), mas também do consumo de cimento. A influência da relação água/cimento e do

consumo de cimento na resposta do concreto às tensões aplicadas pode ser explicada a partir de dois efeitos opostos causados pela incorporação de ar ao concreto. Aumentando-se a porosidade da matriz, o ar incorporado terá um efeito adverso sobre a resistência dos materiais (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.1.1 CLASSIFICAÇÃO DOS POROS

A porosidade é uma característica física empregada para mensurar a quantidade de espaços vazios (poros) de um material (BERRYMAN; WANG, 2000). Matematicamente, a porosidade mede a correlação entre o volume de poros e o total da amostra, sendo uma propriedade adimensional e expressa em formato decimal ou de porcentagem (MEDEIROS, 2015), conforme Equação 02:

$$\emptyset_t = \frac{V_p}{V_t} \quad (\text{eq. 02})$$

Onde:

\emptyset_t = Porosidade total;

V_p = volume de poros;

V_t = volume total da amostra, que compreende o volume poroso e o volume ocupado pelas partículas.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a malha porosa de um material é classificada de forma genérica segundo o tamanho dos poros, conforme tabela 01. Ainda de acordo com Mehta e Monteiro (2014), os macroporos possuem influência na resistência e permeabilidade do concreto, enquanto que os microporos influenciam essencialmente na fluência e retração.

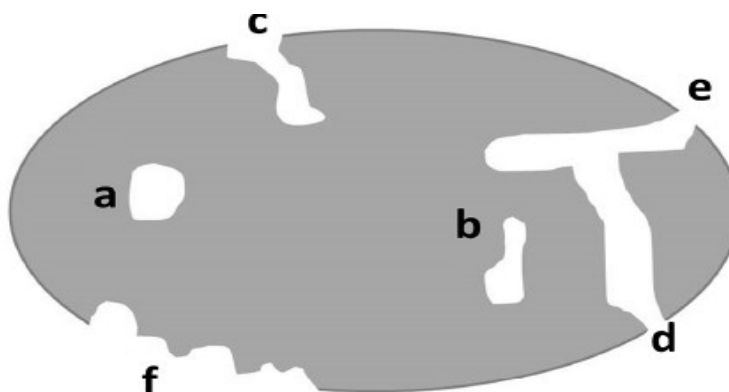
Tabela 01 – Relação entre os tipos e tamanhos de poros

Tipos de poros	Tamanho dos poros
Macroporos	> 50 nm
Mesoporos	2 – 50 nm
Microporos	0,6 – 2 nm
Ultramicroporos	< 0,6 nm

Fonte: Mehta e Monteiro (1993)

De acordo com Santos et al (2016), também classificam-se os poros como: abertos ou fechados, externos e internos, e quanto ao seu formato. A Figura 03 mostra um esquema representativo dos tipos diferentes tipos de poros: abertos, fechados, interconectados e rugosidade de superfície.

Figura 03 – Esquema representativo de poros com diferentes tamanhos e formas: (a) e (b) poros fechados; (c) poro aberto; (d) e (e) poros abertos e interconectados; (f) rugosidade da superfície



Fonte: Santos et al (2016)

Outras classificações empregadas aos tipos de poros presentes na pasta de cimento que compõe o concreto são:

- **Gel ou interlamelar no C – S – H:** São vazios pequenos na ordem de 2 a 25 Å, que não atuam na resistência da pasta. Contudo, as pontes de hidrogênio da ligação química de C – S – H podem reter água nesses pequenos espaços vazios e sua retirada, sobre certas condições, pode favorecer a retração por secagem e fluência (MEHTA; MONTEIRO, 2014).
- **Capilares:** Caracterizam o espaço não preenchido pelos constituintes sólidos da hidratação do cimento, de modo que estes influenciam pouco na resistência da pasta de cimento. A porosidade capilar da pasta depende tanto da relação água/cimento da mistura quanto do grau de hidratação (NEVILLE; BROOKS, 2013).
- **Poros de ar incorporado:** Possuem um formato esférico, com dimensões superiores aos poros capilares. Em razão de suas grandes dimensões, aumentam a permeabilidade e reduzem bastante a resistência do concreto.

2.1.2 TÉCNICAS APLICADAS PARA DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE DO CONCRETO

Devido à variação das dimensões dos poros, bem como às suas formas irregulares, as técnicas utilizadas no seu estudo variam desde operações de equipamentos simples até outras mais sofisticadas. Existem vários métodos para a determinação da porosidade, tais como: determinação do índice de vazios (porosidade) segundo a NBR 9778 (ABNT, 2009), porosimetria de mercúrio (intrusão de mercúrio), microscopia eletrônica de transmissão, microscopia eletrônica de varredura (MEV), microtomografia de raio-X (micro-CT) e

microscopia óptica petrográfica. Outras técnicas são a adsorção de gás e a microscopia de varredura por sonda.

No item 2.2 será dada uma ênfase na descrição da adaptação realizada à técnica de microscopia óptica petrográfica, utilizada nesta pesquisa.

- DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS (POROSIDADE) SEGUNDO A NBR 9778:2005:

O ensaio convencional para determinação do índice de vazios (porosidade) do concreto é regido pela NBR 9778 (ABNT, 2005) e baseia-se no princípio de Arquimedes, que é feito em corpos-de-prova e é realizado em três etapas. A primeira etapa é a secagem da amostra, em que se coloca em estufa a uma temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ por um período de 72 horas, determina-se e registra-se a massa da amostra seca (M_s). Em alguns casos, a amostra permanece na estufa até que duas pesagens consecutivas, no intervalo de 24 horas, não possuam uma diferença de massa maior que 5%.

Na segunda etapa ocorre a saturação da amostra, em que é posta e mantida submersa em água por 72 horas a uma temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$. Em seguida, coloca-se a mesma em um recipiente cheio de água na temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$. Logo após, leva-se a amostra progressivamente à ebulição, que deve começar entre 15 e 30 minutos. A ebulição é mantida por 5 horas, observando-se o nível da água e repondo o volume evaporado na mesma temperatura, deixa-se a água esfriar naturalmente até $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$.

E por fim, na terceira etapa, determina-se e registra-se a massa da amostra imersa em água na balança hidrostática (M_i), seca-se a amostra com pano úmido, determina-se e registra-se a sua massa (M_{sat}). Após a obtenção dos dados calcula-se o índice de vazios (I_v), conforme equação 03:

$$I_v = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100 \quad (\text{eq. 03})$$

Onde:

I_v = Índice de vazios;

M_s = Massa da amostra seca em estufa;

M_i = Massa da amostra imersa;

M_{sat} = Massa da amostra saturada e seca com pano úmido.

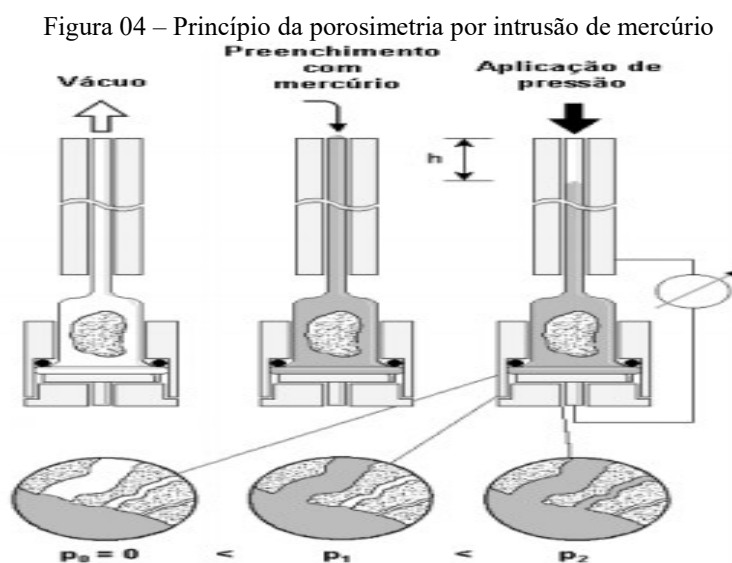
O princípio de Arquimedes diz que a intensidade dessa força, conhecida como força empuxo, é igual ao peso da porção de fluido deslocada pelo corpo (BARBOSA; BREITSCHAFT, 2006). Obtendo a densidade real, pelo método de Arquimedes, e conhecendo a densidade teórica, a diferença entre as respectivas densidades fornecerá a porosidade do material. Outro fato importante sobre o método dispõe sobre o comportamento da tensão superficial da água, fazendo com que tal método torne-se inadequado para a determinação de microporos (SILVA, 2015).

Um fato importante na execução deste ensaio é a utilização da imersão em água e posterior fervura da amostra por um período de 5h. Tal procedimento tem por finalidade reduzir o valor da tensão superficial da água e desta forma facilitar a percolação da mesma na amostra.

- POROSIMETRIA DE MERCÚRIO (INTRUSÃO DE MERCÚRIO):

Define a porosidade de um material por meio da aplicação de pressões em uma amostra submersa em mercúrio. A pressão imposta para inserir o mercúrio dentro da amostra é inversamente proporcional à dimensão dos poros.

O mercúrio age como um fluido não molhante, relativamente à maior parte das substâncias. Em função disso, não penetra naturalmente em pequenas fissuras ou poros destes materiais, contanto que se aplique uma pressão sobre ele. Confinando uma amostra porosa em um recipiente dotado de um capilar e realizando o vácuo e logo após, preenchendo com mercúrio o conjunto capilar e recipiente, aumenta-se a pressão sobre o mercúrio que penetrará nos poros da amostra, diminuindo seu nível no capilar (CASTRO, 2006), conforme figura 04.



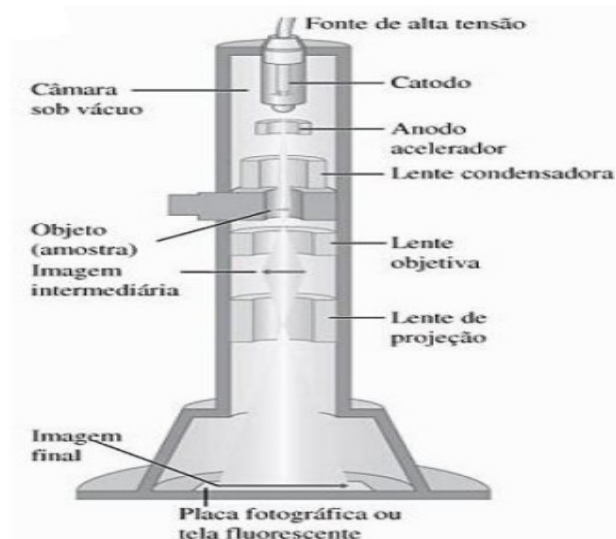
De acordo com Núñez (2007), a molhabilidade é definida como a predisposição de um fluido aderir ou espalhar-se preferencialmente sobre uma superfície sólida em presença de outra fase imiscível. A fase que “molha” é intitulada fase molhante e a outra fase é denominada de fase não molhante.

- MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE TRANSMISSÃO (MET):

Segundo Mannheim (2002), um feixe de elétrons acelerado por alta tensão penetra e interage com uma amostra transparente. A primeira aplicabilidade da microscopia eletrônica de transmissão no estudo dos materiais foi a observação de defeitos cristalinos não observáveis por microscopia óptica ou por microscopia eletrônica de varredura, tais como discordâncias e defeitos de empilhamento (PADILHA, 2000).

O MET equipara-se conceitualmente ao microscópio fotônico convencional, operado em transmissão, mesmo que com disposição totalmente diferente, como mostra a figura 05. Evidencia-se com igualdade uma fonte de radiação, sistema de lentes, facilidades para manipulação da amostra e dispositivos para visualização e registro da imagem, sistemas de vácuo e fontes de tensão.

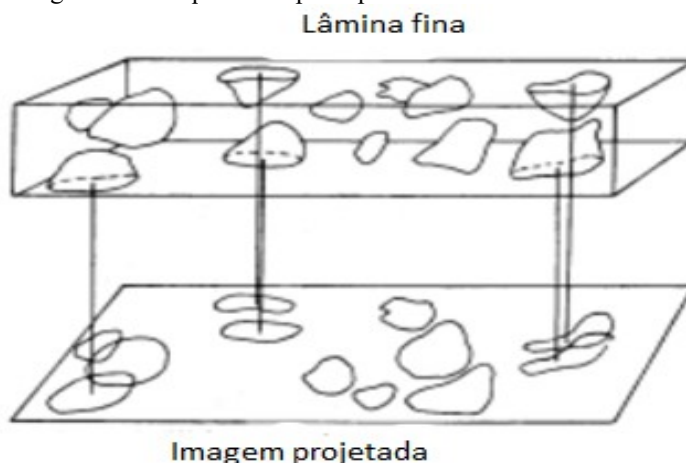
Figura 05 – Diagrama esquemático dos componentes mais importantes do microscópio eletrônico de transmissão



Fonte: Young e Freedman (2009)

A imagem observada pelo método MET é a projeção de uma determinada espessura do material analisado, existindo uma diferença com relação ao observado numa superfície. A figura 06 exibe a projeção de uma lâmina fina como observada no microscópio de transmissão.

Figura 06 – Esquema do princípio de funcionamento do MET



Fonte: Padilha (2002)

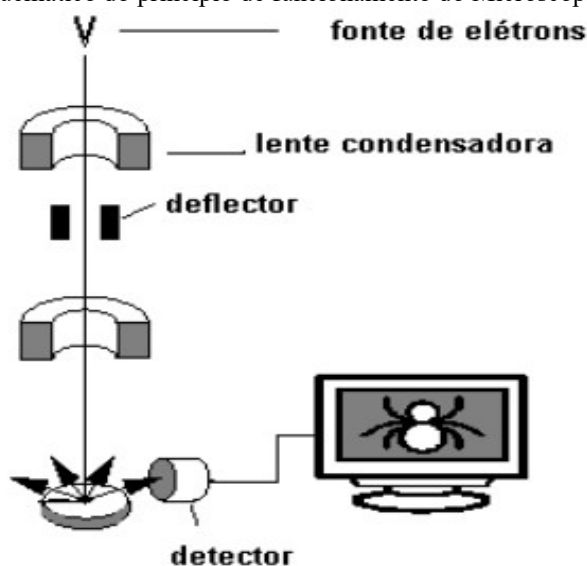
Como pode ser observado na projeção da figura, ocorre uma projeção das linhas, áreas e volumes de interesse, podendo ocorrer superposição. A diferença nas imagens formadas com a técnica de microscopia MET possui diversas origens, tais como: diferença de espessura, diferença de densidade ou de coeficiente de absorção de elétrons (contraste de massa), difração e campos elásticos de tensão (PADILHA, 2000).

- MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA:

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um equipamento multifuncional para a observação das características microestruturais de materiais sólidos. O MEV emprega um feixe de elétrons ao invés de fótons que são utilizados nos microscópios ópticos convencionais, possibilitando solucionar as dificuldades relacionadas com a fonte de luz branca (DEDAVID; GOMES et al, 2007).

Seu princípio de funcionamento baseia-se na utilização de um feixe de elétrons com um diâmetro pequeno para examinar a superfície da amostra, varrendo a mesma sequencialmente em linhas sucessivas e transmitindo o sinal do detector a uma tela catódica com sua varredura devidamente sincronizada com a do feixe incidente. O feixe pode ser orientado a varrer a superfície da amostra em uma malha retangular, por um sistema de bobinas de deflexão. O sinal de imagem é proveniente do feixe incidente com a superfície da amostra, sendo em seguida recolhido através do detector e na sequência modula o brilho do monitor, possibilitando a observação, conforme figura 07.

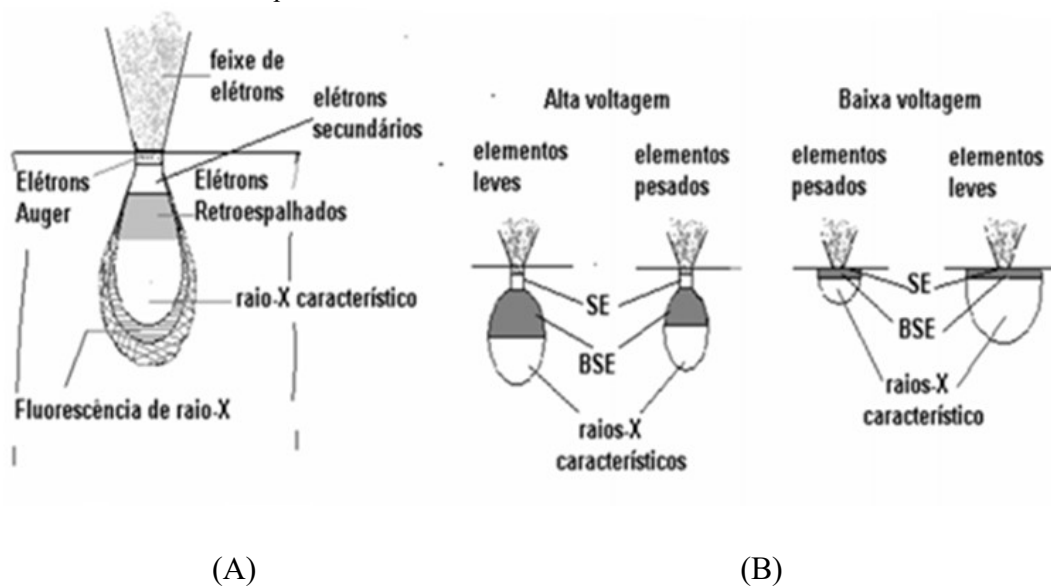
Figura 07 – Desenho esquemático do princípio de funcionamento do Microscópio Eletrônico de Varredura



Fonte: Adaptado de Dedavid, Gomes e Machado (2007)

No momento em que o feixe primário incide na amostra, parte dos elétrons difunde-se e compõe um volume de interação cuja forma se sujeita principalmente da tensão de aceleração e do número atômico da amostra, como mostra a figura 08. Os elétrons e as ondas eletromagnéticas produzidos são empregados para formar as imagens ou para executar análises físico-químicas.

Figura 08 – Volume de interação: A) localização dos sinais emitidos pela amostra; B) relação da voltagem para elementos leves e pesados



(A)

(B)

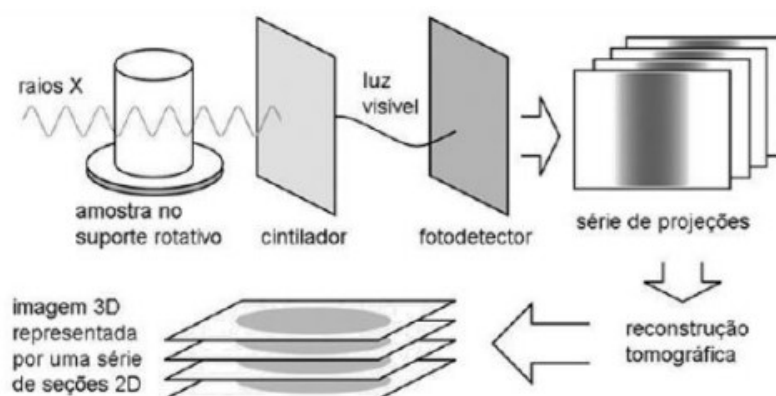
Fonte: Dedavid, Gomes e Machado (2007)

As partículas e os raios resultantes da influência do feixe eletrônico com a amostra devem retornar à superfície da amostra para serem detectados. A altura máxima de detecção ou profundidade depende da energia com que estas partículas ou raios atingem o detector ou são capturadas. A formação da imagem a partir do sinal observado na varredura eletrônica da face do objeto analisado pode apresentar características distintas, uma vez que a imagem provém da amplificação de um sinal obtido de uma interação entre o feixe eletrônico e a amostra. Sinais distintos podem ser emitidos pela amostra. Dentre os quais, os mais utilizados para a obtenção da imagem destaca-se os originários dos elétrons secundários e/ou dos elétrons retro espalhados (DEDAVID; GOMES et al, 2007).

- MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS – X (MICRO-CT):

Reis Neto et al (2011) explicam que trata-se de uma técnica não destrutiva de alta resolução que possibilita a visualização tridimensional de amostras, além da quantificação de área e volume. As imagens tridimensionais formadas pelo tomógrafo são construídas a partir de uma sequência de projeções bidimensionais utilizando radiografias de raios X. As radiografias da amostra em estudo são registradas em vários ângulos de rotação, realizando um giro de 360° sobre a amostra, com a utilização de técnicas de PADI e são produzidas representações gráficas em 3D da amostra, conforme figura 09.

Figura 09 – Esquema de etapas para aquisição de imagens tridimensionais no tomógrafo de Raios-X

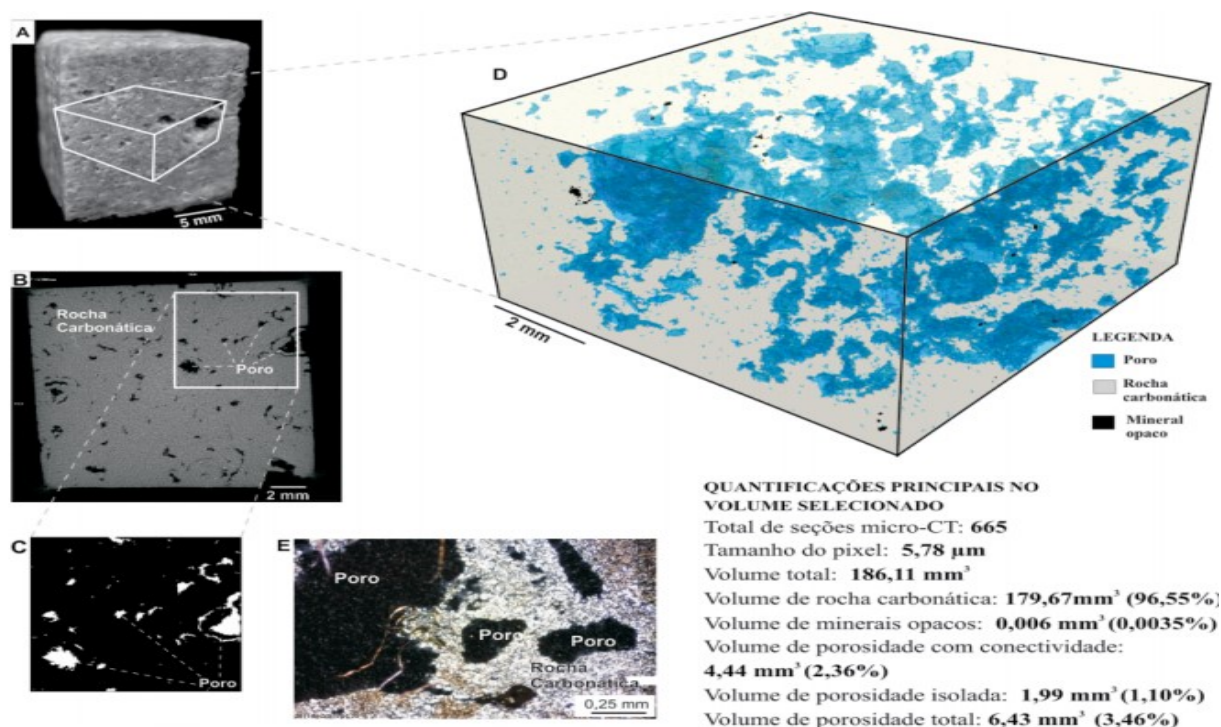


Fonte: Palombo (2017)

A figura 10 mostra o exemplo de utilização da técnica de microtomografia de raio – X para determinação da porosidade em uma amostra de rocha carbonática homogênea (mármore), de cor cinza, granulação muito fina, seccionada em formato aproximadamente

cúbico, selecionada para demonstrar uma análise simplificada da porosidade (REIS NETO et al., 2011).

Figura 10 – Resultados de uma análise simples de porosidade por micro-CT e microscopia óptica em mármore



Fonte: Reis Neto et al (2011)

Os resultados de uma análise simples de porosidade por micro-CT e microscopia óptica em mármore pode ser descrita como: A figura 10 (A) mostra a fotografia da rocha carbonática com demarcação do volume para tratamento de dados; na figura 10 (B) exibe a seção microtomográfica com indicação da área selecionada; a figura 10 (C) exibe a área demarcada na figura 10 (B), onde os poros foram binarizados (selecionados em branco); a figura 10 (D) apresenta o modelo tridimensional gerado após a separação dos poros, rocha e minerais opacos; e por fim a figura 10 (E) é uma fotomicrografia mostrando a ocorrência dos poros entre minerais carbonáticos. Obs: a escala do modelo tridimensional é inferida com base na escala da seção microtomográfica.

- MICROSCOPIA ÓPTICA PETROGRAFICA:

A microscopia de luz fotônica ou visível é a mais tradicional e a mais importante para o estudo da microestrutura dos materiais. O microscópio fotônico moderno pode oferecer um aumento de 1000 vezes, uma resolução na ordem dos microns, além da facilidade de operação e custo modesto comparado a outros equipamentos e técnicas. O objetivo da microscopia é a

aquisição de imagens de um objeto que permite a observação de detalhes não revelados ao olho nu humano. O mesmo possui vantagens e limitações diferentes com relação a outros métodos de determinação da porosidade, tornando-os mais complementares do que competitivos (MANNHEIMER, 2002).

As amostras podem ser examinadas por uma gama de técnicas e, de acordo com sua natureza, tanto para microscópios de luz transmitida adequada a objetos transparentes, como em luz refletida apropriada a objetos opacos. Segundo Machado e Nardy (2016), o microscópio óptico petrográfico possui as duas técnicas de visualização, trata-se de uma área da geologia que estuda a classificação e descrição sistemática das rochas ígneas, metamórficas e sedimentares, através da utilização do microscópio em seções delgadas do material.

Vários métodos foram desenvolvidos para avaliar o conteúdo de vazios de ar do concreto endurecido. As técnicas de medição microscópica direta, como as descritas na norma americana ASTM C457/C457M-16 (ASTM, 2016), são as mais precisas e, dadas as amostras apropriadas, provavelmente fornecem as informações mais úteis. French (1991) considerou o método da norma americana, citada acima, muito mais confiável do que as outras opções.

A norma apresenta três metodologias microscópicas para a determinação do teor de ar incorporado, a frequência de vazios, o fator de espaçamento e a superfície específica em concreto endurecido. Segundo a norma ASTM C457/457M-16 (2016) são:

Procedimento A – Método linear transversal: Este procedimento consiste na determinação da composição volumétrica do concreto pela soma das distâncias percorridas em um determinado componente ao longo de uma série de linhas regularmente espaçadas em um ou mais planos que cruzam o corpo de prova.

Procedimento B – Método da contagem de pontos modificado: Este procedimento consiste na determinação da composição volumétrica do concreto pela observação da frequência com quais áreas de um dado componente coincidem com um sistema de grade regular de pontos nos quais paradas são feitas para permitir as determinações de composição. Esses pontos podem estar em um ou mais planos que cruzam o espécime.

Procedimento C – Método de contraste aprimorado: Este procedimento consiste na determinação da composição volumétrica do concreto pela soma das distâncias medidas em imagens digitais de uma superfície de concreto preparada usando uma série de linhas regularmente espaçadas em uma ou mais imagens digitais obtidas de um ou mais planos que cruzam o corpo de prova. A amostra é preparada exatamente como é descrito para os

procedimentos A e B com as etapas adicionais de escurecimento da superfície da amostra e preenchimento dos vazios de ar com um pó branco de tamanho de partícula fina.

Os procedimentos detalhados na ASTM C457/C457-M (2016) são adotados internacionalmente. As amostras são preparadas a partir da amostra de concreto cortando uma fatia com uma serra diamantada e, em seguida, desbastando progressivamente uma face da fatia até uma superfície lisa e plana. A superfície da amostra finamente retificada é então digitalizada sob um microscópio óptico petrográfico de boa qualidade. As observações coletadas durante essas varreduras são então usadas para calcular vários parâmetros do sistema de vazio de ar, incluindo conteúdo de ar total e fator de espaçamento.

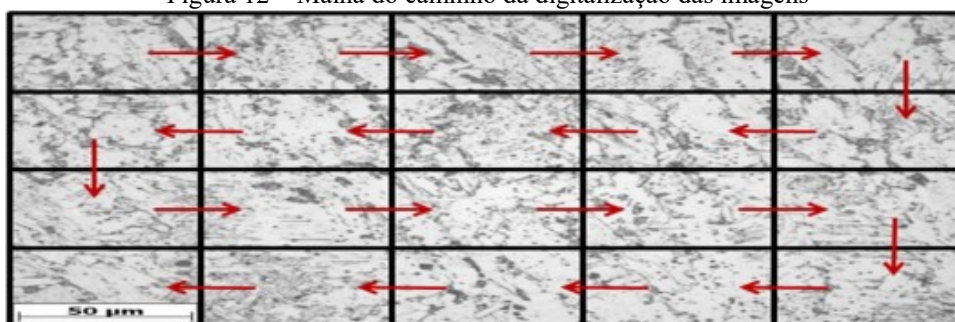
Outras técnicas que também são utilizadas para a determinação da porosidade são a adsorção de gás e a microscopia de varredura por sonda. A primeira é utilizada na análise de materiais em pó com a utilização de um microscópio eletrônico e possui a capacidade de detectar a presença de poros e imperfeições na superfície (LOWELL; SHIELDS, 1991). A segunda possui duas outras técnicas: o Microscópio de varredura de tunelamento (STM) e o Microscópio de força atômica (AFM) e não se baseiam na interação da matéria com elétrons ou a luz, mas na utilização de uma pequena sonda dotada de uma ponta muito aguda que se desloca na superfície da amostra muito próxima da mesma, interagindo com as moléculas da superfície e os átomos, dando-se um destaque às interações de Van der Waals (SOUZA, 2014).

2.2 TÉCNICAS PETROGRÁFICAS PARA DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE

Não existe uma norma brasileira equivalente à americana para a determinação da porosidade do concreto através de técnicas de microscopia óptica, porém tal técnica descrita acima é inspirada nas técnicas petrográficas utilizadas para determinar a porosidade de rochas e, considerando as semelhanças entre os elementos, este trabalho apresenta uma adaptação da técnica geológica para determinar a porosidade do concreto estudado nesta pesquisa.

Domingues (2011) descreve uma técnica bastante consolidada na área de geologia para a determinação da porosidade de rochas. A técnica consiste na identificação dos tipos de poros presentes nas lâminas: se possui macroporos, mesoporos, microporos e ultramicroporos. A digitalização das lâminas petrográficas consiste na captura de imagens em mosaicos, como mostra a figura 12. Após essa etapa é realizado o processamento da imagem com o objetivo de obter a porosidade total da lâmina.

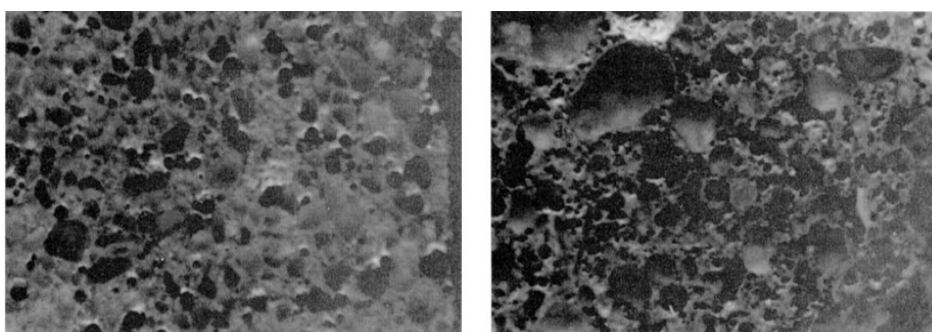
Figura 12 – Malha do caminho da digitalização das imagens



Fonte: Domingues (2011)

De acordo com John, Poole e Sims (1998), a preparação adequada da superfície da amostra é crítica. Os detalhes precisos para lixar com abrasivos progressivamente mais finos são fornecidos na norma, mas o produto acabado deve mostrar excelente reflexão de uma fonte de luz remota em ângulo baixo, estar livre de arranhões e manter bordas afiadas ao redor dos vazios de ar. A Figura 13 ilustra uma superfície adequada quando vista através do microscópio:

Figura 13 – Dois exemplos de preparação de superfície de concreto adequada para contagem de pontos vazios de ar de acordo com ASTM C457 / C457M-16

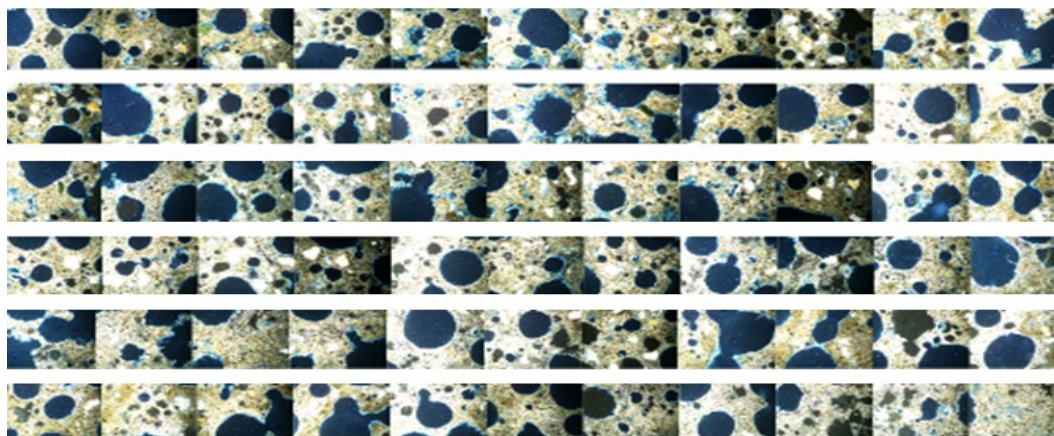


Fonte: John, Poole e Sims (1998)

A consolidação pode ser necessária para concretos mais fracos para evitar a desagregação de partículas agregadas (criando falsos vazios) e/ou o desmoronamento de bordas vazias, mas o procedimento de consolidação não deve ser de um tipo que preencherá os vazios. A norma ASTM C457/C457-M (2016) descreve uma técnica de impregnação com cera fundida. Já a técnica utilizada em geologia utiliza uma resina epóxi associada a um corante geralmente de cor azul.

Tomando a lâmina com espessura unitária, a porosidade pode ser calculada através de uma razão de áreas. A análise das imagens produzidas com base em fotografias digitais das lâminas sob as lentes do microscópio é capaz de ser realizada visualmente ou com o auxílio de métodos de tratamento e processamento de imagens, conforme figura 14.

Figura 14 – Esquema do reticulado de 66 imagens de uma lâmina petrográfica de seção delgada de concreto celular com um teor de espuma de 40% e o nicol cruzado



Fonte: O autor (2020)

Tal método é utilizado para fornecer uma estimativa da porosidade em duas dimensões, a partir da observação visual de lâminas delgadas ou de técnicas de PADI aplicada a imagens digitais. No caso da utilização direta das lâminas, a porosidade é estimada por contagem direta sob um microscópio óptico ou microscópio eletrônico de varredura. Um corante de alto contraste é injetado na amostra antes da retirada das lâminas. Pode-se utilizar um reticulado adequado ao tamanho do grão e a escala da lente para a estimativa de áreas (CASTELO, 2013).

Seja A_p a área de poros e A a área total da imagem, a porosidade ϕ pode ser expressa de acordo com a equação 04:

$$\phi = 1 - \frac{A_p}{A} \quad (\text{eq. 04})$$

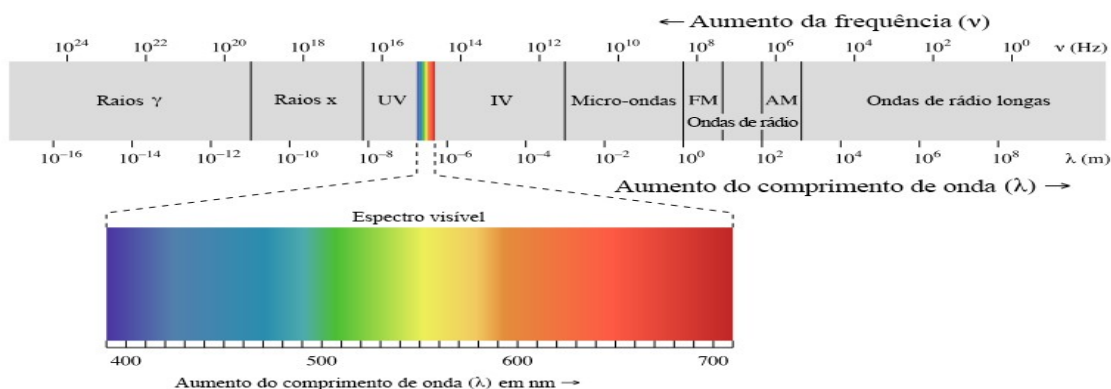
A qualidade do método petrográfico para o cálculo da porosidade depende da experiência do operador humano ou do método PADI utilizado.

2.2.1 CONCEITOS BÁSICOS DA LUZ

Para compreender o princípio de funcionamento do microscópio petrográfico faz-se necessário conhecer os conceitos básicos da Física Óptica. De acordo com Machado e Nardy (2016), as propriedades ópticas de um mineral ou rocha estão relacionadas à maneira como a luz se propaga em seu interior, trazendo informações importantes sobre as características e natureza do mineral.

A luz é a parte visível do espectro eletromagnético, que compreende desde raios γ até as ondas longas de rádio, como mostra a figura 15.

Figura 15 – Espectro eletromagnético

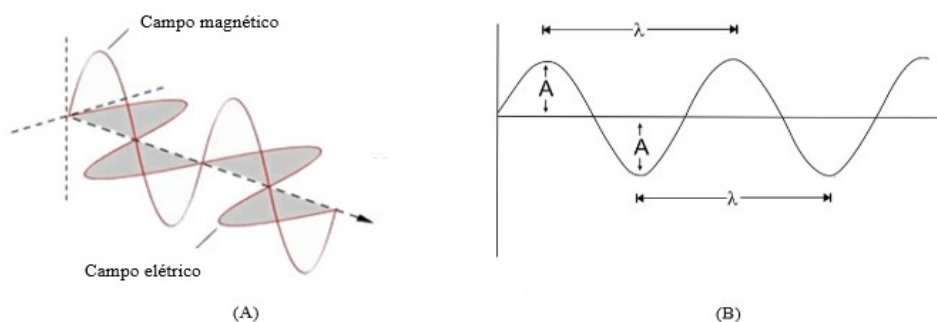


Fonte: Khan Academy, (2020)

A luz apresenta uma natureza dual, tanto corpuscular quanto ondulatória. Para Machado e Nardy (2016), a maioria dos fenômenos ópticos observados na investigação de substâncias amorfas ou cristalinas ao microscópio pode ser explicada adequadamente com o modelo de onda em movimento harmônico contínuo.

No modelo de onda, segundo Raith, Raase, Reinhardt (2014), os raios de luz se propagam como ondas eletromagnéticas. Os vetores elétrico e magnético são perpendiculares entre si e a direção de propagação. O comportamento óptico da luz ao atravessar substâncias amorfas ou cristalinas é essencialmente controlado pela interação do vetor elétrico com o campo elétrico dos íons. As interações com o campo magnético são irrelevantes para os estudos. Cada onda de luz pode, assim, ser descrita como uma oscilação harmônica [$y = A \sin(x)$]. Ver figura 16:

Figura 16 – (A) Representação gráfica de uma onda eletromagnética com as direções de vibração representadas pelos vetores de campo elétrico e magnético. (B) Trem de onda mostrando a distância equivalente a um comprimento de onda (λ) e amplitude (A)

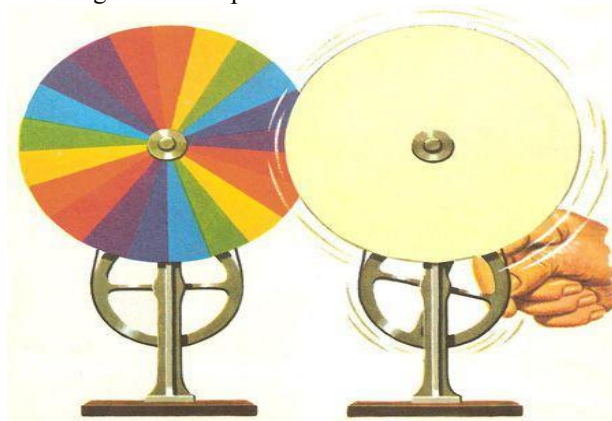


Fonte: O autor (2020)

Para qualificar o comportamento da luz através de meios cristalinos é necessário definir alguns conceitos essenciais que, de acordo com Raith, Raase, Reinhardt (2014) são:

Cor: O olho humano é capaz de ver somente uma pequena parte do amplo espectro de radiação eletromagnética, especificamente a parte do espectro compreendida entre 400 e 800 nm (luz visível), sendo 1 nm (nanômetros) = 10 Å (Ångstrom). Os limites do comprimento de onda (λ) das diferentes cores do espectro da luz visível são arbitrados, uma vez que as cores passam umas para as outras gradualmente, conforme demonstra o conhecido experimento do disco de Newton, conforme figura 17.

Figura 17 – Experimento do disco de Newton



Fonte: Brainly, (2020)

O experimento do disco serve para demonstrar o princípio de funcionamento da retina humana, em que chegam simultaneamente ondas com comprimento de 3.900 Å a 7.700 Å, e o cérebro as interpreta como luz branca. Em outras palavras, a luz branca é a “mistura” de todas as cores do espectro de luz visível.

Os efeitos de cor são gerados quando a composição espectral da luz branca original muda ao atravessar os minerais na lâmina petrográfica, seja pela limitação de certos comprimentos de onda (absorção), seja pela dispersão da luz branca como resultado da difração ou da refração da luz nas bordas dos grãos, em inclusões ou superfícies irregulares (RAITH, RAASE; REINHADT, 2014).

Intensidade: A intensidade da luz de uma cor específica, por exemplo, é determinada pela amplitude da onda de luz. Esta por sua vez pode ser modificada pela absorção.

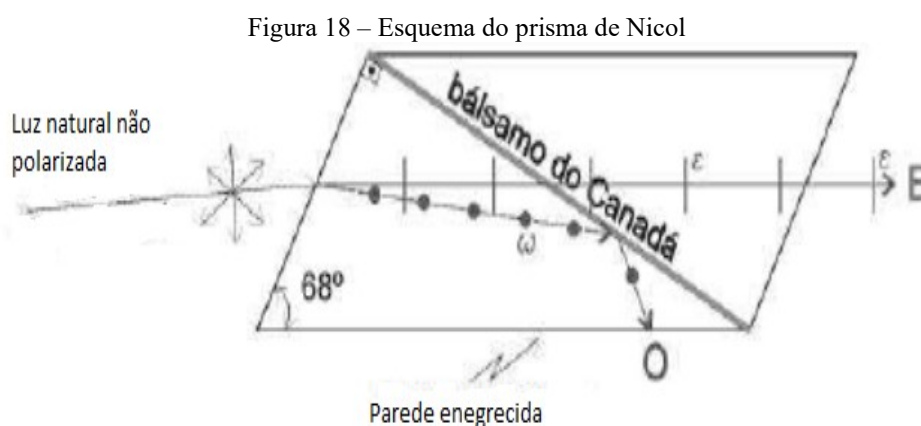
Polarização: A luz natural ou aquela emitida por uma fonte de luz artificial é constituída por ondas que vibram em direções aleatórias. Na luz plano-polarizada, as ondas de luz vibram segundo uma direção definida e, nos microscópios modernos é obtida com o uso de um filtro polarizador fazendo com que a luz de uma fonte natural ou artificial, que

vibra em diversas direções, passe a vibrar em uma única direção. O feixe de ondas de luz, ao atingir a lâmina delgada, consiste inteiramente de ondas de luz que vibram na direção L-O (Leste – Oeste), quando o polarizador está devidamente ajustado (RAITH, RAASE et al, 2014).

Para obter a polarização da luz natural é necessária a aplicação de um dos três métodos:

- Polarização por reflexão: o raio de luz incidente em uma superfície polida e plana sofrerá em parte reflexão, sendo polarizada perpendicularmente ao plano de incidência. Já a porção refratada não sofrerá polarização;
- Polarização por absorção: utilizam - se substâncias que permitem atravessar a luz apenas em certas direções preferenciais, como por exemplo, cristais de turmalina cortados paralelamente ao eixo cristalográfico C ou polaróides;
- Polarização por dupla refração: a luz ao atravessar um meio anisotrópico, refrata – se, desdobrando – se em dois raios que vibram em planos perpendiculares entre si, denominados ordinário (O) e extraordinário (E).

Observação: Os microscópios atuais utilizam polarizadores feitos de substâncias orgânicas denominadas como placas polaróides, que fornecem luz polarizada por meio da absorção seletiva da luz, conforme figura 18.

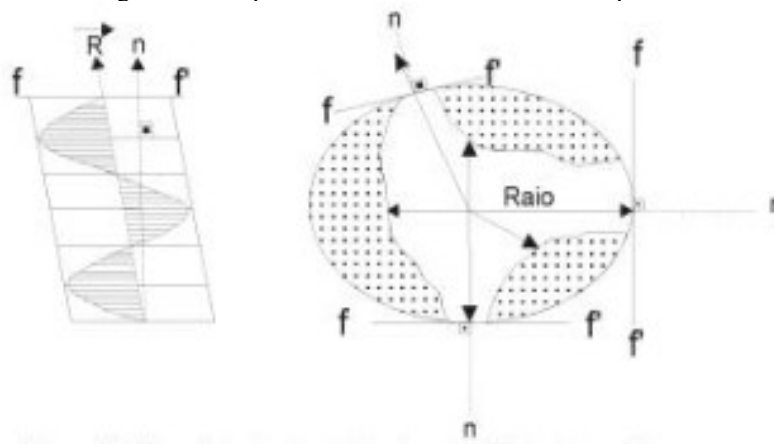


Fonte: Machado e Nardy (2016)

Interferência: Duas ondas de luz coerentes, formada por ondas da mesma fonte luminosa, mesma frequência e direção e que mantem uma relação de fase constante entre si são percebidas nos minerais opticamente anisotrópicos quando os dois raios de luz vibram

perpendicularmente entre si e são gerados pela dupla refração no cristal, levando-os a interferir no analisador após saírem da lâmina delgada. Outra releitura do conceito é feita por Machado e Nardy (2016), que dizem que em um meio anisotrópico a velocidade da luz não é igual em todas as direções, sendo sua superfície de onda representada por um elipsoide, como ilustra a figura 19. Nos microscópios de luz polarizada, a objetiva é equipada com um retículo em cruz ajustado em 90° (ou um círculo micrométrico), que é posicionado no diafragma fixo. Este retículo estabelece a referência N-S e L-O para as direções de vibração do analisador e do polarizador, e também para a medida de ângulos.

Figura 19 – Superfície de onda em meio anisotrópico

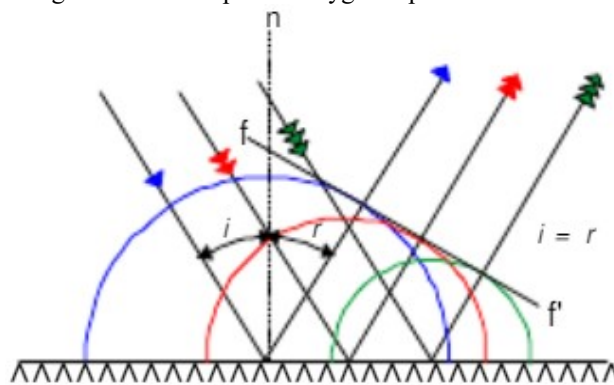


Fonte: Machado e Nardy (2016)

Reflexão e Refração: Como descrito por Machado e Nardy (2016), as esquematizações geométricas mostrando os princípios como a luz é refletida ou refratada baseiam-se no princípio de Huygens: “qualquer ponto ou partícula excitado pelo impacto da energia de uma onda de luz se torna uma nova fonte puntiforme de energia”. Logo, cada ponto sobre uma superfície refletora pode ser considerado uma fonte secundária de radiação com a sua própria superfície de onda.

A lei da reflexão assegura que os ângulos de incidência e reflexão medidos em relação a normal da superfície refletora são iguais e localizados no mesmo plano, denominado plano de incidência, conforme figura 20. Portanto, admitindo-se um meio como isotrópico e empregando-se o princípio de Huygens, determina-se a frente de onda dos raios refletidos desenhando uma linha tangente às superfícies de onda dos raios de luz incidentes, as ondas de luz refletidas serão perpendiculares à frente de onda ($f - f'$).

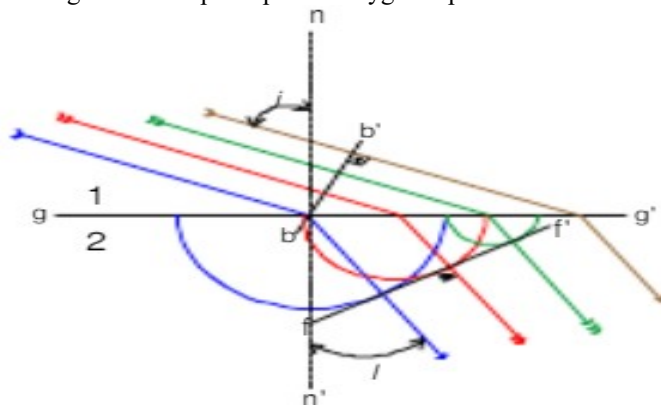
Figura 20 – Princípio de Huygens aplicado à reflexão



Fonte: Machado e Nardy (2016)

Para a lei da refração, quando um raio de luz incide sobre uma superfície que separa dois meios, parte da luz é refletida de volta ao meio 1 e a outra penetra no meio 2, sendo desviada ou refratada, como mostra a figura 21. Admitindo-se como v_1 a velocidade de propagação no meio 1 e v_2 a velocidade de propagação no meio 2, e que $v_1 > v_2$ e $b - b'$ a frente de onda dos raios incidentes, determina-se a direção de propagação dos raios refratados com base no princípio de Huygens, segundo o qual: o ponto de impacto da luz entre os dois meios $g - g'$ age como fontes secundárias de luz.

Figura 21 – O princípio de Huygens aplicado à reflexão.



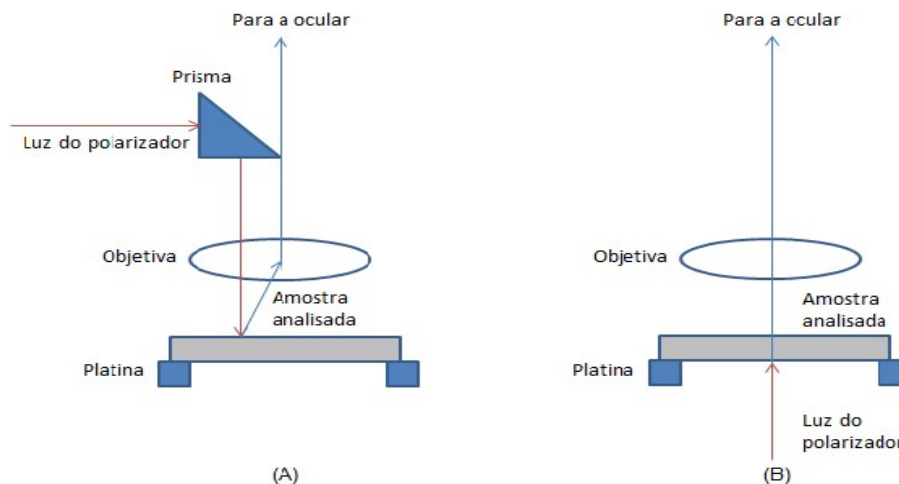
Fonte: Machado e Nardy (2016)

2.2.2 TIPOS DE ARRANJOS PARA ANÁLISES EM MICROSCÓPIO PETROGRÁFICO

De acordo com Machado e Nardy (2016), existem dois métodos básicos de microscopia óptica que são empregados em Petrográfia: o de luz transmitida e o de luz refletida. O primeiro método é utilizado para a análise de minerais opacos, sendo que a luz incidente na superfície do mineral é refletida em direção à objetiva do microscópio e posteriormente à ocular, conforme figura 22 (A). Já o segundo é utilizado para a análise de

minerais translúcidos, onde a luz atravessa o objeto a ser estudado e atinge a objetiva do microscópio e, logo após, a ocular. Ver figura 22 (B).

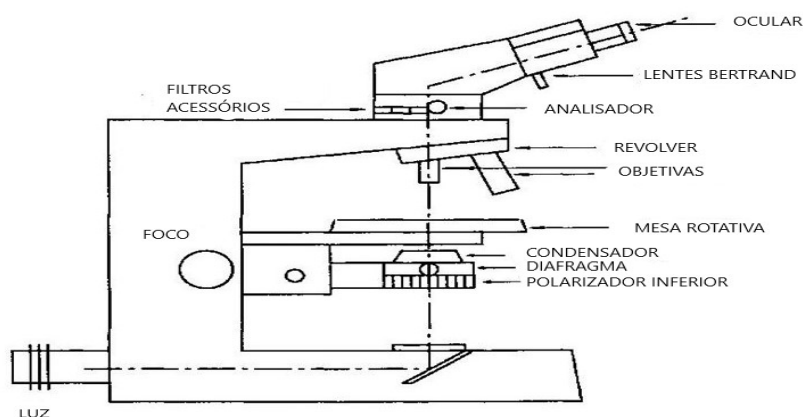
Figura 22 – Esquema representativo das técnicas de microscopia de luz refletida (A) e transmitida (B)



Fonte: O autor (2020)

De acordo com Machado e Nardy (2016), o microscópio petrográfico consiste em um microscópio ordinário que possui dois polarizadores, ficando um posicionado acima e outro posicionado abaixo do mineral analisado. Os diversos componentes de um microscópio petrográfico podem ser classificados segundo o sistema óptico-ocular, objetiva, lente de Amici-Bertrand, analisador (ou polarizador superior), polarizador (ou polarizador inferior), diafragma-íris, condensador móvel, condensador fixo e filtro azul. Quanto aos componentes do sistema mecânico do microscópio dispomos do suporte-canhão, braço, presilhas de sustentação das objetivas ou revolver, platina, cremalheira macro e micrométrica de movimentação vertical da platina e base, conforme figura 23.

Figura 23 – Principais componentes de um microscópio



Fonte: O autor (2020)

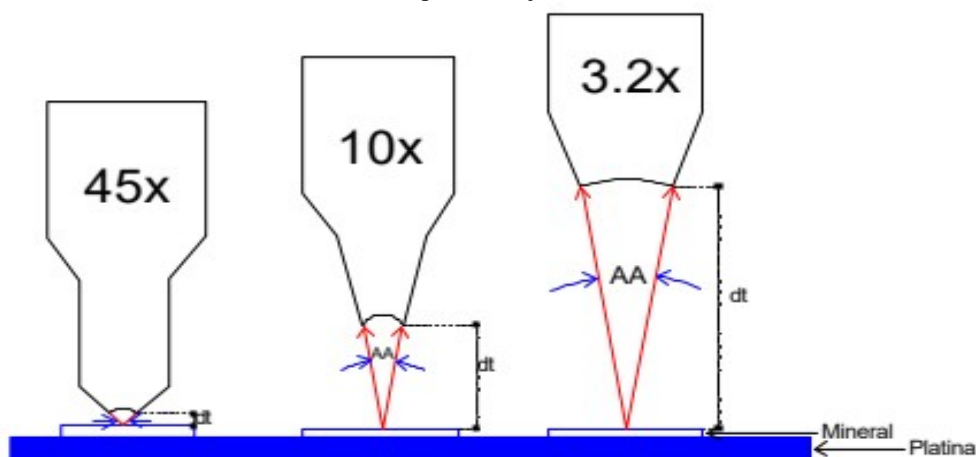
Objetiva: Trata-se de uma lente ou uma associação de lentes que fornece uma imagem real aumentada do objeto analisado. Localiza-se no tubo do canhão, como esquematizado na figura 24. A qualidade da imagem observada ao microscópio é determinada fundamentalmente pela objetiva, sendo, portanto, uma componente chave no microscópio, responsável pela imagem primária, pelo aumento e resolução (RAITH, RAASE et al, 2014).

As características de uma objetiva vêm impressas em seu corpo e são:

- (AL) Aumento linear: refere – se à relação entre a imagem real fornecida pela objetiva e o objeto, ou seja, quantas vezes a imagem será maior que o objeto real analisado, como 3,2X, 10X, 40X, 50X, etc.
- (AA) Abertura angular: refere – se ao ângulo entre os raios divergentes que penetram na objetiva a partir de um ponto focado por ela.
- (n) Índice de refração: refere – se ao índice de refração existente entre a lente coletora da objetiva e a superfície superior do material analisado.
- (dt) Distância de trabalho ou frontal: refere – se à distância entre a face inferior da objetiva e a face superior do objeto focalizado. Quanto maior for o aumento linear da objetiva, menor será a distância de trabalho.
- (AN) Abertura numérica: refere – se à quantidade de luz que verdadeiramente penetra na objetiva, sendo dada pela equação 05:

$$AN = n \cdot \frac{\sin AA}{2} \quad (\text{eq. 05})$$

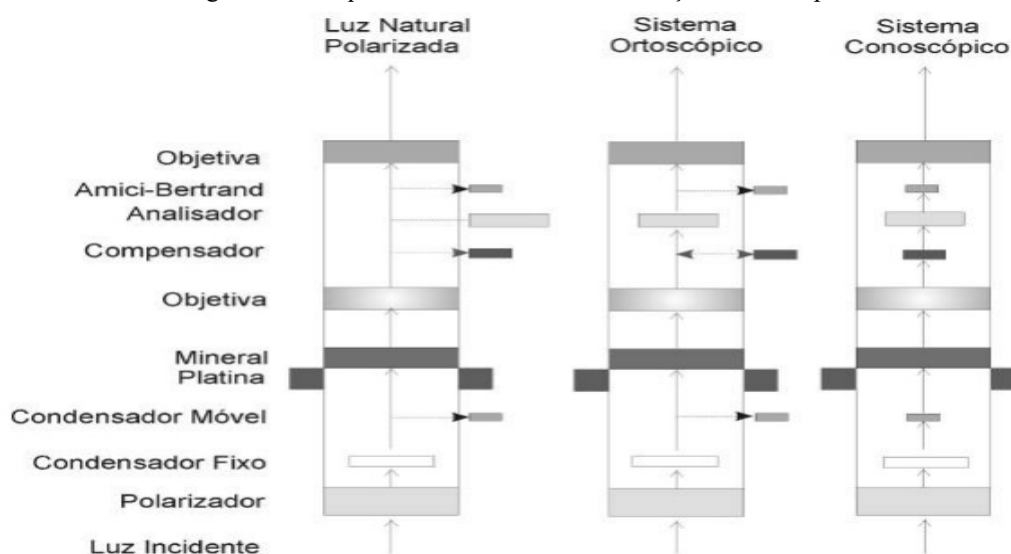
Figura 24 – Representação esquemática das propriedades de uma objetiva, em que AA = abertura angular e dt = distância de trabalho ou frontal, para as objetivas de aumentos lineares de 45, 10 e 3,2 vezes



Fonte: Machado e Nardy (2016)

Ocular: A associação de lentes oculares permite conservar a imagem real do objeto gerado pela objetiva, como mostra a figura 25. As oculares localizam-se fixas em um tubo metálico denominado revólver e a lente mais próxima ao olho do observador denomina-se lente de olho, enquanto a que recebe o raio de luz proveniente da objetiva é chamada de coletora. Elas também são classificadas em positiva ou negativa. As lentes positivas possuem o foco do sistema antes da lente coletora, e, nas negativas, o foco encontra-se depois dessa lente.

Figura 25 – Esquemas de sistemas de observação microscópica



Fonte: Fujimore (1985)

A ocular serve para realizar a ampliação adicional dos detalhes da imagem intermediária. As propriedades importantes de uma objetiva incluem: aberração, abertura e resolução. O aumento visual total do microscópio é proveniente da relação entre a objetiva e a ocular, que é dada pela equação 06.

$$AT = ALO \times ALB \quad (\text{eq. 06})$$

Onde:

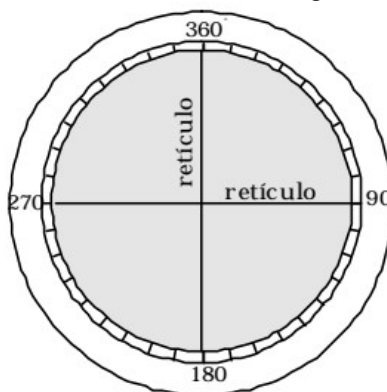
AT = Aumento visual total do microscópio;

ALO = Aumento linear da ocular;

ALB = Aumento linear da objetiva.

Platina: Consiste em uma placa metálica que sustenta a amostra em análise, conforme figura 26, possui uma graduação de 360° e um movimento de rotação, que quando utilizada em associação aos retículos medem ângulos de direção morfológica dos minerais presentes no material analisado (MACHADO, NARDY, 2016).

Figura 26 – Esquema da associação entre a platina graduada e os retículos da ocular, sendo essas graduações utilizadas como linhas de referência na medida de ângulos entre unidades lineares



Fonte: Machado e Nardy (2016)

Lente de Amici – Bertrand: É utilizada somente no sistema conoscópico e tem como objetivo trazer a imagem de interferência para o plano focal da ocular, como mostra a figura 10. Localiza-se entre a ocular e o analisador podendo ser inserida ou removida do sistema óptico.

Diafragma – Íris: Consiste em um dispositivo que regula a quantidade de luz que adentra no microscópio e se localiza usualmente sobre o condensador fixo. A redução do feixe de luz permite acentuar os traços morfológicos dos minerais, como por exemplo: bordas, fraturas, rugosidade das superfícies e presença de inclusões.

Filtros: São elementos constituídos de placas de vidro de diversas cores e têm como finalidade absorver determinados comprimentos de ondas de radiações indesejáveis da luz utilizada. A utilização adequada de um filtro proporciona um aumento no contraste de imagens e melhoras na sua resolução.

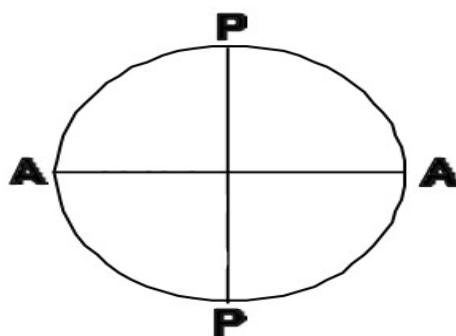
Polarizador e Analisador: A utilização do polarizador e do analisador é de fundamental importância para a técnica de determinação da porosidade proposta neste trabalho. O microscópio petrográfico possui dois polarizadores, ou nicóis, sendo, o superior denominado de analisador e o segundo de polarizador inferior ou simplesmente polarizador. O vocábulo “nicol” é um termo clássico da área de estudo da mineralogia óptica que se refere à época em que a polarização da luz era obtida pela utilização de prismas de calcita fatiados e

colados segundo direções específicas. Portanto, o termo nicóis cruzados significa que o analisador está inserido no caminho óptico do microscópio (FUJIMORE, 1985).

Nos microscópios modernos, os polarizadores são constituídos por lâminas polaroides, formadas por compostos químicos orgânicos que, são dispostos segundo certa orientação. Logo quando a luz incide no polarizador, a luz natural não polarizada terá todas as suas direções de vibração, com exceção daquela paralela à sua direção de vibração, absorvida pelo mesmo. O polarizador inferior localiza-se acima da fonte de luz e abaixo do mineral a ser analisado. Sua finalidade é fornecer luz polarizada, que, ao rotacionar a platina do microscópio, incide em diferentes direções na superfície do material analisado, como mostra a figura 25.

Quanto ao analisador, este está disposto acima do material analisado e abaixo da ocular, achando-se orientado de modo que sua direção de polarização seja perpendicular à do polarizador inferior. É de fundamental importância para a determinação das propriedades ópticas do material analisado que as direções de vibração dos polarizadores encontrem-se paralelas às direções dos retículos da ocular, como mostra a figura. 27.

Figura 27 – Representação do paralelismo dos retículos da ocular com as direções de vibração do polarizador (P-P) e do analisador (A - A). As direções de vibração não necessariamente serão sempre coincidentes como as representadas na figura



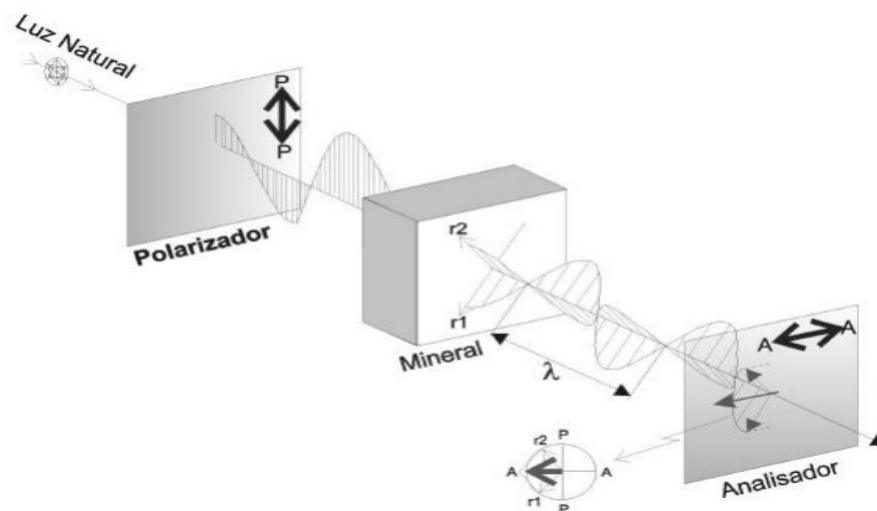
Fonte: O autor (2020)

Logo, todas as vezes que um material isotrópico for colocado entre os nicóis cruzados, não existirá passagem de luz para a ocular do observador. Isso é naturalmente observado no microscópio petrográfico, à medida que se cruzam os nicóis sem haver material na platina rotativa. O ar é uma substância isotrópica, a luz originária do polarizador chega sem desvios ao analisador. Como sua direção de polarização é normal à do analisador, a luz será absolutamente absorvida por ele, sem haver nenhuma passagem dela.

No entanto, quando uma substância anisotrópica for colocada na platina do microscópio, a luz sofrerá dupla refração a fim de exemplificar a descrição, como

demonstrado na figura 28. A onda de luz oriunda do polarizador que oscila em uma única direção N – S, ou L – O, ao acertar a superfície da amostra é dividida em outros dois raios, denominados de r_1 e r_2 (MACHADO, NARDY, 2016).

Figura 28 – A função do analisador no sistema óptico de um microscópio, em que P – P = direção de vibração do polarizador, A – A = direção de vibração do analisador e r_1 e r_2 = os dois raios que surgem devido ao fenômeno da dupla refração. A obtenção do raio resultante da soma vetorial dos raios r_1 e r_2 segundo a direção do analisador e a consequente transmissão da luz através desse analisador



Fonte: Machado e Nardy (2016)

Alguns fatos ópticos específicos estão intrinsecamente correlacionados à orientação do polarizador, tais como pleocroísmo, que consiste em uma especificidade óptica de um mineral anisotrópico que assimila diferencialmente os diversos comprimentos de onda conforme as diferentes direções cristalográficas da radiação transmitida, decorrendo em mudanças de cor ao rotacionar o material (WINGE et al., 2001). Logo, além de verificar o alinhamento dos polarizadores, o observador deve inteirar-se sobre a orientação dos polarizadores ao iniciar os estudos com o microscópio.

Conforme esses dois raios de luz vibram em planos perpendiculares entre si são denominados de incongruentes, ou seja, não se interferem para formar um raio de luz. Ao atingir o observador, eles passarão a oscilar em um único plano, logo, atuam respectivamente, produzindo uma onda resultante paralela a direção de oscilação do analisador, que agora transmite luz ao observador.

Condensadores: O microscópio petrográfico possui dois condensadores, sendo um fixo localizado entre o polarizador e a platina, e o segundo condensador móvel, localizado sobre o condensador fixo e imediatamente sob a platina, ver figura 20. Os condensadores têm por objetivo proporcionar uma maior convergência dos raios de luz que atingem o material

em estudo.

Ademais, o condensador móvel dispõe de uma função especial para promover uma alta convergência dos raios de luz perto de um ponto sobre o material em análise. Dessa forma, os raios de luz que seguem do material para a objetiva são divergentes. Observa-se que o condensador móvel só é recomendado ser utilizado quando são utilizadas as objetivas de médio a grande aumento linear.

Portanto, a utilização de todos ou de alguns elementos no caminho óptico do microscópio permite a identificação de diferentes propriedades do material analisado, concebendo assim, sistemas ópticos distintos, em conformidade com Tabela 02 e a figura 22. Invariavelmente, estarão presentes no trajeto óptico o filtro azul, o polarizador inferior, o condensador fixo, a objetiva e a ocular (MACHADO, NARDY, 2016).

Tabela 02 – Técnicas de visualização do microscópio Petrográfico

Sistema	Itens ópticos fundamentais	Propriedades ópticas observáveis
Luz natural	Polarizador inferior (Objetiva pequena ou média)	Morfológicas: hábito, relevo, cor, divisibilidade, etc.
Ortoscópico	Polarizador inferior e analisador (Objetiva pequena ou média)	Cores de interferência: birrefringência, sinal de alongação, tipo de extinção, etc.
Conoscópico	Polarizador inferior, analisador, lente de Amici – Bertrand e condensador móvel (Objetiva maior).	Figuras de interferência: caráter óptico, sinal óptico, ângulo 2V, etc.

Fonte: Machado e Nardy (2016)

2.2.3 IMAGENS DIGITAIS

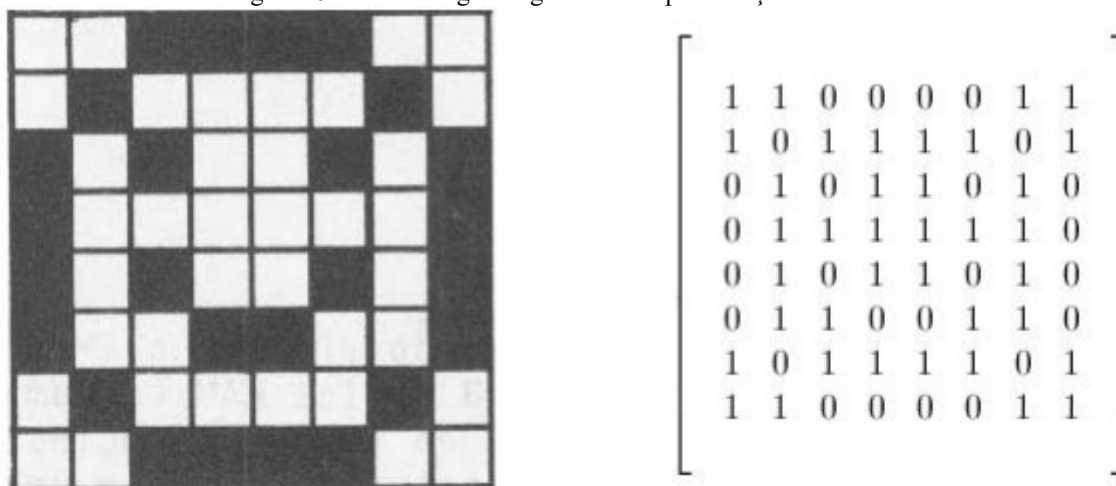
De acordo com Ignacio (2013), existem dois tipos de imagens digitais. A primeira delas é a vetorial e a segunda, bitmap. A imagem vetorial pode ser definida por meio de vetores matemáticos e possibilita o redimensionamento da imagem em qualquer escala sem perda de qualidade. Contudo, quando é necessário imprimir este tipo de imagem, a mesma é convertida para bitmap, que é adequada às características do equipamento de impressão.

Tal processo de conversão é denominado de “rasterização”, sendo a imagem bitmap mapeada por bits, isto é, a imagem é organizada em uma matriz de linhas e colunas formadas por pixels e cada pixel possui apenas uma cor, nos quais cada cor é referenciada por intervalos numérico de 2, 4, 8, 16 ou 32 bits, determinantes para a quantidade de cores disponíveis. A

mesma não possui dimensão fixa, ou seja, o tamanho será atribuído ao pixel no momento da sua exibição em impressora ou vídeo.

Uma imagem digital pode ser caracterizada como um arquivo de dados que armazena uma matriz de valores bidimensional, em que o primeiro valor é relativo ao pixel, um ponto específico da imagem, e o segundo valor, ao dado representativo deste pixel. A figura 29 apresenta uma imagem monocromática de [8x8] pontos e sua respectiva representação numérica por uma matriz [8x8]:

Figura 29 – Uma imagem digital e sua representação numérica



Fonte: Ignacio (2013)

Desta forma é necessário entender os conceitos de resolução e profundidade digital, que segundo Ignacio (2013), são:

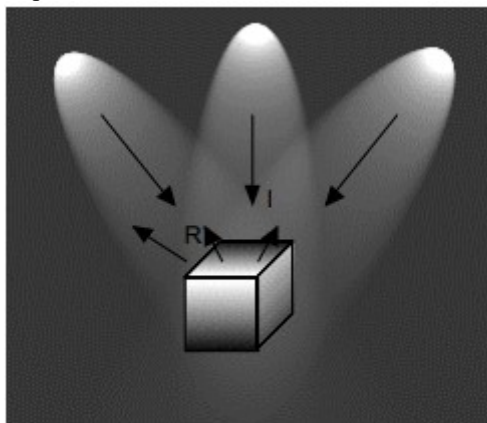
- **Resolução:** é a capacidade que um sistema de reprodução e/ou captura de imagens possui para reproduzir detalhes. A unidade de representação da resolução é em pontos por polegada quadrada (dots per inch = dpi), conforme maior a resolução, maiores serão os detalhes. Vale ressaltar a importância que a resolução do equipamento deve ser maior que a resolução do arquivo bitmap desejado.
- **Profundidade:** é o número máximo de níveis de intensidade que uma imagem pode apresentar. Por exemplo, uma imagem em escala de tons de cinza com 8 bits, poderá ter seu valor entre 0 e 255 para cada pixel, ou seja, uma profundidade com intervalo de 256 valores diferentes.

Uma imagem monocromática pode ser caracterizada matematicamente através de uma função $f(x,y)$ da intensidade luminosa, sendo o valor da respectiva função em qualquer ponto

de coordenadas espaciais (x,y) , relativo ao brilho da imagem (nível de cinza). Cada ponto retrata um elemento da imagem e é denominado “pixel” (Picture element). Outra forma de caracterizar uma imagem digital é a utilização de uma matriz $(M \times N)$, onde cada elemento da combinação i e j representa um pixel e o valor do elemento corresponde à sua intensidade (FILHO; NETO, 1999).

A função $f(x,y)$ equivale ao produto da interação entre a iluminância $i(x,y)$, que representa a quantidade de luz que incide sobre o objeto analisado e as propriedades de transmitância ou refletância próprias do objeto, caracterizada pela função $r(x,y)$, cujo valor representa a fração de luz incidente sobre o mesmo, como mostra a figura 30.

Figura 30 – Componentes de iluminância I e refletância R de uma imagem



Fonte: Filho e Neto (1999)

Matematicamente, tais conceitos que são descritos acima e através da figura 14 são representados na equação 07.

$$f(x,y) = i(x,y) \cdot r(x,y) \quad (\text{eq. 07})$$

Onde,

$$0 < i(x,y) < \infty;$$

$$0 < r(x,y) < 1.$$

Como caracteriza Filho e Neto (1999), a intensidade de uma imagem monocromática $f(x,y)$ nas respectivas coordenadas cartesianas será qualificada como nível de cinza (ou tom de cinza) (L) da imagem em determinado ponto. Este valor estará no intervalo descrito abaixo, onde L_{\min} e L_{\max} são valores finitos e positivos:

$$L_{\min} \leq L \leq L_{\max}$$

O intervalo $[L_{\min}, L_{\max}]$ representa a escala de cinza da imagem. É comum deslocar este intervalo numericamente para o intervalo dos inteiros $[0, W)$, onde $L=0$ (Pixel preto) e $L=W-1$ (Pixel branco). Usualmente, W é uma potência inteira positiva de 2. Uma imagem que dispõe informações em intervalos ou bandas distintas de frequência, possui uma função $f(x,y)$ para cada banda. É o caso de imagens coloridas padrão RGB.

2.2.4 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DIGITAL DE IMAGENS (PADI)

O processamento e análise digital de imagens (PADI) é objeto de crescente interesse por proporcionar um grande número de aplicações em aprimoramento de informações pictóricas para a interpretação humana e a análise automática de informações obtidas através de imagens. De meados da década de 60 até os dias atuais, a área de PADI exibe um crescimento expressivo e suas aplicações estão presentes em quase todos os ramos da ciência.

Em 1964, durante os estágios iniciais da exploração espacial, surgiu a análise automática de imagens digitais, com métodos que melhoravam a informação visual para a análise humana, de forma rápida e com grande precisão, surge então o Processamento e Análise Digital de Imagens (PADI). Posteriormente, inúmeras áreas como geografia, engenharia, medicina, física, biologia, entre outras, utilizam de forma progressiva as tecnologias PADI.

Na área de medicina o uso de imagens para a realização de diagnósticos médicos tornou-se rotineira e a evolução no processamento de imagens vem proporcionando tanto o desenvolvimento de novos equipamentos quanto a maior facilidade de interpretação de imagens. Em biologia, a habilidade de processar automaticamente imagens obtidas de microscópios, descomplica bastante a execução de tarefas laboratoriais com alto grau de precisão e repetitividade. Do mesmo modo, o processamento digital de imagens faz-se presente nas áreas de geografia, astronomia, segurança, publicidade, direito, sensoriamento remoto, meteorologia, arqueologia, física, matemática, engenharia, computação gráfica entre outras.

2.2.5 HISTOGRAMA E ESCALA DE CINZA

De acordo com Filho e Neto (1999) o histograma de uma imagem é um conjunto de números que contabiliza o percentual de pixels de uma imagem determinando o nível de cinza. Tais valores são costumeiramente representados por um gráfico que representa para

cada nível de cinza o número ou percentual de pixels da imagem analisada. Por meio da visualização do histograma de uma imagem aferi-se uma indicação da qualidade da imagem quanto ao nível de contraste e seu brilho médio, caso a imagem seja predominantemente clara ou escura.

Cada elemento deste conjunto é calculado de acordo com a equação 08:

$$p_r(r_k) = \frac{n_k}{n} \quad (\text{eq. 08})$$

Onde:

$$0 \leq r_k \leq 1;$$

$K = 0, 1, \dots, L-1$, onde L é o número de níveis de cinza da imagem digitalizada;

n = número total de pixels da imagem;

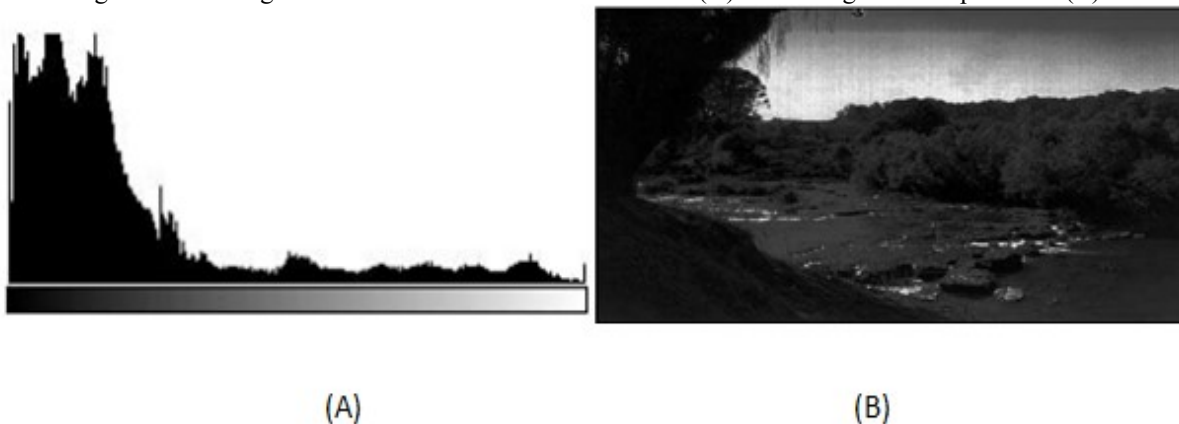
$p_r(r_k)$ = probabilidade do k -ésimo nível de cinza;

n_k = número de pixels cujo nível de cinza correspondente a k .

Um histograma exibe diversas características importantes. Primeiramente, cada valor de $p_r(r_k)$ fornece a probabilidade de um pixel da imagem analisada apresentar nível de cinza r_k . Assim sendo, um histograma nada mais é que uma função de distribuição de probabilidades, devendo obedecer aos teoremas e axiomas da probabilidade matemática (FILHO; NETO, 1999).

A figura 31 (A) exibe um histograma com uma grande concentração de pixels em torno dos valores mais baixos de cinza, representando uma imagem majoritariamente escura figura 31 (B).

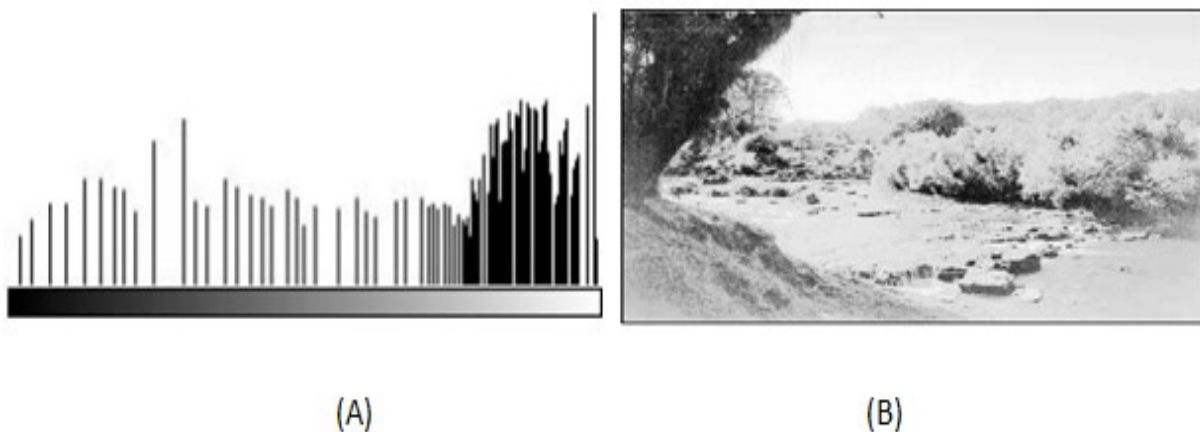
Figura 31 – Histograma com valores mais baixos de cinza (A) e sua imagem correspondente (B)



Fonte: Filho e Neto (1999)

Os pixels estão condensados em valores próximos ao limite superior da escala de cinza, conforme figura 32 (A), caracterizando uma imagem clara como exemplificado na figura 32 (B):

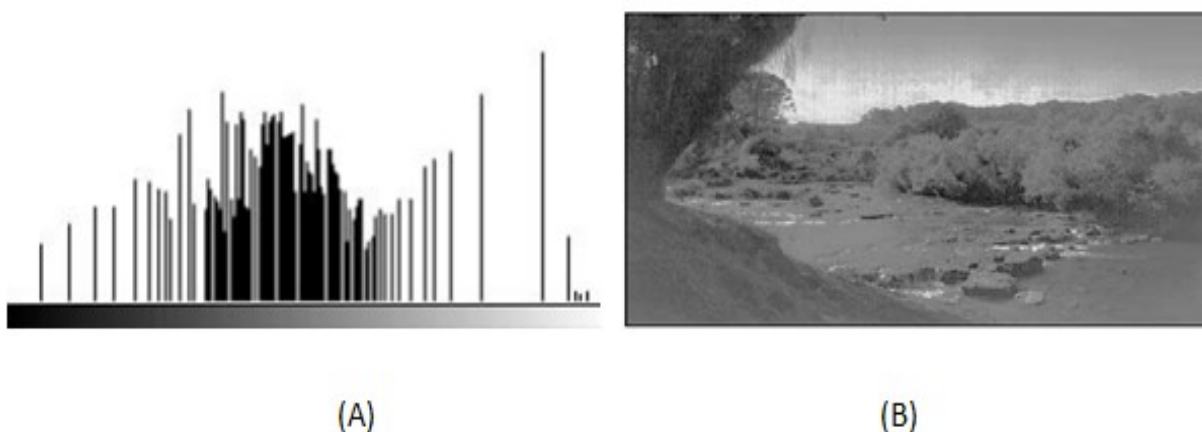
Figura 32 – Histograma com valores no limite superior da escala de cinza (A) e sua imagem correspondente (B)



Fonte: Filho e Neto (1999)

O histograma da figura 33 (A) exemplifica pixels que estão agrupados em torno de valores médios de cinza, correspondendo a uma imagem de brilho médio como exposto na figura 33 (B).

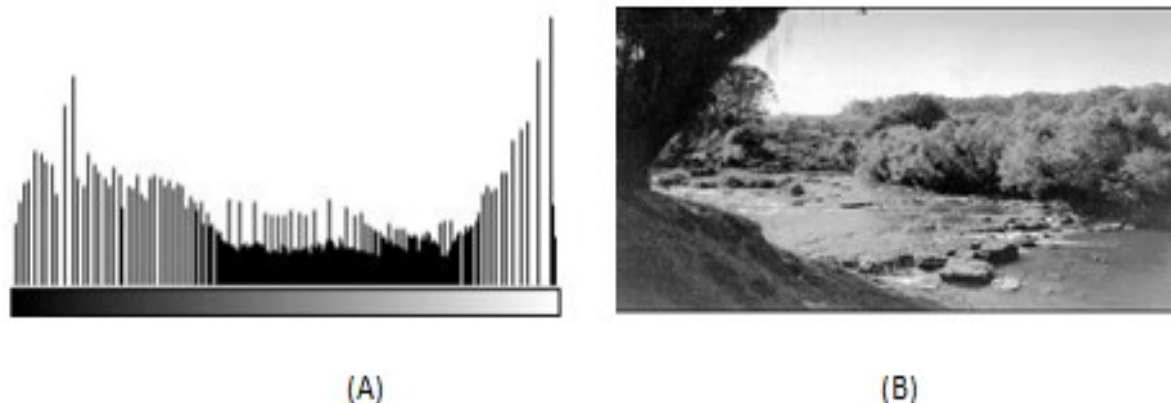
Figura 33 – Histograma com valores médios da escala de cinza (A) e sua imagem correspondente (B)



Fonte: Filho e Neto (1999)

O histograma da figura 34 (A) assemelha-se a uma imagem com pixels distribuídos ao longo de toda a escala de cinza. É normal dizer que uma imagem com estas características apresenta um bom contraste como demonstrado por sua imagem na figura 34 (B).

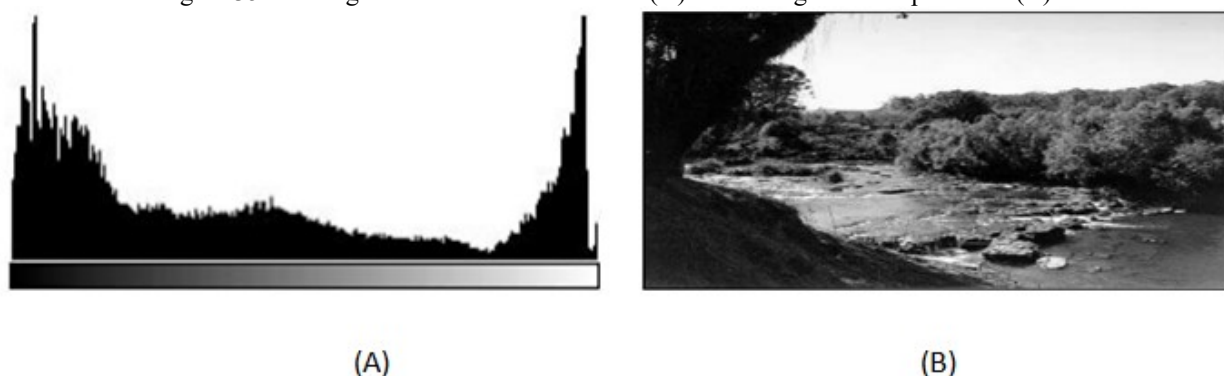
Figura 34 – Histograma com valores ao longo de toda a escala de cinza (A) e sua imagem correspondente (B)



Fonte: Filho e Neto (1999)

A figura 35 (A) exibe um histograma habitualmente bimodal, isto é, apresentando duas concentrações de pixels, uma delas em torno de valores escuros e outra na região clara do histograma. Portanto, a imagem apresenta alto nível de contraste entre as duas concentrações da escala de cinza, visto que as mesmas encontram-se razoavelmente espaçadas como observado na figura 35 (B):

Figura 35 – Histograma com valores bimodal (A) e sua imagem correspondente (B)



Fonte: Filho, Neto (1999)

2.2.6 SEGMENTAÇÃO

Uma das etapas mais difíceis no processamento de imagens é a segmentação de uma imagem em fragmentos ou objetos constituintes. A segmentação pode ser vista como a classificação dos pixels relativos aos diferentes objetos caracterizados na imagem. Logo, os objetos imageados são vistos como classes de pixels, ou seja, ao final do processo de segmentação os mesmos são classificados como pertencentes a uma destas classes. O valor conferido ao rótulo de cada pixel é utilizado para formar uma imagem temática que permite uma visualização do resultado da segmentação.

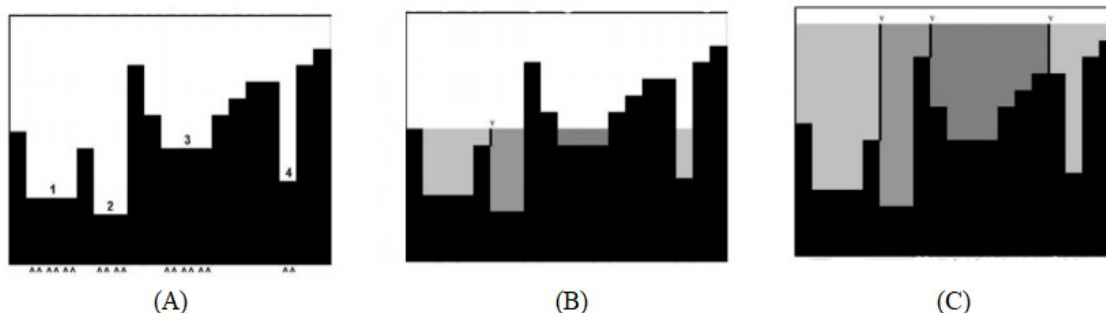
De acordo com Rosa (2008), o processo de segmentação é habitualmente realizado com a assistência do usuário, realizando o ajuste nos parâmetros, tais como limiares de intensidade em uma escala de cinza ou ainda a seleção de regiões relevantes do objeto. Tais métodos podem ser automatizados com eficácia quando as condições de obtenção das imagens podem ser determinadas com precisão e, os objetos imageados exibem as mesmas características em todas as imagens.

Contudo, isso é muito difícil de alcançar na identificação de minerais, pois as propriedades ópticas, como pleocrismo e bi refletância, não permitem estabelecer uma equivalência biunívoca entre brilho ou cor e a mineralogia. O reconhecimento automático de objetos com aparência mutável exige métodos adaptáveis às variações esperadas, cuja escolha demanda algum conhecimento a respeito dos objetos analisados e das condições de imageamento. Este trabalho utiliza a função Watershed para realizar a segmentação da imagem e a identificação dos poros da amostra.

De acordo com Audigier (2004), o método de watershed reproduz uma inundação em um relevo e embasa-se na escolha de marcadores caracterizados, cujo objetivo é definir as regiões que pertencem aos objetos de interesse e ao fundo da imagem. A seleção de rótulos distintos para vários objetos podem ser alcançados ao mesmo tempo. O método de watershed pertence ao campo da Morfologia Matemática, que realiza o estudo de estruturas geométricas presentes numa imagem por meio de técnicas matemáticas (FACON, 2011).

Ainda de acordo com Audigier (2004), em Morfologia Matemática, realiza-se uma correspondência entre o valor de cada pixel de uma imagem em escala de cinza e a altitude. Valores elevados de pixels representam picos. Valores baixos são correlacionados a vales e valores constantes são ligados a planícies. Logo, uma imagem 2D retrata uma superfície topográfica 3D. A figura 36 esquematiza a aplicação do método Watershed.

Figura 36 – Processo de inundação no método Watershed



Fonte: Audigier (2004)

Tal método é uma segmentação morfológica matemática que se baseia na teoria topológica. A ideia básica é tomar a imagem como uma geomorfologia topológica em

geodésia, e cada pixel de valor cinza da imagem indica a altitude, limites de cada valor local mínimo e sua área de impacto chamada de bacias de captação e formação de bacias hidrográficas.

2.3 COEFICIENTE DE VARIAÇÃO COMO MEDIDA DA HOMEONEIDADE OU HETEROGENEIDADE DA DISTRIBUIÇÃO DE POROS

A interpretação da análise estatística dos dados obtidos pode dar uma visão geral quanto à homogeneidade ou heterogeneidade da distribuição de poros na amostra. Para determinar a viabilidade dos resultados, são empregadas medidas de dispersão, que tomam como ponto de comparação um valor de tendência central, mediana ou média. Na avaliação e interpretação de resultados do experimento destaca-se a importância de utilizar, além da média, medidas de dispersão que garantam conclusões mais seguras e precisas (MOHALLEN, 2008).

Dentre as medidas, ainda segundo Mohallen (2018), destaca-se o coeficiente de variação, sendo a única que permite a comparação da dispersão entre diferentes trabalhos e mesmo entre diferentes variáveis, sendo considerada uma medida de dispersão relativa. Isto porque, por definição, o coeficiente de variação de uma amostra é obtido pelo desvio padrão em porcentagem da média aritmética conforme a fórmula da equação 09:

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\% \quad (\text{eq. 09})$$

Onde:

CV = Coeficiente de variação;

S = desvio padrão;

X = média.

O número de repetições exerce certa influência sobre o valor do CV e o pesquisador deve estar familiarizado com a variável em questão para saber se o coeficiente de variação encontrado é alto ou baixo.

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para atingir os objetivos do trabalho, além da revisão bibliográfica sobre o tema já exposta, foi desenvolvida uma investigação experimental com o objetivo de comprovar a eficiência da técnica de Microscopia Petrográfica para determinação da porosidade do concreto. O trabalho em questão realiza uma adaptação da técnica descrita por Domingues (2011), utilizada em Geologia e associada às técnicas PADI para determinar a porosidade de corpos de provas prismáticos de concreto celular.

O concreto celular com diferentes teores de ar fora escolhido por causa de sua formação estrutural em razão de sua grande porosidade. Segundo a norma vigente, pode ser obtido pela introdução de bolhas de ar em argamassa, com dimensões milimétricas, homogêneas, uniformemente distribuídas, estáveis, incomunicáveis e independentes, formadas ao fim do processo, cuja densidade de massa aparente em estado fresco deve estar compreendida entre 1.300 kg/m^3 e 1.900 kg/m^3 , conforme NBR 12645 (ABNT, 1992).

Nesta lógica, esta seção apresenta a descrição dos componentes do concreto celular utilizado na pesquisa, sua dosagem, produção e também suas características no estado fresco e endurecido. Os corpos de prova confeccionados para aplicação da técnica de Microscopia Petrográfica foram moldados juntamente com os corpos de prova para a determinação das propriedades mecânicas. A partir dos prismas de concreto celular produzidos foram confeccionadas lâminas petrográficas de seção delgada, posteriormente fotografadas com o auxílio de um microscópio petrográfico e analisadas segundo técnicas PADI.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO CELULAR

A caracterização do agregado: granulometria, módulo de finura, massa unitária, massa específica e absorção de água, foi estabelecida em observância às normas brasileiras vigentes. As propriedades químicas e físicas dos aditivos superplastificante e espumígeno, tais como: base química, densidade e concentração de sólidos foram obtidas das fichas técnicas dos fabricantes. De modo semelhante aos aditivos, as características do cimento foram determinadas, apresentando informações sobre: perda ao fogo, resíduos insolúveis, finura, superfície específica e resistência à compressão aos 28 dias.

- AGREGADOS

A tabela 03 apresenta as normas utilizadas para a realização dos ensaios de caracterização da areia realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) e seus respectivos resultados.

Tabela 03 - Lista de normas utilizadas para caracterizar a areia

Ensaio	Resultados	Normas
Diâmetro máximo	2,36mm	NBR NM 248 (ABNT, 2006)
Módulo de finura	1,93	NBR 7211 (ABNT, 2009)
Massa unitária	1407 kg/m ³	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa específica	2600 kg/m ³	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Absorção	1,38%	NBR NM 30 (ABNT, 2001)

Fonte: O autor (2020)

- ADITIVOS QUÍMICOS

O aditivo espumígeno de espuma pré-formada (AESP) é um aditivo de natureza química a base de ácido sal de álcool graxo etoxilado sulfatado, fornecido no estado líquido, massa específica 1,002 g/cm³, teor de sólidos de 5% e cor castanho escuro e solúvel em água.

Quanto ao aditivo superplastificante, também é de natureza química à base de éter policarboxilato, fornecido no estado líquido, massa específica 1,087 g/cm³ e com uma dosagem de utilização de 0,16% da massa do cimento.

- CIMENTO

A caracterização do cimento Portland de Alta Resistência Inicial, CP-V-ARI, fora fornecida pelo fabricante, como mostra o quadro 01.

Quadro 02 - Caracterização do Cimento Portland

Ensaio	CP-V-ARI
Perda ao fogo	3,90%
Resíduos insolúveis	0,87%
Finura (0,075mm)	0,1%
Superfície específica	5330 cm ² /g
Resistência à compressão aos 28 dias	52,5 Mpa

Fonte: Fabricante Cimento Elizabeth (2020)

3.1.1 DOSAGEM CONCRETO CELULAR

A dosagem dos concretos utilizadas no estudo e apresentada no quadro 02, são elaboradas para os seguintes fatores: água/cimento (a/c) = 0,38; aditivo espumígeno/cimento (Ar/C) = 1,5, Super plastificante (SP) = 0,16% da massa de cimento.

Quadro 04 - Dosagem do concreto celular para produção de 1,0 m³

Percentual de Espuma	Cimento (kg)	Areia (kg)	Água (kg)	Volume de Espuma (m ³)
0%	686,81	1030,22	260,00	0,00
20%	617,35	926,23	234,59	0,20
30%	570,01	855,02	216,60	0,30
40%	450,28	675,42	171,11	0,40

Fonte: O autor (2020)

3.1.1 PRODUÇÃO DO CONCRETO CELULAR E CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Finalizada a caracterização dos componentes do concreto celular e definição de sua dosagem, deu-se início à etapa de produção e confecção dos corpos de prova prismáticos com dimensões de 4x4x16 cm, de acordo com a norma NBR 5738 (ABNT, 2016). Foram produzidos 4 corpos de prova, de acordo com a metodologia apresentada abaixo, para os seguintes percentuais de espuma 0%, 20%, 30% e 40%. Os mesmos são confeccionados de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005). Para tanto, fora utilizado uma argamassadeira planetária de 5,0 L e os traços indicados no quadro 02.

O processo de mistura para obtenção dos concretos obedeceu às seguintes etapas:

1. Colocar o cimento na cuba da argamassadeira;
2. Colocar a areia sobre o cimento;
3. Misturar por 30 s;
4. Colocar água (80%) na cuba da argamassadeira;
5. Deixar 30 s em repouso, misturar em velocidade lenta por 30 s, deixar em repouso por 60 s, misturar em velocidade rápida por 60 s;
6. Colocar o superplastificante com o restante da água;
7. Misturar em velocidade lenta por 30 s e em velocidade rápida por 90 s;
8. Misturar a água com o aditivo incorporador de ar por 180 s (concomitante com a mistura da pasta base);

9. Colocar a espuma formada sobre a pasta base;
10. Misturar em velocidade lenta por 180 s.

Após a moldagem dos corpos de prova, estes eram desformados após 48 horas e armazenados em tanques de cura, segundo a NBR 5738 (ABNT, 2016), até a data do rompimento aos 28 e 56 dias.

3.1.2 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NOS ESTADOS FRESCO E ENDURECIDO

As características do concreto no estado fresco são descritas no quadro 03, nele são apresentados o Teor de ar incorporado no estado fresco (Ai), densidade plástica (Dp), tempo de escoamento do funil de Marsh (Tf), diâmetro do espalhamento do ensaio de mini abatimento (Desp), a viscosidade plástica (Vp) e tensão de escoamento (Te).

Quadro 05 - Dados do concreto no estado fresco

Percentual de espuma	Ai (%)	Dp (kg/m ³)	Tf (s)	Desp (mm)	Vp (mPa.s)	Te (Pa)
0%	11,1	2016	26,8	319	1988	2,83
20%	22,34	1788	21,4	305	2554	1,73
30%	30,4	1596	19,4	300	970	2,09
40%	42,78	1322	19,6	316	789,9	1,55

Fonte: O autor (2020)

O Quadro 04 apresenta os dados das retrações aos 28 e 56 dias, a resistência à compressão aos 28 e 56 dias e a resistência à tração axial também aos 28 e 56 dias. Os ensaios foram realizados segundo a norma NBR 13279 (2005). Já o ensaio de retração fora realizado de acordo com a norma ASTM C490 (2017).

Quadro 06 - Dados de resistência dos corpos de prova prismáticos aos 28 e 56 dias

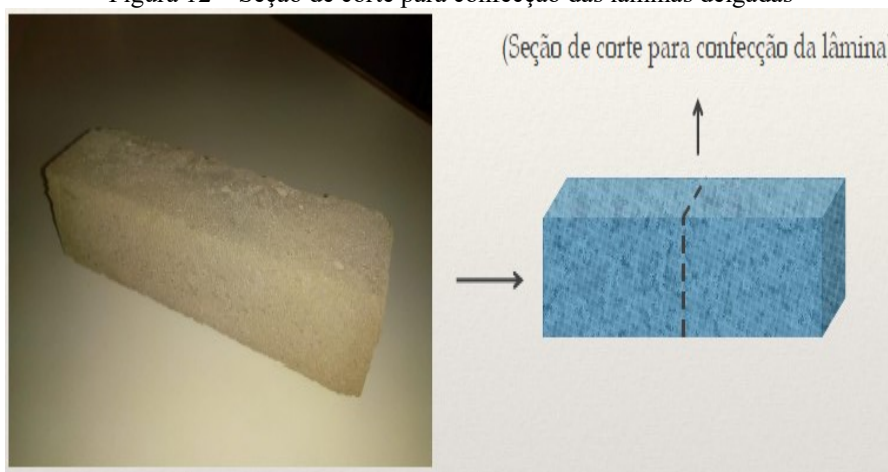
Percentual de espuma	Retração aos 28 dias (mm/m)	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Resistência à tração axial aos 28 dias (MPa)	Retração aos 56 dias (mm/m)	Resistência à compressão aos 56 dias (MPa)	Resistência à tração axial aos 56 dias (MPa)
0%	0,624	51,97	8,27	0,752	62,52	10,91
20%	0,685	35,00	6,10	0,853	40,65	8,05
30%	0,890	16,33	2,83	1,011	18,91	4,39
40%	0,976	7,15	2,68	1,020	9,08	4,27

Fonte: O autor (2020)

3.2 CONFECÇÃO E DETALHE DAS LÂMINAS PETROGRÁFICAS

A amostra foi enviada para o Laboratório de Laminação da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Primeiramente é retirada uma pequena peça da seção central do corpo, para garantir a representatividade das amostras e evitar o efeito parede produzido pela forma, as lâminas delgadas devem ser confeccionadas a partir de sua região central, evitando as regiões de fronteira com a forma, de acordo com a figura 37.

Figura 12 – Seção de corte para confecção das lâminas delgadas



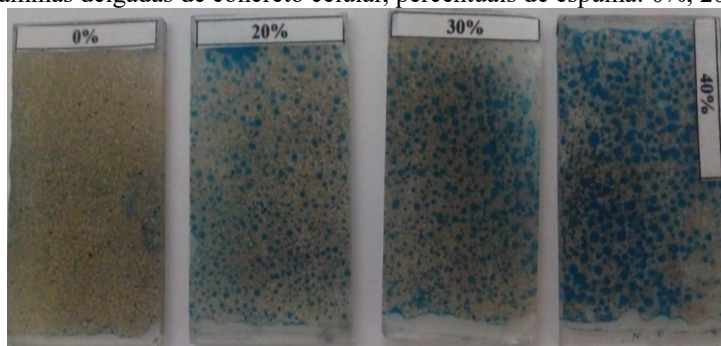
Fonte: O autor (2019)

As etapas para a confecção da lâmina podem ser resumidas, como:

1. Amostra de mão é identificada e orientada para o corte;
2. Aquecimento em estufa a 100°C por 2 horas;
3. A amostra é banhada em cola Epóxi Glass e em seguida seca em estufa a 60°C por 2 horas;
4. Em seguida é cortada em um prisma com dimensões de (4,5x2,5x3,0)cm;
5. Os prismas são impregnados com uma solução de cola Epoxi Glass + Corante azul, utilizando vácuo e em seguida novamente secas em estufa a 60°C por 2 horas;
6. Os prismas impregnados são polidos utilizando alumina em pó com granulometria de (180 – 600) μm ;
7. Os prismas são colados na lamínula de vidro utilizando a mesma cola (secagem natural – 24h);
8. Por último, realiza-se o corte milimétrico e o desbaste do prisma utilizando alumina em pó com granulometria de (180 – 1000) μm , até atingir a espessura de 30 μm .

A figura 38 apresenta o resultado final da confecção das lâminas de seção delgada:

Figura 13 – Lâminas delgadas de concreto celular, percentuais de espuma: 0%, 20%, 30% e 40%



Fonte: O autor (2020)

3.3 AS POSIÇÕES DO POLARIZADOR DO MICROSCÓPIO E A OBTENÇÃO DAS IMAGENS DIGITAIS

Para a determinação da porosidade é indispensável conhecer a direção de vibração dos polarizadores. A posição dos nicóis deve ser perpendicular uma ao outro. Para tanto, os nicóis devem ser cruzados sem a presença de uma lâmina na platina (ou mesa rotativa) e a área de visão da ocular precisa torna-se completamente escura, como descrito por Machado e Nardy (2016) na seção 2.2.2 deste trabalho.

Após a confecção das lâminas delgadas inicia-se a aquisição das imagens utilizando um microscópio óptico Petrográfico OPTICAM O600P, acompanhado de uma câmera digital de 18.3 Mega Pixel acoplada a um computador com o Software OPTHD 3.7. Foram utilizadas 198 imagens por lâmina, sendo estas imagens coloridas e com o tamanho de 4912 x 3684 pixels. A objetiva utilizada fora a de 5X, com 66 imagens sem nicol cruzado em formato TFT, 66 imagens com nicol cruzado em formato TFT e 66 imagens com nicol cruzado em formato JPEG, conforme figura 39.

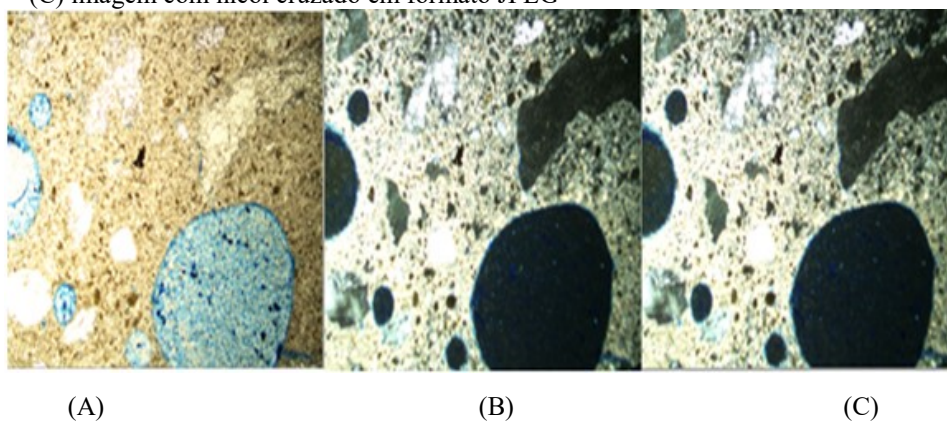
Figura 14 – Segmentação da lâmina delgada em seções e sequência de leitura

56	57	58	59	60	61	▶	62	63	64	65	66
55	54	53	52	51	50	◀	49	48	47	46	45
34	35	36	37	38	39	▶	40	41	42	43	44
33	32	31	30	29	28	◀	27	26	25	24	23
12	13	14	15	16	17	▶	18	19	20	21	22
11	10	9	8	7	6	◀	5	4	3	2	1

Fonte: O autor (2020)

A escolha da lente objetiva utilizada neste trabalho foi realizada observando-se a necessidade de a imagem demonstrar uma área da lâmina que revele uma quantidade suficiente de informações, que por sua vez caracterizem o meio poroso, possibilitando a visualização da microestrutura e da binarização da imagem. Exemplificativamente, um aumento muito grande possuiria uma quantidade escassa de poros e de sólidos, o que decorreria em uma função de autocorrelação (correlação cruzada de um sinal ou parâmetro com ele próprio) e uma distribuição de tamanhos de poros diferentes da real apresentada pela lâmina, como mostra a figura 40:

Figura 40 – (A) Imagem sem nicol cruzado em formato TFT; (B) Imagem com nicol cruzado em formato TFT e (C) imagem com nicol cruzado em formato JPEG



Fonte: O autor (2020)

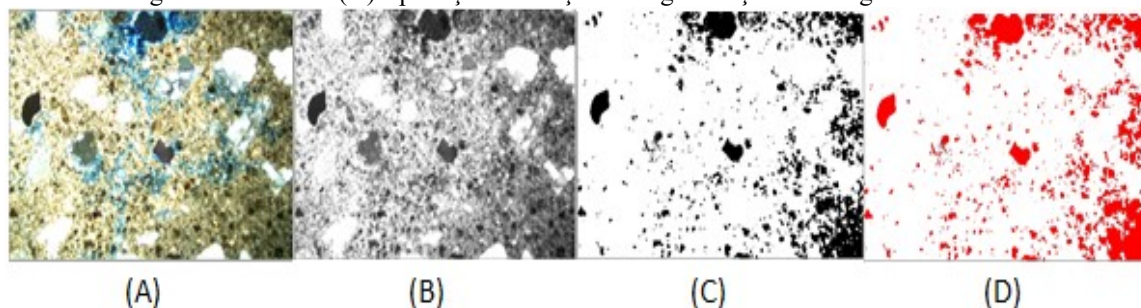
3.4 PROCESSO DE SEGMENTAÇÃO DAS IMAGENS PARA DETECÇÃO DA POROSIDADE

Com as imagens, foi dado início ao tratamento através da utilização de técnicas PADI. O Software OPTHD 3.7 foi utilizado para realizar as análises das amostras segundo a metodologia PDI. O mesmo possui diversas técnicas de segmentação e contagem, tais como: Watersshed (W); OTSU Dark; OTSU Bright; RGB Histogram; HSV Histogram; Split Objects e Count Result. De acordo com a imagem obtida, seleciona-se a técnica que mais se adequava ao caso de estudo.

A primeira etapa para utilização do método consiste na segmentação da imagem, que é realizada pela utilização dos nicóis cruzados. Após essa etapa, realizou-se a conversão da imagem para um padrão de escala de cinza com tons variando de 0 a 255 tons, em que 0 é igual ao preto total e 255 é o branco total como caracterizado por Filho e Neto (1999). Em seguida, realizou-se a binarização da imagem e por fim, aplicou-se a função de segmentação e

contagem Watershed. A figura 41 apresenta os passos do processo de tratamento da imagem para a obtenção da porosidade da amostra:

Figura 41 – (A) Imagem sem nico cruzado em formato TFT; (B) Imagem em escala de tons de cinza; (C) imagem binarizada e (D) Aplicação da função de segmentação e contagem Watershed.



Fonte: O autor (2020)

O próprio software, através da função “Count Result”, realiza a contagem dos resultados. A unidade de resultado estatístico é a mesma que o usuário seleciona na unidade de exibição da imagem, conforme figura 42. Para saber o percentual de poros da lâmina é preciso calcular através de uma media aritmética simples realizada sobre as 66 imagens analisadas.

Figura 42 – Exemplo de aplicação do método OTSU Brigh a imagem da (B) da figura 17

Index	Center	Radius	Area	Perimeter
1	(108.82, 96.30)	0.54	0.25	2.41
2	(51.32, 95.94)	0.98	0.75	4.11
3	(119.61, 95.57)	3.32	12.82	20.68
4	(60.67, 94.36)	6.18	59.16	41.91
5	(37.57, 90.30)	1.42	0.25	5.69
6	(29.81, 89.42)	0.57	0.31	2.62
7	(66.49, 85.19)	0.57	0.06	2.62
8	(25.06, 89.02)	5.78	76.52	45.86
9	(82.24, 93.40)	12.06	173.82	101.48
10	(15.70, 84.66)	4.50	1.62	20.56
11	(13.58, 82.36)	6.21	53.00	44.11
12	(12.70, 76.54)	0.73	0.62	3.41
13	(41.45, 80.95)	6.13	60.03	52.35
14	(2.65, 78.66)	5.95	64.70	40.29
15	(14.29, 72.84)	0.57	0.19	2.62
16	(83.97, 76.58)	6.20	66.13	55.76
17	(105.80, 81.50)	16.57	309.87	189.77
18	(17.99, 70.02)	7.26	82.86	62.48
19	(8.82, 65.61)	1.54	0.19	6.90

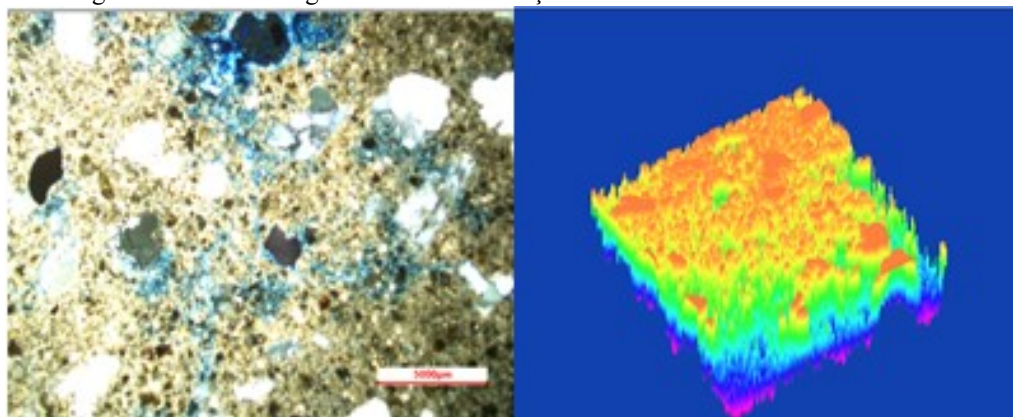
Fonte: OPTICAM-Manual de segmentação e contagem Software OPTHD 3.7

Após a obtenção dos 66 valores da porosidade de cada imagem por lâmina, realiza-se uma avaliação dos dados através do estudo do coeficiente de variação (CV) dos mesmos. Tal análise fornecerá uma estimativa sobre a homogeneidade ou heterogeneidade da distribuição de poros nas lâminas.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Durante a execução da técnica de análise petrográfica observou-se que a impregnação do corante só penetra em mesoporos e macroporos, não sendo capaz de penetrar na microporosidade e ultramicroporosidade de pasta. Como observado na imagem tridimensional da figura 43, a técnica de microscopia petrográfica consegue detectar a microporosidade de pasta. Outros estudos devem ser realizados para investigar por qual motivo a impregnação da resina epóxi não penetra na porosidade de pasta.

Figura 43 – Imagem tridimensional gerada através da função Surface Plot do Software OPTICAM OPTHD 3.7

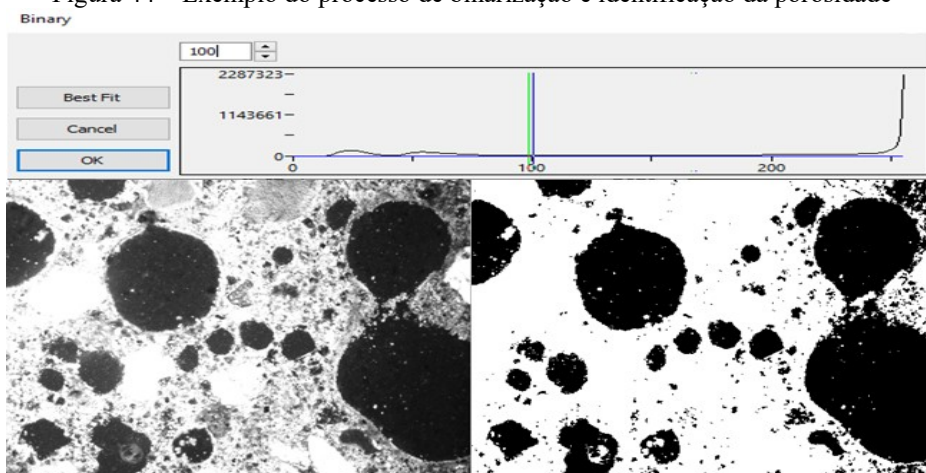


Fonte: Autor (2021)

Para contornar o problema da impregnação, realizou-se um tratamento prévio das imagens. Como descrito no item 3.2.5 da metodologia, foram utilizadas 4 lâminas, cada uma correspondente a um corpo de prova com os seguintes percentuais de espuma: 0%, 20%, 30% e 40%. As mesmas foram fotografadas e processadas utilizando a função de transformação para escala de cinza, binarização e por fim a metodologia de segmentação e contagem Watershed. Ver apêndices A, B, C, e D.

O método Watershed necessita de forte interação com o analista para manter a qualidade do processo de segmentação. A interação do usuário é fundamental para essa análise e para escolha dos valores de corte e verificação da qualidade da segmentação. Neste caso o valor limite para o processo de binarização utilizado no trabalho é 100. As diversas regiões da imagem recebe um rótulo indicando onde os voxels (representa um valor de um grid regular em um espaço tridimensional), são segmentados e recebem um dos dois rótulos de argamassa (branco) ou poro (preto), como mostra a figura 44:

Figura 44 – Exemplo do processo de binarização e identificação da porosidade



Fonte: Autor (2021)

Assim, a formação do conceito Watershed pode ser ilustrada através da simulação do processo de imersão. Em cada valor local mínimo da superfície, perfurando um furo, todo o modelo lentamente imerso na água se expande para fora da bacia em duas bacias na construção de barragens de confluência que formam a bacia hidrográfica. Watershed é a escolha adequada para fundos de objetos relativamente simples ou para objetos com uma diferença relativamente grande entre as imagens de fundo, ao invés de uma aplicação mais complexa.

A análise das lâminas apresentaram os seguintes resultados:

- 1ª Lâmina (0%): A primeira lâmina representativa da amostra com percentual de 0% de volume de espuma obteve uma porosidade média de 19,02%, como apresentado pelo quadro 05. O apêndice A apresenta as imagens da lâmina de 0%.

Quadro 05 - Valores da porosidade obtidos da análise das 66 imagens da lâmina de 0%

1	16,09%	12	26,10%	23	9,80%	34	11,40%	45	9,50%	56	15,41%
2	27,37%	13	10,55%	24	24,34%	35	10,67%	46	46,61%	57	10,47%
3	6,85%	14	11,67%	25	20,16%	36	8,52%	47	17,49%	58	19,85%
4	49,82%	15	22,94%	26	25,64%	37	8,76%	48	8,65%	59	40,62%
5	16,68%	16	25,32%	27	25,29%	38	8,88%	49	11,85%	60	22,26%
6	13,76%	17	14,76%	28	60,30%	39	12,34%	50	10,58%	61	40,97%
7	17,19%	18	9,08%	29	8,59%	40	13,25%	51	12,02%	62	28,23%
8	10,22%	19	10,52%	30	13,14%	41	6,98%	52	15,18%	63	12,94%
9	19,94%	20	20,18%	31	74,66%	42	24,78%	53	7,52%	64	10,21%
10	39,14%	21	10,17%	32	21,61%	43	28,12%	54	12,28%	65	18,13%
11	9,12%	22	30,68%	33	19,22%	44	6,87%	55	11,94%	66	10,99%
Porosidade média										19,02%	

Fonte: Autor (2021)

- 2ª Lâmina (20%): A segunda lâmina representativa da amostra com percentual de 20% de volume de espuma obteve uma porosidade média de 28,41%, como apresentado pelo Quadro 06. O apêndice B apresenta as imagens da lâmina de 20%.

Quadro 06 - Valores da porosidade obtidos da análise das 66 imagens da lâmina de 20%

1	24,53%	12	21,14%	23	33,52%	34	11,40%	45	29,00%	56	33,23%
2	26,36%	13	22,72%	24	29,46%	35	26,27%	46	25,45%	57	20,40%
3	24,66%	14	27,29%	25	25,19%	36	46,87%	47	33,17%	58	34,05%
4	22,97%	15	15,46%	26	31,24%	37	22,98%	48	44,18%	59	20,49%
5	19,25%	16	29,04%	27	29,06%	38	14,15%	49	52,40%	60	45,90%
6	44,04%	17	9,97%	28	31,25%	39	17,35%	50	26,53%	61	11,52%
7	19,55%	18	22,67%	29	47,51%	40	38,61%	51	20,22%	62	19,22%
8	22,87%	19	25,95%	30	19,51%	41	51,82%	52	33,31%	63	51,39%
9	25,04%	20	24,56%	31	32,45%	42	29,88%	53	17,94%	64	14,44%
10	19,79%	21	25,34%	32	14,68%	43	37,31%	54	26,18%	65	36,02%
11	25,61%	22	27,20%	33	39,34%	44	49,01%	55	42,41%	66	32,46%
Porosidade média											28,41%

Fonte: Autor (2021)

- 3ª Lâmina (30%): A terceira lâmina representativa da amostra com percentual de 30% de volume de espuma obteve uma porosidade média de 29,12%, como apresentado pelo quadro 07. O apêndice C apresenta as imagens da lâmina de 30%.

Quadro 07 - Valores da porosidade obtidos da análise das 66 imagens da lâmina de 30%

1	38,98%	12	24,79%	23	38,04%	34	28,34%	45	19,20%	56	38,40%
2	35,53%	13	19,70%	24	23,30%	35	23,27%	46	34,66%	57	23,03%
3	16,49%	14	23,97%	25	36,57%	36	26,14%	47	28,80%	58	29,84%
4	32,27%	15	21,93%	26	24,72%	37	35,17%	48	34,25%	59	29,68%
5	34,75%	16	27,05%	27	37,78%	38	23,30%	49	24,99%	60	27,99%
6	22,45%	17	41,51%	28	20,21%	39	28,84%	50	33,68%	61	32,95%
7	31,86%	18	37,08%	29	23,92%	40	16,55%	51	22,24%	62	23,43%
8	39,01%	19	23,87%	30	30,11%	41	37,64%	52	26,31%	63	25,22%
9	43,03%	20	29,98%	31	34,65%	42	22,82%	53	27,94%	64	45,51%
10	19,60%	21	37,76%	32	23,34%	43	30,69%	54	22,88%	65	29,33%
11	32,09%	22	25,02%	33	33,18%	44	19,56%	55	31,29%	66	33,43%
Porosidade média											29,12%

Fonte: Autor (2021)

- 4ª Lâmina (40%): A quarta e última lâmina representativa da amostra com percentual de 40% de volume de espuma obteve uma porosidade média de 41,00%, como apresentado pelo quadro 08. O apêndice D apresenta as imagens da lâmina de 40%.

Quadro 08 - Valores da porosidade obtidos da análise das 66 imagens da lâmina de 40%

1	57,66%	12	43,00%	23	39,95%	34	32,58%	45	60,35%	56	33,14%
2	46,47%	13	50,33%	24	53,34%	35	29,39%	46	41,02%	57	18,03%
3	41,75%	14	36,86%	25	56,56%	36	29,22%	47	34,25%	58	52,37%
4	45,21%	15	25,19%	26	33,78%	37	50,21%	48	41,30%	59	44,63%
5	41,31%	16	23,78%	27	54,97%	38	32,72%	49	39,78%	60	36,32%
6	40,65%	17	37,17%	28	39,22%	39	34,93%	50	37,01%	61	50,01%
7	19,32%	18	47,41%	29	33,31%	40	43,46%	51	41,77%	62	42,47%
8	50,84%	19	57,30%	30	42,48%	41	35,90%	52	52,02%	63	44,26%
9	53,15%	20	44,84%	31	49,88%	42	66,26%	53	36,65%	64	44,12%
10	26,46%	21	26,17%	32	33,40%	43	34,02%	54	54,77%	65	22,52%
11	56,09%	22	33,13%	33	41,79%	44	50,95%	55	41,64%	66	15,16%
Porosidade média										41,00%	

Fonte: Autor (2021)

O quadro 09 apresenta o coeficiente de variação dos resultados das quatro lâminas analisadas. O coeficiente de variação indica a precisão de um experimento ou da dispersão de um conjunto de dados, podendo ser utilizado para caracterizar a homogeneidade ou heterogeneidade do conjunto. O Coeficiente de variação (CV) é definido como o quociente entre desvio padrão (S) e a média (X), multiplicado por 100%. Logo, o coeficiente de variação nada mais é do que o desvio padrão em porcentagem da média.

Quadro 09 - Utilização do coeficiente de variação (CV) para análise da homogeneidade ou heterogeneidade da distribuição dos poros

Percentual de espuma	Porosidade média (X)	Desvio padrão (S)	Coeficiente de variação (CV)
0%	19,02%	13,12%	68,99%
20%	28,41%	10,48%	36,89%
30%	29,12%	6,80%	23,35%
40%	41,00%	10,80%	26,95%

Fonte: Autor (2021)

O coeficiente de variação pode ser interpretado como uma medida de homogeneidade ou heterogeneidade dos dados, quanto mais próximo de 0% mais homogêneo são os dados e quanto mais próximo de 100% mais heterogêneos são os dados. A questão da homogeneidade ou heterogeneidade pode ser associada à distribuição dos poros na lâmina, ou seja, se a distribuição dos poros é homogênea ou heterogênea, quanto mais próxima de 0% mais homogênea é a distribuição de poros da amostra, da mesma forma quanto mais próximo de 100% mais heterogênea é a distribuição de poros da amostra.

Outro fato a ser considerado é que uma quantidade maior de lâminas por corpo de prova poderá aumentar a precisão do valor estatístico da porosidade média calculada. A estimativa desse erro é básica para verificar se as diferenças observadas nos dados são estatisticamente diferentes. Outro motivo se refere ao fato de que, se a média de uma amostra for usada para estimar o efeito de um fator no experimento, a replicação permite a obtenção de uma estimativa mais precisa desse efeito.

Valores menores que o percentual de espuma inseridos no corpo de prova podem ainda ser evidências da instabilidade de espuma, tendo em vista que o volume total da amostra é uma soma dos volumes absolutos da fase sólida (argamassa), mais o volume de água e de ar aprisionado. Outro fator pode ser a qualidade da imagem ou um erro do operador quanto à interpretação do histograma do processo de binarização.

Uma análise a olho nu da figura 38 é possível constatar a diferença entre as porosidades das lâminas, com destaque para a diferença entre as lâminas de 20% e 30%. De acordo com os resultados apresentados nos quadros 06 e 07, a lâmina de 30% possui uma porosidade muito próxima a de 20% e inferior ao percentual de espuma da mesma, o valor da porosidade encontrada para a lâmina de 30% pode ter sofrido a influência do baixo número de lâminas, pois como dito nos parágrafos anteriores quanto maior o número de lâminas por corpo de prova melhor será o resultado estatístico.

Os ensaios de resistência dos corpos de prova à compressão e tração axial aos 28 e 56 dias, corrobora a teoria da lei de Abrams, pois quanto maior a porosidade menor será a resistência (NEVILLE; BROOKS, 2013), conforme quadro 10.

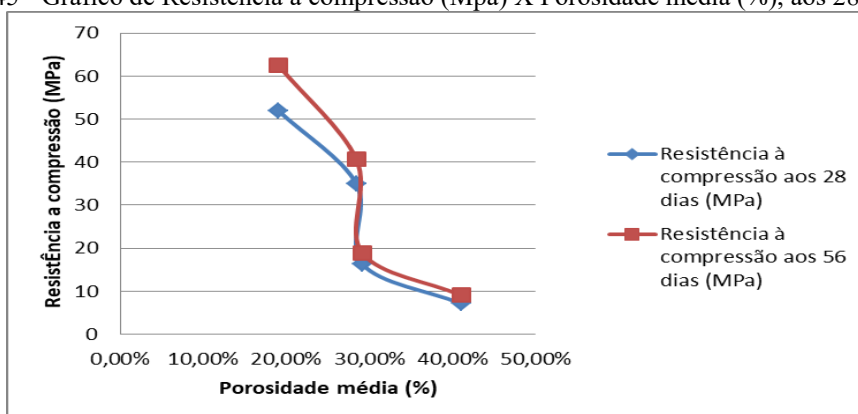
Quadro 10 - Relação entre a porosidade, resistência a compressão e tração axial aos 28 e 56 dias

Percentual de espuma	Média da porosidade	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Resistência à compressão aos 56 dias (MPa)	Resistência à tração axial aos 28 dias (MPa)	Resistência à tração axial aos 56 dias (MPa)
0%	19,02%	51,97	62,52	8,27	10,91
20%	28,41%	35,00	40,65	6,1	8,05
30%	29,12%	16,33	18,91	2,83	4,39
40%	41,00%	7,15	9,08	2,68	4,27

Fonte: Autor (2021)

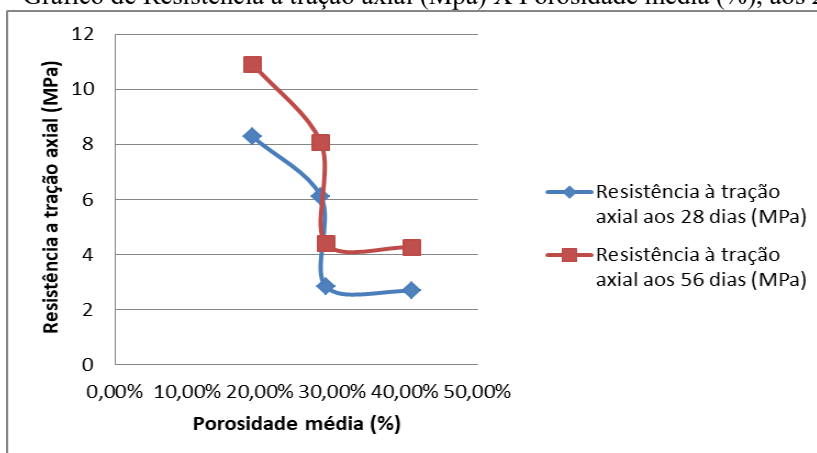
Os gráficos 45 e 46 demonstram os respectivos resultados e a tendência de comportamento proporcional entre os gráficos de resistência à compressão e à tração axial.

Figura 45 - Gráfico de Resistência à compressão (Mpa) X Porosidade média (%), aos 28 e 56 dias



Fonte: Autor (2021)

Figura 46 - Gráfico de Resistência à tração axial (Mpa) X Porosidade média (%), aos 28 e 56 dias



Fonte: Autor (2021)

Os ensaios de retração demonstraram que quanto maior a porosidade, maior será a retração, como exposto no quadro 11:

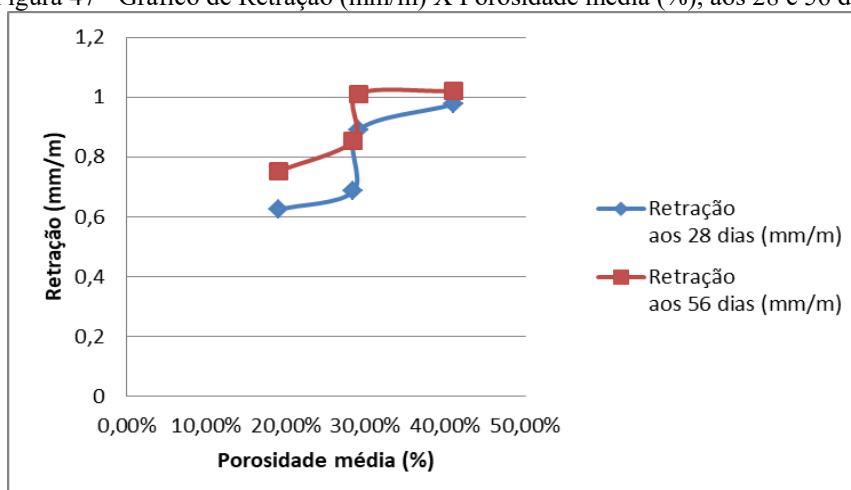
Quadro 11 – Relação entre a porosidade e a retração aos 28 e 56 dias

Percentual de espuma	Média da porosidade	Retração aos 28 dias (mm/m)	Retração aos 56 dias (mm/m)
0%	19,02%	0,624	0,752
20%	28,41%	0,685	0,853
30%	29,12%	0,89	1,011
40%	41,00%	0,976	1,02

Fonte: Autor (2021)

Tal retração pode estar associada à “retração hidráulica ou por secagem”. A mesma se caracteriza por uma diminuição do seu volume, decorrente da perda de água do material quando ele já se apresenta em estado sólido. Essa perda acontece em razão de, mesmo na fase de hidratação, a água ainda não estar completamente ligada ao concreto através dos fenômenos físico-químicos conhecidos. Ver gráfico 47:

Figura 47 - Gráfico de Retração (mm/m) X Porosidade média (%), aos 28 e 56 dias



Fonte: Autor (2021)

O quadro 12 demonstra a relação entre a média da porosidade obtida através da técnica de microscopia óptica e densidade plástica do concreto no estado fresco. Com base nos dados apresentados, pode-se notar que o resultado encontrado neste trabalho condiz com o que é esperado do efeito da adição de espuma no concreto, pois à medida que se aumenta o teor de espuma, ocorre uma diminuição da densidade plástica do concreto no estado fresco. Uma das grandes vantagens do concreto celular é a sua baixa densidade, pois tal característica é desejável para algumas aplicações.

Quadro 12 – Relação entre o percentual de espuma e o seu peso específico

Percentual de espuma	Média da porosidade	Dp (kg/m ³)
0%	19,02%	2016
20%	28,41%	1788
30%	29,12%	1596
40%	41,00%	1322

Fonte: Autor (2021)

Acreditasse que as medida de porosidade feita nas quatro lâminas tenham uma boa relação estatística com a porosidade, devido às muitas medidas executadas e o arranjo das mesmas. Dessa forma, os resultados obtidos corroboram com a viabilidade da utilização da técnica de Microscopia Óptica Petrográfica para o estudo da porosidade do concreto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A microscopia petrográfica de luz transmitida ou a de luz refletida na investigação de minerais, rochas, minério e de outros materiais sintéticos ou compósitos permanece um dos métodos clássicos e, até o momento, imprescindível ao estudo dessas substâncias, revelando possuir uma grande potencial para investigação das propriedades dos poros do concreto, tais como: formato do poro, distribuição, diâmetro, perímetro, área e o índice de porosidade.

Dentre elas, destaca-se a microscopia de luz polarizada, tratando-se de uma técnica não destrutiva e confiável na determinação de substâncias sólidas amorfas ou cristalinas. Possui uma resolução espacial relativamente alta e, ao proporcionar o estudo das fases minerais de acordo com as relações de entrelaçamento de estrutura, trama, associação e relações de fases, fornece dados importantes sobre a porosidade do concreto.

As deficiências da técnica de microscopia de luz transmitida são óbvias quando é necessário obter a constituição química de soluções sólidas complexas ou quando o material é muito fino para determinação de uma única fase. Portanto, é necessária a utilização de técnicas PADI para auxiliar no estudo e caracterização da amostra. São várias as ferramentas de segmentação e contagem. A técnica Watershed, utilizada neste trabalho, demonstrou ser uma escolha adequada e de fácil utilização.

A técnica também encontrou dificuldades na detecção da microporosidade e ultramicroporosidade de pasta. Para contornar tais dificuldades, as transformações da imagem em escala de cinza e, posteriormente, sua binarização mostraram-se eficazes para determinação da porosidade. Os resultados da resistência à compressão, tração axial e retração condizem com os conceitos estabelecidos pela lei de Abrams.

Outros estudos devem ser realizados para investigar a instabilidade das bolhas dos corpos de prova com valores de porosidade menores que o teor de espuma inseridos, além de mais investigações sobre a etapa de impregnação para identificação do motivo da não impregnação dos microporos e ultramicroporos de pasta. O estudo também identificou a necessidade de aumentar o número de lâminas analisadas por corpo de prova para melhorar o valor estatístico da porosidade.

O tema abordado neste trabalho já é bastante desenvolvido ao redor do mundo, contando com uma vasta bibliografia e normas. No Brasil, a microscopia petrográfica é consolidada na área de geologia, porém ainda pouco desenvolvida na investigação do concreto. A Ciência dos Materiais deve, dependendo de seus objetivos e dos materiais a ser

investigados, combinar estudos de microscopia de luz transmitida com métodos não destrutivos complementares de alta resolução.

Como sugestão de trabalhos futuros, tem-se:

- Avaliar a influência da estabilidade de bolhas na porosidade do concreto;
- Avaliar a influência da preparação das amostras nos resultados das medidas da porosidade do concreto;
- Validar a técnica de Microscopia Petrográfica para a avaliação da porosidade do concreto através da comparação dos resultados obtidos com outras técnicas;

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C457/C457M-16:** Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete. United States, 2016.

_____. ASTM C490: Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete. United States, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30:** Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios, Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa aparente, Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 5738:** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7211:** Agregados para concreto – Especificação (Módulo de finura), Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 12645:** Execução de paredes de concreto celular espumoso moldadas no local. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 13279:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão, Rio de Janeiro, 2001.

AUDIGIER, R. M. M. **Segmentação e Visualização Tridimensional Interativa de Imagens de Ressonância Magnética.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Estadual de Campinas, 2004.

BARBOSA, V. C., BREITSCHAFT, A. M. S. **Um aparato experimental para o estudo do princípio de Arquimedes.** Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 28, p. 115 – 122, 2006.

BERRYMAN, J. G.; WANG, H. F. **Elastic wave propagation and attenuation in a double-porosity dual-permeability medium**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 37, p. 63-78, jan (2000).

BLOG DE EDUCAÇÃO (2019). **Experimento do disco de Newton**. Disponível em: <<https://brainly.com.br/tarefa/22818782>>. Acessado em 14/01/2020.

CASTRO, A. A. DE. **Avaliação de propriedades em altas temperaturas de pelotas para alto-forno**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais – REDEMAT: Rede Temática em Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia dos materiais uma Introdução**. 7° ed. Brasil: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2007. 327 p.

CASTELO, F. W. L. **Estimativa de porosidade em lâminas petrográficas através da morfologia matemática binária**. Dissertação (Mestrado em Geofísica), Universidade Federal do Pará, 2013.

DEDAVID, B. A., GOMES, C. I., MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: Aplicações e preparações de amostras: Materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. 1° ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

DOMINGUES, D. L. P. **Caracterização geológica e geomecânica de Travertinos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2011.

DUARTE, J. P. **Caracterização da porosidade e permeabilidade em arenitos da formação Monte Alegre, carbonífero da Bacia Amazonas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

FACON, J. A. **Morfologia Matemática e suas Aplicações em Processamento de Imagens**. VII Workshop de Visão Computacional, 2011.

FILHO, O.M., NETO, H. V. **Processamento Digital de Imagens**. 1° ed. Brasil: Basport, 1999.

FRENCH, W. J. **Concrete Petrography: a review**. Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 24 (1), p. 17-48, 1991.

FUJIMORI, S. **Introdução ao uso do microscópio petrográfico**. 1° ed. Brasil: Centro Editorial e Didático da Universidade Federal da Bahia, 1985.

FUNDAÇÃO EDUCACIONAL. **Espectro eletromagnético**. Disponível em: <<https://pt.khanacademy.org/science/physics/light-waves/introduction-to-light-waves/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>>. Acessado em 14/01/2020.

IGNACIO, J. S. **Processamento e análise digital de imagens em estudos da cinética de recristalização de ligas Al-Mg-X**. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2013.

JOHN, D. A., POOLE, A. B., SIMS, I. **Concrete Petrography: A handbook of investigative techniques**. United States: John Wiley & Sons, Inc., 1998.

LOPES A.P., FIORI A.P., REIS NETO J.M., MARCHESE C., VASCONCELLOS E.M.G., Trzaskos B., Onishi C.T., Pinto-Coelho C.V., Secchi R., Silva G.F. **Análise tridimensional de rochas por meio de microtomografia computadorizada de raios X integrada a petrografia**. UNESP, Geociências, São Paulo, v. 31, n. 1, p. 129-142. 2012.

LOWELL, S., SHIELDS, J. E., **Powerd Surface Area and Porosity**. 3° ed. Holanda: Springer Science e Business Media, B. V., 1991.

MACHADO, F. B., NARDY, A. J. R. **Mineralogia Óptica**. 1° ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

MANNHEIMER, W. A. **Microscopia dos materiais: Uma introdução**. 1° ed. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais, 2002.

MEDEIROS, W. B. B. **Estudo da permeabilidade de meios porosos com solução polimérica**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 2° ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MOHALLEN, D. F. **Avaliação do coeficiente de variação como medida da precisão em experimentos com frangos de corte**. Dissertação (Mestrado em Ciências Veterinária), Universidade Federal de Uberlândia, 2008.

NEVILLE, A. M., BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2° ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2° ed. Brasil: PINI, 1997. 285 p.

NÚÑEZ, V. R. G. **Deslocamento de óleo em um meio poroso através de injeção de emulsões óleo-em-água: Análise de fluxo linear**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia: Microestrutura e Propriedade**. 1° ed. Brasil. Hemus Livraria, Distribuidora e Editora S.A, 2000.

PALOMBO, L. **A microtomografia de raios X e a porosimetria por intrusão de mercúrio na determinação de porosidade e densidade de rochas reservatório.** Dissertação (Mestrado em Ciências), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2017.

RAITH, M. M., RAASE, P., REINHARDT, J. **Guia para a microscopia de minerais em lâminas delgadas (Tradução para o português: Maria do Carmo Gastal & Márcia Elisa B. Gomes).** 1º ed. e-Book ISBN 978-3-00-046279-5, 2014.

REIS NETO, J.M.; FIORI, A.P.; LOPES, A.P.; MARCHESE, C.; PINTO-COELHO, C.V.; VASCONCELLOS; E.M.G., SILVA G.F.; SECCHI, R.. **A microtomografia computadorizada de raios x integrada à petrografia no estudo tridimensional de porosidade em rochas.** Revista Brasileira de Geociências, volume 41 (3), p. 498-508, 2011.

ROSA, M. **Segmentação de Grãos de Hematita em Amostras de Minério de Ferro por Análise de Imagens de Luz Polarizada.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

SANTOS, A. V., VIANA, M. M., MEDEIROS, F. H. A., MOHALLEM, N. D. S. **O incrível mundo dos materiais porosos – Características, propriedades e aplicações.** Revista Química e Sociedade, vol. 38, Nº 1, p. 4 – 11, 2016.

SILVA, V. C. DA. **Medida de porosidade em SiC através do processamento digital de imagens.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SITE EDUCACIONAL. **Incidência de uma onda sonora em uma superfície qualquer.** Disponível em: <<https://www.emaze.com/@AOLWLOOTC>>. Acessado em 08/07/2020.

SOUZA, S. T. **Microscopias de varredura por sondas aplicadas a estudos de amostras biológicas, vítreas e cerâmicas.** Tese (Doutorado em Ciências), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2014.

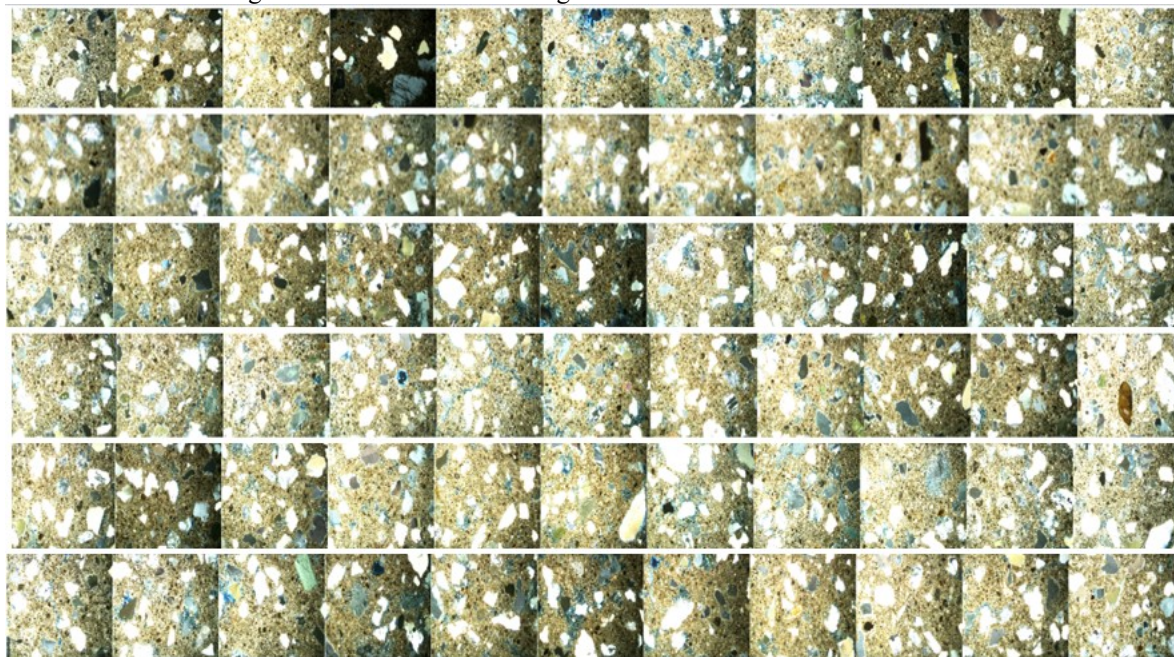
WINGE, M. et. al. 2001. **Glossário geológico ilustrado.** Disponível em: <http://sigep.cprm.gov.br/glossario/>>. Acessado em 16/05/2020.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física IV: ótica e física moderna.** 14º ed. Brasil: Pearson Universidades, 2015.

APÊNDICES

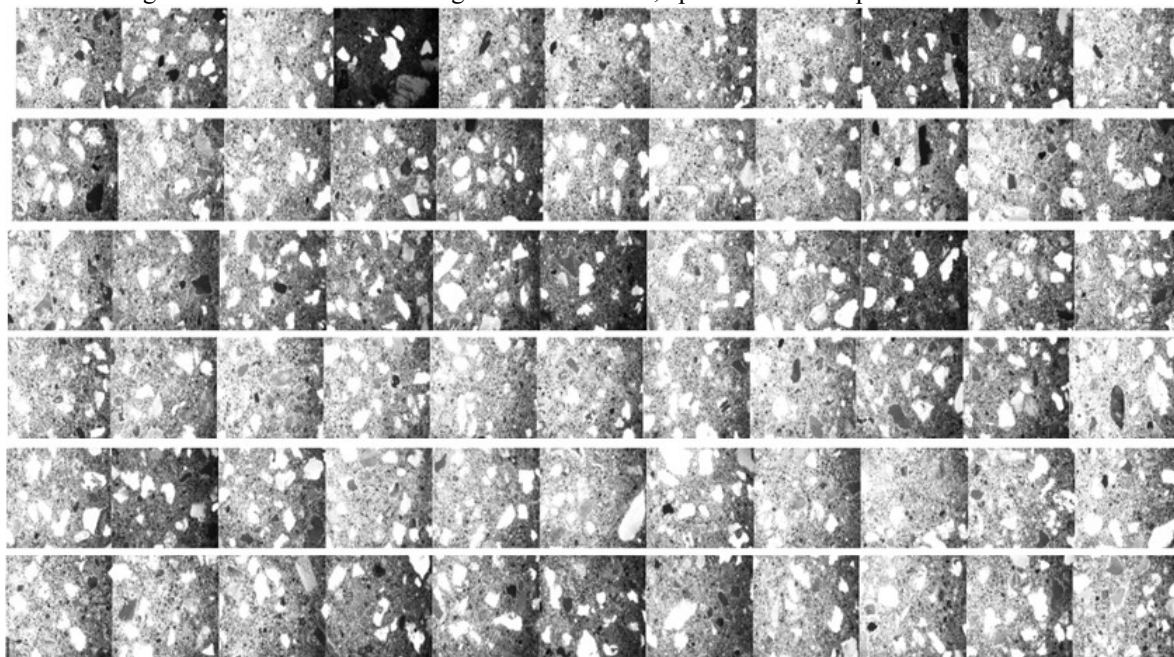
APÊNDICE A – IMAGENS DA LÂMINA PETROGRÁFICA DO CORPO DE PROVA COM 0% DE VOLUME DE ESPUMA.

Figura 48 – Malha com 66 imagens da lâmina 0% com nicol cruzado



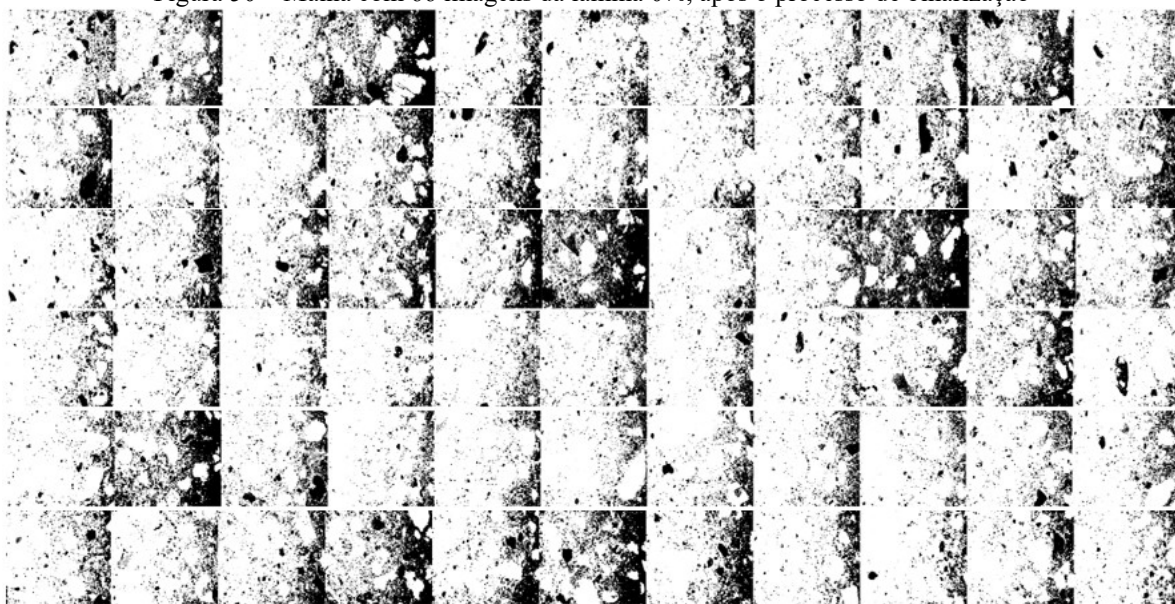
Fonte: Autor (2021)

Figura 49 – Malha com 66 imagens da lâmina 0%, após a conversão para escala de cinza



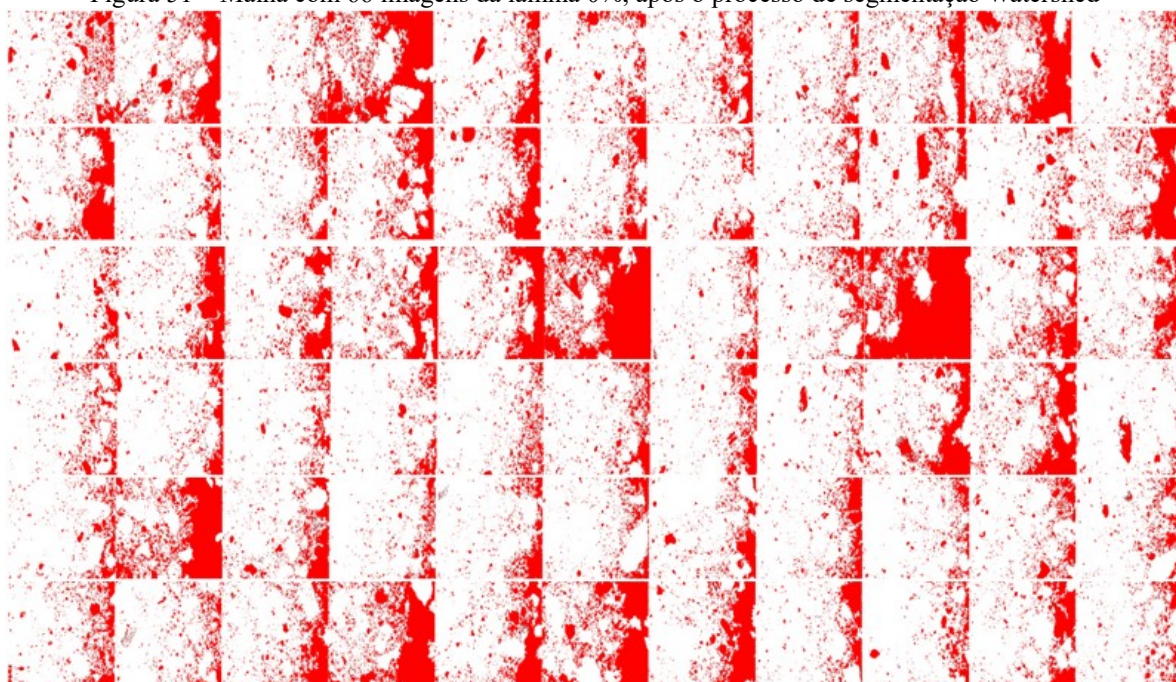
Fonte: Autor (2021)

Figura 50 – Malha com 66 imagens da lâmina 0%, após o processo de binarização



Fonte: Autor (2021)

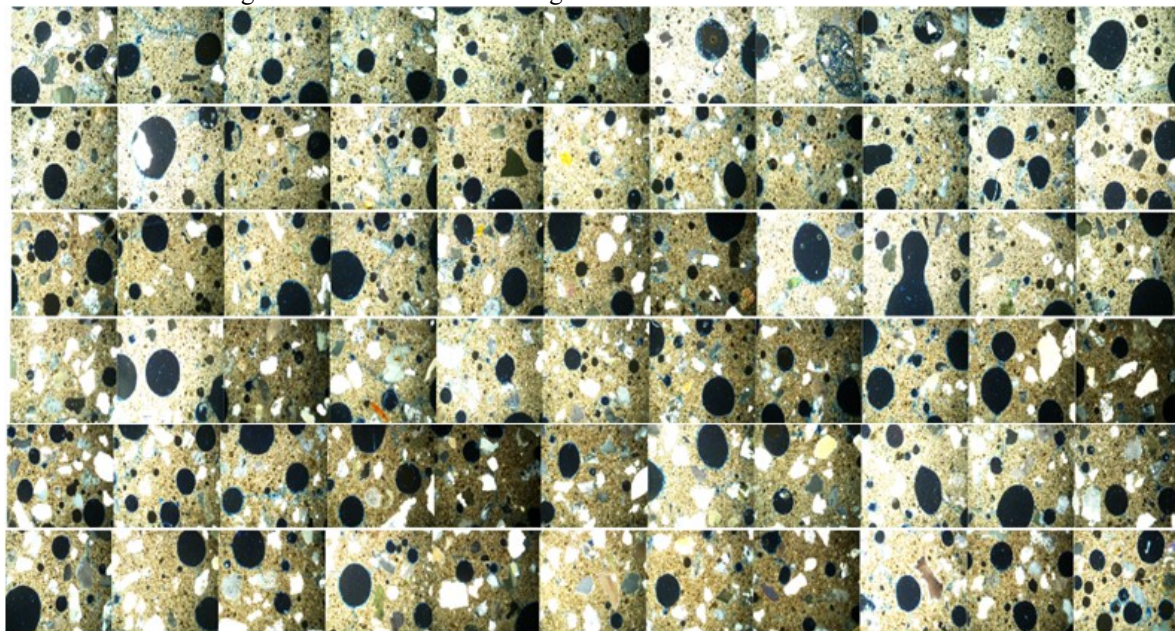
Figura 51 – Malha com 66 imagens da lâmina 0%, após o processo de segmentação Watershed



Fonte: Autor (2021)

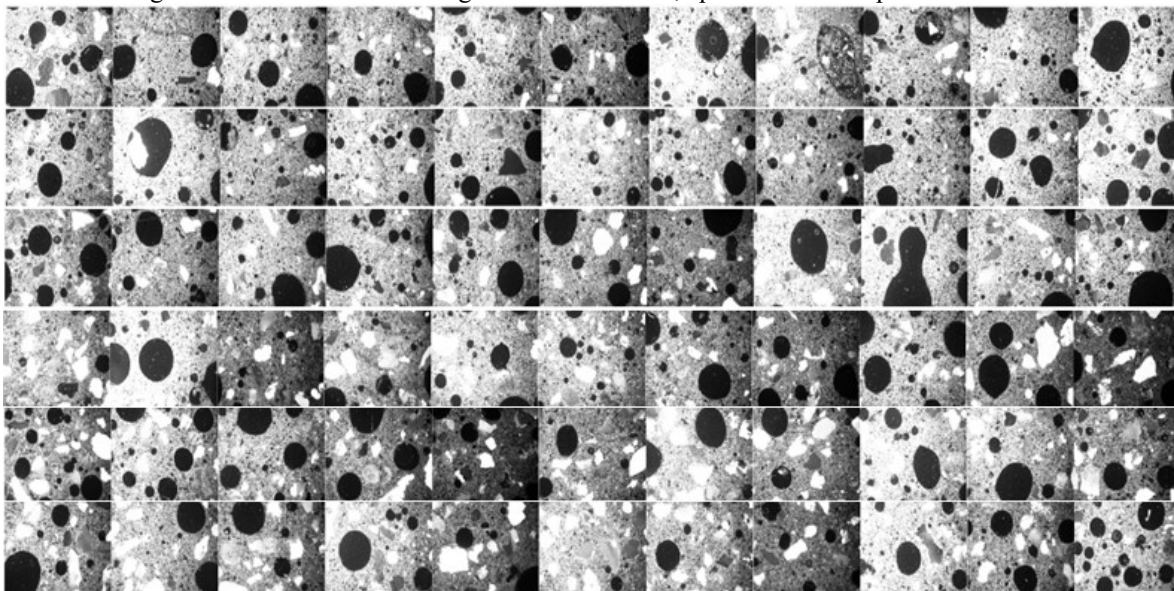
APÊNDICE B – IMAGENS DA LÂMINA PETROGRÁFICA DO CORPO DE PROVA COM 20% DE VOLUME DE ESPUMA.

Figura 52 – Malha com 66 imagens da lâmina 20% com nicol cruzado



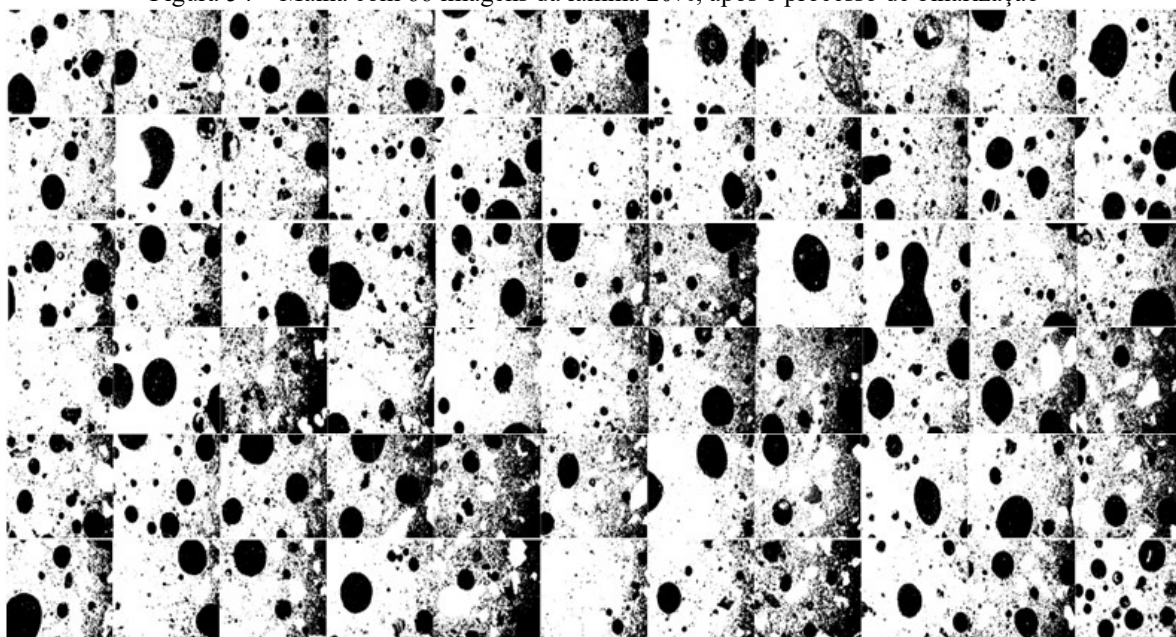
Fonte: Autor (2021)

Figura 53 – Malha com 66 imagens da lâmina 20%, após a conversão para escala de cinza



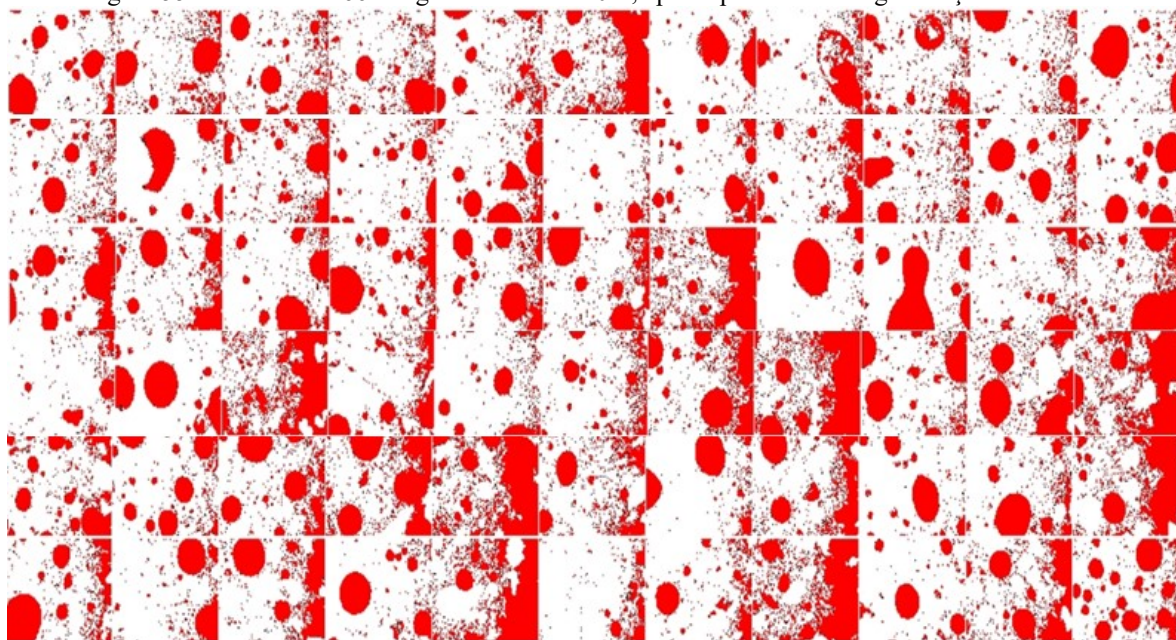
Fonte: Autor (2021)

Figura 54 – Malha com 66 imagens da lâmina 20%, após o processo de binarização



Fonte: Autor (2021)

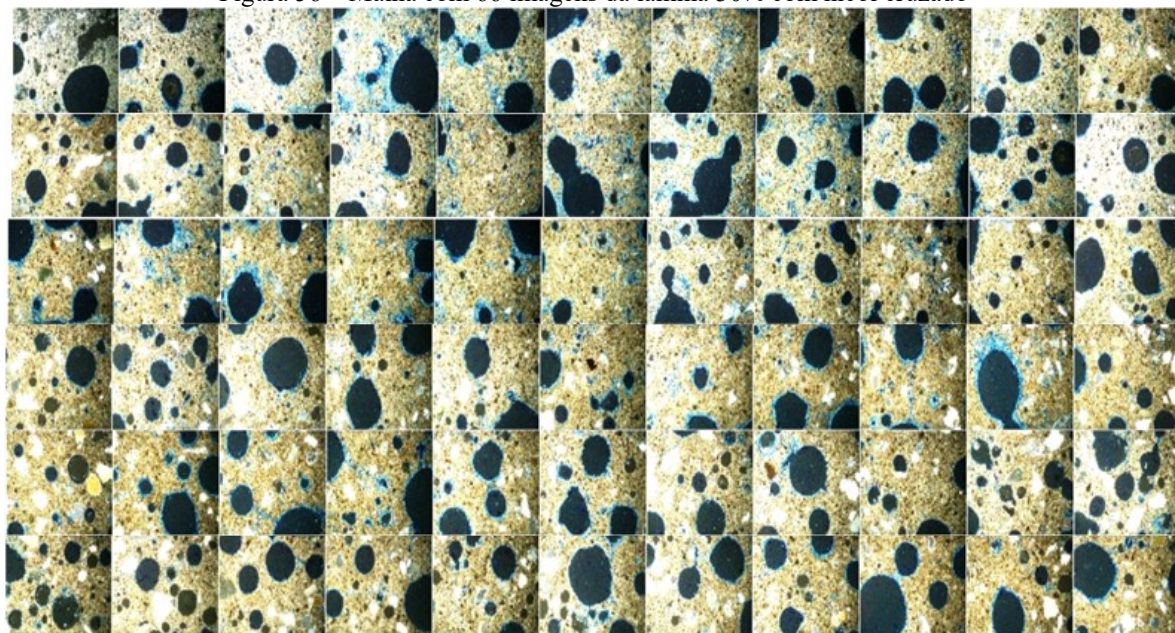
Figura 55 – Malha com 66 imagens da lâmina 20%, após o processo de segmentação Watershed



Fonte: Autor (2021)

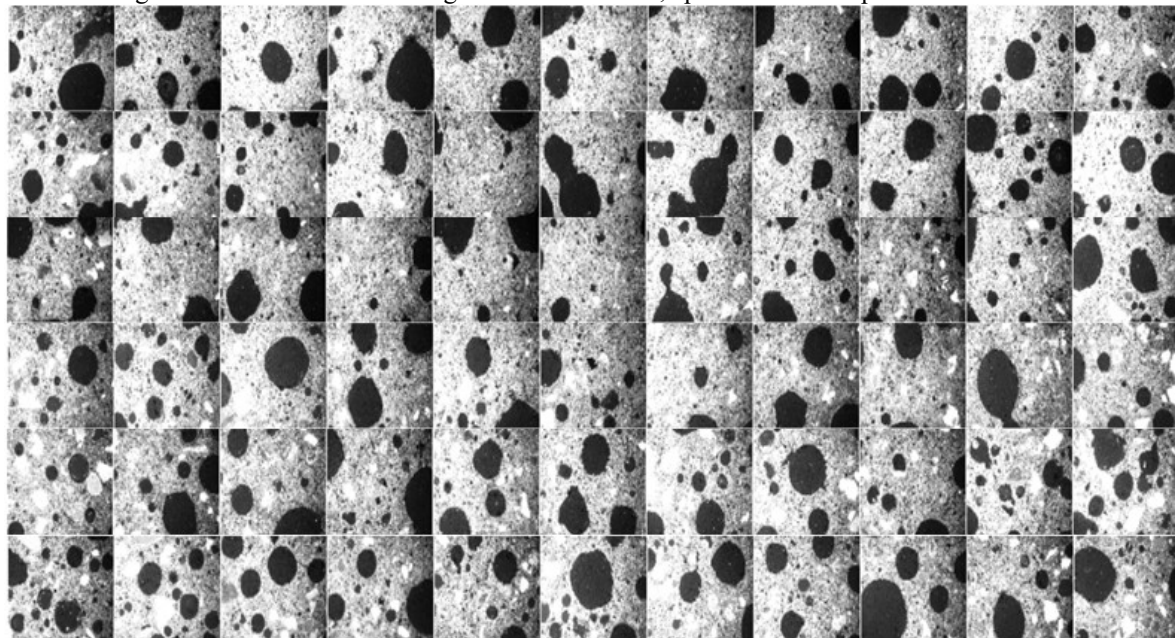
APÊNDICE C – IMAGENS DA LÂMINA PETROGRÁFICA DO CORPO DE PROVA COM 30% DE VOLUME DE ESPUMA.

Figura 56 – Malha com 66 imagens da lâmina 30% com nicol cruzado



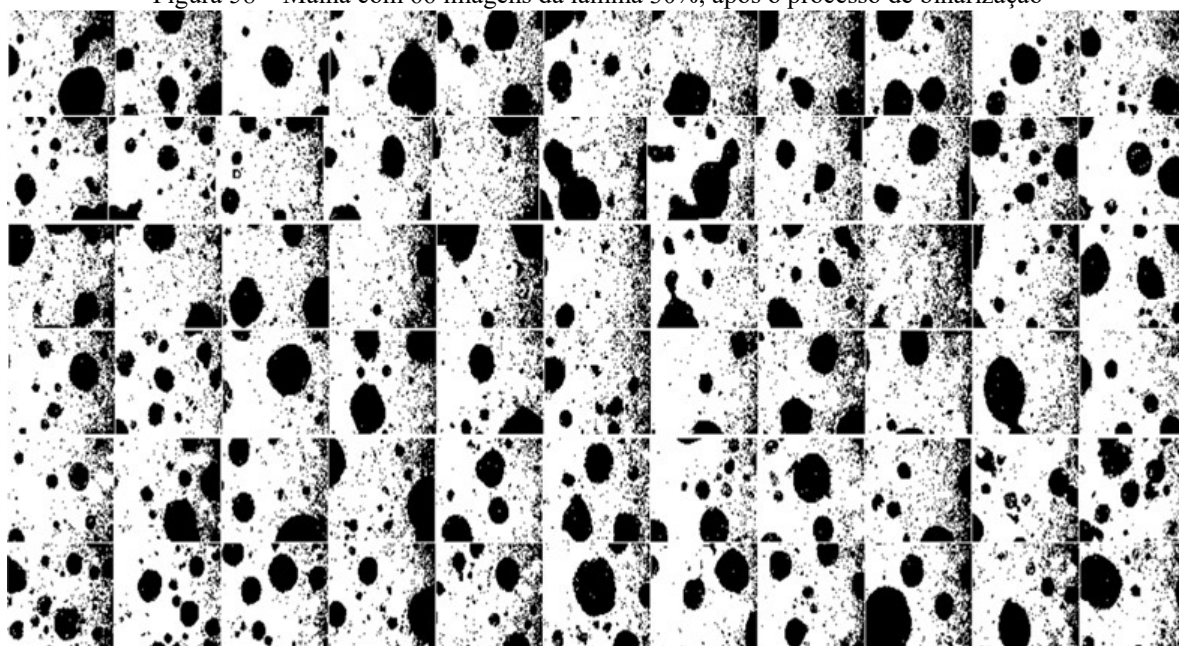
Fonte: Autor (2021)

Figura 57 – Malha com 66 imagens da lâmina 30%, após a conversão para escala de cinza



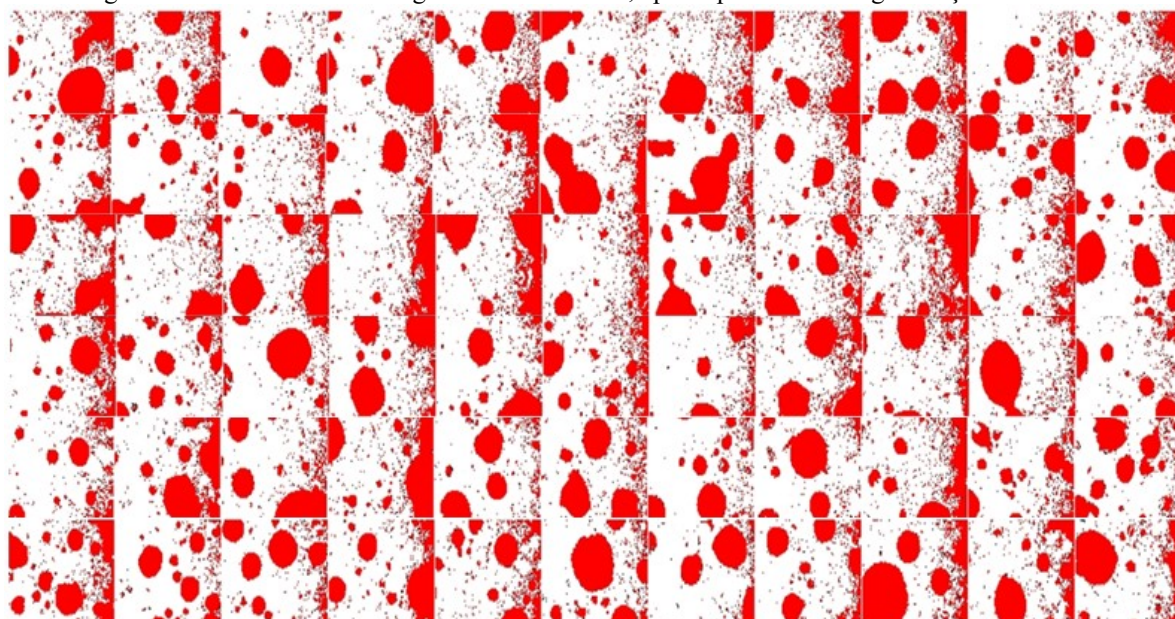
Fonte: Autor (2021)

Figura 58 – Malha com 66 imagens da lâmina 30%, após o processo de binarização



Fonte: Autor (2021)

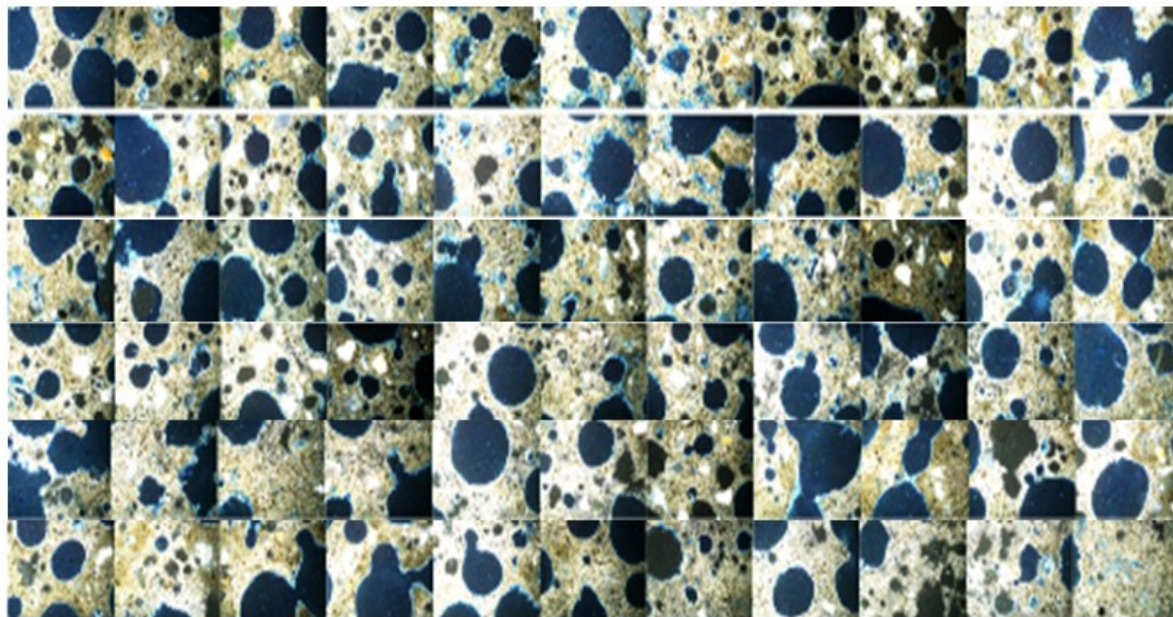
Figura 59 – Malha com 66 imagens da lâmina 30%, após o processo de segmentação Watershed



Fonte: Autor (2021)

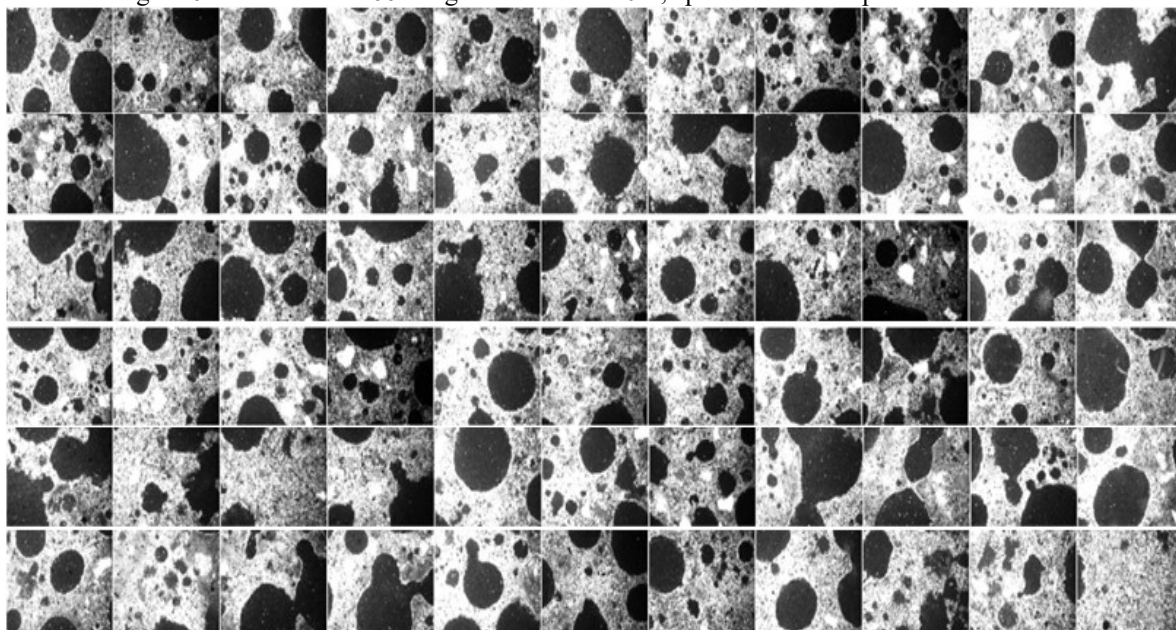
APÊNDICE D – IMAGENS DA LÂMINA PETROGRÁFICA DO CORPO DE PROVA COM 40% DE VOLUME DE ESPUMA.

Figura 60 – Malha com 66 imagens da lâmina 40% com nicol cruzado



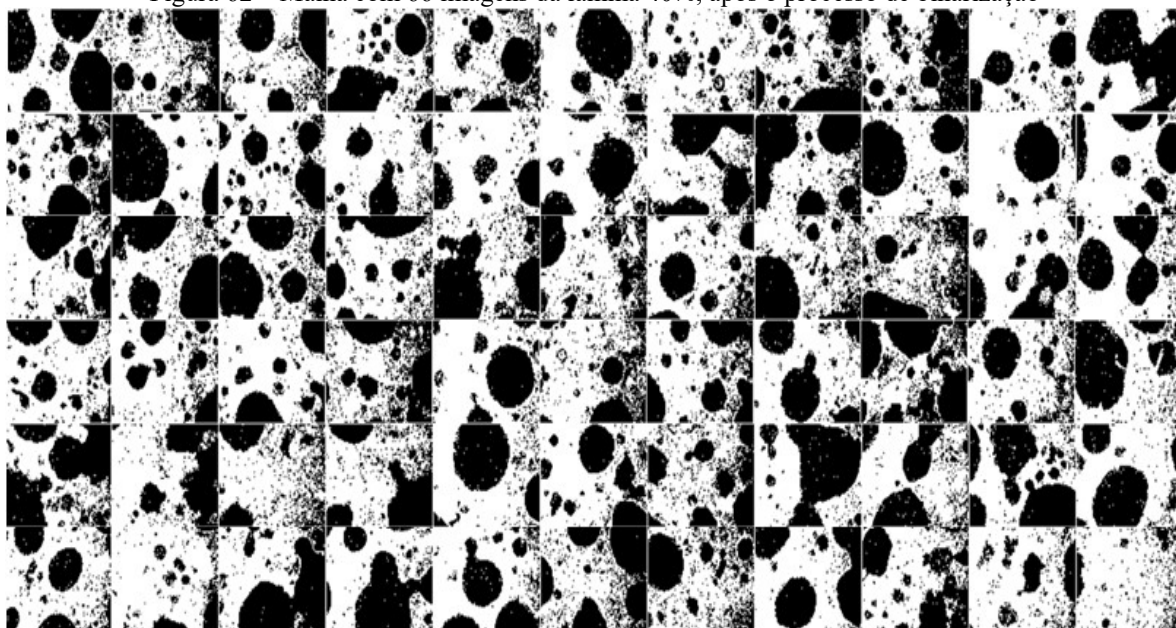
Fonte: Autor (2021)

Figura 61 – Malha com 66 imagens da lâmina 40%, após a conversão para escala de cinza



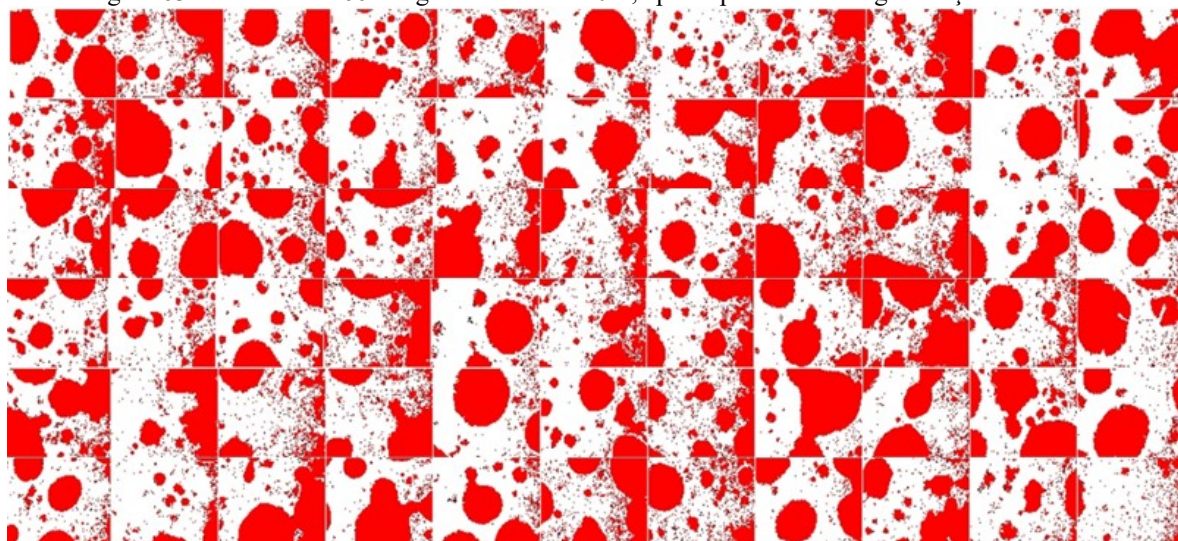
Fonte: Autor (2021)

Figura 62 – Malha com 66 imagens da lâmina 40%, após o processo de binarização



Fonte: Autor (2021)

Figura 63 – Malha com 66 imagens da lâmina 40%, após o processo de segmentação Watershed



Fonte: Autor (2021)