



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS**



**CARACTERIZAÇÃO PETROFÍSICA MULTIESCALAR DE TUFAS
CARBONÁTICAS DA FORMAÇÃO JANDAÍRA, BACIA POTIGUAR**

AUTOR: Francisco de Assis da Silveira Gonzaga

**ORIENTADORES: Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto
Prof. Dr. José Agnelo Soares**

**CAMPINA GRANDE – PB
AGOSTO - 2017**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS**



**CARACTERIZAÇÃO PETROFÍSICA MULTIESCALAR DE TUFAS
CARBONÁTICAS DA FORMAÇÃO JANDAÍRA, BACIA POTIGUAR**

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos.

AUTOR: Francisco de Assis da Silveira Gonzaga

**ORIENTADORES: Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto
Prof. Dr. José Agnelo Soares**

**CAMPINA GRANDE – PB
AGOSTO – 2017**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

G642c Gonzaga, Francisco de Assis da Silveira.

Caracterização petrofísica multiescalar de tufas carbonáticas da formação Jandaíra, Bacia Potiguar / Francisco de Assis da Silveira Gonzaga. – Campina Grande, 2017.

171 f. : il.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2017.

"Orientação: Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto, Prof. Dr. José Agnelo Soares".

Referências.

1. Petrografia. 2. DRX. 3. Rochas Carbonáticas. 4. Petrografia - Tomografia. 5. Petrografia – Microtomografia. I. Farias Neto, Severino Rodrigues de. II. Soares, José Agnelo. III. Título.

CDU 552(043)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE FRANCISCO DE ASSIS DA SILVEIRA GONZAGA, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE.

Defesa de tese apresentada e aprovada em, 31 de agosto de 2017.



Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto
UAEQ/CCT/UFCG – Orientador



Prof. Dr. José Agnelo Soares
UAMG/CTRN/UFCG – Orientador



Profa. Dra. Elissandra Nascimento de Moura Lima
UAMG/CTRN/UFCG



Profa. Dra. Adriana Lemos Porto
CCM/IFPB



Prof. Dr. Dwight Rodrigues Soares
CCM/IFPB



Prof. Dr. Wandenberg Bismarck Colaço Lima
CCM/IFPB

Campina Grande, agosto de 2017.

DEDICATÓRIA

*Dedico esta pesquisa a todo(a)s mestres que me
doutrinaram, desde a alfabetização até os dias de hoje.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores Doutores Severino Rodrigues de Farias Neto e José Agnelo Soares pela as discussões, apoio, elaboração e disponibilidades temporal no decorrer da pesquisa.

À professora Dra. Adriana Lemos Porto pelas discussões no âmbito da microtomografia e incentivos a este trabalho.

Ao professor Dr. Dwight Rodrigues Soares pelos os incentivos e as discussões referentes principalmente a Difractometria de raios X.

À professora Dra. Elissandra Nascimento de Moura Lima e ao professor Dr. Wandenberg Bismarck Colaço Lima por terem aceitado o convite para fazer parte da banca examinadora e pelas as sugestões solicitadas ao doutorando.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - Campus Campina Grande, pelo o apoio e incentivo no desenvolvimeno deste trabalho.

À Granfuji, na pessoa de Orisvaldo Ferreira da Silva, responsável pelo parque indústrial da empresa.

Ao Hospital Universitário Alcides Carneiro na pessoa de Osvaldo Fernando Meira Teixeira Filho, que prontamente imageou as rochas no tomógrafo médico.

Ao Dr. Rodrigo José da Silva Lima que contribuiu no processo analítico do DRX.

À professora Dra. Marcela Marques Vieira do Departamentode de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte pelas discussões relativas às lâminas delgadas.

Aos graduandos em Engenharia de Minas da UFCG, Josenildo Isidro dos Santos Filho e Henrique Bruno Lima de Oliveira, que colaboraram na formatação desta pesquisa.

Aos companheiros de trabalho da CDRM e do IFPB.

À minha família, Clediana (esposa) e Bruno, Glauco e Marília (filhos) pelo o apoio, incentivo e compreensão durante o período de execução deste trabalho.

RESUMO

A Formação Jandaíra é constituída por rochas carbonáticas de idade Cretácia que ocorrem em grande parte da Bacia Potiguar. Dentre as rochas presentes nesta formação estão as tufas carbonáticas resultantes de vários processos diagenéticos, característicos da área estudada. Neste trabalho são analisadas propriedades petrofísicas, composicionais e petrográficas de duas amostras de tufa carbonática, em escalas que variam de poucas dezenas de centímetros até alguns micrômetros. As tufas estudadas foram coletadas em dois afloramentos do município de Felipe Guerra, no Rio Grande do Norte. Os carbonatos, e em particular as tufas carbonáticas, são rochas muito heterogêneas, cujas propriedades medidas dependem da escala de investigação. Esta pesquisa visa quantificar a dependência dessas propriedades com a escala de investigação através de vários métodos de caracterização a fim de indicar se é adequado fazer a extrapolação de uma dada propriedade aferida em uma escala para outra escala de interesse. Para isso as propriedades foram investigadas em um cubo de tufa com 30 cm de aresta, oriundo do afloramento Cachoeira Roncador (CR). Uma das amostras foi adequada em forma de cubo e logo após dividida em dividido em 8 blocos cúbicos com 15 cm de aresta. De cada bloco foi extraído um plugue cilíndrico, para análise petrofísica convencional e tomografia de raios X, uma esquírola para confecção de lâmina delgada, e uma porção para análise de DRX. A outra amostra originada do afloramento situado ao lado da Igreja Nossa Senhora do Perpétuo Socorro (TFG) foi analisada por microtomografia de raios X e por ensaio petrofísico convencional. As propriedades petrofísicas foram investigadas através de ensaios laboratoriais convencionais e por análise das imagens de tomografia e de microtomografia. Tais análises permitiram a caracterização completa da estrutura matricial e porosa da amostra, revelando a porosidade e a permeabilidade presentes. Foram observados processos característicos na formação das tufas como a geminação polissintética e estruturas características como estilólitos, geopetais e processos de ankeritização. O cruzamento das informações geradas pela análise das lâminas delgadas e de DRX foi de fundamental importância para a correta determinação da composição mineral. A análise da porosidade das amostras, pelos vários métodos e escalas, mostrou uma grande variação nos valores medidos, confirmando a grande heterogeneidade apresentada pela tufa carbonática. A porosidade estimada pela análise das lâminas delgadas e pela análise petrofísica convencional (picnometria gasosa) apresentou valores em uma mesma ordem de grandeza, enquanto que a porosidade estimada pela tomografia nos blocos e nos plugues apresentou valores numa

ordem de grandeza menores. Já a porosidade estimada pela microtomografia foi de até uma ordem de grandeza acima dos valores medidos convencionalmente. Isto indica que esta propriedade nas tufas carbonáticas é muito dependente da escala de observação. Nas imagens de tomografia apenas os poros vulgares grandes são reconhecidos, o que resulta numa subestimação da porosidade pela perda da informação sobre a microporosidade. Por outro lado, a microporosidade é captada pela microtomografia, mas, devido ao reduzido tamanho da amostra, os grandes poros vulgares não são captados. As diferenças observadas entre as diversas escalas e métodos sugerem ainda que os poros são essencialmente mal conectados. A permeabilidade medida por todos os métodos indica valores muito baixos, o que confirma a suspeita de baixa conectividade de poros já indicada pelos valores de porosidade medidos nas diversas escalas.

Palavras-chave: petrografia; DRX; rochas carbonáticas; tomografia; microtomografia.

ABSTRACT

The Jandaíra Formation consists of carbonate rocks of Cretaceous age that occur in much of the Potiguar Basin. Among the rocks present in this formation are the carbonaceous tufas resulting from several diagenetic processes, characteristic of the studied area. In this work the petrophysical, compositional and petrographic properties of two samples of carbonate tufa are analyzed, in scales varying from a few tens of centimeters up to a few micrometers. The tufas studied were collected in two outcrops of the municipality of Felipe Guerra, in Rio Grande do Norte. The carbonates, and in particular the carbonate tufas, are very heterogeneous rocks whose measured properties depend on the scale of investigation. This research aims to quantify the dependence of these properties on the scale of investigation through several characterization methods to indicate if it is appropriate to extrapolate a given property on a scale to another scale of interest. For this, the properties were investigated in a tufa cube with 30 cm of edge, originating from the outcrop Cachoeira Roncador (CR). One of the samples was suitable in cube form and soon after divided into 8 cubic blocks with 15 cm of edge. From each block a cylindrical plug was extracted, for conventional petrophysical analysis and X-ray tomography, a thinning blade, and a portion for XRD analysis. The other sample originated from the outcrop next to the Nossa Senhora do Perpétuo Socorro Church (TFG) was analyzed by X-ray microtomography and by conventional petrophysical tests. The petrophysical properties were investigated through conventional laboratory tests and tomography and microtomography images. These analyzes allowed the complete characterization of the matrix and porous structure of the sample, revealing the porosity and the permeability present. Characteristic processes were observed in the formation of tufas such as polysynthetic twinning and characteristic structures such as stillites, geo - tetals and ankeritization processes. The crossing of the information generated by the analysis of the thin films and XRD was of fundamental importance for the correct determination of the mineral composition. The analysis of the porosity of the samples, by the various methods and scales, showed a great variation in the measured values, confirming the great heterogeneity presented by the carbonate tufa. The porosity estimated by thin slice analysis and conventional petrophysical analysis (gas pycnometry) presented values in the same order of magnitude, while the porosity estimated by the tomography in the blocks and in the plugs presented values in a smaller order of magnitude. The porosity estimated by the microtomography was up to an order of magnitude higher than the values measured conventionally. This indicates

that this property in carbonates is very dependent on the scale of observation. In tomography images only large vugular pores are recognized, which results in an underestimation of porosity by loss of information on microporosity. On the other hand, microporosity is captured by microtomography, but, due to the small sample size, large volute pores are not captured. The observed differences between the various scales and methods further suggest that the pores are essentially poorly connected. The permeability measured by all methods indicates very low values, which confirms the suspicion of low pore connectivity already indicated by the porosity values measured at the various scales.

Keywords: petrography; XRD; carbonate rocks; tomography; microtomography.

SUMÁRIO

RESUMO	iv
ABSTRACT	vi
SUMÁRIO	viii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xvi
LISTA DE QUADROS	xvii
1.0 INTRODUÇÃO	01
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	06
2.1 Classificação das Rochas Carbonáticas.....	08
2.1.1 Classificação de Folk.....	09
2.1.2 Classificação de Riding.....	11
2.1.3 Classificação dos Travertinos	14
2.2 Porosidade.....	17
2.2.1 Estrutura Porosa.....	18
2.3 Permeabilidade.....	23
2.4 Tomografia Computadorizada.....	26
2.4.1 Componentes do aparelho e aquisição da imagem.....	28
2.5 Microtomografia Computadorizada.....	31
2.5.1 Processamento e análise digital de imagens (PADI)	34
2.6 Permoporosímetro à Gás	36
2.7 Difração de raios-X.....	36
2.7.1 Ondas eletromagnéticas.....	38
2.7.2 Espectro das ondas eletromagnéticas.....	38
2.7.3 Produção dos raios – X.....	40
2.7.4 Espalhamento dos elétrons.....	40
2.7.5 Salto quântico.....	41
2.7.6 Monocromatização dos raios – X.....	42
2.7.7 A incidência da radiação sobre a amostra.....	43
2.7.8 Lei de Bragg.....	43
2.7.9 Funcionamento do aparelho de raios – X.....	44
2.8 Difratometro de raios-X.....	47

2.9 Petrografia Microscópica	48
3.0 METODOLOGIA.....	51
3.1 Aquisição e preparação de amostras.....	51
3.2 Tomografia.....	57
3.3 Microtomografia.....	57
3.4 Permoporosímetro.....	59
3.5 Difração de raios-X.....	60
3.6 Petrografia microscópica.....	61
3.7 Processamento digital de imagens.....	65
4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
4.1 Porosidade e permeabilidade.....	69
4.2 Lâminas delgadas.....	70
4.3 Difractometria de raios-X.....	74
4.4 Porosidade e permeabilidade pelos métodos convencionais.....	79
4.5 Tomografia.....	81
4.6 Microtomografia	98
5.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	101
6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104
ANEXOS.....	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Mapa geológico com destaque da região emersa da Bacia Potiguar.....	01
Figura 1.2	Estratigrafia da Bacia Potiguar (adaptado de Pessoa Neto <i>et al.</i> 2007).....	02
Figura 2.1	Micrita de cor escuro e granulometria mais fina (esquerda) e esparita como material intergranular (direita). Huilca, 2014	07
Figura 2.2	Grãos aloquímicos	07
Figura 2.3	Classificação gráfica de Folk 1962 (adaptado de Folk, 1962).....	09
Figura 2.4	Espectro textural para sedimentos carbonáticos de Folk 1962	10
Figura 2.5	Classificação para recifes orgânicos: Diagrama triangular MSC	12
Figura 2.6	Representação esquemática da classificação das rochas carbonáticas.....	13
Figura 2.7	<i>Cement Reefs</i> orgânicos e carbonatos <i>Mud Mound</i> plotados em um Diagrama MSC	13
Figura 2.8	Tufa calcária (A) e travertino laminado (B)	16
Figura 2.9	Lâmina delgada mostrando diversas relações entre as estruturas porosas. Seta Verde: Corpo alongado, denominado de garganta. Seta Laranja: Estrutura porosa intercristalina. Seta Azul: Garganta fechada indicando resquícios do espaço poroso. Seta Vermelha: Porosidade intracristalina	19
Figura 2.10	Classificação da porosidade de Choquette & Pray (1970)	21
Figura 2.11	Classificação genética da porosidade em rochas carbonáticas de Ahr 2008	22
Figura 2.12	Ilustração esquemática do fluxo de um fluido através de um meio poroso linear	24
Figura 2.13	Vazão de um fluido, através de uma coluna de sedimento acondicionado em um cilindro de percolação	24
Figura 2.14	Aparelho de tomografia computadorizada tradicional: (1) e (2) <i>gantry</i> e mesa respectivamente	29
Figura 2.15	Representação gráfica do interior do <i>gantry</i> , onde o tubo de raios-X gira em torno matéria, emitindo um feixe colimado de raios-x em forma de leque, direcionado ao anel estacionário de detectores	29
Figura 2.16	O princípio da construção da imagem em TC tradicional: A) valores de atenuação do feixe de raios X, após atravessar o objeto em diversas direções	

	e B) a matriz com o cálculo computadorizado da densidade de cada região atravessada pelos feixes de radiação. (Brooks. 1993)	30
Figura 2.17	Representação esquemática das unidades que compõem a imagem da tomografia computadorizada tradicional	31
Figura 2.18	Fluxograma do processo de microtomografia de raios-X	32
Figura 2.19	Sequência padrão do processamento e análises de imagens	34
Figura 2.20	Exemplo de um equipamento de difração de raios-X, mostrando o percurso desde a emissão dos raios até a sua detecção	37
Figura 2.21	Estrutura cristalina da calcita exibindo os átomos de oxigênio (verde), carbono (azul), cálcio (vermelho) e as faces externas do cristal resultante desta estrutura	37
Figura 2.22	Difração de Raios X de acordo com a Lei de Bragg	38
Figura 2.23	Intervalos dos comprimentos de ondas	40
Figura 2.24	Produção de raios-X	41
Figura 2.25	Espectro de radiação branco dos raios-X	42
Figura 2.26	Obtenção de radiação K_{α} e K_{β}	43
Figura 2.27	Espectro de Raios-X contínuo e característico tendo Molibdênio (Mo) com alvo a 35 KV, mostrando os picos de radiação K_{α} e K_{β} e $K_{\alpha 1}$ e $K_{\beta 2}$	44
Figura 2.28	Aparelho de Difração de raios-X pelo método de Debye-Scherrer	45
Figura 2.29	A) Direções fixas de reflexão do cristalito. B) Ilustração dos Cones de Difração formados pelo cristalito girando	46
Figura 2.30	Relação filme-amostra-feixe incidente. Esquema dos Cones de Difração de raios-X pelo método de Debye-Scherrer e aspecto do filme quando o mesmo é desenrolado sobre uma superfície plana	46
Figura 2.31	Esquema da Difração de raios-X pelo método de Debye-Scherrer	47
Figura 2.32	Geometria Bragg-Brentano de um difratômetro de raios X, mostrando as diferentes fendas utilizadas	48
Figura 2.33	Formação da imagem do cristal por uma lente biconvexa.....	49
Figura 3.1	Sequência metodológica adotada.....	51
Figura 3.2	Em (A) vista parcial do afloramento de tufas carbonáticas, onde se observa a formação de estalactites, e em (B) detalhe do afloramento mostrando os vugus da rocha, localizada na Cachoeira Roncador	52

Figura 3.3	Amostra de tufa carbonáticas “ <i>in situ</i> ”, localidade Cachoeira Roncador	53
Figura 3.4	Amostra de tufa carbonática sendo trabalhada para torna-la com dimensões próximas a um cubo, localidade Cachoeira Roncador	53
Figura 3.5	Amostra de tufa carbonáticas dos quatros blocos da base, mostrando as porosidades vugular e fratural	54
Figura 3.6	Amostra de tufa carbonática dos quatros blocos do topo, mostrando as porosidades vugular e fratural	54
Figura 3.7	Máquina de corte monofio	54
Figura 3.8	Corte da amostra de tufa carbonática tornando-a em cubo	55
Figura 3.9	Blocos seccionados com aproximadamente quinze centímetro de aresta. Em (A) blocos de topo e em (B) de base	56
Figura 3.10	(A) Plugadeira de bancada e em B, Retificadora de extremidades. Porto, 2015.....	57
Figura 3.11	Plugues iniciando o escaneamento, juntamente com plugue de alumínio.....	57
Figura 3.12	A) Tomógrafo médico utilizado nesta pesquisa. B) Detalhe de duas amostras de tufa carbonática sendo escaneadas.....	58
Figura 3.13	A) Amostras de topo, indicando pela linha vermelha o final do procedimento. (B), Início do processo com a mesa avançando em direção ao Gantry.....	59
Figura 3.14	Permoporosímetro pertencente ao Laboratório de Petrofísica da UFCG.....	60
Figura 3.15	Amostras de tufas carbonáticas seccionadas para serem analisadas. Em (A), amostra enviada para DRX, em (B), amostra analisada pelo o tomógrafo, em (C), porção enviada para confecção de lâminas delgadas e em (D), amostra preparada para análise em μ CT.....	61
Figura 3.16	Amostra de tufa carbonática sendo analisada pelo equipamento de Difração de Raios X da SHIMADZU – XRD 7000	62
Figura 3.17	Equipamento de corte para fatiar a rocha	63
Figura 3.18	Equipamento destinado ao desbaste da esquirola	63
Figura 3.19	Desbaste da esquirola utilizando disco	64
Figura 3.20	Várias fases de passagem de uma amostra de rocha a lâmina delgada	64

Figura 3.21	Porosidade vugular e alongada (seta vermelha) entre cristais de dolomita romboédricos (seta verde). P//. Obj: 5X	65
Figura 3.22	Representação sequencial dos passos para obtenção das imagens em 3D e das porosidades efetivas das amostras de tufas carbonáticas	66
Figura 3.23	Representação sequencial dos passos para obtenção das permeabilidades das amostras de tufas carbonáticas	67
Figura 3.24	Representação da sequência realizada para a geração das imagens e cálculo da porosidade	68
Figura 3.25	Representação da sequência realizada para a geração das imagens e cálculo da permeabilidade	68
Figura 4.1	Em (A), porosidade intergranular na micrita (seta azul), dolomitização (romboedros, seta vermelha), e cimento blocoso (seta verde). PX.Obj: 5X. Em (B), matriz calcítica (seta vermelha), porosidade microcristalina com porções localizadas de cimento mesocristalino (seta azul). PX.Obj: 5X.....	71
Figura 4.2	Em (A), porosidade intercristalina alongada (seta vermelha) em meio aos romboedros de dolomita (seta azul). P//.Obj: 5X. Em (B), dolomitização (romboedros, seta vermelha) em cimento blocoso (seta verde). PX. Obj: 5X	72
Figura 4.3	Em (A), porosidade intercristalina (seta vermelha) entre os romboedros de dolomita. P//.Obj: 10X. Em (B), dolomitização (romboedros, seta vermelha) em cimento blocoso (seta verde), e geminação oriunda da deformação diferencial. PX. Obj: 5X	72
Figura 4.4	Em (A), porosidade intercristalina (seta vermelha) entre os romboedros de dolomita. P//.Obj: 20X. Em (B), matriz silte-peloidal (seta vermelha) dolomitizada (seta verde) com porosidade intercristalina alongada (seta azul) e equante (seta amarela), entre os romboedros de dolomita. P//. Obj: 5X	73
Figura 4.5	Em (A), porosidade vugular do tipo equante e dolomitização (romboedros, seta vermelha) em cimento blocoso (seta verde). P//.Obj: 20X. Em (B), porosidade intercristalina, alongada, efetiva e dolomitização (romboedros, seta vermelha) em cimento blocoso (seta verde). P//.Obj: 5X	74

Figura 4.6	Em (A), porosidade intercrystalina alongada (seta vermelha), entre os romboedros de dolomita (seta verde). P//.Obj: 5X. Em (B), Estilólito (seta vermelha). P//. Obj: 5X	74
Figura 4.7	Em A, porosidade na micrita (seta vermelha), gerando uma estrutura geopetal. P//.Obj: 5X. Em B, geminação em cimento calcítico (seta vermelha). PX. Obj: 5X	75
Figura 4.8	Difratograma de uma amostra padrão de calcita.....	76
Figura 4.9	Difratograma de uma amostra padrão de ankerita	77
Figura 4.10	Difratograma de uma amostra padrão de dolomita	78
Figura 4.11	Composição mineralógica das amostras	80
Figura 4.12	Representação gráfica da amostra A1 (A) e (B), mostrando as nuvens de porosidades efetivas nos planos ortogonais da imagem.....	83
Figura 4.13	Representação gráfica da amostra A1 (A) e (B), mostrando as nuvens de porosidades efetivas nos planos ortogonais da imagem	84
Figura 4.14	Representação gráfica da amostra A2 (A) e (B), mostrando porosidades efetivas intercrystalina alongada, efetiva e possivelmente vugular.....	84
Figura 4.15	Representação gráfica da amostra A2 (A) e (B), mostrando porosidades efetivas intercrystalina alongada, efetiva e possivelmente vugular.....	84
Figura 4.16	Representação gráfica da amostra A3 (A) e (B), mostrando porosidades efetivas intercrystalina alongada, efetiva e possivelmente vugular.....	86
Figura 4.17	Representação gráfica da amostra A3 (A) e (B), mostrando porosidades efetivas intercrystalina alongada, efetiva e possivelmente vugular.....	86
Figura 4.18	Representação gráfica da amostra A4 (A) e (B), mostrando porosidades efetivas provavelmente do molde intercrystalina alongada, efetiva e vugular do tipo equante não efetiva.....	87
Figura 4.19	Representação gráfica da amostra A4 (A) e (B), mostrando porosidades efetivas provavelmente do molde intercrystalina alongada, efetiva e vugular do tipo equante não efetiva.....	88
Figura 4.20	Representação gráfica da amostra B1 (A) e (B), mostrando porosidades efetivas possivelmente do molde intercrystalina alongada, efetiva e vugular do tipo equante não efetiva.....	88
Figura 4.21	Representação gráfica da amostra B1 (A) e (B), mostrando porosidades	

	efetivas possivelmente do molde intercristalina alongada, efetiva e vugular do tipo equante não efetiva.....	89
Figura 4.22	Representação gráfica da amostra B2 (A) e (B), mostrando porosidades efetivas provavelmente do padrão intercristalina alongada, efetiva e vugular do tipo equante não efetiva.....	90
Figura 4.23	Representação gráfica da amostra B3 (A) e (B), mostrando porosidades efetivas possivelmente do molde intercristalina alongada, efetiva e vugular do tipo equante não efetiva.....	90
Figura 4.24	Representação gráfica da amostra B3 (A) e (B), mostrando porosidades efetivas possivelmente do molde intercristalina alongada, efetiva e vugular do tipo equante não efetiva.....	91
Figura 4.25	Representação gráfica da amostra B4 (A) e (B), mostrando porosidades efetivas provavelmente dos tipos intercristalina alongada, e vugular equante.....	92
Figura 4.26	Representação gráfica da amostra B4 (A) e (B), mostrando porosidades efetivas provavelmente dos tipos intercristalina alongada, e vugular equante.....	92
Figura 4.27	Representação gráfica plugue (PL A1) (A), (B) e (C), mostrando porosidades efetivas dispersas nos planos ortogonais das imagens.....	93
Figura 4.28	Representação gráfica plugue (PLA2) (A) e (B), sugerindo uma porosidade intercristalina e possivelmente microvugular	94
Figura 4.29	Representação gráfica plugue (PLA3) (A) e (B), sugerindo uma porosidade intercristalina e possivelmente microvugular	95
Figura 4.30	Representação gráfica plugue (PLA4) (A) e (B), sugerindo uma porosidade intercristalina e/ou vugular	95
Figura 4.31	Representação gráfica do plugue (PLB3) (A) e (B), sugerindo uma porosidade intercristalina e/ou vugular	96
Figura 4.32	Representação gráfica do plugue (PLB4) (A) e (B), sugerindo uma porosidade intercristalina e/ou vugular.....	97
Figura 4.33	Representação microtomográfica da amostra (TFG 03) (A), (B), (C) e (D), mostrando a porosidade bastante elevada.....	100
Figura 4.34	Representação microtomográfica da amostra (TFG 23) (A), (B), (C) e (D), mostrando a porosidade elevada.....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Escala de tamanho de grãos para rochas carbonáticas de Folk 1962	11
Tabela 2.2	Valores da porosidade de solos e rochas	18
Tabela 2.3	Coefficiente de permeabilidade de rochas e solos	25
Tabela 2.4	Correlação entre as cores e as faixas de energia dos fótons	40
Tabela 4.1	Relação da intensidade dos picos com 2θ para o mineral calcita	75
Tabela 4.2	Relação da intensidade dos picos com 2θ para o mineral ankerita	77
Tabela 4.3	Relação da intensidade dos picos com 2θ para o mineral dolomita	78
Tabela 4.4	Relação da composição mineralógica com o percentual das amostras de tufas carbonáticas	79
Tabela 4.5	Porosidade e outros parâmetros das amostras de tufas carbonáticas	81
Tabela 4.6	Classificação das porosidades adaptado de Popp (1998)	81
Tabela 4.7	Permeabilidade e outros parâmetros das amostras de tufas carbonáticas.....	82
Tabela 4.8	Escala de permeabilidade. Gomes (2002)	82
Tabela 4.9	Porosidade dos blocos calculada através da tomografia	93
Tabela 4.10	Porosidade dos plugues calculada através da tomografia.....	97
Tabela 4.11	Permeabilidade dos plugues calculada através da tomografia.....	98
Tabela 4.12	Tipos de porosidades e percentual obtidos em lâminas delgadas [1] etomógrafos [2] em blocos e [3] em plugues, [4] permoporosímetro.....	99
Tabela 4.13	Porosidade calculada nas amostras (TFG)	101
Tabela 4.14	Permeabilidade calculada nas amostras (TFG)	101

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1	Subdivisão das principais classificações dos carbonatos. Ahr (2008)	08
Quadro 2.2	Classificação unificada dos travertinos, Pentecost & Viles (1994)	15
Quadro 2.3	Classificação dos tipos de porosidade, Murray (1960)	17
Quadro 2.4	Classificação genética da porosidade dos híbridos em rochas carbonáticas. Adaptado de Ahr (2008)	22

1.0 – INTRODUÇÃO

De acordo com Reyes-Pérez *et al.* (2003), a Bacia Potiguar, situada no extremo nordeste do Brasil, abrange uma área estimada de 60.000 km², englobando o norte do Estado do Rio Grande do Norte e uma porção do Estado do Ceará (Figura 1.1). Na porção intermediária da coluna estratigráfica dessa bacia, encontra-se a Formação Jandaíra constituída por carbonatos de idade correspondente ao Cretáceo Superior ($\pm 79 - 93$ Ma). Nesta formação são encontrados calcários, dolomitos e tufas carbonáticas. As rochas dessa formação muitas vezes se apresentam fraturadas e alteradas por processos diagenéticos como dissolução, recristalização e substituição mineral. Neste trabalho foram estudadas, de forma particular, amostras de tufas carbonáticas que ocorrem no afloramento denominado Cachoeira Roncador e em outro afloramento próximo, pertencentes ao município de Felipe Guerra, na região oeste do estado do Rio Grande do Norte.

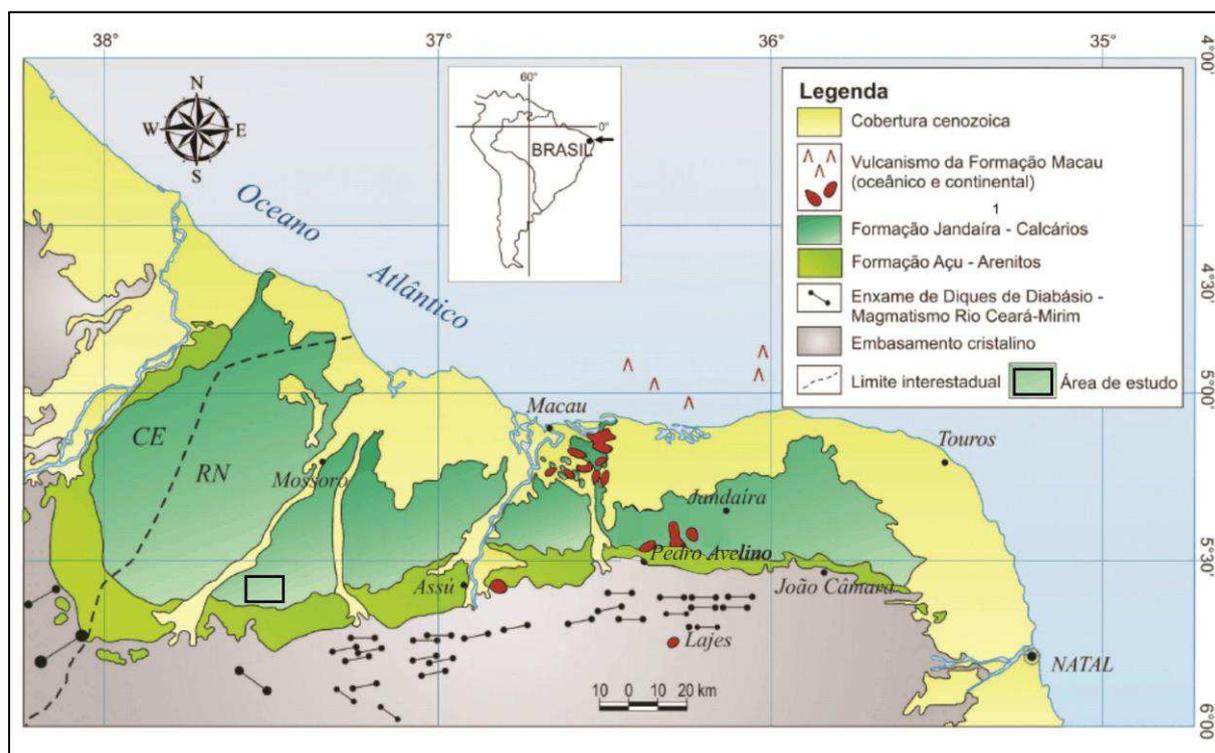


Figura 1.1 – Mapa geológico com destaque da região emersa da Bacia Potiguar (adaptado de Cassab, 2003).

As rochas carbonáticas que compõem a Formação Jandaíra têm início de deposição no Turoniano ± 93 Ma, estando assentada sobre os arenitos da Formação Açú (Barremiano $\pm 130 - 135$ Ma). As rochas estudadas estão inseridas na porção superior da

Bacia Potiguar, datada no Campaniano ± 79 Ma (Figura 1.2).

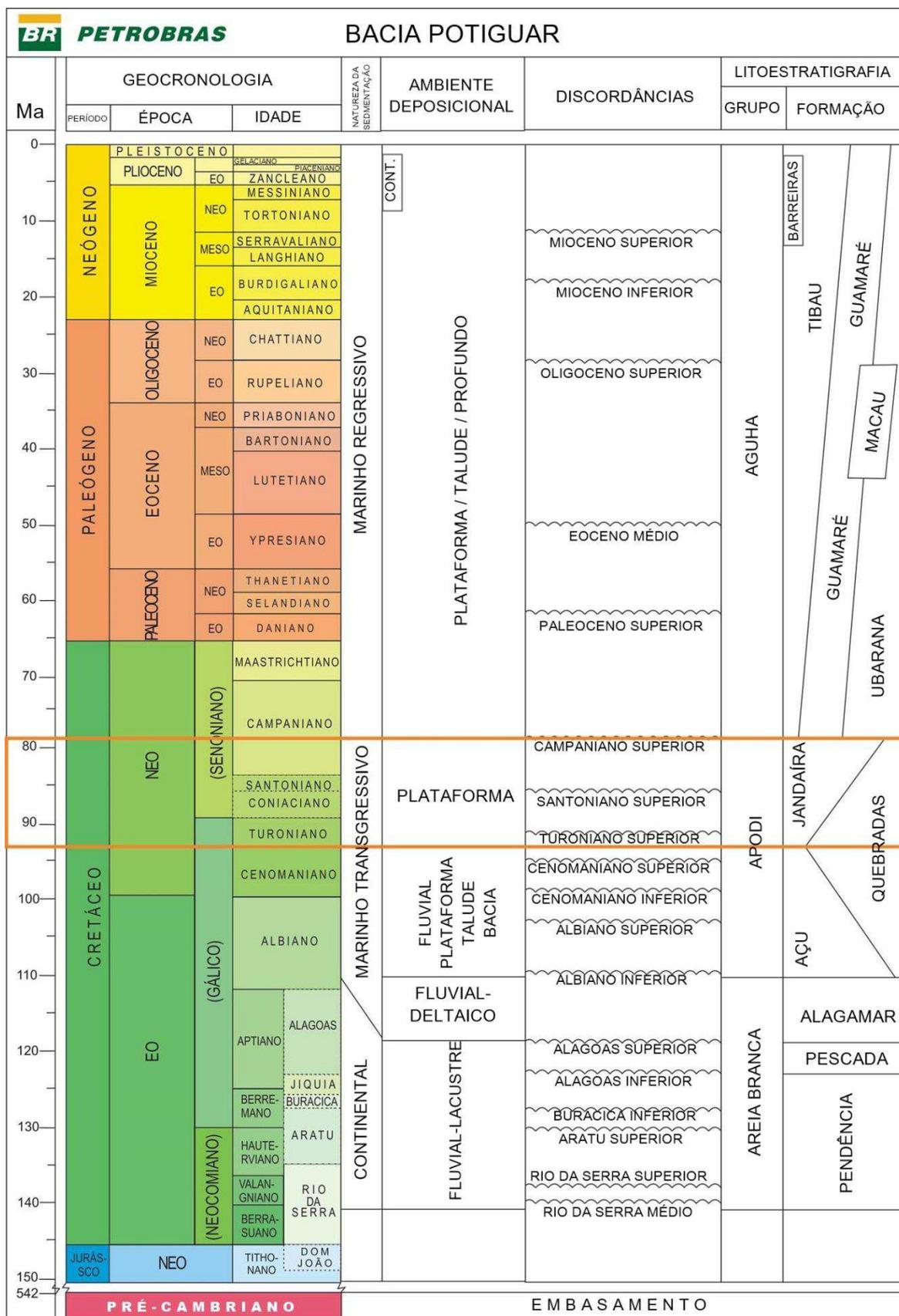


Figura 1.2 - Estratigrafia da Bacia Potiguar (adaptado de Pessoa Neto et al. 2007)

As tufas carbonáticas são variedades de calcários formados em águas não termais, resultantes de variadas condições climáticas. Seus depósitos apresentam elevada heterogeneidade, sendo compostos por restos de matéria orgânica pertencente a microrganismos, plantas ou animais, além da ocorrência de minerais como a calcita, a dolomita e a aragonita, estando presentes também alguns representantes dos sulfatos, argilominerais e silicatos em menor quantidade. Sua formação é determinada por fenômenos de dissolução química, controlados por fatores de origem bioquímica, morfológica, hidroquímica, hidrogeológica e climática. Sua origem favorece a formação de poros em sua composição, estes apresentando variabilidade dimensional e, por consequência, de preenchimento, podendo ocorrer ocupação de argila nos poros dos tipos vugular e fenestral.

A porosidade das tufas carbonáticas pode se apresentar de diversas maneiras. De modo geral, a porosidade das rochas carbonáticas pode ser dividida em duas componentes: a microporosidade e a macroporosidade. A microporosidade é encontrada na matriz micrítica, composta essencialmente pela litificação da lama carbonática durante a gênese da rocha. A macroporosidade pode ser originada tanto durante a gênese da rocha quanto durante as transformações diagenéticas que ocorrem após sua formação.

Os macroporos que são formados durante a gênese da rocha podem ter como causa a justaposição de elementos minerais com dimensões maiores, como por exemplo, grãos oolíticos ou oncolíticos. No entanto, as maiorias dos macroporos das rochas carbonáticas têm origem nos processos pós-deposicionais, como a formação de poros por dissolução, substituição mineral (dolomitização, por exemplo), fraturamento e porosidade móldica.

Atualmente, são utilizadas diversas técnicas com o objetivo de quantificar as propriedades físicas das rochas sedimentares, tais como: sísmica de superfície, perfilagem geofísica de poços e ensaios petrofísicos em laboratório. Tais técnicas usam princípios físicos como ultrassom e radiometria, no entanto, aplicadas a diferentes escalas de investigação e, consequentemente, com diferentes resoluções.

Por outro lado, a medição de uma dada propriedade física depende da distribuição espacial desta propriedade, das dimensões do corpo investigado e da resolução e da profundidade de investigação do método de avaliação empregado. Por exemplo, a porosidade de uma rocha carbonática pode variar desde poros vugulares com alguns centímetros de diâmetro, passando por uma macroporosidade intergranular da ordem de décimos de milímetros, até microporosidades na escala de poucas dezenas de micrômetros.

Dessa forma, a adequada determinação de uma propriedade petrofísica depende das dimensões da amostra e do método de investigação adotado (Kronbauer, 2014). Atualmente os métodos de ultrassom e de raios X são rotineiramente aplicados para a caracterização petrofísica sem que se conheça, em cada caso, as dimensões ideais das amostras analisadas. Devido ao seu elevado grau de heterogeneidade, este é o problema mais importante para o caso das rochas carbonáticas.

Devido à sua elevada heterogeneidade composicional e do tipo de porosidade, as tufas carbonáticas precisam ser caracterizadas em diversas escalas. Cada técnica de caracterização possui uma escala particular de observação. Por exemplo, a análise petrográfica baseada em microscopia óptica em lâminas delgadas apresenta um campo de observação na escala de centímetros. A técnica de análise por difratometria de raios X (DRX) analisa poucos gramas de rocha, portanto, é também bastante limitada quando se trata do volume de rocha analisado. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) analisa o que ocorre na escala de um poro, o que resulta numa análise de elevada resolução, mas representativa apenas em escala muito pequena. Por outro lado, a tomografia de raios X pode ser aplicada para caracterizar rochas em certo intervalo de escalas (Appoloni *et al.* 2007). A tomografia de raios X permite realizar ensaios em amostras de rocha com dimensões desde algumas dezenas de centímetros até alguns décimos de milímetro. A microtomografia de raios X permite a análise detalhada da estrutura porosa e matriz mineral presente na rocha em escalas micrométricas.

O estudo de porosidade juntamente com o de permeabilidade é primordial na prospecção de fluídos contidos nas rochas sedimentares, tais como hidrocarbonetos e água subterrânea e no reconhecimento das “barreiras de permeabilidade”, que são limites para o fluxo do fluído, sendo também responsáveis por controlar a precipitação de minerais de baixa temperatura. O conhecimento quantitativo da permeabilidade é de fundamental importância para se realizarem estimativas de produção, avaliar o comportamento dos poços e realizar estudos de simulação de reservatórios. Apesar da importância desse valor na avaliação de um reservatório, a permeabilidade é um dos parâmetros mais difíceis de definir, principalmente devido à escala e ao método de observação, estes fatores resultam na necessidade da simulação para a estimativa desta propriedade.

O objetivo geral desta tese é caracterizar as propriedades composicionais, como fase mineralógica e forma estrutural dos componentes porosos; quantificar e identificar as propriedades petrofísicas, como porosidade e permeabilidade de duas amostras de tufa

carbonática, em diversas escalas de observação (desde dezenas de centímetros até micrômetros), a partir do imageamento interno por tomografia de raios-X.

Para atingir este objetivo foram aplicados os seguintes objetivos específicos:

- Interpretação multiescalar de um bloco de tufa carbonática da Formação Jandaíra;
- Análise mineralógica e petrofísica através das lâminas delgadas das amostras;
- Caracterização composicional dos minerais da tufa carbonática através do método de DRX;
- Análise dos parâmetros petrofísicos: porosidade e permeabilidade, através dos métodos convencionais (permoporosímetro a gás);
- Análise dos parâmetros petrofísicos: porosidade e permeabilidade, através dos métodos computacionais (tomografia e microtomografia);
- Interpretação relacional, entre os métodos e escalas, da composição mineralógica e das propriedades petrofísicas das amostras de tufa carbonática.

Os métodos aqui utilizados servem como base para análises composicionais de variados tipos de materiais em diversas áreas de pesquisa. Abrangendo estudos voltados à prospecção de depósitos de hidrocarbonetos para a indústria do petróleo, pesquisa em aquíferos de rochas sedimentares porosas visando à exploração e exploração de águas subterrâneas, passando pela área de caracterização pedológica e secagem de alimentos.

2.0 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os carbonatos são rochas sedimentares de origem clástica, química ou bioquímica, compostas principalmente por calcita (CaCO_3), dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_2)_3$] e aragonita (CaCO_3), além de minerais secundários como anidrita, gipsita, siderita, quartzo, argilominerais, pirita, óxidos e sulfatos (Ahr, 2008). Estas rochas são depositadas naturalmente em ambientes marinhos ou continentais de águas claras, cálidas e rasas. Também podem se formar pela erosão ou lixiviação e posterior transporte do material carbonático das zonas de dissolução às zonas de precipitação o que leva à sedimentação destas rochas em camadas paralelas e horizontais (Acocella & Turrini, 2010).

Ahr (2008) sugere que é comum agrupar os minerais carbonáticos em famílias, de acordo com seu sistema cristalino ou organização interna dos átomos, sendo estes sistemas cristalinos hexagonal, ortorrômbico ou monoclinico. A calcita e a dolomita se cristalizam no sistema trigonal com hábito escalenoédrico e romboédrico. A aragonita, embora tenha a mesma composição da calcita, cristaliza-se no sistema ortorrômbico com hábito bipiramidal. O reconhecimento dos principais constituintes de uma rocha é muito importante no momento de estabelecer alguma classificação petrológica. No caso das rochas carbonáticas, é indispensável a identificação da presença da matriz, cimento e grãos e a definição do tipo de suporte, ou seja, arcabouço – matriz – suportado ou grão-suportado (Terra *et al.* 2010). A matriz ou micrita, a qual é material primário na formação da rocha, é composta por cristais de calcita com dimensões menores que $4\mu\text{m}$ (Terra *et al.* 2010).

Reveco (2005) e Terra *et al.* (2010) classificam o cimento ou esparita como um agregado de cristais de carbonato formados principalmente por aragonita, calcita magnesiana, calcita de baixo teor de magnésio ou dolomita com tamanhos maiores que $4\mu\text{m}$, que precipitam nos espaços vazios existentes entre os grãos dos sedimentos carbonáticos (Figura 2.1).

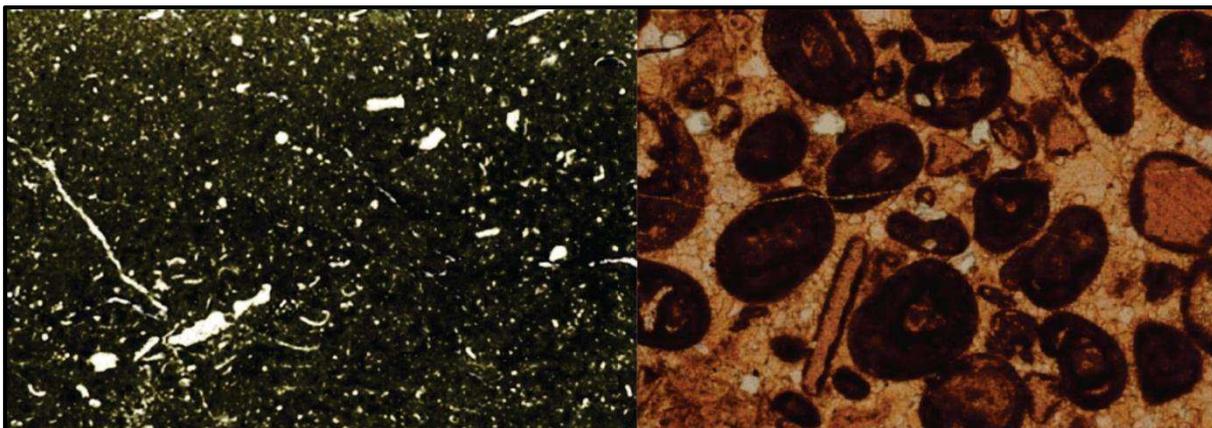


Figura 2.1 - Micrita de cor escura e granulometria mais fina (esquerda) e esparita como material intergranular (direita). Huilca, 2014.

Com relação aos grãos, são classificados como grãos aloquímicos (Figura 2.2), os oolitos, oncolitos, esferulitos, pelóides, intraclastos e bioclastos.

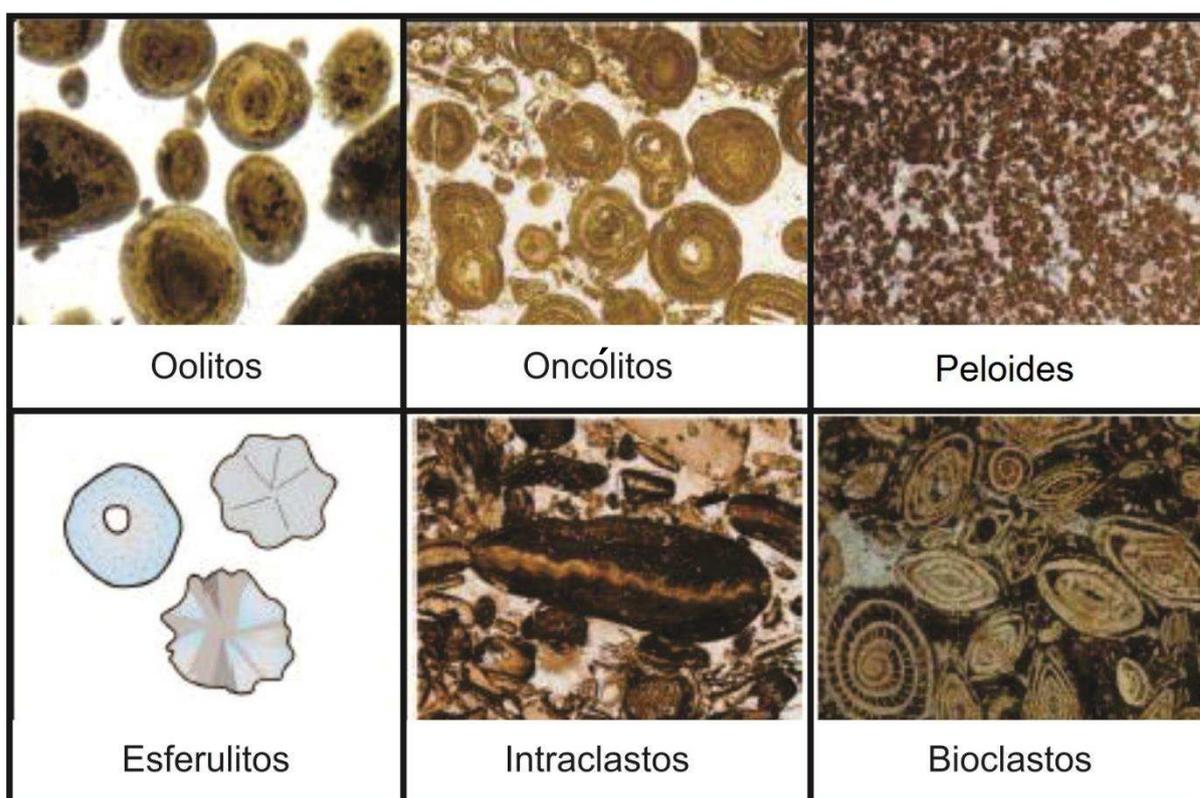


Figura 2.2 - Grãos aloquímicos (Reveco, 2005; Terra *et al.* 2010).

Os oolitos são partículas envelopadas, esféricas a subsféricas, originadas por acreção físico-química com laminação em torno de um núcleo, mostrando uma estrutura laminar ou radial, com diâmetros menores que 2,0 mm (Adams *et al.* 1984).

Os oncolitos são formados pela acreção organo-sedimentar de cianobactérias (algas verdes e azuis), possuem envelopes descontínuos de micrita, geralmente pouco nítidos, de forma subesférica a subelíptica, originados em ambientes de baixa a moderada energia, seus tamanhos variam de 0,5 mm a mais de 5,0 mm (Terra *et al.* 2010).

Os pelóides são grãos micríticos de forma esférica a subesférica sem estrutura interna, de origem desconhecida, mostram uma marcada uniformidade do tamanho e forma do grão, seus tamanhos variam de 0,03 mm a 0,15 mm de diâmetro, apresentando um alto conteúdo de matéria orgânica (Folk, 1962).

Terra *et al.* (2010) caracterizam os esferulitos com forma esférica ou subesférica, de contornos lisos ou lobados, não apresentam núcleos e sua estrutura interna varia desde estrutura radiada a vacuolada, de tamanho geralmente menor que 2 mm.

Reveco (2005) especifica que os intraclastos são fragmentos retrabalhados dos sedimentos contemporâneos aos sedimentos carbonáticos, cujos fragmentos geralmente são angulosos de tamanhos variados compostos por lama micrítica ou areia carbonática.

Os bioclastos englobam todos os fósseis de estruturas calcárias de organismos ou fragmentos destas estruturas, com diferentes grupos, gêneros e espécies restritos a determinados ambientes de formação (Hiullca *et al.* 2014).

2.1 - Classificação das Rochas Carbonáticas

As classificações das rochas carbonáticas são baseadas principalmente em fatores como a textura, fábrica, tipo de grão, tipo de poro, composição e diagênese (Akbar *et al.* 2001, Tucker & Wright 1990).

Atualmente existem diversas classificações das rochas carbonáticas, sendo alguns esquemas gerais e outros mais específicos. Ahr (2008) propôs uma subdivisão das principais classificações dos carbonatos de acordo com a textura (carbonatos detríticos), padrões de crescimento biológico (rochas biogênicas) e origem da deposição – biologia – genética (Quadro 2.1).

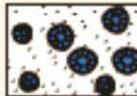
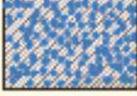
Quadro 2.1 – Subdivisão das principais classificações dos carbonatos. Ahr (2008).

Rochas carbonáticas	Carbonatos Detríticos
	Rochas biogênicas (<i>reef rocks</i>)
	Classificação Genética

2.1.1 - Classificação de Folk

Folk (1962) propõe diversas terminologias baseadas em três feições: a primeira referida com a abundância e tipo de grãos (aloquímicos), matriz (micrita) e cimento (esparito) ou espaço poroso. A segunda referida com o grau de classificação e arredondamento dos grãos e a terceira relacionada com o tamanho médio dos grãos ou tamanho dos cristais da rocha (Scholle & Ulmer-Scholle, 2003). Folk (1962) na primeira feição reconheceu quatro tipos de aloquímicos: os ooides, peloides, bioclastos e os intraclastos. Foram estabelecidas três principais famílias ou tipos de calcários (Figura 2.3): calcário aloquímicoespático (tipo I), formado por grãos aloquímicos cimentados por calcita espática. Calcário aloquímico microcristalino (tipo II), composto por grãos aloquímicos em matriz micrítica e calcário microcristalino (tipo III), sem grãos aloquímicos.

SUBDIVISÃO ESPECTRAL DAS ROCHAS CALCÁRIAS

Rochas Aloquímicas			Rochas Ortoquímicas
Intraesparito	Cimento de Calcita Espática I	Matriz de Calcita Microcristalina II	Calcita Microcristalina sem aloquímicos III
	 Intraesparito	 Intramicrita	 Micrita
	 Ooesparito	 Oomicrita	 Dismicrita
	 Bioesparito	 Biomicrita	Rochas Recifais Autóctones IV  Biolitito
	 Pelesparito	 Pelmicrita	

 Calcita Microcristalina
  Calcita Espática

Figura 2.3 - Classificação gráfica de Folk 1962 (adaptado de Folk, 1962).

Folk (1962) considera uma classe especial (tipo IV) as rochas constituídas por massas recifais ou estruturas orgânicas desenvolvidas *in situ*, denominadas biolitito. Para descrever as características da segunda feição, (Folk, 1962) classifica os depósitos de acordo com a energia do ambiente de formação. Pode-se observar na Figura 2.4, que a energia de formação aumenta da esquerda para a direita. Ambientes de baixa energia tipicamente apresentam maiores concentrações de lama pura ou quase pura. Em ambientes de energia intermediária as acumulações de lama com concentrações de grãos são mais comuns, enquanto em ambientes de alta energia ocorrem acumulações de grãos classificados e arredondados com a lama da matriz virtualmente removida (Scholle & Ulmer-Scholle, 2003).

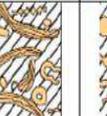
Porcentagem de aloquímicos	> 2/3 de matriz de lama calcária				calcita espática e lama carbonáticas em proporções semelhantes	> 2/3 de calcita espática		
	0-1%	1-10%	10-50%	>50%		Mal selecionada	Bem selecionada	Arredondada e desgastada
Termo Textural	Micrito e dismicrito	Micrito fossilífero	Bimicrito disperso	Bimicrito denso	Intraesparito	Bioesparito mal selecionado	Bioesparito selecionado	Bioesparito arredondado
Petrotrama								
Análogos Terrígenos	Argilito		Argilito arenoso	Arenito imaturo ou argiloso		Arenito submaturo	Arenito Maturo	Arenito supermaturo

Figura 2.4 – Espectro textural para sedimentos carbonáticos de Folk 1962 (Domingues, 2011).

Para a terceira feição, Folk (1962) estabelece uma terminologia para variados tamanhos do material transportado ou para precipitado autigênico, também usado para os produtos de recristalização ou de substituição como a dolomita (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Escala de tamanho de grãos para rochas carbonáticas (Adaptado de Folk, 1962).

Tamanho do Grão	Constituintes transportados	Constituintes autigênicos	Tamanho do Grão
64 mm	Calcirudito muito grosso	Minerais de granulometria extremamente elevada	4 mm
16 mm	Calcirudito grosso		
4 mm	Calcirudito médio		
1 mm	Calcirudito fino	Minerais de granulometria elevada	1 mm
0,5 mm	Calcarenito grosso	Minerais de granulometria considerável	0,25 mm
0,25 mm	Calcarenito médio		
0,125 mm	Calcarenito fino	Minerais de granulometria média	0,062 mm
0,062 mm	Calcarenito muito fino		
0,031 mm	Calcilutito grosso	Minerais de granulometria fina	0,016 mm
0,016 mm	Calcilutito médio		
0,008 mm	Calcilutito fino	Minerais de granulometria muito fina	0,004 mm
	Calcilutito muito fino	Minerais de granulometria extremamente fina	

2.1.2 - Classificação de Riding

Riding (2002) desenvolveu uma classificação para os recifes orgânicos com base na proporção volumétrica dos componentes sedimentares matriz (M), esqueleto (S) e cimento (C), utilizando diagramas triangulares MSC para representar as proporções de suporte destes componentes (Figura 2.5).

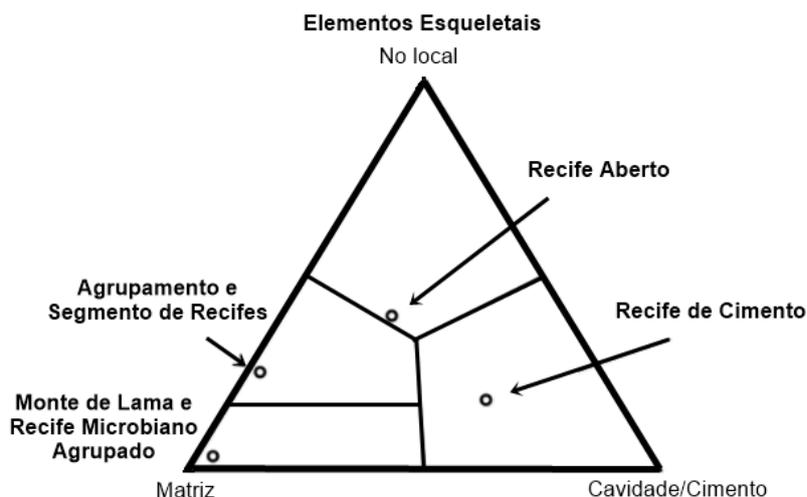


Figura 2.5- Classificação para recifes orgânicos: Diagrama triangular MSC (Riding, 2002).

Desta forma, Riding (2002) distinguiu categorias de acordo com quais estes componentes fornecia o suporte principal para a estrutura durante a formação, as quais são representadas na Figura 2.6.

A categoria dominada pela matriz como suporte principal abrangeu os *Agglutinated Microbial Reefs*, os quais são criados pelo aprisionamento microbiano e a acumulação de partículas sedimentares, os *Mud Mound*, que são depósitos de carbonato de origem orgânica ou inorgânica, que além de terem a matriz de suporte têm um relevo topográfico, e os *Cluster Reefs*, que são recifes que exibem elementos dos esqueletos adjacentes, mas não em contato. *Segment Reefs* são recifes matriz-suportados onde os elementos do esqueleto podem estar em contato, não estando articulados.

A categoria dominada pelo esqueleto como suporte principal abrange os *Frame Reefs*, que são recifes que apresentam os elementos do esqueleto em contato. A categoria dominada pelo cimento como suporte principal contém os *Cement Reefs*, que são recifes criados tanto em ambiente marinho como não marinho pela cimentação de organismos *in situ*.

Matriz de suporte		Esqueleto de suporte	Cimento de suporte
<p>Recife Microbiano Aglutinado</p> 	<p>Grupo de Recife</p> 	<p>Recife de Estrutura</p>  <p>Aberto</p>	<p>Recife de Cimento</p> 
<p>Monte de Lama de Carbonato</p> 	<p>Segmento do Recife</p> 	 <p>Preenchido</p>	<p>Esqueleto de Recife de Cimento</p> 
<p>Pouco ou nenhum esqueleto</p>	<p>Esqueleto perto</p>	<p>Esqueleto em contato</p>	<p>Organismos cimentados (esquelético ou não esquelético)</p>

Figura 2.6 - Representação esquemática da classificação das rochas carbonáticas (Riding, 2002).

Além do tipo de suporte, a presença de cimento na rocha permite diferenciar quatro tipos de recifes orgânicos como se pode observar na Figura 2.7. Esta mostra que o travertino e a tufa estão incluídos dentro dos recifes orgânicos suportados por cimento ou *Cement Reefs*.

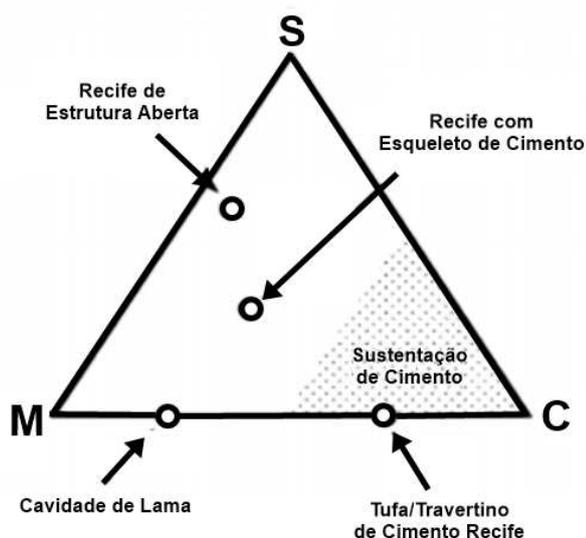


Figura 2.7 – *Cement Reefs* orgânicos e carbonatos *Mud Mound* plotados em um Diagrama MSC (Riding, 2002).

2.1.3 - Classificação dos Travertinos

Segundo Chafetz & Folk (1984), o termo travertino é de origem italiana, constituindo uma derivação do latim *Tiburinus* cuja tradução do latim significa “Pedra de Tibur”, em referência à cidade de Tivoli. O travertino é uma rocha sedimentar não clástica com microestrutura cristalina (formada através dos sedimentos, perto de águas termais, lagoas, nascentes e cachoeiras), e sua origem é vinculada com o afloramento de águas hidrotermais enriquecidas em carbonato de cálcio que surgem na superfície da terra.

A constante e progressiva acumulação de material carbonático da zona de dissolução para a zona de precipitação conduz à sedimentação desta rocha em camadas paralelas, horizontais por vezes, caracterizadas por mudanças de cor e ampla porosidade irregular (Acocella & Turrini 2010). Para Chafetz & Folk (1984) o travertino é uma forma de carbonato de água fresca proveniente de nascentes e depositado por processos orgânicos e inorgânicos. Para Pentecost (2005) o travertino é um calcário continental, quimicamente precipitado e formado no entorno de infiltrações, nascentes, rios e ocasionalmente lagos. É constituído de calcita ou aragonita, de baixa a moderada porosidade intercrystalina e elevada porosidade móldica ou *framework*, dentro da zona vadosa ou ocasionalmente com o nível freático superficial.

Segundo Pentecost (2005), a precipitação resulta principalmente através da transferência do dióxido de carbono da ou para as fontes de água subterrânea, levando à supersaturação de carbonato de cálcio, com a nucleação e crescimento de cristais que ocorre sobre uma superfície submersa.

Em um esforço de organizar os travertinos para seu estudo, Pentecost & Viles (1994) fizeram um esquema da classificação baseada em certas feições, como geoquímica, fábrica e morfologia, como apresentado no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Classificação unificada dos travertinos, Pentecost & Viles (1994)

Fatores			
Geoquímico	Termal (Termógeno)	Meteógeno	
	Autóctone		
	Alóctone		
Feições de grandes escalas (morfologia e posição topográfica)	<p>Manancial</p> <p>↓</p> <p>Fissuras em cristas</p> <p>↓</p> <p>Colina</p>	<p>Rio</p> <p>↓</p> <p>Cascatas</p> <p>Bancos de ruditos cimentados</p> <p>↓</p> <p>Barragem</p> <p>Lago</p> <p>↓</p> <p>Incrustação</p>	<p>Pântano</p> <p>↓</p> <p>Depósitos paludais</p> <p>Clásticos</p> <p>↓</p> <p>Lagos e vales preenchidos, barreiras e cones aluviais (frequentemente cimentados)</p>
	Autóctone		
Feições de pequenas escalas (micromorfologia e microfabric)	<p>Microbial</p> <p>↓</p> <p>Muitos oncóides</p> <p>↓</p> <p>Estromatólitos</p>	<p>Arbustros bacterianos</p> <p>↓</p> <p>Tufos de algas</p> <p>Incrustações laminadas</p> <p>Briófita</p> <p>↓</p> <p>Tufas e musgos</p>	<p>Inorgânico</p> <p>↓</p> <p>Carbonato "espumoso"</p> <p>Raft Sinter (maioria pisóides)</p> <p>Clásticos</p> <p>↓</p> <p>Intraclastos e pelóides</p>

Na classificação geoquímica, Pentecost & Viles (1994) dividiram o travertino em dois grupos geoquímicos de acordo com a temperatura da fonte da água, sendo estes, o travertino meteógeno e o termógeno.

O travertino meteógeno ou tufa calcária (Figura 2.8) é referido a uma ampla variedade de depósitos calcários de água fresca, onde o CO₂ é proveniente do solo e da atmosfera. A tufa é o produto de precipitações de carbonato de cálcio sob regimes de água fria e tipicamente contém restos de micrófitas e macrófitas, invertebrados e bactérias. Estas rochas podem se formar em uma ampla gama de condições climáticas sempre que exista um regime de fluxo moderado (Ford & Pedley, 1996).

O travertino termógeno ou termal é um depósito de CaCO₃ precipitado em ambientes geotermalmente ativos, onde os fluidos provenientes dos circuitos geotermais interagem com as camadas de rochas carbonáticas e ascendem para a superfície, onde liberam o excesso de bicarbonato de cálcio formando os depósitos de travertino (De Filippis *et al.* 2013).

O CO₂ neste caso é originado por processos termais dentro ou abaixo da crosta terrestre, ou de uma variedade de reações como a hidrólise, oxidação e redução do carbono,

descarbonização do calcário ou diretamente a partir do manto superior, sendo por isso estas rochas mais comuns em regiões de atividade vulcânica ou tectônica recente (Pentecost & Viles 1994; Ford & Pedley 1996).

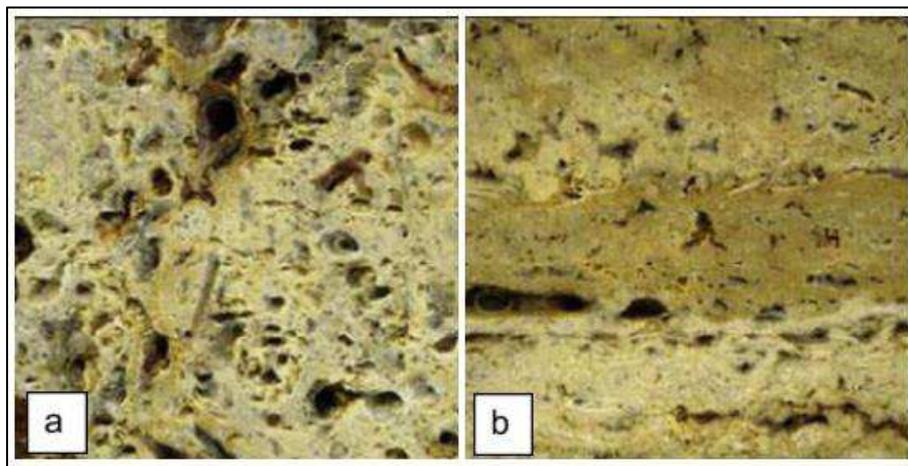


Figura 2.8 - Tufa calcária (a) e travertino laminado (b). (De Filippis *et al.*2013)

Ford & Pedley, *op. cit* (1996) indicam que o termo travertino propriamente dito é restrito a todos os depósitos de carbonato de cálcio de água fresca termal e hidrotermal dominados pela precipitação físico-química, e microbial sem restos de micrófitas, macrófitas, invertebrados, bactérias e animais *in situ*.

Segundo Pentecost & Viles (1994) a diferenciação dos travertinos de acordo com a fábrica é relacionada à arquitetura dos depósitos, ou seja, seu arranjo, densidade e tamanho das unidades que compõem a rocha. Os mesmos autores indicam que as plantas, algas, bactérias, gás e tipo de mineral tem uma grande influência na fábrica do travertino. Isto permite ter uma grande diversidade de nomes para cada caso. Por exemplo, para o caso das plantas, a fábrica pode ser reconhecida por marcas deixadas por folhas e ramos depois que se deterioram e esvanecem, as quais podem originar a porosidade móldica. Em depósitos originados perto de fontes de gás podem apresentar uma fábrica do tipo espuma, a qual é comum nos depósitos termais. Outros depósitos, como os de aragonito, apresentam uma estrutura radiada ou subparalela de cristais. No caso dos travertinos bacterianos a fábrica é mais difícil de ser reconhecida, mas pode ter forma de plumas ou arbustos.

Para a classificação morfológica, Pentecost & Viles (1994) dividiram o travertino em dois grupos baseado na escala de suas feições, as quais contêm nove categorias contidas em dois subgrupos. O primeiro subgrupo contém os depósitos autóctones (*in situ*) associados com nascentes, correntes, rios, lagos e pântanos. O segundo subgrupo é o dos travertinos

alóctones (clásticos - transportados). Os mesmos autores indicam que é possível a ocorrência de formas integradas de travertinos as quais podem desafiar qualquer tentativa de classificação.

2.2 - Porosidade

Segundo Suguio (2003), o estudo dos parâmetros de porosidade e permeabilidade faz parte da *Petrofísica*. A porosidade é definida pela porcentagem de espaços vazios existentes em uma rocha, quando confrontada com o seu volume total.

A porosidade das rochas sedimentares varia de zero, por exemplo, em sílex compacto não fraturado, até 80 a 90% em argilitos recém-depositados. Porém, os valores mais frequentes de porosidade são da ordem de 5 a 25% e, quando alcançam cifras de 25 a 35 %, são referidas como excelentes, tanto para aquíferos como para rochas reservatórios com fluídos de considerável valor econômico.

De acordo com Murray (1960), existem dois tipos principais de porosidade: a singenética ou sindeposicional e a epigenética, que é pós-deposicional (Quadro 2.3).

Quadro 2.3 – Classificação dos tipos de porosidade, Murray (1960).

	Tipo	Origem
Singenética ou sindeposicional	1-Intergranular ou inter-partícula 1- Intragranular ou intra-partícula	Sedimentação
Epigenética ou pós-deposicional	1- Intercristalina 2- Fenestral (janelas)	Cimentação
	3-de molde 4-vesicular 5-de fratura	Dissolução, movimentação tectônica, compactação ou desidratação.

A porosidade, representada pela letra grega ϕ (fi), é o parâmetro físico que representa a relação entre o volume poroso V_p e o volume total V_t de um corpo sólido:

$$\phi = V_p/V_t \quad \text{Eq. (2.1)}$$

O volume total da rocha é dado pela soma do volume poroso V_p e do volume da parte sólida V_s :

$$V_t = V_p + V_s \quad \text{Eq. (2.2)}$$

Nos solos, onde os grãos minerais podem se separar mais facilmente devido a agitação do sistema quando existe a penetração de água na superfície, a porosidade assume valores substancialmente maiores (Tabela 2.2). Os vazios são resultados dos poros e fissuras da rocha e não estão necessariamente interligados. Desse modo, a porosidade total resulta da existência dos poros e das fissuras apresentadas, pelo material, dividido pelo volume da rocha.

Por esta razão, são por vezes definidos dois tipos de porosidade para as rochas: a total e a efetiva, esta última correspondente ao volume de vazios acessível à passagem de fluidos, normalmente a água. A uma escala maior, para os maciços rochosos, podemos ainda distinguir a porosidade primária correspondente ao volume dos poros entre os fragmentos das rochas clásticas e a porosidade secundária produzida pela fraturação e alterações posteriores da rocha. A primeira é característica de toda a massa rochosa e a segunda depende da tectônica e da história de alteração da rocha, podendo variar muito no mesmo maciço rochoso.

Tabela 2.2 – Valores típicos da porosidade de solos e rochas.

Tipo de rocha ou solo	Porosidade máxima (%)
Solo	> 50
Areia e seixo	20 - 47
Argila	> 49
Areia cimentada	5 - 25
Arenito	10 - 15
Calcário e mármore	5
Calcário oolítico	10
R. sedimentares carbonatadas	Até 50

Estudo experimental do comportamento geomecânico do travertino. Adaptado de Huilca, 2014.

2.2.1 - Estrutura Porosa

Os carbonatos são rochas que apresentam estrutura porosa complexa, caracterizada por ampla variabilidade na porosidade e no tamanho dos poros, revelando diferentes características petrológicas devido aos diversos fatores que podem influenciar sua gênese.

A estrutura porosa ou espaço poroso num sistema real é dividido em corpo do

poro e garganta (Al-kharusi, 2007), onde o maior espaço vazio é considerado o corpo do poro e onde os espaços vazios mais alongados e que conectam os maiores espaços vazios são as gargantas, como mostrado na (Figura 2.9).

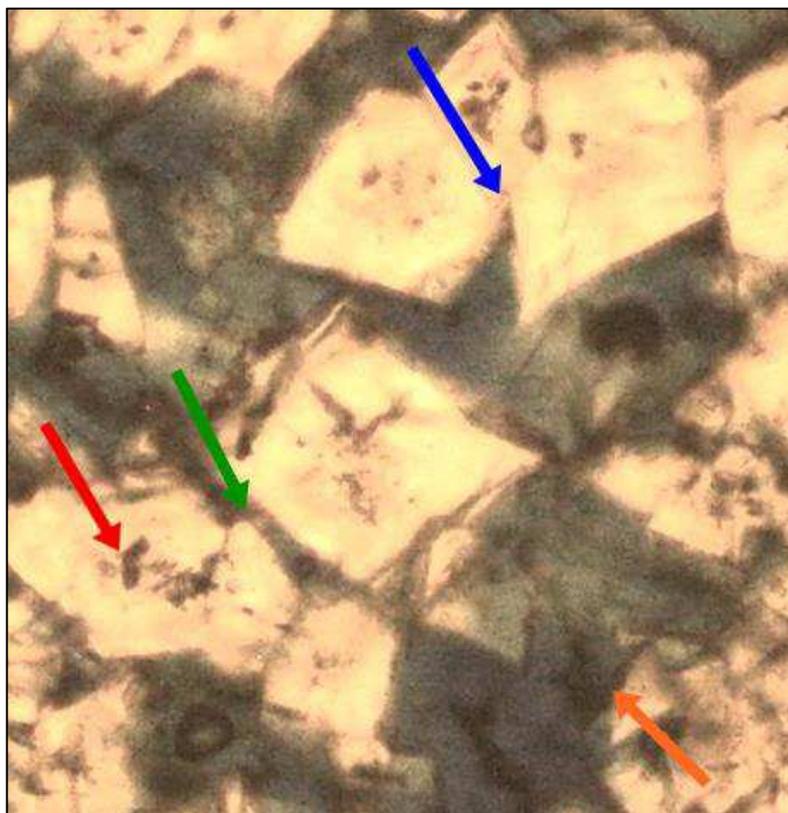


Figura 2.9 - Lâmina delgada mostrando diversas relações entre as estruturas porosas. Seta verde: Corpo alongado, denominado de garganta. Seta laranja: Estrutura porosa intercristalina. Seta azul: garganta fechada indicando resquícios do espaço poroso. Seta vermelha: porosidade intracristalina.

A porosidade nas rochas pode ser do tipo primário, gerada durante a formação da rocha ou no final da deposição dos sedimentos, ou secundária originada por qualquer processo após da formação da rocha ou deposição dos sedimentos, como por exemplo, dissolução, tectonismo, etc.

Segundo Berryman & Wang (2000) dois tipos de porosidade são frequentemente importantes na escala de reservatório: a porosidade da matriz e a porosidade de fissuras ou fraturas. Além disso, de acordo com a sua condutividade a estrutura porosa pode ser dividida em espaço poroso efetivo e não-efetivo, sendo o efetivo aquele que controla a permeabilidade, com maior sensibilidade às variações de esforços. O espaço poroso não efetivo é definido como aquele onde a velocidade do fluido é menor que 1% da velocidade

média do fluido (Bernabé *et al.* 2003). A porosidade pode ser considerada uma componente petrofísica muito importante, que confere às rochas algumas propriedades: dureza, resistência, permeabilidade, e as torna adequadas para diferentes aplicações. Por isso, é de grande interesse estudar a influência da porosidade sobre o comportamento da rocha (Rodríguez *et al.* 2004). O conhecimento da forte susceptibilidade dos carbonatos à dissolução, substituição mineralógica e recristalização permite gerar uma variedade de tipos e tamanhos de poros de irregular distribuição (Akbar *et al.* 2001).

A porosidade das rochas carbonáticas pode se agrupar em três tipos:

- Porosidade conectada, existente entre os grãos do carbonato;
- Porosidade vugular, que são poros com forma de vesículas, originados pela dissolução da calcita durante a diagênese;
- Porosidade por fraturamento que é originada por esforços depois da deposição (Schlumberger, 2008).

Scholle & Ulmer-Scholle (2003) fizeram uma representação dos diferentes tipos de porosidade (Figura 2.10) com base na classificação de Choquette & Pray (1970) sendo divididos em três grupos.

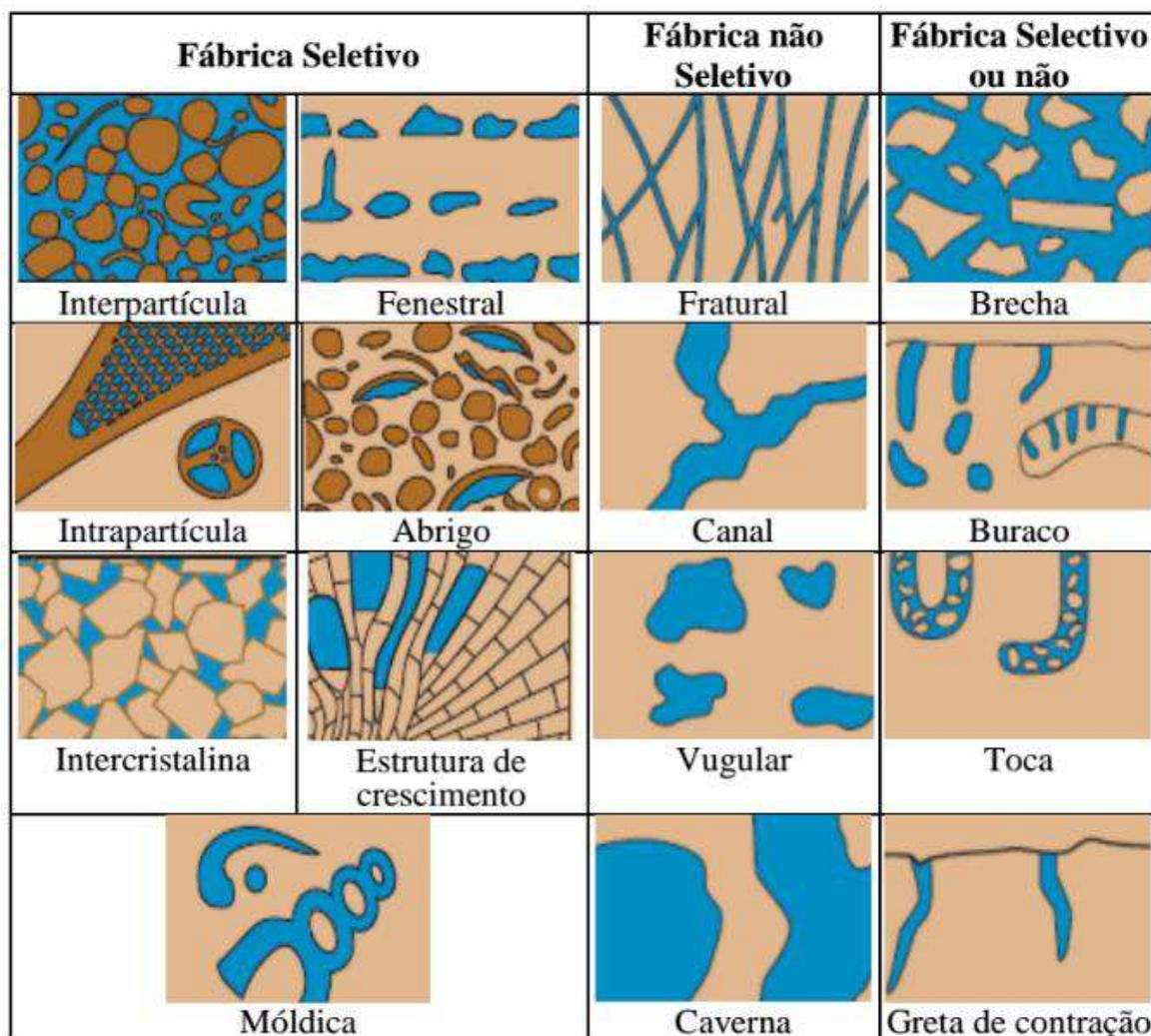


Figura 2.10 - Classificação da porosidade de Choquette & Pray (1970). (Adaptado por Scholle & Scholle, 2003).

Lucia (1999) faz uma classificação da porosidade enfatizada em aspectos petrofísicos, considerando a conectividade dos poros tipo vugular, a fim de estimar a porosidade intergranular e propriedade de capilaridade e permeabilidade. Para Ahr (2008) este é um método visual e prático para caracterizar rochas carbonáticas e suas propriedades petrofísicas sem incluir sua gênica.

Ahr (2008) apresentou sua classificação gênica da porosidade para as rochas carbonáticas (Figura 2.11), a qual inclui três processos como os principais responsáveis da formação dos poros nas rochas carbonáticas: deposição, fraturamento e diagênese.



Figura 2.11 - Classificação genética da porosidade em rochas carbonáticas. Adaptado de Ahr 2008.

Estes processos são independentes, mas existem tipos de poros intermediários chamados híbridos, porque nestes casos mais de um mecanismo pode ter afetado a formação de um sistema de poros em diferentes momentos durante sua história genética, como por exemplo, a deposição alterada por diagênese, mas onde a textura, fábrica e as camadas não são reconhecíveis, sendo classificado como híbrido onde os atributos da diagênese são dominantes. O Quadro 2.4 descreve os tópicos as ilustrados na Figura 2.11, enumerando as características dos vários tipos de porosidade híbrida que ocorrem em rochas carbonáticas.

Quadro 2.4 - Classificação genética da porosidade dos híbridos em rochas carbonáticas. Adaptado de Ahr (2008)

1a	Deposição aspectos dominantes	1c	Melhorada Dissolução Substituição Recristalização	1e	Intraesqueleto Interesqueleto Vugs Stromatactis Vazios construídos Enchimento detrítico
1b	Diagênese aspecto dominante	1d	Interpartícula Intrapartícula Fenestral Abrigo/keystone Reef	1f	Caracter deposicional influência o fraturamento

Garcia-del-Cura *et al.* (2010) classificam a porosidade do travertino em microporosidade e macroporosidade. Dentro da primeira se encontram os poros com tamanho menor de 100 μm (0,1 mm), na segunda se encontram os poros com um tamanho maior a 100 μm , podendo atingir até vários centímetros. No entanto, existem diversos limites estabelecidos na literatura para separar microporos e macroporos.

2.3 – Permeabilidade

Para Schlumberger (2008), a permeabilidade representa a medida da capacidade de uma rocha de permitir a passagem de um fluido, quando submetido a um determinado gradiente de pressão. Seu valor depende da litologia, textura e estrutura da rocha, tipo e quantidade de cimento, tipo e forma da distribuição das argilas. Fatores, outros igualmente importantes são os graus de compactação da rocha, presença de fraturas e efeitos diagenéticos.

Segundo Schlumberger (2008), a permeabilidade pode ser avaliada por diferentes métodos, que por sua vez, apresentam certas limitações. Os testes de formação fornecem valores médios de permeabilidade. As medições diretas em plugues obtidos através de testemunhos de rochas e programas de interpretação fornecem valores estimativos de permeabilidade a partir de dados gerados por perfis.

Para Suguio (2003), a permeabilidade das rochas é determinada, na maior parte nos laboratórios, utilizando-se ar como fluido de medição por possuir a vantagem de não introduzir modificações nas amostras por dissolução ou intumescimento por hidratação de eventuais minerais suscetíveis a essas reações.

Segundo Thomas (2004), a permeabilidade absoluta é caracterizada quando existe um único fluido saturando a rocha e, para o caso onde exista mais de um fluido, a facilidade com que cada um se move é chamada de permeabilidade efetiva ao fluido considerado, ou seja, se um meio poroso está fluindo água e óleo, então se tem a permeabilidade efetiva à água e ao óleo.

Como discutido em Thomas (2004), um fluido com viscosidade μ fluindo através de um meio poroso com comprimento L e seção reta (área aberta do fluxo) A . A equação 2.3, apresenta a vazão q através do meio poroso que é diretamente proporcional à área aberta ao fluxo, ao diferencial de pressão ($P_1 - P_2$) e inversamente proporcional ao comprimento e a viscosidade. A Figura 2.12 representa um esquema do fluxo linear de um fluido através de um meio poroso.

Eq. (2.3)

$$k = \frac{q \cdot \mu \cdot L}{A(P_1 - P_2)} \quad \begin{array}{l} q = 1 \text{ cm}^3/\text{s}, \mu = 1 \text{ cp}, L = 1 \text{ cm}, A = 1 \text{ cm}^2 \text{ e} \\ (P_1 - P_2) = 1 \text{ atm} \longrightarrow \boxed{k = 1 \text{ Darcy}} \end{array}$$

(1 Darcy equivale a $9,869233 \times 10^{-13} \text{ m}^2$)

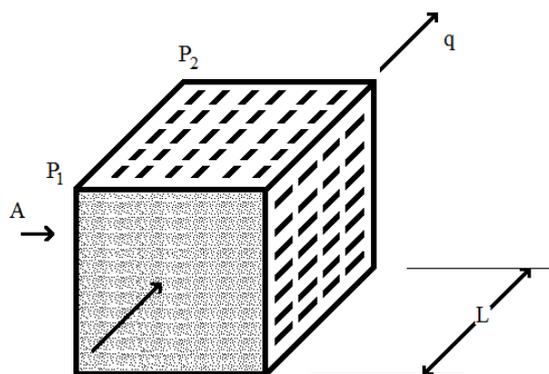


Figura 2.12 - Ilustração esquemática do fluxo linear de um fluido através de um meio poroso. (Thomas 2004)

Segundo Suguio (2003), para se determinar a permeabilidade devem-se considerar os estágios dos sedimentos, ou seja, se esses estão inconsolidados ou consolidados. Quando os sedimentos estão inconsolidados a permeabilidade pode ser determinada em laboratório pela vazão de um fluido, através de uma coluna de sedimento acondicionado em um cilindro de percolação (Figura 2.13). Entretanto, quando os sedimentos se apresentarem litificados pode-se, usar o método proposto por Nutting (1930), no qual se usa uma amostra de rocha cortada em disco de tamanho padrão de 1,27 centímetros de diâmetro e de 5,0 centímetros de espessura. Essa amostra deve ser envolvida lateralmente com lacre e cimentado dentro de um tubo de seção circular. A rocha convenientemente preparada é adaptada em um tubo ligado a um recipiente de gás. O tempo requerido para um determinado volume de gás percolar a amostra é registrado, e a permeabilidade é encontrada por meio de tabelas descritas através de ensaios realizados em laboratório.

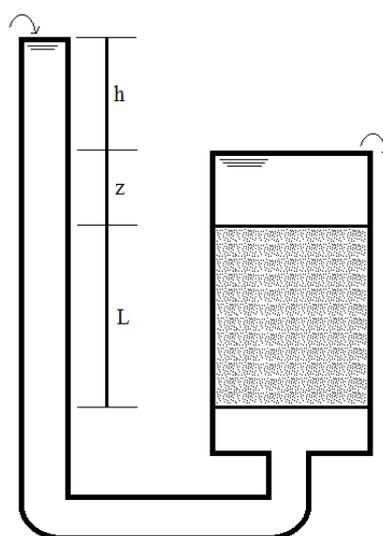


Figura 2.13- Vazão de um fluido, através de uma coluna de sedimento acondicionado em um cilindro de percolação. Adaptado de Duque Neto & Marangon (2004)

A facilidade de escoamento da água através de um meio contínuo é avaliada através do coeficiente de permeabilidade (k). Este coeficiente pode ser calculado através da aplicação da Lei de Darcy, onde:

$$Q = K.i.A \quad \text{Eq. (2.4)}$$

Q = A vazão de percolação do fluido (m/s³);

K = Coeficiente de permeabilidade (m/s);

i = Coeficiente Hidráulico;

A = Área transversal ao escoamento (m²);

A permeabilidade das rochas, em comparação com a dos solos, é geralmente muito baixa (Tabela 2.3). O seu valor cresce sensivelmente com a fissuração e o grau de alteração. O nível de anisotropia da permeabilidade depende da orientação preferencial das fissuras.

O estado de tensão na rocha influencia consideravelmente a sua permeabilidade. O aumento das tensões de compressão provoca o fechamento das fissuras e a diminuição da permeabilidade, mas, a partir de certo limite, o aumento das tensões pode iniciar o aparecimento de novas fraturas provocando o aumento da permeabilidade. A variação da permeabilidade da rocha pode também variar com a pressão da água que circula nos seus vazios e descontinuidades: o aumento da pressão da água tende a abrir as fissuras aumentando a permeabilidade.

Tabela 2.3 – Coeficiente de permeabilidade de rochas e solos. Adaptada Huilca, 2014.

Rochas e Solos	k(m/s)
Areia uniforme	$5,0 \times 10^{-5} - 2,0 \times 10^{-3}$
Areia e seixo	$1,0 \times 10^{-5} - 1,0 \times 10^{-3}$
Argila siltosa	$1,0 \times 10^{-5} - 5,0 \times 10^{-5}$
Argilas	$1,0 \times 10^{-10} - 1,0 \times 10^{-7}$
Granodiorito	$9,8 \times 10^{-11}$
Granito	$1,96 \times 10^{-10}$
Basalto	$2,94 \times 10^{-10}$
Calcário	$9,8 \times 10^{-11} - 7,65 \times 10^{-6}$

2.4 - Tomografia Computadorizada

A tomografia computadorizada foi inicialmente desenvolvida na Inglaterra em 1972 por Hounsfield, para aplicações na área médica. Essa técnica revolucionou a radiologia médica, por possibilitar a obtenção de imagens radiológicas detalhadas e acuradas. Graças a essa inovação, Hounsfield recebeu o prêmio Nobel em medicina em 1979.

A tomografia industrial possibilita a visualização e a análise não destrutiva da estrutura interna dos corpos-de-prova. A importância da tomografia computadorizada está na capacidade de distinguir quantitativamente pequenas diferenças na atenuação da radiação no corpo examinado, de modo que esta diferença pode ser relacionada às diferenças de densidades físicas no corpo.

O princípio da TC X (Tomografia Computadorizada por Raios X) é a medida da atenuação (coeficiente de atenuação linear) dos raios X que atravessam o corpo segundo uma lei física conhecida.

A tomografia computadorizada é um processo radiológico que utiliza a radiação para obter a reconstrução de uma seção transversal de um corpo, quando certo número de projeções unidimensionais em diversos ângulos é processado. Neste caso, o escaneamento em duas direções fornece a imagem bidimensional e através do *software* de interpretação, adquire-se a reconstrução do modelo tridimensional da amostra.

Reimers & Goebbels (1983) realizaram uma das primeiras pesquisas ao aplicar a TC para monitorar o progresso de escoamentos multifásicos em meios porosos, onde foi mostrada a grande importância de se medir a evolução da saturação do meio pelo fluido *in situ* para melhor interpretação dos resultados dos experimentos.

Wang *et al.* (1984) produziram imagens da distribuição de saturações durante um deslocamento (líquido-líquido) imiscível em amostras do arenito *Berea*. Estas foram as primeiras imagens e as primeiras publicações em aplicações de TC em estudos de fluxo multifásico em meios porosos.

Alguns estudos com corpos-de-prova do Mar do Norte foram reportados na literatura. Foi usado um tomógrafo de primeira geração para a visualização do fenômeno de deslocamento de fluidos em calcário *Danian* e arenitos *Berea* por Cromwell *et al.* (1984).

A técnica da TC com raios X contribui para o aumento do entendimento dos processos de escoamento de um fluido em experimentos com amostras de laboratório. A literatura apresenta estudos de deslocamento de fluidos miscíveis e imiscíveis em corpos-de-

prova homogêneos e heterogêneos. Os efeitos da heterogeneidade nos mesmos e a dispersão do fluxo foram observados e discutidos por Saldin *et al.*(1985).

Honapour *et al.* (1985) usaram um tomógrafo de quarta geração *Picker* SD600 para descrição de rochas reservatórios. Foram demonstradas as heterogeneidades da rocha, redutores macroscópicos de permeabilidade e orientação de fraturas em corpos de prova de calcário *Danian* do Mar do Norte.

Foi visualizado por TC o deslocamento de óleo pesado por entre os poros de grãos de sílica e monitorada a evolução da frente de invasão por (Fransham & Jelen, 1987).

Chatzis *et al.* (1988) realizaram imagens usando TC para estudar as propriedades físicas de rochas porosas e perfis de saturação durante fluxos bi e trifásicos em processos de saturação de fluidos injetados sob pressão. Outro estudo importante realizado pelos autores, foi utilizar o uso de TC para medidas de saturação, injetando-se sob pressão gás inertes na formação.

Um dos primeiros a atentar para o potencial e a versatilidade do uso da tomografia em estudo de materiais geológicos foi Withjack (1988), mas a TC ainda não era extensamente utilizada para estudos geológicos. Os primeiros relatos neste campo aparecem desde 1990 por Klobes (1997), que reportaram esta técnica, apresentando exemplos deste uso e mostrando que a TC poderia ser usada em conjunto com outras técnicas estabelecidas na determinação da porosidade. Desde então, o enfoque principal de trabalhos nesta área tem sido na investigação de injeção de fluido, mecanismo de fratura de rochas e no estudo da distribuição de cavidades.

Kantzas *et al.* (1988) investigou o uso de dopantes variando-se a tensão do tomógrafo. Ele observou que o aumento dos números CT é obtido pelo íon binário de cada sal. Com o aumento da concentração, o efeito de endurecimento de feixe se torna mais e mais pronunciado. Este parece ser o maior obstáculo ao uso de soluções de dopantes muito concentradas em testes utilizando TC.

A tomografia computadorizada por raios X é uma técnica não-destrutiva que mede as variações de densidade do material. A técnica utiliza a obtenção de uma série de imagens bidimensionais por meio da passagem de um feixe de raios X através de um objeto, para em seguida com a utilização de um algoritmo matemático reconstruir tridimensionalmente, a estrutura interna do mesmo (Wellington & Vinegar, 1987; Flannery *et al.* 1987).

A TC tem muitos benefícios comparados com outros métodos, para cálculo de porosidade supondo fluxo multifásico. Pode-se gerar uma imagem 3D da saturação das três fases, durante o processo de deslocamento, nas pressões e temperaturas do reservatório.

Dentre os problemas que podem ser estudados estão à permeabilidade relativa das três fases, a dispersão, a viscosidade anular, segregação da gravidade, óleo trapeado, controle de mobilidade e da molhabilidade. O uso da TC para o deslocamento de duas fases imiscíveis foi relatado por (Wang *et al.* 1984).

Os dados obtidos por TC com radiação transmitida foram analisados por computadores utilizando algoritmos de reconstrução para produzir um mapeamento tridimensional dos valores do coeficiente de atenuação linear de objetos opacos. Desde então, esta técnica tem sido extensivamente, utilizada também fora da área médica e tem havido um grande desenvolvimento de sofisticados algoritmos para melhorar as imagens obtidas, a resolução espacial, e diminuir o tempo de computação (Flannery *et al.* 1987).

A tomografia computadorizada com raios X demonstrou ser excelente ferramenta na análise de trincas e pode revolucionar a tecnologia de análise de testemunhos de rocha. A pesquisa mostrou que a tomografia de resolução médica pode ser utilizada para medidas de trincas até 0,5 mm de largura. Outros resultados incluem a análise de invasão de fluidos de perfuração (Bergosh's *et al.* 1985).

2.4.1 - Componentes do aparelho e aquisição da imagem

O aparelho de tomografia computadorizada tradicional apresenta três componentes principais (Figura 2.14) o *gantry*, no interior do qual se localizam o tubo de raios-X e um anel de detectores de radiação, constituído por cristais de cintilação; a mesa, que acomoda o material e que, durante o exame, movimenta-se em direção ao interior do *gantry* e ainda, o computador, que reconstrói a imagem tomográfica a partir das informações adquiridas no *gantry*.

O técnico ou operador de TC acompanha o exame pelo computador, que geralmente fica fora da sala que acomoda o *gantry* e a mesa, separados por uma parede de vidro plumbífero.



Figura 2.14 - Aparelho de tomografia computadorizada tradicional: *gantry* e mesa; seta indica o movimento realizado pelo aparelho.

Neste aparelho, a fonte de raios-x emite um feixe estreito (colimado) em forma de leque, direcionado a um anel com diversos detectores (Figura 2.15). Durante o exame, no interior do *gantry*, o tubo de raios-x gira dentro do anel estacionário de receptores. Os sinais recebidos pelos detectores dependem da absorção da matéria atravessada pelo feixe radiográfico e são registrados e processados matematicamente no computador.

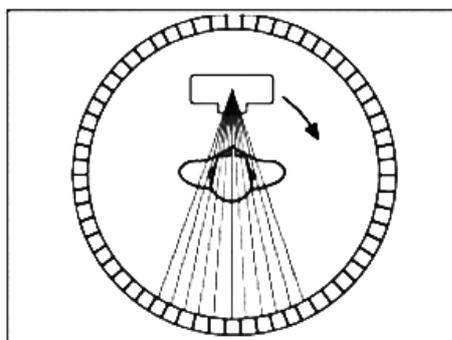


Figura 2.15 - Representação gráfica do interior do *gantry*, onde o tubo de raios-X gira em torno da matéria, emitindo um feixe colimado de raios-x em forma de leque, direcionado ao anel estacionário de detectores. (Garib *et. al.* 2007).

Por meio de múltiplas projeções no curso de 360° ao redor da matéria, os receptores registram uma série de valores de atenuação dos raios-X. Estes múltiplos coeficientes de atenuação são submetidos a complexos cálculos matriciais (Figura 2.16), permitindo ao computador reconstruir a imagem de uma secção da matéria (Goaz & White, 1994).

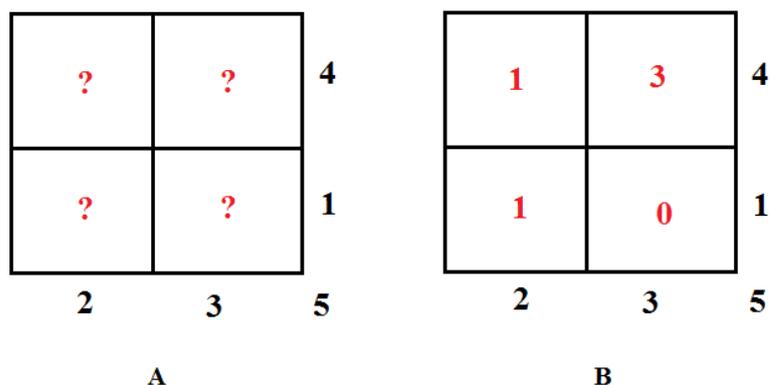


Figura 2.16 - O princípio da construção da imagem em TC tradicional: (A) valores de atenuação do feixe de raios X, após atravessar o objeto em diversas direções e (B) a matriz com o cálculo computadorizado da densidade de cada região atravessada pelos feixes de radiação. (Brooks, 1993).

Nas primeiras gerações de aparelhos de TC, o feixe de raios-x completava um giro em torno do objeto e, posteriormente, a mesa se movimentava para capturar a imagem em fatia da próxima região adjacente. Nos aparelhos atuais, denominados de última geração, a mesa com o objeto, movimenta-se simultaneamente à rotação do tubo de raios-x, determinando uma trajetória helicoidal da fonte de raios-X em torno do objeto, o que provê a denominação aos aparelhos de TC modernos: tomografia computadorizada helicoidal ou espiral, (Sukovic, 2003). Este avanço incrementou a qualidade da imagem e reduziu o tempo de exposição do objeto. Além disso, os aparelhos modernos apresentam a tecnologia *multislice*, isto é, são capazes de adquirir 4 a 16 fatias de imagem para cada giro de 360° do feixe de raios-x em torno do objeto (Gee *et al.* 2003).

As vantagens dos aparelhos *multislice* referem-se à maior velocidade de aquisição da imagem, especialmente útil quando o movimento do objeto constitui um fator limitante para o exame, assim como melhor resolução espacial das imagens (Sukovic, 2003). A imagem compõe-se unitariamente pelo pixel (Figura 2.17), cada um dos quais apresenta um número que traduz a densidade da matéria ou o seu poder de atenuação da radiação.

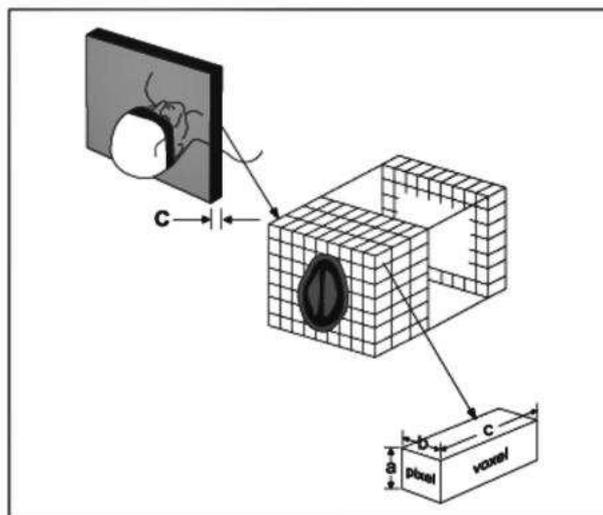


Figura 2.17 - Representação esquemática das unidades que compõem a imagem da tomografia computadorizada tradicional (Goaz & White 1994).

Deve-se destacar que a imagem de TC ainda apresenta uma terceira dimensão, representada pela espessura do corte. Assim, outra palavra deve ser familiar aos profissionais que trabalham com imagens tridimensionais: o *voxel*. Denomina-se *voxel* a menor unidade volumétrica da imagem, que em tomografias com resolução médica, a espessura do corte (Figura 2.15), pode variar de 0,5 a 20 mm, a depender da região do objeto a ser escaneada e da qualidade da imagem desejada (Goaz & White, 1994).

Deste modo, quando se deseja imagens muito precisas de pequenas regiões, ajusta-se o aparelho para adquirir cortes de 1mm de espessura, por exemplo, e assim o *voxel* das imagens resultantes corresponderá a 1 mm.

2.5 - Microtomografia Computadorizada

A microtomografia computadorizada (μ CT) tem sido considerada uma poderosa ferramenta de análise microestrutural para rochas petrolíferas (Appoloni *et al.* 2007). Nos últimos anos, com o desenvolvimento de novas tecnologias, tomografias computadorizadas (TC) têm evoluído rapidamente, tanto quanto a resolução espacial e a qualidade da imagem em questão, que vão desde milímetros até micrômetros, mais recentemente, nanômetros.

A μ CT fornece imagens 2D da secção transversal das amostras, permitindo assim a caracterização da sua microestrutura. No entanto, a fim de utilizar completamente a metodologia, é necessário reconstituir, visualizar e processar imagens tridimensionais (3D).

A microtomografia é uma técnica não destrutiva que segundo Shulakova *et al.* (2013), consiste num conjunto de números correspondentes às densidades de raios-X, $D(x, y, z)$ atribuídos a cada *voxel* (x, y, z) do volume estudado. Dessa forma a tomografia fornece um conjunto de dados que dá uma representação tridimensional da estrutura e da variação da composição dentro de uma amostra. O fluxograma apresentado na Figura 2.18 define um passo a passo geral do processo.

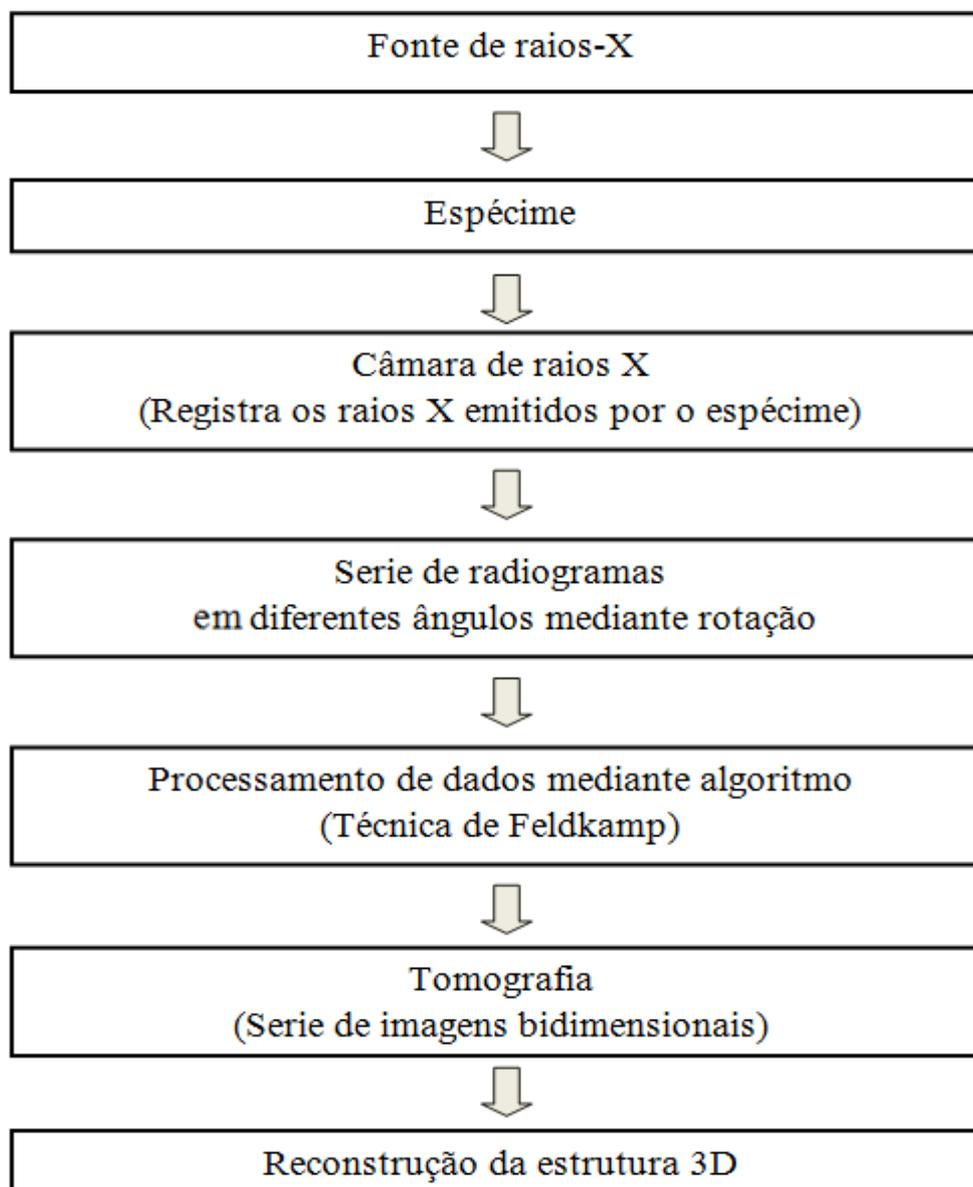


Figura 2.18 - Fluxograma do processo de microtomografia de raios-X. Adaptado de Shulakova *et al.* 2013.

A microtomografia tem como fundamento a utilização de raios-X. A absorção ou deflexão dos raios depende das densidades de cada componente do espécime. Uma série de

radiografias das amostras é adquirida em diferentes ângulos. Este conjunto de radiografias, dados de projeção, é processado computacionalmente utilizando algoritmos de reconstrução gerando os tomogramas, imagens bidimensionais, que permitem a reconstrução digital da estrutura tridimensional da amostra partindo de *pixels* (2D) para *voxels* (3D).

Segundo Arns *et al.* (2005) a resolução e a maximização do campo de observação são otimizadas tanto pela manipulação da fonte de raios-X como pelo detector e é limitada pela energia da fonte e a voltagem de operação. Assim, uma ampla gama de energias de raios-X será perfeita para aperfeiçoar o contraste entre as diferentes fases do espécime e uma ampla faixa dinâmica da câmera dos raios-X melhorará a discriminação de traços finos em materiais densos.

Knackstedt *et al.* (2006) mostraram a presença de fortes variações na estrutura de rochas carbonáticas mediante imagens 3D obtidas pela microtomografia computadorizada. Além disso, os modelos gerados pelas imagens mostram amplas variações topológicas e geométricas da rede de poros, que apresentavam dramáticas diferenças visuais e quantitativas.

Petunin *et al.* (2011) usaram imagens de μ CT com o fim de prever o comportamento da porosidade e da permeabilidade, dependendo do estado de tensões em arenitos e carbonatos. Os autores verificaram significativas variações das correlações tensão – permeabilidade de acordo com o tipo de rocha, podendo este comportamento ser, segundo estes, explicado pela diferença entre a estrutura porosa das rochas.

Qajar *et al.* (2013) afirmam que em imagens provenientes da μ CT, as rochas carbonáticas podem apresentar um incremento da porosidade e da interconectividade entre os poros devido à dissolução da rocha, originada pelo fluido percolante.

Segundo Knackstedt *et al.* (2006), a porosidade obtida das imagens da μ CT depende da resolução do equipamento, motivo pelo qual alguns poros não serão contabilizados durante a análise, registrando-se porosidades aparentes. Os autores indicam que as imagens de baixa resolução só permitem determinar o tamanho, forma e distribuição espacial da porosidade vugular, sendo que as imagens de maior resolução exibem porosidade interconectada e permitem medir o tamanho do poro intergranular.

Para Qajar *et al.* (2013) as diferenças na porosidade podem ser também atribuídas a erros experimentais e de representatividade, dado que só uma pequena porção da rocha é tomografada.

O uso de uma elevada resolução torna-se importante, uma vez que os macroporos apresentam uma pobre conectividade, tornando-se a microporosidade a responsável pela

porosidade efetiva.

Arns *et al.* (2005) utilizaram imagens tomográficas no cálculo de parâmetros como permeabilidade, pressão capilar de drenagem, e índice de resistividade, os quais comparados com ensaios de laboratório de permeabilidade e de pressão capilar de injeção de mercúrio mostraram resultados satisfatórios.

2.5.1 - Processamento e análise digital de imagens (PADI)

Gomes (2001) descreve processamento e análise digital de imagens (PADI) como uma técnica que utiliza operações matemáticas para alterar os valores dos pixels de uma imagem digital, modificando-a, para facilitar sua visualização, ou para preparar a imagem para ser analisada computacionalmente.

A análise digital de imagens consiste na extração e tratamento de dados quantitativos de imagens digitais. Podem-se realizar medições mais rápidas e precisas, possibilitando a realização de medidas impossíveis de se executar manualmente.

Os programas computacionais desenvolvidos para executar rotinas de PADI em imagens digitais podem ser estudados e entendidos a partir da sequência básica exposta na (Figura 2.19), que segundo Gomes (2001) não é inalterável e seu grau de flexibilidade é função do problema envolvido.

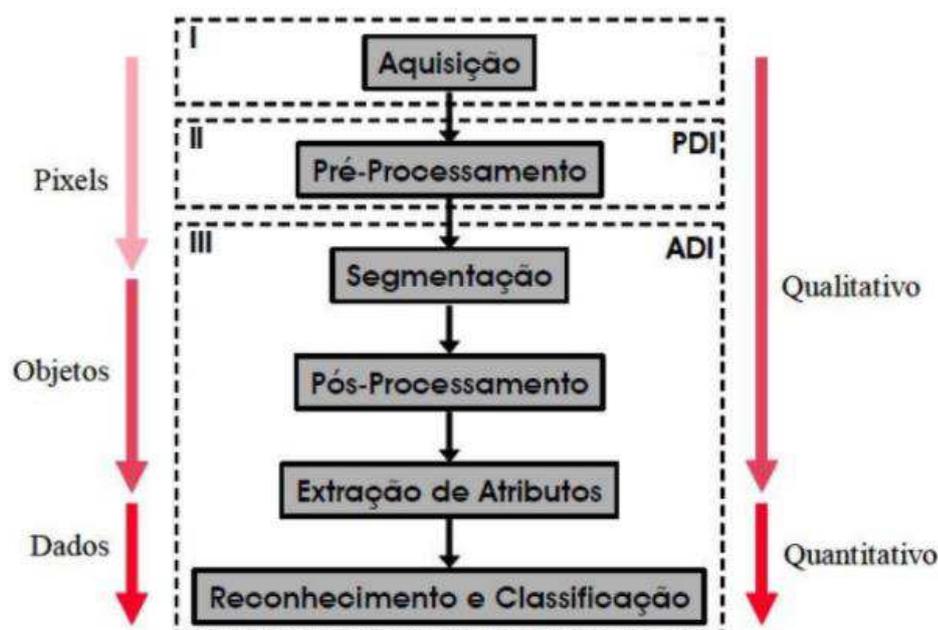


Figura 2.19 - Sequência padrão do processamento e análises de imagens. Adaptado de Gomes, 2001.

A sequência de PADI consta de três blocos gerais:

I. O bloco Aquisição: formação da imagem e sua digitalização.

II. O bloco (PDI): recebe a imagem e fornece mediante a manipulação uma imagem processada.

III. O bloco (ADI): recebe a imagem processada e fornece dados numéricos.

O bloco I consiste na entrada de uma amostra adequadamente preparada para a formação da imagem e sua digitalização. Esta imagem digital é um arquivo de computador constituído por um cabeçalho, com diversas informações, e uma matriz de números, onde cada número corresponde à cor ou intensidade do pixel de posição correspondente na imagem. Desse modo, a matriz formada é um mapa que reproduz a imagem pixel a pixel. O número e tamanho dos pixels da imagem digital representam toda a variedade espectral dos constituintes da imagem, ilustrando a resolução espacial ou o tamanho real da imagem e a resolução espectral, a profundidade ou níveis de tons de cinza que consiste no número máximo de níveis de intensidade que a imagem pode apresentar. Um baixo e alto contraste são, respectivamente, pequenas ou altas variações de tons de cinza nos pixels de uma imagem.

A resolução espectral pode ser analisada, mediante o histograma, que constitui uma representação gráfica da função distribuição dos tons de cinza de seus pixels. O histograma é um gráfico que tem como eixo horizontal a escala de tons de cinza e cujo eixo vertical representa as probabilidades de ocorrência dos tons de cinza na imagem, segundo o referido por (Gomes, 2001).

O bloco II, de pré-processamento da imagem digital (PDI) recebe a imagem original e fornece mediante a manipulação uma imagem processada. O processo de manipulação é geralmente executado em três etapas: pré-processamento, segmentação e pós-processamento.

No bloco III, ocorre o recebimento da imagem processada pelo bloco anterior e fornece dados numéricos, representando a densidade de cada região do objeto absorvente dos feixes de radiação.

2.6 - Porosimetria à Gás

Uma das técnicas mais importantes para a determinação de porosidade de materiais é a porosimetria pelo método da intrusão de mercúrio (PIM). Poros entre 600 μm e 3,5 nm, em geral, podem ser caracterizados por esta técnica. A técnica se baseia nos fenômenos de capilaridade por líquidos que não molham os sólidos e que só serão introduzidos nos poros mediante aplicação de pressão (Leitner, 1981).

A análise de porosidade efetiva e densidade de grãos no permoporosímetro a gás baseia-se na lei de Boyle, uma vez que se trata de um sistema fechado, sem variação de temperatura, em que o produto entre o volume de gás e a pressão se mantém constantes antes e após a interligação dos dois subsistemas (teoria dos vasos comunicantes) (Cavalcanti *et al.* 2013)

A aplicação desse método é reconhecida como uma das técnicas mais utilizadas para a determinação da porosidade de materiais. A porosimetria consiste no método de intrusão de fluídos e se baseia nos fenômenos de capilaridade para determinar a estrutura e extensão dos poros presentes no corpo de prova, sendo introduzida nos poros mediante aplicação de pressão, submetendo o corpo sólido.

2.7 - Difração de Raios-X

A difratometria de raios-X corresponde a uma das principais técnicas de caracterização microestrutural de materiais cristalinos, encontrando aplicações em diversos campos do conhecimento, mais particularmente na engenharia e ciências de materiais, engenharias metalúrgicas, químicas e de minas, além das geociências, dentre outras (Figura 2.20). Portanto, é fundamental para o profissional envolvido conhecer a estrutura cristalina e a microestrutura de um material para poder entender suas propriedades. O termo estrutura cristalina envolve o arranjo dos átomos, enquanto que o termo microestrutura engloba desde os constituintes estruturais tais como composição presente, fases, quantidades, inclusões até contornos de grãos, trincas, vazios, geminações impressas nos minerais, etc.

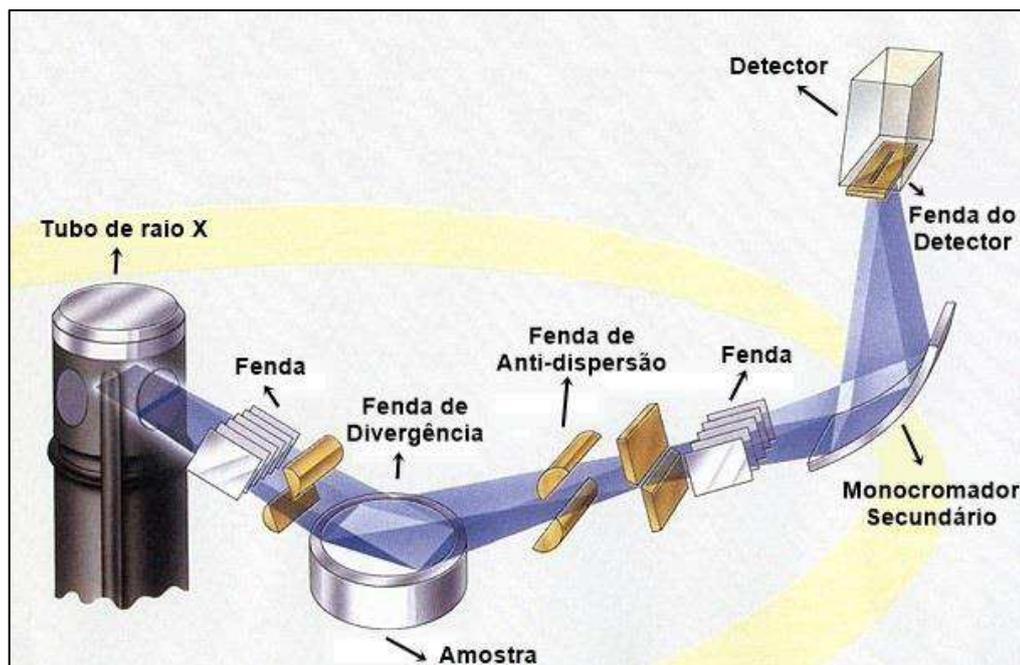


Figura 2.20– Exemplo de um equipamento de difração de raios-X, mostrando o percurso desde a emissão dos raios até a sua detecção. (Fonte: <http://www.zfcs.agh.edu.pl/Zmml/equipment.html>).

Um cristal pode ser definido como um arranjo ordenado e periódico de átomos formando um sólido ou parte dele como um grão, por exemplo. Esta repetição periódica é devido à coordenação atômica no interior do material, na busca de minimizar a energia volumétrica contida no cristal. Esse arranjo atômico periódico pode ser responsável também pela forma externa do cristal como acontece, por exemplo, com o mineral calcita (CaCO_3), Figura 2.21, a halita ou o topázio cristalino encontrado na natureza, (Cullity, 1956).

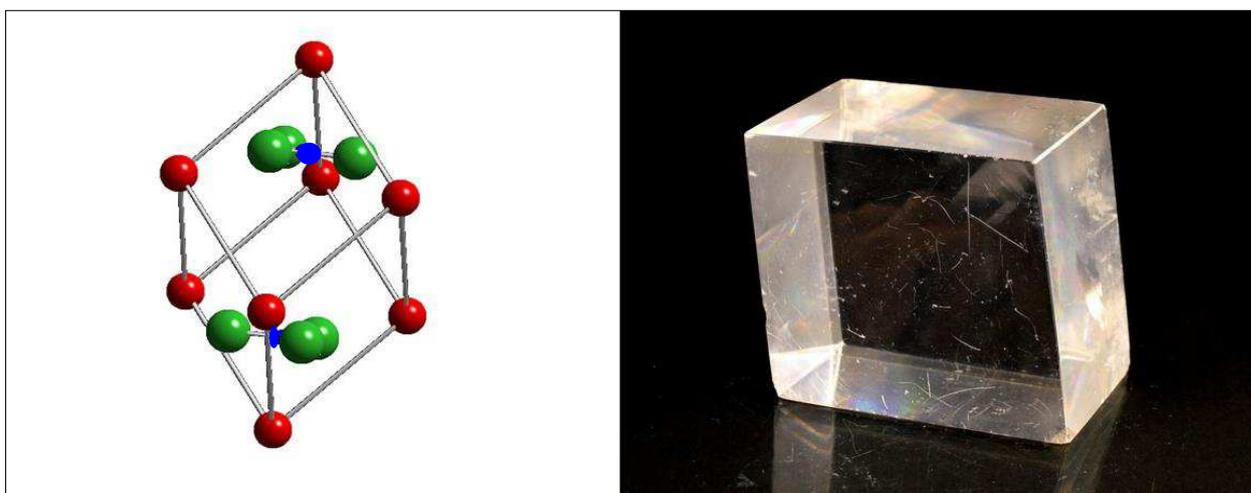


Figura 2.21 - Estrutura cristalina da calcita exibindo os átomos de oxigênio (verde), carbono (azul), cálcio (vermelho) e as faces externas do cristal resultante desta estrutura.

Fonte: www.e-agps.info

Desta forma, cristais (sólidos) se diferem fundamentalmente dos gases e líquidos (fluidos) por estes não possuírem uma exigência essencial que é a periodicidade do seu arranjo atômico. Nem todos os sólidos são cristalinos, alguns são totalmente amorfos (sem forma definida), como os vidros, a obsidiana e alguns polímeros como o poliestireno (PS) e o Polimetilmetacrilato (PMMA). Neste sentido não existe diferença alguma entre um líquido e um sólido amorfo. A técnica de análise estrutural e microestrutural por raios-X se baseiam na presença de uma rede cristalina ou na periodicidade do arranjo atômico. Esta é a principal limitação da técnica, ou seja, a técnica de análise de estrutura ou microestrutura de difração de raios-X não se aplica a materiais sólidos totalmente amorfos como os vidros ou polímeros e nem a líquidos (Callister, 2009).

2.7.1 - Lei de Bragg

Considerando-se dois ou mais planos de uma estrutura cristalina, as condições para que ocorra a difração de raios X (interferência construtiva ou numa mesma fase) vão depender da diferença de caminho percorrida pelos raios X e o comprimento de onda da radiação incidente. Esta condição é expressa pela lei de Bragg, ou seja, $n \lambda = 2 d \sin \theta$ (Figura 2.22), onde λ corresponde ao comprimento de onda da radiação incidente, “n” a um número inteiro (ordem de difração), d à distância interplanar para o conjunto de planos hkl (índice de Miller) da estrutura cristalina e θ ao ângulo de incidência dos raios X (medido entre o feixe incidente e os planos cristalinos).

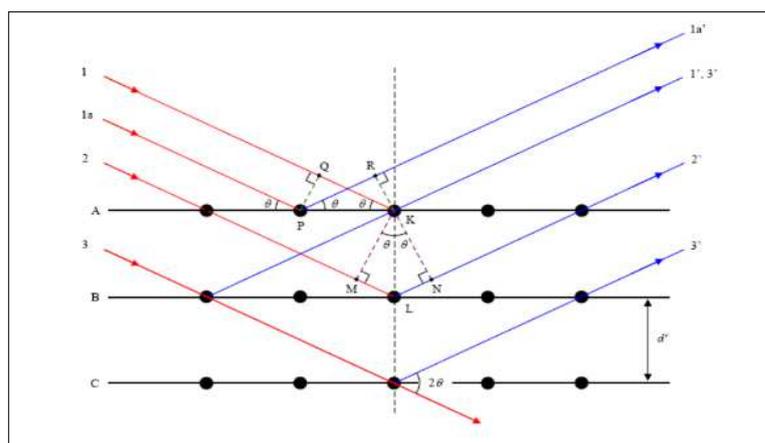


Figura 2.22 - Difração de Raios X de acordo com a Lei de Bragg. (Disponível em: <http://principo.org/1-0-aula-terica-de-difraco-de-raios-x-2-introduco.html>)

A intensidade difratada, dentre outros fatores, é dependente do número de elétrons no átomo. Adicionalmente, os átomos são distribuídos no espaço, de tal forma que os vários planos de uma estrutura cristalina possuem diferentes densidades de átomos ou elétrons, fazendo com que as intensidades difratadas sejam, por consequência, distintas para os diversos planos cristalinos.

2.7.2 - Ondas Eletromagnéticas

Ondas eletromagnéticas são produzidas pela oscilação de cargas elétricas sejam elas positivas como os prótons ou negativas como os elétrons. Para se saber quantas vezes por segundo é preciso vibrar ou agitar uma carga elétrica para se obter uma determinada cor basta estimar o comprimento de onda do movimento:

$$v = \frac{c}{\lambda} \quad \text{Eq. (2.5)}$$

Onde: c = velocidade da luz e λ = comprimento de onda

A faixa visível corresponde ao intervalo que se estende desde 800 nm a 400 nm, onde o verde das folhas, por exemplo, corresponde a 530 nm. A velocidade da luz é representada pela letra c que equivale a $2,999 \times 10^{10}$ m/s, e λ é o comprimento de onda da cor que se quer obter pela oscilação da carga elétrica. No caso do verde das folhas a frequência de vibração das cargas elétricas é de $5,66 \times 10^{22}$ Hz, ou seja, cerca de 10^{22} vezes por segundo.

2.7.3 - Espectro de ondas Eletromagnéticas

A extensão visível do espectro eletromagnético ocupa apenas uma pequena porção entre 1,7 e 3,1 elétron-Volt (eV) (Figura 2.23) e Tabela 2.4. A cor é fundamentalmente um fenômeno subjetivo, resultante do estímulo recebido pelos olhos e interpretado pelo cérebro. A retina contém vários tipos distintos de receptores de cor, ou seja, estruturas que são sensíveis a regiões particulares do espectro visível. O sistema nervoso central interpreta esse estímulo ou combinação de estímulos, que resulta na percepção de uma cor em particular. Seu aparecimento está condicionado, portanto, à existência de dois elementos: a luz, que é o agente de estímulo e o olho como aparelho receptor (Marzorati *et al.* 2012).

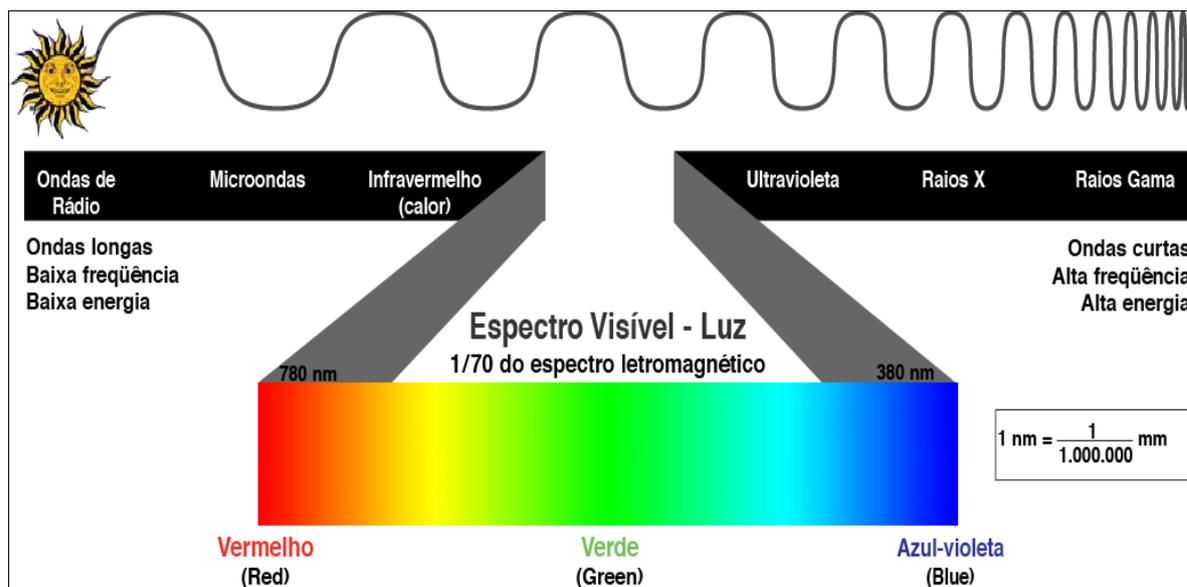


Figura 2.23 – Intervalos dos comprimentos de ondas. USP/Instituto de Química, 2012.

Os raios-X são radiações eletromagnéticas que correspondem a uma faixa do espectro que vai desde 10 nm a 0,1 nm (ou 1,0 a 100Å). Acima desta faixa temos os Raios Gama, cujos comprimentos de onda são menores que 0,1 nm. (Marzorati *et al.* 2012).

Tabela 2.4 - Correlação entre as cores e as faixas de energia dos fótons.

COR	Comprimento de onda (nm)	Largura de banda (nm)	Energia (eV)
Vermelho	647,0-700,0	53,0	1,77-1,92
Laranja	585,0-647,0	62,0	1,92-2,12
Amarelo	575,0-585,0	10,0	2,12-2,16
Verde	491,2-575,0	83,3	2,16-2,52
Azul	420,0-491,2	71,2	2,52-2,95
Violeta	400,0-420,0	20,0	2,95-3,10

Marzorati *et al.* (2012).

Uma fonte que emite fótons de todas as energias da região do visível (1,7 a 3,1 eV ou 400 a 750 nanômetros), é percebida como branca. O olho é insensível à luz com comprimentos de onda inferiores a 400 nm (região do ultravioleta) para evitar os efeitos perniciosos provocados pela foto degradação das biomoléculas. Essa ação destrutiva das

radiações de alta energia (ionizantes) podem provocar danos fatais e é usada para matar microrganismos (por exemplo, as lâmpadas bactericidas de vapor de mercúrio). O cristalino atua como um filtro protetor, retendo os raios luminosos de ondas curtas. Porém, os raios de $\lambda \sim 250$ nm são capazes de cegar se os olhos ficarem muito tempo em exposição. No outro limite, do lado dos raios de ondas longas, a visibilidade cessa por volta de 750 nm, impossibilitando a visão dos raios infravermelhos (Marzorati *et al.* 2012).

2.7.4 - Produção dos Raios – X

O fenômeno mais comum utilizado para produzir emissão de raios-X, ocorre quando um feixe de elétrons é acelerado por uma diferença de potencial e incide sobre certo elemento material que serve de alvo como mostra a Figura 2.24 (Subbarao *et al.* 1973).

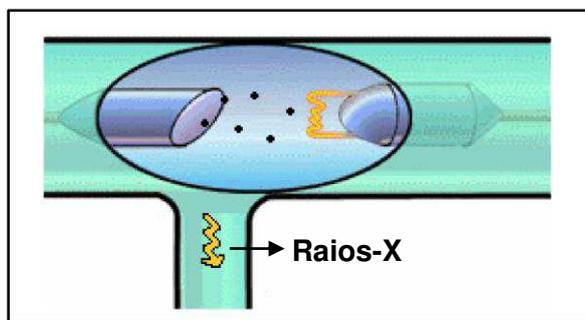


Figura 2.24 - Produção de raios-X. Adatado de Subbarao *et al.* (1973)

Os raios são resultado do encontro dos elétrons em alta velocidade com um alvo metálico. O nível de produção desses raios é controlado pela medida da corrente usada para a fabricação, quanto maior for à corrente elétrica, maior será a produção de raios - X.

2.7.5 - Espalhamento dos Elétrons

O espalhamento dos elétrons consiste no encurvamento da trajetória de um elétron incidente sobre um núcleo atômico (normalmente o alvo) provocando a emissão de raios-X.

Este encurvamento promove uma desaceleração dos elétrons e estes convertem parte de sua energia cinética em radiação fluorescente (raios-X) e calor. Como nem todos os elétrons são desacelerados de forma idêntica, a emissão de radiação aparece como um espectro contínuo chamado de radiação branca, conforme mostra a Figura 2.25.

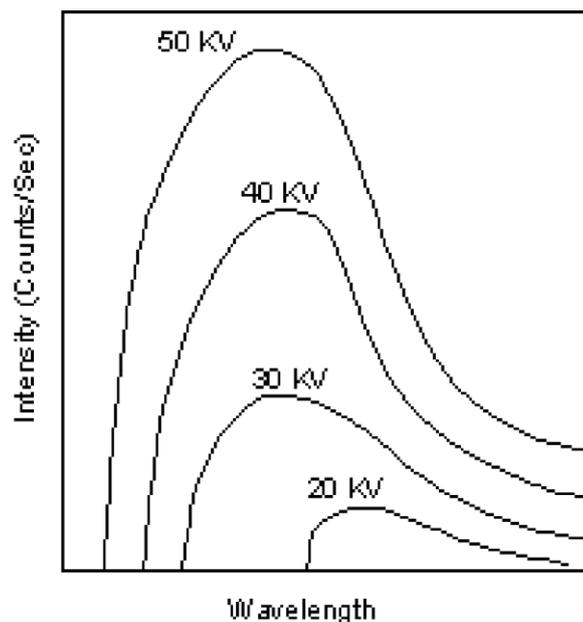


Figura 2.25 - Espectro de radiação branca dos raios-X. Subbarao *et al.* (1973).

2.7.6 - Salto Quântico

Quando a diferença de potencial V atinge um valor crítico V_c , chamado de potencial de excitação (que depende do elemento ou material do alvo), os elétrons incidentes possuem energia cinéticas suficientes para, ao colidir com elétrons das camadas mais internas do elemento do alvo, expelirem estes elétrons deixando suas posições vacantes. Elétrons das camadas mais externas do elemento podem preencher estas posições vacantes liberando raios-X. Por exemplo, se um elétron da camada K for retirado, elétrons da camada L , M , N , etc podem preenchê-la, emitindo raios - X de diferentes comprimentos de ondas bem específicos, conforme mostra a Figura 2.26. Uma radiação muito importante para o estudo de raios-X, é a radiação K_α que é resultado do preenchimento de um elétron da camada L em uma vacância na camada K , ou seja, resulta do salto eletrônico entre as camadas (Subbarao *et al.* 1973).

O espectro de raios X produzido desta forma depende do elemento do alvo (material) e é chamado de espectro característico. Assim o espectro de raios-X produzido por um difratômetro comercial é constituído por dois espectros sobrepostos: o espectro contínuo e o característico.

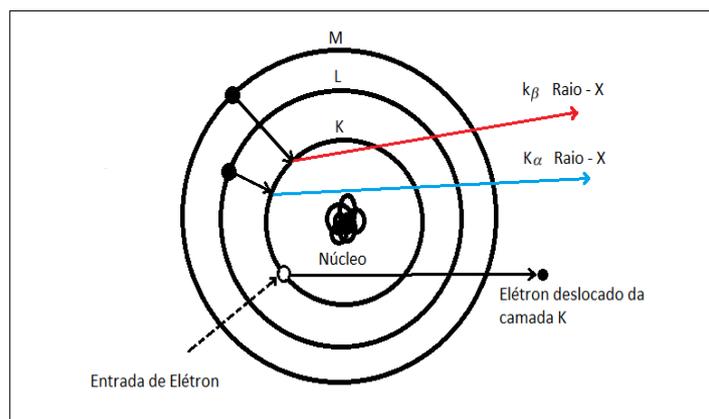


Figura 2.26- Obtenção de radiação K_{α} e K_{β} . Adaptado de USP/Instituto de Química, 2012.

2.7.7 - Monocromatização dos Raios – X

Na prática, espectro de raios-X produzidos desta forma não apresenta utilidade para identificação de materiais, pois existem diferentes comprimentos de ondas com intensidades relativas consideráveis, que ao atingir um material cristalino qualquer poderia ser responsável pelo fenômeno da difração. Desta forma é preciso selecionar um único comprimento de onda dentre os vários gerados pelo difratômetro (normalmente seleciona-se o comprimento de onda mais intenso que é o K_{α}). Com base nas propriedades de absorção de ondas eletromagnéticas dos diferentes materiais pode-se escolher um material que permita a passagem de comprimentos de onda igual a K_{α} . Por exemplo, quando utilizamos um alvo de cobre na produção de raios-X, o espectro é composto pelo espectro contínuo e pelo espectro característico, de pouca utilidade prática, conforme mostra a Figura 2.27. Entretanto, quando incidimos os raios-X gerados pelo alvo de cobre com um filtro de níquel, este permite passar somente raios-X com comprimento de onda $\lambda = 1,5413 \text{ \AA}$ este sim com larga aplicação em engenharia de materiais. A este processo chamamos de monocromatização do feixe e ao comprar um equipamento de raios-X o elemento alvo e filtro já estão estabelecidos. (Subbarao *et al.* 1973).

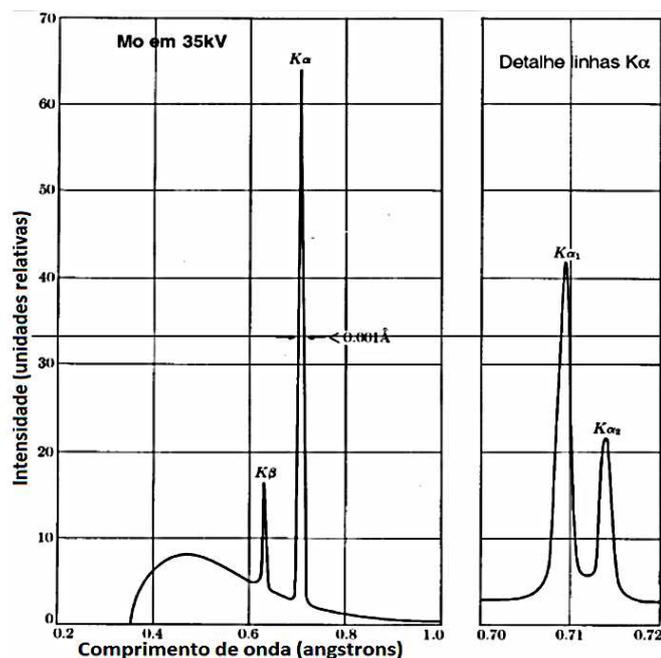


Figura 2.27 - Espectro de Raios-X contínuo e característico tendo Molibdênio (Mo) como alvo a 35 KV, mostrando os picos de radiação K_{α} e K_{β} e $K_{\alpha 1}$ e $K_{\alpha 2}$ (Cullity & Stock, 2001)

2.7.8 - A incidência da radiação sobre a amostra

Quando um feixe de raios-X monocromáticos incide sobre um material cristalino ocorre o fenômeno da difração. Imagine inicialmente que a incidência ocorra em um único átomo isolado. Os elétrons deste átomo ficarão excitados e vibrarão com a mesma frequência do feixe incidente. Estes elétrons vibrando emitirão raios-X em todas as direções com a mesma frequência do feixe incidente. O átomo pode ser visto como uma fonte de emissão esférica de radiação (Princípio de Huyghens).

Ao se incidir um feixe de raios-X sobre um cristal, onde os átomos estão regularmente espaçados (periodicidade do arranjo cristalino), cada átomo será uma fonte de emissão esférica de radiação. Nestas condições poderá haver interferências construtivas ou destrutivas entre as ondas eletromagnéticas se estiverem em fase entre si ou defasadas, respectivamente. O comprimento de onda da radiação incidente deve ser da mesma ordem de grandeza do tamanho da partícula a ser analisada.

2.7.9 - Funcionamento do Aparelho de Raios – X

O princípio de funcionamento do aparelho de raios-X segue análogo àquele de uma câmara de Debye-Scherrer, que utiliza o pó do material cristalino, como mostrado na Figura 2.28.

O método do pó foi inventado independentemente, em 1916, por Debye e Scherrer, na Alemanha, e em 1917, por Hull, nos Estados Unidos, para se estudar a estrutura de cristais. Esse método ainda é o mais utilizado e fornece informações estruturais, tais como, parâmetro de rede e determinação de fase, sobre o material que está sendo investigado.

Basicamente esse método envolve a difração de um feixe de raios-X monocromático por pequenos cristais ou por um pó fino. O feixe monocromático é obtido por meio do uso de um filtro de níquel e geralmente usa as linhas $K_{\alpha 1}$ e $K_{\beta 2}$. Esse método é muito utilizado na área de metalurgia, como também, para se estudar ligas polifásicas, produtos de corrosão, refratários, rochas, etc. Além disso, apresenta a vantagem de não destruir e nem necessitar de um preparo especial do material em questão.

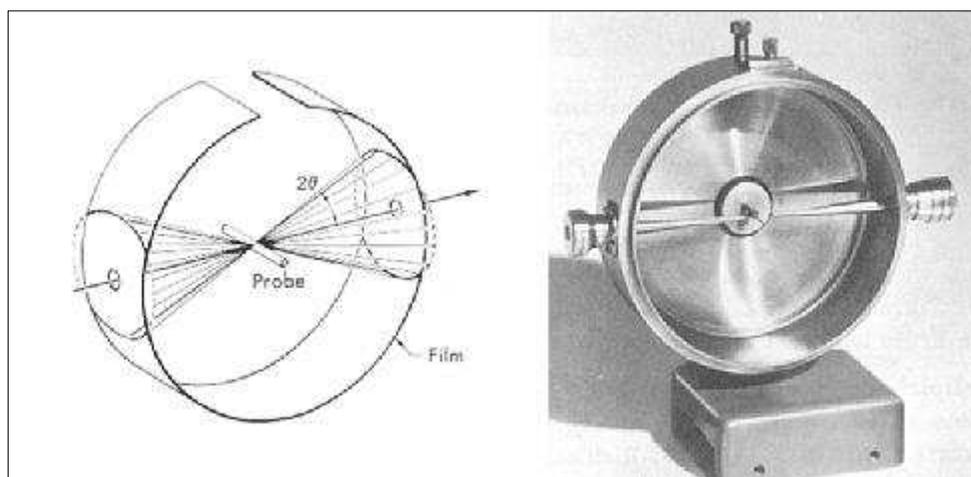


Figura 2.28- Aparelho de Difração de raios-X pelo método de Debye-Scherrer. Disponível em: <<http://principo.org/1-0-aula-terica-de-difracao-de-raios--x-2-introduco.html>>

No método do pó o cristal a ser examinado está na forma de um pó muito fino, o qual é colocado no feixe de raios-X monocromático (filtrado). Cada partícula é um pequeno cristal, orientado aleatoriamente em relação ao feixe incidente. Por causalidade alguns cristais estarão orientados de tal maneira que seus planos irão reemitir o feixe incidente na forma semelhante a uma reflexão. Como resultado, teremos que, cada conjunto de planos também será capaz de emitir o feixe. Para que isso ocorra devemos ter a condição de Bragg satisfeita.

Consideremos uma reflexão particular que dá certa reflexão de Bragg. A Figura 2.29a mostra este plano e o feixe difratado. Imaginemos agora que esse plano gira de tal maneira que o ângulo θ fique constante. O feixe refletido irá caminhar sobre a superfície do coneda Figura 2.29b, cujo eixo coincide com o feixe incidente. A reflexão de um pó imóvel tem a forma de uma folha cônica de radiação difratada.

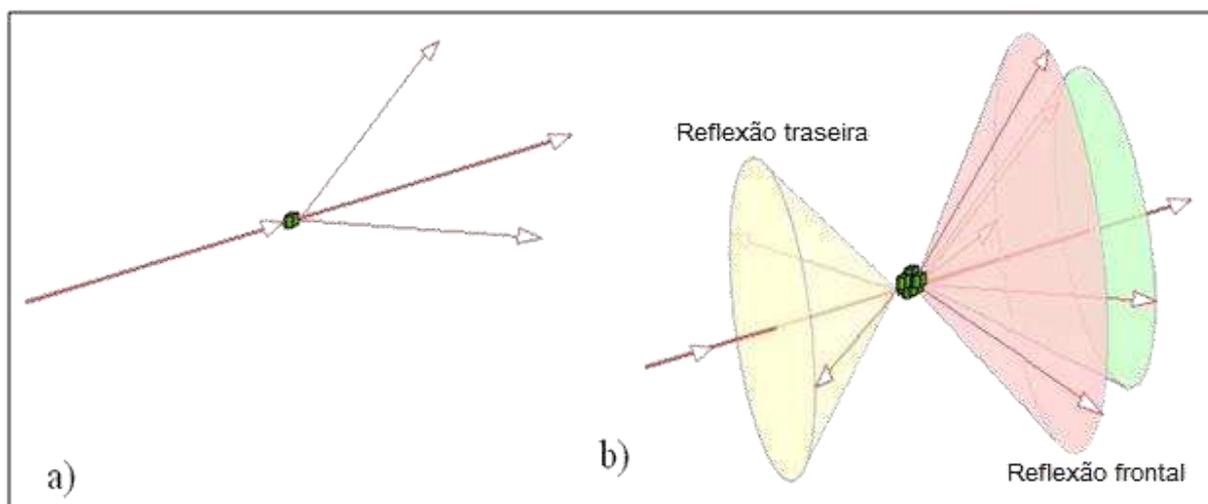


Figura 2.29 - a) Direções fixas de reflexão do cristalito. b) Ilustração dos cones de difração formados pelo cristalito girando. Disponível em: <<http://principo.org/1-0-aula-terica-de-difracao-de-raios-x-2-introduco.html>>

Um cone diferente é formado para cada conjunto de planos que pertence a diferentes separações dos planos da rede. A Figura 2.30 ilustra alguns destes cones, formados após a incidência dos raios na amostra em pó. Este método é denominado de Debye-Scherrer, e é o mais utilizado nas análises de amostras minerais.

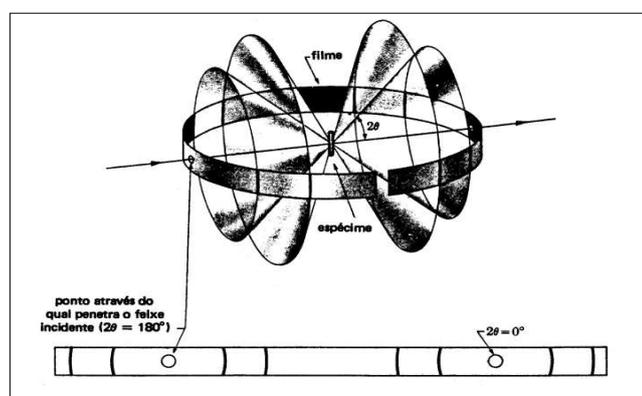


Figura 2.30 - Relação filme-amostra-feixe incidente. Esquema dos cones de difração de raios-X pelo método de Debye-Scherrer e aspecto do filme quando o mesmo é desenrolado sobre uma superfície plana. Padilha, 2000.

Nesse método uma estreita faixa de filme é enrolada dentro do cilindro com a amostra colocada no centro sobre o eixo dele. Os cones de difração interceptam o cilindro com o filme e, quando o mesmo é retirado observa-se a configuração das linhas. Na Figura 2.31, ilustra-se com detalhe angular o esquema de difração de raios-X.

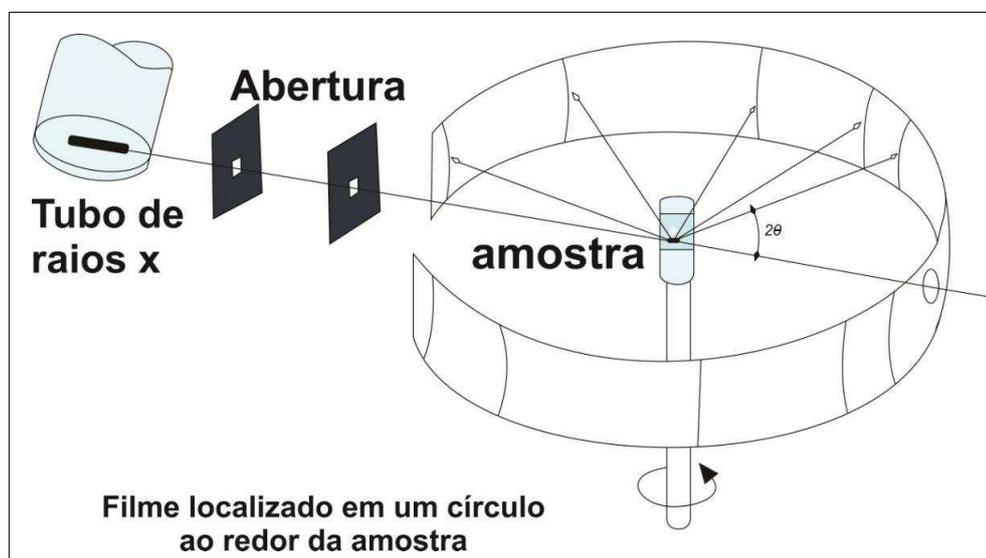


Figura 2.31. Esquema da Difração de raios-X pelo método de Debye-Scherrer. Disponível em: <http://principio.org/1-0-aula-terica-de-difraco-de-raios-x-2-introduco.html>

Atualmente a base desse método ainda é usada, porém, no lugar do filme utiliza-se um detector especial que capta o sinal e o envia a um sistema computadorizado que registra e processa esse sinal; além disso, não está limitado somente ao uso de pó.

2.7.10 - Difrátômetros de Raios-X

Os difratômetros de raios X disponíveis no mercado são dominados pela geometria parafocal Bragg-Brentano. Seu arranjo geométrico básico pode constituir-se de um goniômetro horizontal (θ - 2θ) ou vertical (θ - 2θ ou θ - θ). Outras configurações, mais sofisticadas e específicas para estudos na área de ciências de materiais e de monocristais, podem ser também encontradas.

Para a geometria θ - 2θ (Figura 2.32), o goniômetro, acoplado aos acessórios de recepção do feixe difratado, move-se (H) com velocidade angular (2θ /passo) sobre o eixo P e rotaciona a amostra (P) com metade desta velocidade angular (θ /passo). O raio do círculo do goniômetro é fixo, apresentando iguais distâncias do tubo gerador de raios X à amostra e

da amostra à fenda de recepção D ($LP = PD$). O plano do círculo focal contém os raios incidente e difratado, isto é, a fonte, a amostra e a fenda de recepção.

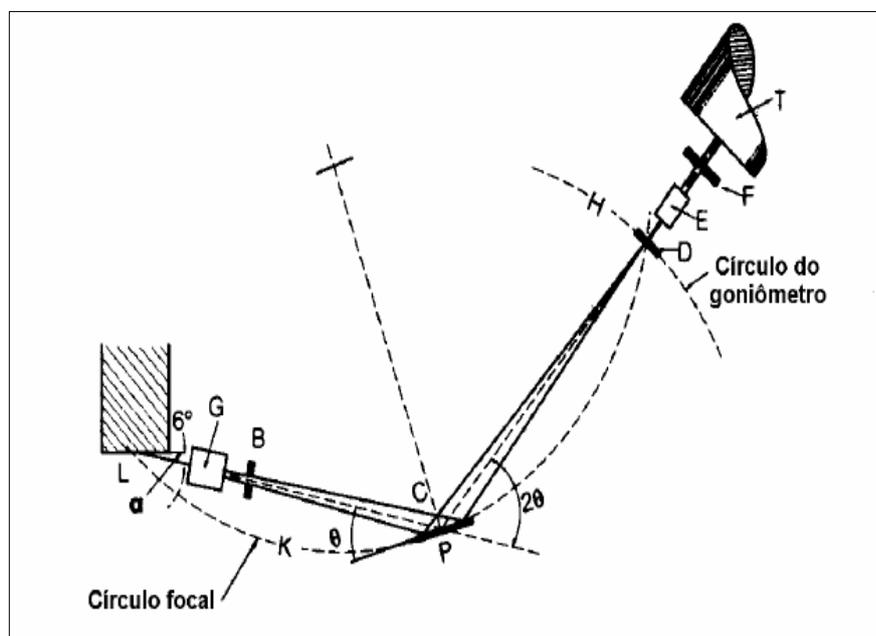


Figura 2.32– Geometria Bragg-Brentano de um difratômetro de raios X, mostrando as diferentes fendas utilizadas. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABVuMAD/apostila-caracterizacao-mev-drx-an-1-quimica-gran>>.

A partir da fonte, os raios X atravessam a fenda Soller ou colimadores paralelos (G), a fenda de divergência (B) e irradiam a superfície da amostra (C). Os raios difratados em determinado ângulo 2θ convergem para a fenda de recepção (D). Antes ou depois da fenda de recepção pode ser colocado um segundo conjunto de colimadores (E) e uma fenda de espalhamento (F). Um monocromador do feixe difratado pode ser colocado após a fenda de recepção, na posição da fenda de espalhamento.

2.8 - Petrografia microscópica

Para examinar microtexturas e feições mineralógicas de uma rocha em lâmina delgada, com resolução superior à permitida pelos olhos, é necessário utilizar o microscópio. O microscópio possui dois sistemas de lentes. O primeiro sistema de lentes (objetiva) produz a imagem ampliada do objeto. Esta imagem real é novamente ampliada pelo segundo sistema de lentes (ocular).

Imagens ópticas de um objeto são formadas por lentes convergentes, *i.e.*, lentes esféricas com superfícies convexas (lentes biconvexas). A imagem real invertida é formada

quando o objeto é colocado a uma distância superior à distância focal (f) da lente. Esta imagem pode assim ser projetada em uma tela, como mostrado na Figura 2.33, parte superior. Este é o mesmo princípio da visão pelo olho humano, ou do funcionamento de uma câmera.

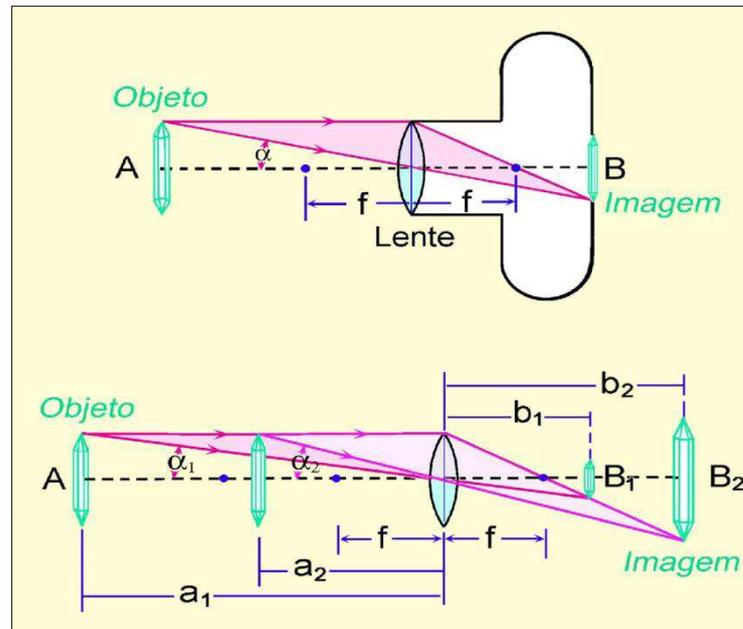


Figura 2.33 - Formação da imagem do cristal por uma lente biconvexa. Raith *et al.* 2004.

As distâncias (a) e (b), respectivamente, entre o objeto e a lente (a) e entre a lente e a imagem produzida (b), são relacionadas às distâncias focais (f) das lentes biconvexas pela seguinte equação:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad \text{Eq. (2.6)}$$

O aumento da lente é dado por:

$$M = \frac{B}{A} = \frac{b}{a} = \frac{b-f}{f} = \frac{f}{a-f} \quad \text{Eq. (2.7)}$$

O tamanho da imagem real (B) será maior que o do objeto (A), quando:

$$\frac{b-f}{f} > 1 \text{ ou seja } 2f < b \text{ é recíproco } \frac{f}{a-f} > 1 \text{ ou seja } a < 2f \quad \text{Eq. (2.8)}$$

Supondo que o objeto está a uma distância de 33 mm diante da lente biconvexa, com distância focal de 30 mm, a lente produzirá uma imagem ampliada em 10 vezes ($M = 10:1$) a uma distância de 330 mm atrás da lente.

O olho humano pode modificar a distância focal variando a curvatura de sua lente (o cristalino), de modo a projetar na retina imagens focalizadas de objetos postos a distâncias variáveis entre 250 mm e o infinito. Quando um objeto que está distante se aproxima do olho humano, esse é visto com ângulos de visão (α) crescentes e aumentos também crescentes, dado que a imagem na retina torna-se progressivamente maior.

A menor distância adequada ao foco de objetos, na visão humana, varia com a pessoa. Na indústria óptica, esta distância mínima é padronizada em 250 mm, de modo a facilitar o cálculo dos aumentos em lentes corretivas.

Quando o objeto está na distância mínima para o foco da visão humana, esse é visto com o maior ângulo de visão possível e, assim, com o maior aumento permitido. Os detalhes menores de um objeto, quando observados na menor distância possível para o olho humano, terão boa resolução se o ângulo de visão for superior a 1' (cerca de $0,02^\circ$). Os detalhes que estiverem abaixo do limite de resolução da visão humana poderão ser vistos mediante ampliação, utilizando a lente de aumento (lupa) ou o microscópio.

3.0 – METODOLOGIA

Durante a realização do trabalho de interpretação da tufa carbonática e os estágios desenvolvidos para cada etapa da pesquisa, foi aderida a sequência metodológica detalhada na Figura 3.1.

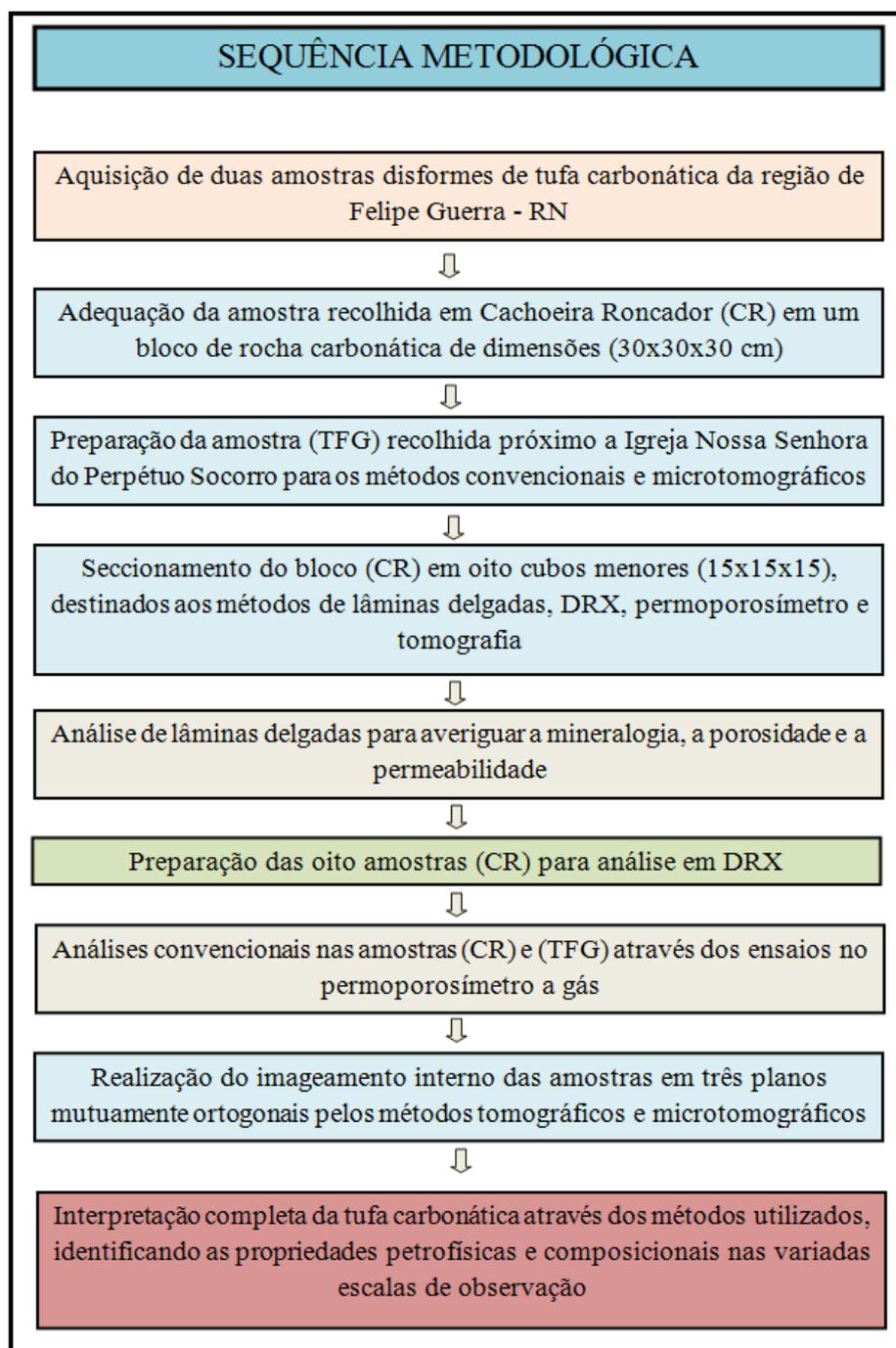


Figura 3.1 - Sequência metodológica adotada

3.1 - Aquisição e preparação da amostra

Nesta pesquisa foi coletado um bloco com dimensões irregulares na localidade de Cachoeira Roncador (CR) e outra amostra no afloramento situado próximo a Igreja Nossa Senhora do Péripetuo Socorro (TFG) de tufa carbonática da Formação Jandaíra, pertencente à Bacia Potiguar. As amostras coletadas encontravam-se no município de Felipe Guerra/RN, o qual dista cerca de 360 km de Campina Grande/PB. O acesso ao local faz-se a partir de Campina Grande/PB até o município de Apodí/RN, desta pela BR-405 percorrendo cerca de 35km, chega-se ao município de Felipe Guerra/RN. Daí então por estradas carroçáveis encontra-se a localidade denominada de Cachoeira do Roncador, que possui os seguintes parâmetros de localização: 9383692 de latitude Sul e 646313 de longitude Oeste e altitude de 78 metros. A Figura 3.2, representa o local de coleta da amostra.



Figura 3.2 – Vista parcial do afloramento de tufas carbonáticas, onde se observa a formação de estalactites, e em B detalhe do afloramento mostrando os vugues da rocha, localizada na Cachoeira do Roncador.

A amostra coletada na localidade de Cachoeira Roncador (CR) na ocasião apresentava-se disforme, como era de se esperar, e ao chegar ao laboratório, a tufa carbonática foi manipulada, no sentido de torná-la o mais próximo possível de um cubo com arestas em torno de 30 centímetros, Figura 3.3.



Figura 3.3– Amostra de tufa carbonática “*in situ*”, localidade Cachoeira Roncador.

Para realizar a manipulação da amostra, se fez necessário o uso dos equipamentos e ferramentas como serra circular, esmerilhadeira angular e martelo geológico, Figura 3.4.



Figura 3.4 – Amostra de tufa carbonática sendo trabalhada para torná-la com dimensões próximas a um cubo, localidade Cachoeira do Roncador.

Após as etapas realizadas para o tratamento da amostra de rocha carbonática, observou-se que a tufa ainda não estava adequada à forma cúbica com as dimensões requeridas para a pesquisa e, portanto, fez-se necessária uma segunda fase de tratamento. Foi solicitado a Fuji S/A - Mármore e Granitos, o corte do cubo principal (30x30x30cm) e em seguida em oito cubos de (15x15x15cm), sendo estes, quatro da base, denominados de B1, B2, B3 e B4 (Figura 3.5) e quatro do topo da amostra, A1, A2, A3 e A4 (Figura 3.6). Após a autorização da empresa, foram realizados os trabalhos de preparo e corte da amostra de tufa carbonática nas suas dependencias.



Figura 3.5 – Amostra de tufa carbonática dos quatro blocos da base, mostrando as porosidades vugular e fratural.

As amostras apresentam porosidades vugular e fratural bem desenvolvidas, já identificáveis no cubo do lado esquerdo da Figura 3.5. Na Figura 3.6, destaca-se a parte superior do bloco definida pela erosão presente, sendo esta característica a responsável pela possível definição das amostras de topo e de base para os ensaios realizados.



Figura 3.6 – Amostra de tufa carbonática dos quatro blocos do topo, mostrando as porosidades vugular e fratural.

As máquinas de corte monofio (Figura 3.7) e a máquina de corte monofio CNC com dois eixos coordenados, são as que têm maior presença no parque de máquinas da

indústria do setor de desmonte de blocos rochosos. As máquinas de corte convencionalmente utilizadas para o desmonte dos blocos rochosos têm um sistema simples de polias, onde uma das polias é a motora e outra é a tratora. Atualmente, este tipo de equipamento utiliza duas polias, no entanto se verifica a utilização de mais por parte de alguns construtores de máquinas. O movimento de rotação da polia motora provoca o movimento linear do fio diamantado pelo sistema de polias. A transmissão do movimento é assegurada pelas forças de atrito que se desenvolvem na superfície de contato do fio diamantado com a polia motora. Neste sentido, o fio diamantado deve ser sujeito a uma determinada tensão para que a força de atrito gerada, entre a polia motora e o fio diamantado, seja suficiente para este movimentar-se linearmente. Desta forma, o tensionamento ocorre por meio da movimentação da polia tratora para aumentar a tensão sobre o cabo de aço do fio diamantado. Após esta fase inicial, de movimentação do fio diamantado, seguem-se os movimentos de corte.



Figura 3.7 - Máquina de corte monofio. Gaspari Menotti. Disponível em:
< <http://www.gasparimenotti.it/po/instala%C3%A7%C3%B5es-chapa-marmore/gswseries.asp> >

Os cortes foram feitos na amostra de tufa carbonática (Figura 3.8), adequando-a a dimensões próximas de um cubo com aresta em torno de quinze centímetros.



Figura 3.8 – Corte da amostra de tufa carbonática tornando-a em cubo. Foto cedida pela Granfuji.

Com a amostra seccionada em oito cubos, (Figura 3.9), de aproximadamente 15 centímetros de aresta, levaram-se os cubos de tufas carbonáticas para serem escaneados no Hospital Universitário Alcides Carneiro, da Universidade Federal de Campina Grande.

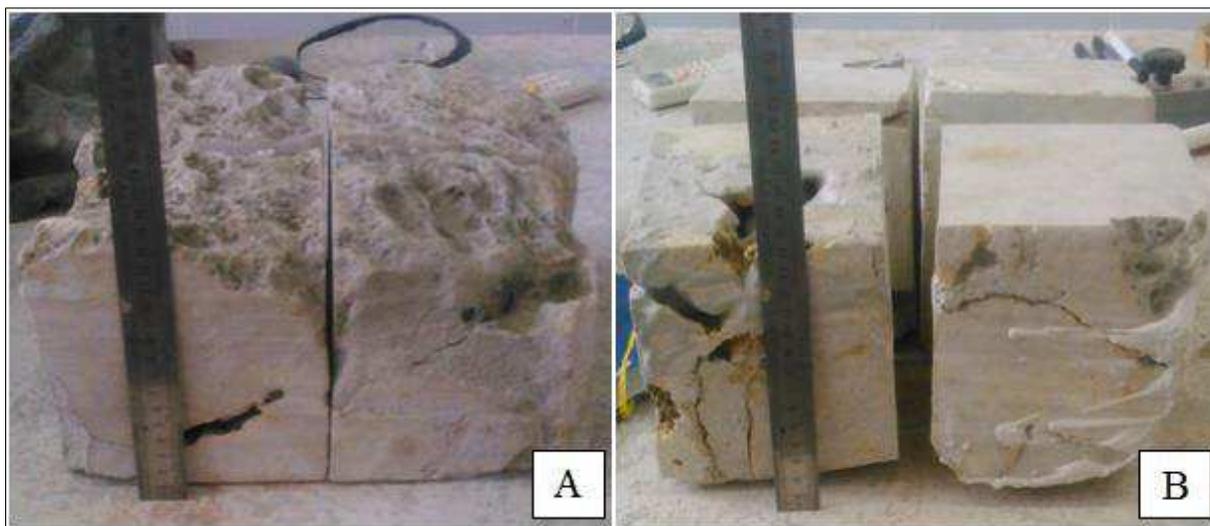


Figura 3.9 – Blocos seccionados com aproximadamente quinze centímetro de aresta. Em A blocos de topo e em B de base.

Posteriormente, as amostras (oito cubos) foram colocadas em uma bancada no Laboratório de Petrofísica da Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia da Universidade Federal de Campina Grande para preparação de amostras cilíndricas chamadas de plugues (Figura 3.10). Escolheram-se os melhores locais nestes cubos para retirar os plugues, considerando que estes plugues resultassem em amostras perfeitas, ou seja, que eles não derivassem em plugues quebradiços, pois para analisá-los através do tomógrafo e do porosímetro não seria adequado.

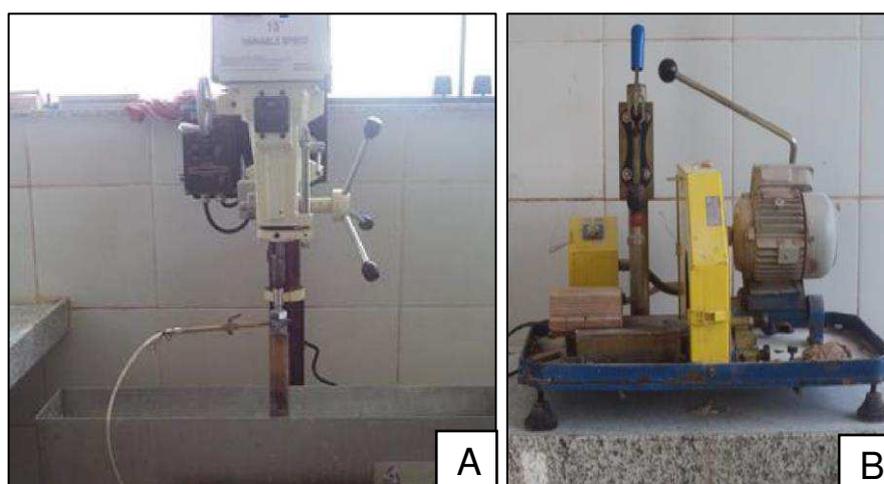


Figura 3.10 – (A) Plugadeira de bancada e em (B), Retificadora de extremidades. Porto, 2015.

Após a obtenção das amostras plugadas e retificadas, encaminharam-se os plugues para serem escaneados no mesmo tomógrafo da Universidade Federal de Campina Grande. O procedimento efetivado para analisar os plugues foi semelhante ao realizado nos cubos, porém observou-se que a resolução mais adequada para a identificação da porosidade, era com separação de *slices* de 0,8 mm (Figura 3.11).



Figura 3.11 – Plugues iniciando o escaneamento, juntamente com plugue de alumínio.

3.2 - TOMOGRAFIA

O tomógrafo utilizado nesta tese foi o BRILLIANCE PHILIPS, aparelho pertencente ao Hospital Universitário Alcides Carneiro da Universidade Federal de Campina Grande. Embora as configurações de corte variem, todos os sistemas Brilliance CT são sistemas avançados de tomografia por rotação contínua composta pelos seguintes componentes.

- Estação experimental;
- Caixa de controle;
- *Gantry*;
- Mesa.

O aparelho apresenta uma mesa móvel posicionada para receber pacientes (Figura 3.12, (A)). Para a análise das amostras foi realizada uma adaptação, posicionando uma prancha estrategicamente preparada para que a amostra permanecesse fixa em superfície plana durante todo o processo. A Figura 3.12 (B) mostra em detalhe a tábua sobre a mesa e as amostras dos cubos A1, do topo, e B1, da base, já inseridas dentro do *Gantry*. As amostras foram escaneadas com 0,8 mm de separação entre *slices* e posteriormente com 2,0 mm, para observar qual a resolução seria mais adequada no sentido de se identificar a porosidade da tufa carbonática.



Figura 3.12 – (A) Tomógrafo médico utilizado nesta pesquisa. (B) Detalhe de duas amostras de tufa carbonática sendo escaneadas

Em seguida procedeu-se de maneira análoga para os outros seis blocos, sendo três de topo (A2, A3 e A4) e três da base (B2, B3 e B4) como visto na Figura 3.13, onde se pode observar o final do procedimento nas amostras de topo (A) e o início nas amostras da base (B).



Figura 3.13– (A) Amostras de topo, indicando pela linha vermelha o final do procedimento. (B), Início do processo com a mesa avançando em direção ao *Gantry*.

3.3– MICROTOMOGRÁFIA

As microtomografias foram realizadas nas amostras (TFG) de tufas carbonáticas da região do município de Felipe Guerra/RN, pela Universidade Federal de Santa Catarina e enviadas para a Universidade Federal de Campina Grande para serem analisadas. Devido à crise financeira que assola o país, não foi possível executar as análises microtomográficas das amostras do bloco utilizado nas outras análises, sendo utilizadas amostras locais de rocha calcária (TFG 03 e TFG 23), para comparação com os resultados obtidos nos testes realizados no bloco de amostradas tufas carbonáticas da localidade Cachoeira Roncador, distrito de Felipe Guerra/RN, inicialmente estudada.

A microtomografia de raios X é uma metodologia simples na preparação de amostras e geração de imagens 3D. A μ CT possibilita que informações fundamentais como porosidade e permeabilidade sejam aferidas com maior rapidez e precisão, além de ser um método não-destrutivo. Neste sentido, a caracterização por μ CT proporciona uma aquisição direta de dados volumétricos, análise quantitativa em 3D, menor tempo de análise. (Miller & Lin, 2004).

A técnica baseia-se no princípio de geração de imagens por raios X, no qual várias radiografias do objeto analisado são registradas em diferentes ângulos de rotação. Tais imagens são utilizadas para compor uma representação em três dimensões do interior do objeto analisado através de processamento computacional. A amostra é posicionada entre a fonte de emissão de raios X e o detector, sendo então rotacionada para a aquisição de projeções em várias posições. Essas projeções são proporcionais à quantidade de radiação que chega ao detector, que varia de acordo com os distintos coeficientes de atenuação dos raios X de cada material (Lin & Miller, 2002).

3.4 - PERMOPOROSÍMETRIA A GÁS

Após a preparação das amostras, determinando o dimensionamento e pesagem dos plugues, estes foram submetidos aos ensaios no permoporosímetro a gás, ULTRAPOROPERM 500, do Laboratório de Petrofísica da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Figura 3.14. As amostras TFG's também foram analisadas pelo equipamento, para realização de análise comparativa dos parâmetros de porosidade e permeabilidade.



Figura 3.14 - Permoporosímetro pertencente ao Laboratório de Petrofísica da UFCG

O volume dos grãos do plugue é medido com o uso do *matrix cup*. O volume de vazios da amostra analisada é resultado da diferença entre o volume dos grãos e o volume total. Pode-se determinar a porosidade através da razão entre o volume de vazios e o volume total, assume-se então, que a massa da amostra corresponde apenas a massa de sua fase sólida. A densidade dos grãos é dada pela razão entre a massa do plugue e o volume de grãos determinado pelo aparelho (Soares *et al.* 2016).

3.5 - DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Para realizar as análises das amostras através do equipamento de Difração de Raios X da SHIMADZU – XRD 7000, pertencente ao laboratório de Física da UFCG, necessitou-se executar alguns procedimentos antes de inserir as amostras no equipamento. Primeiramente, das sobras que resataram após a extração de cada um dos plugues, uma parte foi separada para analisar com o equipamento de DRX, e foi enviada para Universidade Federal do Rio de Janeiro para confeccionar lâminas delgadas (Figura 3.15).

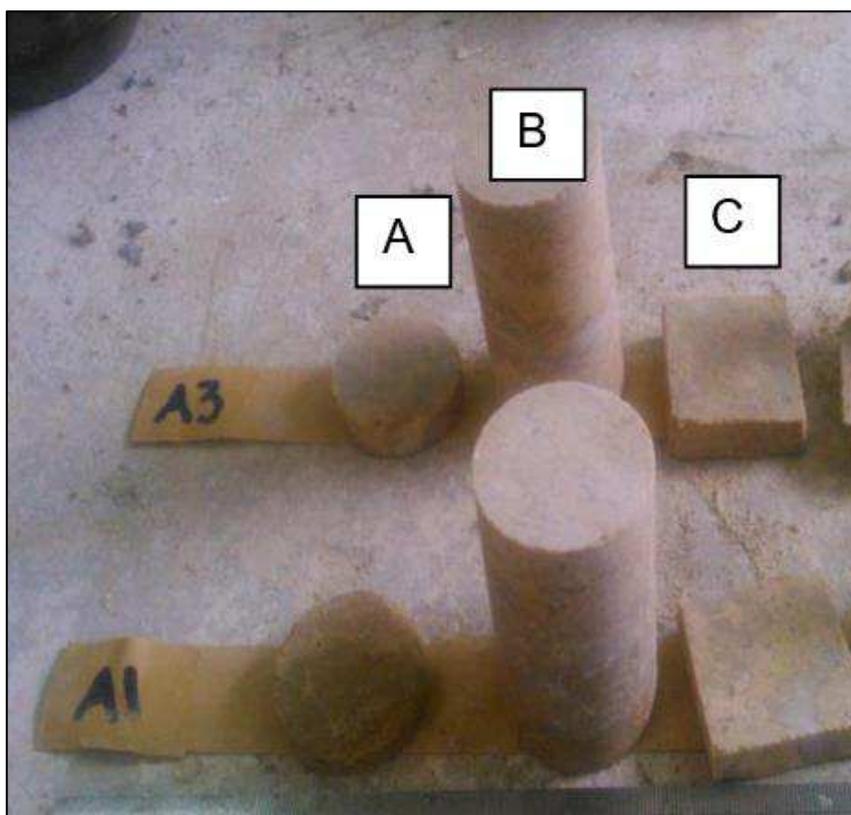


Figura 3.15– Amostras de tufas carbonáticas seccionadas para serem analisadas. Em (A), amostra enviada para DRX, em (B), amostra analisada pelo o tomógrafo e em (C), porção enviada para confecção de lâminas delgadas.

Na sequência as oito amostras foram trituradas individualmente com o almofariz, no laboratório de Cominuição do Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologias da Paraíba – Campus Campina Grande, as quais foram todas pesadas e acondicionadas em recipiente apropriado para em seguida, encaminhá-las para UFCG e analisadas com o DRX. O peso de cada amostra analisada pelo Difrátômetro de Raios X é de aproximadamente quatro gramas (Figura 3.16).



Figura 3.16– Amostra de tufa carbonática sendo analisada pelo equipamento de Difração de Raios X da UFCG, modelo SHIMADZU – XRD 7000.

3.6 - PETROGRAFIA MICROSCÓPICA

Após a preparação das amostras de tufa carbonática, adequando-as em formato retangular, elas foram enviadas à Universidade Federal do Rio de Janeiro para a confecção das lâminas delgadas necessárias para a análise estrutural. Para observar as rochas no microscópio petrográfico, estas devem ser sujeitas a uma preparação prévia utilizando equipamentos adequados. As amostras devem possuir uma dimensão apropriada ao manuseamento nos equipamentos utilizados. Uma mostra deverá possuir uma dimensão que caiba dentro de uma mão fechada. No caso das amostras possuírem dimensões maiores, estas deverão ser cortadas em uma serra.

Depois das amostras possuírem a dimensão desejada, é cortada uma esquírola. Isto é, corta-se uma "fatia" de rocha com cerca de 0,5 cm de espessura utilizando uma serra como a apresentada na Figura 3.17.



Figura 3.17– Equipamento de corte para fatiar a rocha. Departamento de Ciências da Terra – UMinho.

Uma das superfícies da esquírola é desgastada utilizando o equipamento apresentado na Figura 3.19. Sobre a superfície polida da esquírola é colada uma lâmina de vidro (letras C e D da Figura 3.20). Este conjunto de esquírola mais lâmina de vidro vai sofrer um desgaste de modo a ser reduzida a espessura da amostra, utilizando o equipamento da Figura 3.18, até ter um aspecto idêntico ao que mostra a letra E da Figura 3.20.

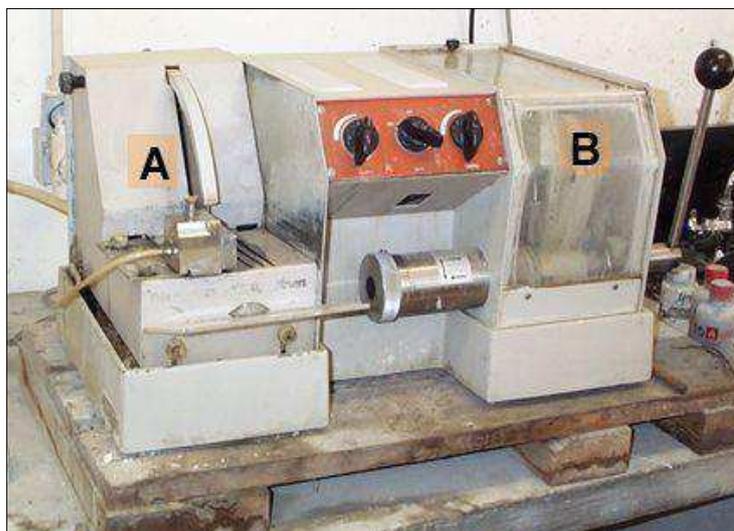


Figura 3.18 - Equipamento destinado ao desgaste da esquírola. Departamento de Ciências da Terra – UMinho.

A amostra é ainda sujeita um último desgaste utilizando o disco, juntamente com alguns abrasivos (Figura 3.19), até que se obtenha uma espessura de rocha da ordem dos 0,03 mm. Finalmente a preparação é coberta por uma lamínula de vidro, designando-se por lâmina delgada - letra F da Figura 3.18 ou é ainda sujeita a um tratamento final de modo a ficar com a superfície bastante polida, obtendo-se a chamada lâmina polida - letra G da Figura 3.20.



Figura 3.19– Desbaste da esquírola utilizando disco. Departamento de Ciências da Terra – UMinho.

Os procedimentos são necessários para a preparação de uma lâmina delgada, de acordo com a Figura 3.20, iniciam-se com a amostra de rocha macroscópica (letra A) até a fase final (letra F), obtendo-se a lâmina polida. Uma lâmina delgada demora cerca 6 horas a ser feita por um técnico experimentado.

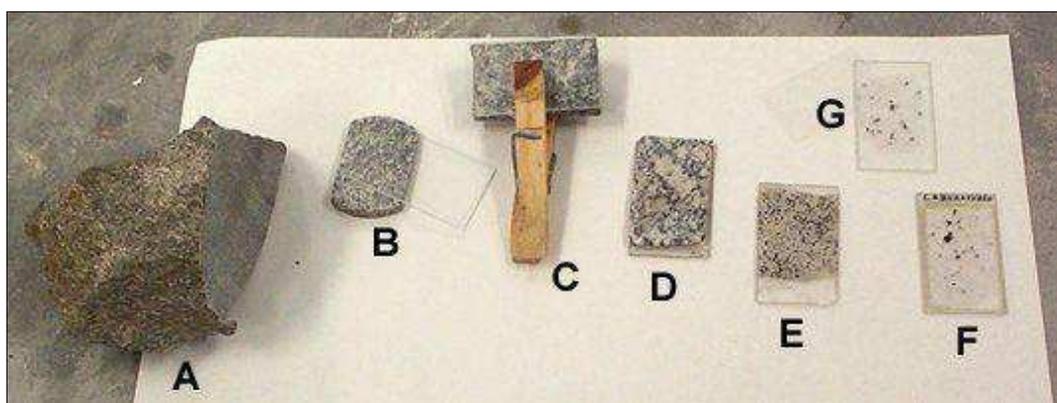


Figura 3.20 - Várias fases de passagem de uma amostra de rocha a lâmina delgada. Departamento de Ciências da Terra – UMinho.

A - Amostra de mão de onde foi cortada uma esquírola.

B - Esquírola de rocha (cerca de 0,5 cm de espessura) e lâmina de vidro onde vai ser colada a esquírola.

C - Colagem da esquírola à lâmina de vidro.

D - Amostra já colada na lâmina de vidro.

E - Amostra já depois de ser desgastada.

F - Lâmina delgada já finalizada, depois de polida e com lamela de vidro já colada.

G - Lâmina polida já finalizada.

Ao final do processo, as lâminas confeccionadas foram enviadas ao laboratório de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, onde todas foram analisadas de acordo com a composição mineralógica e os parâmetros petrofísicos como a porosidade e permeabilidade (Figura 3.21).

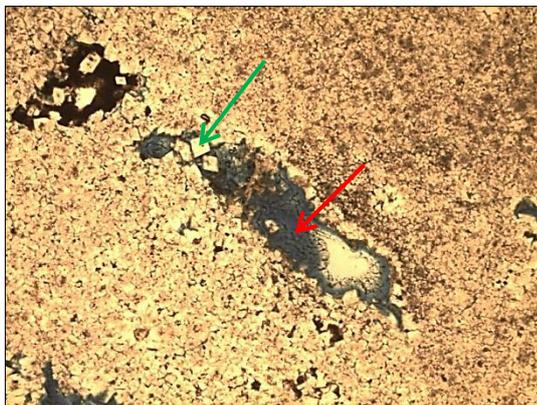


Figura 3.21 - Porosidade vulgare e alongada (seta vermelha) entre cristais de dolomita romboédricos (seta verde). P//. Obj: 5X

A porosidade nas lâminas delgadas foi determinada através do método de contagem de pontos, em microscópio petrográfico, com observação de aproximadamente 300 pontos. Neste método, a lâmina é deslocada em intervalos regulares de espaçamento para que todos os pontos observados na lâmina tenham a mesma probabilidade de estarem no cruzamento dos retículos da ocular (Netto, 1978).

Este método permite a visualização da relação entre a porosidade existente e propriedades litológicas presentes na lâmina. Ainda que considerada uma técnica demorada e maçante, além da ocorrência esporádica do escurecimento de poros pequenos que podem ser confundidos com outros constituintes sólidos da amostra de rocha, é um dos métodos mais utilizados para verificação dessa propriedade. (Azevedo & Marques, 2002).

Por estes motivos, os valores de porosidade obtidos por métodos ópticos são, normalmente, menores do que os obtidos por outros métodos diretos (Gaspari *et al.* 2004). Além do fato de que os valores obtidos são resultado da observação da amostra em um plano, não podendo, portanto, representar precisamente a porosidade presente na estrutura da rocha em três dimensões (Netto, 1978).

3.7 - PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

O programa utilizado nas análises das imagens foi o Avizo Fire, que é um *software* avançado de análise 3D usado para explorar e compreender estruturas e propriedades de materiais, em uma ampla gama de áreas de pesquisa de materiais científicos e para vários tipos de materiais (fibrosos, porosos, metais e ligas, cerâmicas, compostos e polímeros, semicondutores e alimentos). Desde a visualização e medição diretas até processamento, quantificação, análise e relatórios de imagem avançados, o *software* Avizo fornece um laboratório digital abrangente e multimodal para a caracterização avançada de estruturas em 2D e 3D.

Após o escaneamento realizado pelo tomógrafo do Hospital Universitário Dr. Alcides Carneiro, da Universidade Federal de Campina Grande, de marca e modelo Philips – Brilance 6, as imagens geradas foram processadas pelo *software* Avizo Fire 8.1 que gerou imagens em 3D e também forneceu no passo identificado como "Material Statistics" a quantificação das porosidades efetivas contidas no terceiro passo "Extract Subvolume". Portanto, para cada bloco e plugue foram obtidos diagramas em 3D e as porosidades efetivas relacionadas para cada uma das amostras, após o imageamento tomográfico. Na Figura 3.22 observa-se a sequencia dos passos percorridos para se obter com celeridade e êxito os blocos diagramas (3D) e as porosidades contidas nos mesmos, onde se pode manipular girando essas imagens em todos os planos possíveis, verificando desse modo o formato das porosidades efetivas.

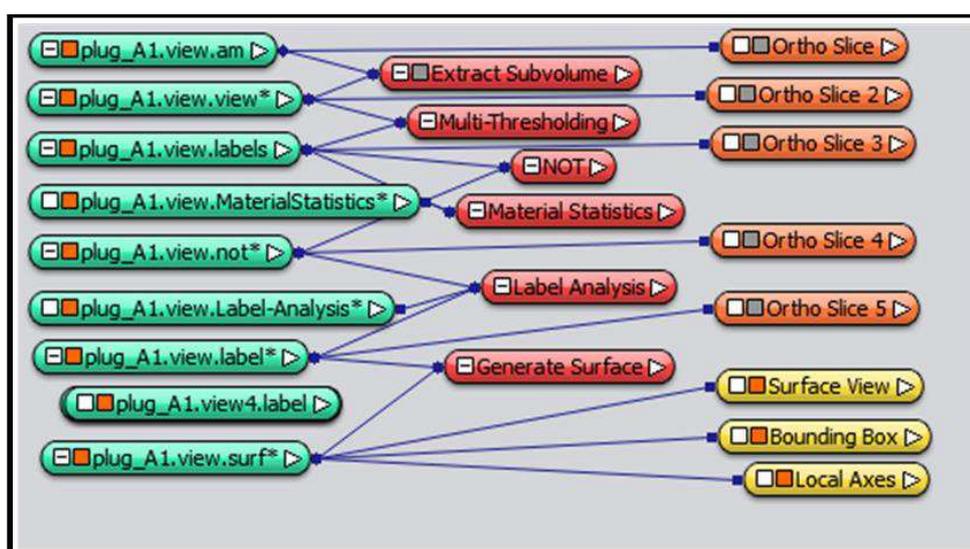


Figura 3.22 - Representação sequencial dos passos para obtenção das imagens em 3D na interface do Avizo Fire® das porosidades efetivas das amostras de tufas carbonáticas.

De modo análogo aos procedimentos usados para a aquisição das porosidades, determina-se a permeabilidade, porém com um número reduzido de passos sequenciais para se obter a permeabilidade, Figura 3.23. Salienta-se que o processo para a consecução das permeabilidades foi executado apenas nos plugues, pois não se justifica calcular a permeabilidade também dos blocos, porquanto os resultados serão análogos. A permeabilidade calculada empregando o *software* foi obtida na unidade de Darcy (D).

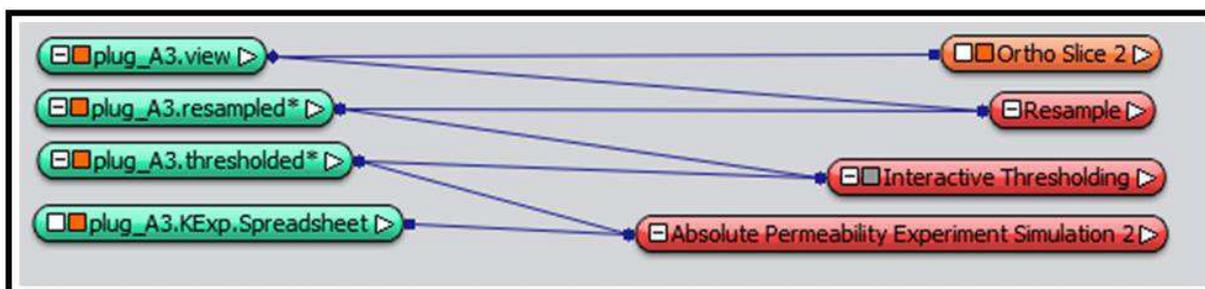


Figura 3.23 - Representação sequencial dos passos para obtenção das permeabilidades das amostras de tufas carbonáticas na interface do Avizo Fire®.

Após o escaneamento realizado pela microtomografia da Universidade Federal de Santa Catarina, os dados obtidos também foram processados pelo *software* Avizo Fire 8.1 que gerou imagens em 3D das estruturas porosas presentes nas amostras, além de calcular por meio da opção "Material Statistics" a quantificação das porosidades efetivas contidas na delimitação da amostra selecionada na opção "Extract Subvolume". Portanto, para cada amostra foram obtidos diagramas em 3D e as porosidades efetivas de cada uma. Na Figura 3.24, observa-se a sequencia dos passos percorridos para se obter os blocos diagramas (3D) e as porosidades contidas nos mesmos.

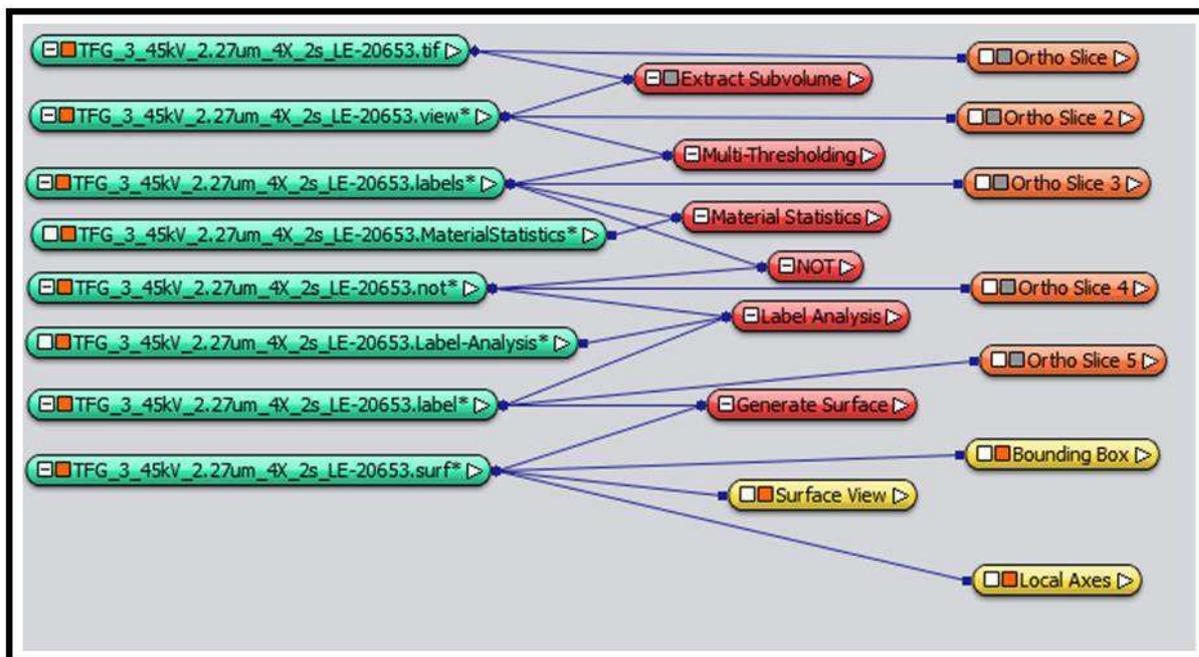


Figura 3.24 – Representação da sequência realizada para a geração das imagens e cálculo da porosidade na interface do Avizo Fire®.

De modo análogo aos procedimentos usados para a aquisição das porosidades, determina-se a permeabilidade, porém com um número reduzido de passos sequenciais, utilizando a opção “Absolute Permeability Experiment Simulation” para se obter o cálculo da permeabilidade, Figura 3.25. A permeabilidade calculada empregando o *software* foi obtida na unidade Darcy (D).

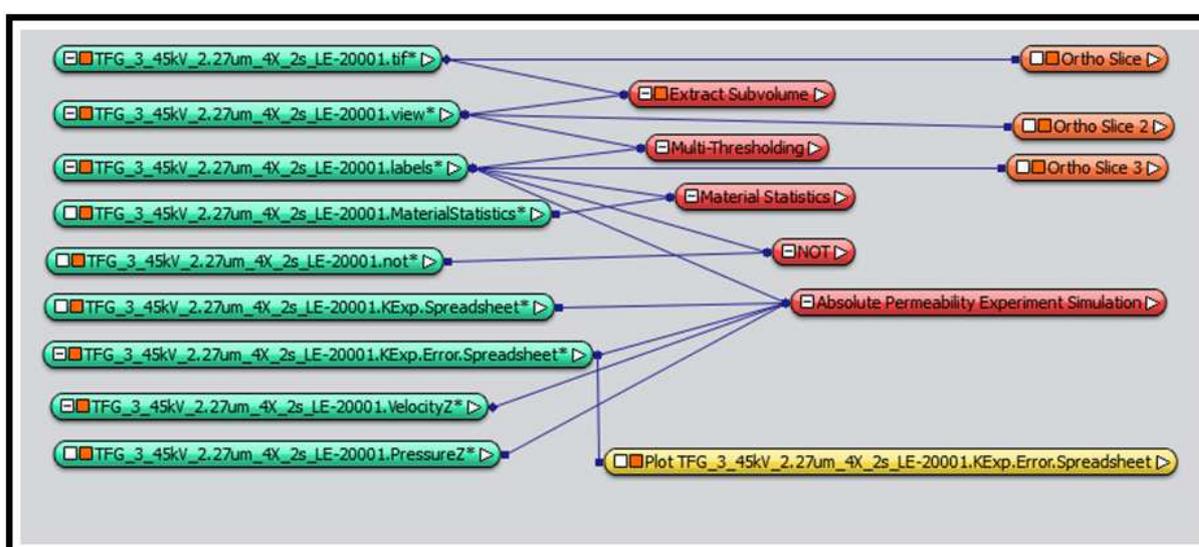


Figura 3.25 – Representação da sequência realizada para a geração das imagens e cálculo da permeabilidade na interface do Avizo Fire®.

As propriedades petrofísicas de tufas carbonáticas da localidade Cachoeira Roncador, município de Felipe Guerra/RN também foram medidas no Laboratório de Petrofísica da UFCG, onde os ensaios foram realizados no permoporosímetro a gás. Com os resultados oriundos do permoporosímetro pode-se avaliar que a diferença entre o volume total e o volume de grãos consiste no volume de vazios da amostra. Portanto, para calcular a porosidade basta determinar, a razão entre o volume de vazios e o volume total. Ao final estes dados foram relacionados com aqueles calculados pelo *software*.

4.0 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

As propriedades petrofísicas e composicionais do bloco de tufa carbonática foram observadas em diversas escalas (desde dezenas de centímetros até poucos micrômetros), pelo imageamento interno por microtomografia, tomografia de raios-X e calibração por outros métodos convencionais, como petrografia óptica, DRX e picnometria gasosa. Em campos de utilização das imagens em raios-X, como a petrofísica, a interpretação dos dados não é representativa da amostra como um todo, tendo em vista que a análise feita abrange apenas a estrutura porosa, desconsiderando a qualificação da matriz sólida. Quando o estudo tem como objetivo uma área que remete as geociências, se faz necessária a interpretação por completo do material, analisando os elementos que compõem tanto a matriz rochosa quanto a estrutura porosa. A interpretação discutida nesta tese compreende o segundo caso.

Foi observada nas lâminas a atuação de processos geológicos e mineralógicos extremamente importantes na identificação da tufa e do local de onde foi retirada, como por exemplo, a geminação “polissintética”, revelando processos de deformação causados por estresse resultante de forças cisalhantes que atuaram na região, indicando sua influência nas estruturas da tufa estudada. Além disso, estruturas características como, estilólitos, geopetal e processos de formação do mineral ankerita, que foram chamados neste trabalho de ankeritização, podem ser observadas em lâminas delgadas.

4.1 - POROSIDADE E PERMEABILIDADE

O cálculo da porosidade e permeabilidade é realizado pelo software Avizo Fire, versão 8.1, que interpreta os dados obtidos gerando imagens em 3D da estrutura interna das amostras submetidas aos aparelhos tomográficos e simula a percolação de fluídos através da estrutura gerada, calculando a porosidade efetiva presente na amostra estudada. A tomografia foi realizada nos blocos confeccionados a partir das amostras, medindo 15x15 cm, indicando a quantificação da porosidade, através do cálculo gerado pelo Avizo Fire, versão 8.1, que demonstrou as seguintes porcentagens: A1, ϕ 0,09%; A2, ϕ 0,43%; A3, ϕ 4,08%; A4, ϕ 4,06%; B1, ϕ 2,38%; B2, ϕ 1,63%; B3, ϕ 4,10%; B4, ϕ 4,50%; e posteriormente nos plugues, retirados destes blocos, que revelaram as seguintes porcentagens calculadas: A1, ϕ 0,01953%; A2, ϕ 0,35058%; A3, ϕ 0,00012%; A4, 0,02195%; B1, ϕ 0,01953%; B2, ϕ 0,12352%; B3, 0,98279%; B4, 0,27224%. As diferenças identificadas nestes valores,

incluindo aqueles indicados pelas lâminas, ocorrem devido a limitação de área estudada na amostra. A lâmina corresponde a apenas uma diminuta parte da amostra, assim como os plugues, já a tomografia dos blocos, por ser realizada em área efetiva maior, resulta em dados mais completos e uniformes, tendo em vista que a amostra não sofreu dano algum durante o teste realizado.

4.2 – LÂMINAS DELGADAS

A lâmina A1, referente ao bloco A1, revela uma porosidade (ϕ) em torno de 20%, intergranular na micrita, e uma provável baixa permeabilidade e alta microporosidade. Em termos de composição mineralógica, a amostra indica principalmente calcita (CaCO_3), dolomita (CaMgCO_3) e ankerita ($\text{Ca}(\text{Fe}^{+2},\text{Mg})\text{CO}_3)_2$ num processo evolutivo de ankeritização, Figura 4.1, além da presença de cimento blocosocalcítico (espático). A mesma lâmina ainda apresenta matriz calcítica (micrita) e cimento mesocristalino. Esta porosidade pode ser interpretada como resultante da dissolução de carbonatos presentes na região, formando grãos de ankerita e dolomita em menor quantidade a partir da dissolução inicial do mineral calcita. Além disso, pode-se também observar a variação na escala dos grãos, revelando porções micro e mesocristalinas, resultado da relação entre áreas de maior e menor dissolução dentro da tufa.

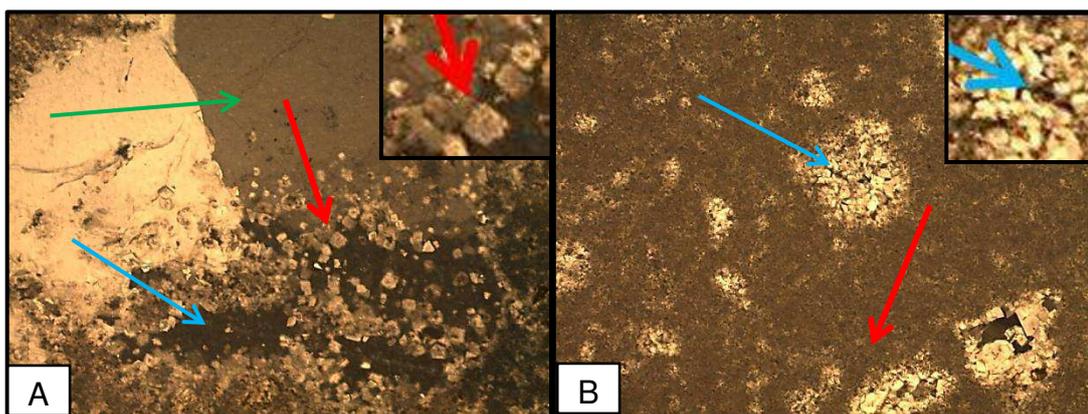


Figura 4.1 - Em (A), porosidade intergranular na micrita (seta azul), dolomitização (romboedros, seta vermelha), e cimento blocoso (seta verde). PX.Obj: 5X. Em (B), matriz calcítica (seta vermelha), porosidade microcristalina com porções localizadas de cimento mesocristalino (seta azul). PX.Obj: 5X

Com relação à lâmina A2, referente ao bloco A2, (Figura 4.2), esta apresenta uma porosidade (ϕ) próxima a 13% do tipo intercristalina alongada, efetiva, entre os romboedros de dolomita evugular do tipo equante, não efetiva e intergranular, alongada, na micrita. Esta

porosidade é característica de áreas da tufa onde existe alta concentração de grãos minerais, o que contribui para que a porosidade formada seja entre áreas de maior acúmulo desses grãos.

Também é observada a presença de cimento blocoso (Figura 4.2 B), o que indica que processos de substituição e preenchimento dos poros ocorreram após a formação da tufa carbonática.

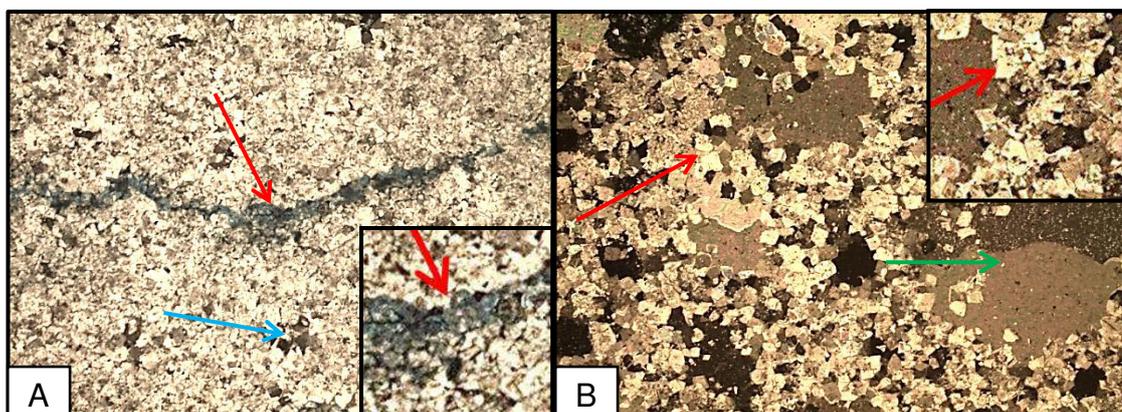


Figura 4.2 – Em (A), porosidade intercrystalina alongada (seta vermelha) em meio aos romboedros de dolomita (seta azul). P//.Obj: 5X. Em (B), dolomitização (romboedros, seta vermelha) em cimento blocoso (seta verde). PX.Obj: 5X.

Observa-se que na lâmina delgada do bloco A2 a porosidade é caracterizada como intercrystalina com os cristais romboédricos de dolomita Figura 4.3 (A), e ocorre também a ankeritização e a presença do cimento calcífero blocoso Figura 4.3 (B), além do aparecimento de uma geminação que pode advir do polimorfismo entre a calcita, dolomita e ankerita ou de uma deformação diferencial ocorrida na região onde a tufa foi formada. O destaque da Figura 4.3A, indica o início da dissolução de um cristal, formando nova porosidade intercrystalina.

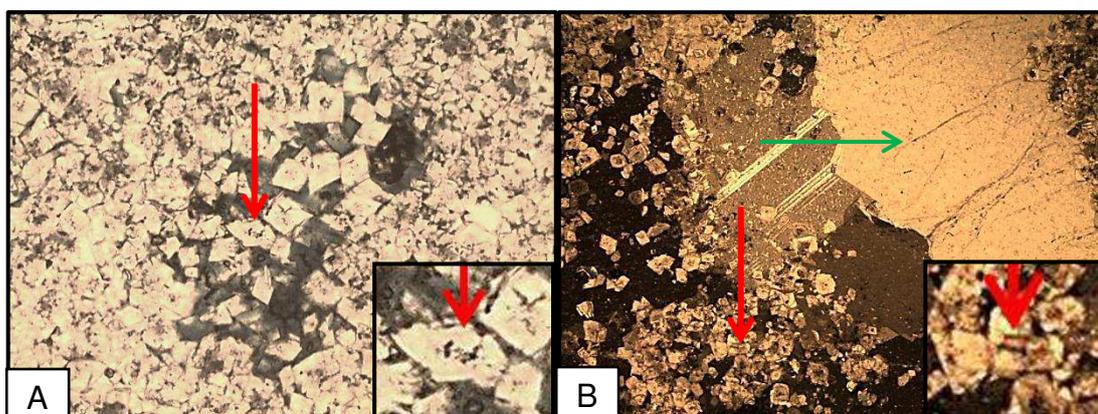


Figura 4.3 - Em (A), porosidade intercrystalina (seta vermelha) entre os romboedros de dolomita. P//.Obj: 10X. Em (B), dolomitização (romboedros, seta vermelha) em cimento blocoso (seta verde), e geminação oriunda da deformação diferencial. PX.Obj: 5X.

As porosidades identificadas na lâmina A3 é de aproximadamente de (ϕ)4%, do tipo intercrystalina, alongada e efetiva, entre os romboedros de dolomita e vugular do tipo equante. A porosidade intercrystalina alongada localiza-se na parte direita da Figura 4.4 (B) e a vugular no lado esquerdo acima, na mesma Figura, e na parte central da Figura 4.4 (A). Em (A), observa-se o maior espaçamento entre os romboedros, o que pode significar um ponto de dissolução elevada na amostra. Em (B), pode-se destacar o preenchimento de silte nos poros. Além disso, é indicado o provável início de um processo de ankeritização.

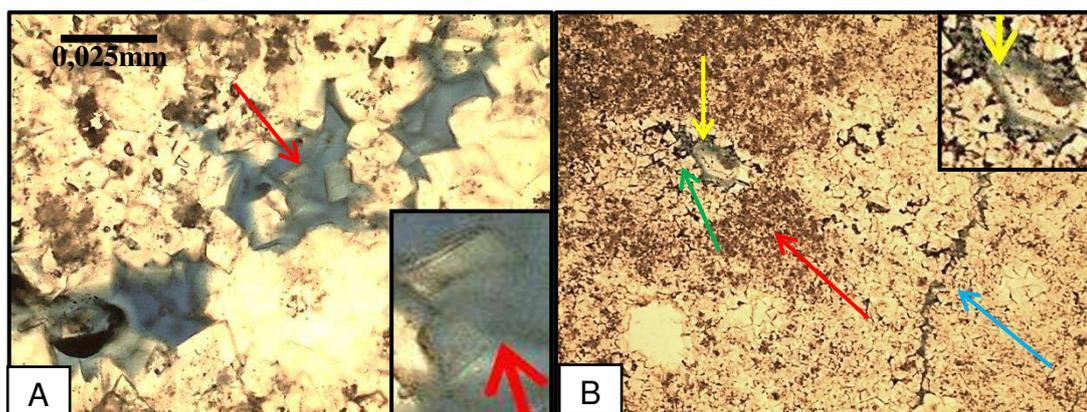


Figura 4.4 – Em (A), porosidade intercrystalina (seta vermelha) entre os romboedros de dolomita. P//.Obj: 20X. Em (B), matriz silte-peloidal (seta vermelha) dolomitizada (seta verde) com porosidade intercrystalina alongada (seta azul) e equante (seta amarela), entre os romboedros de dolomita.

P//.Obj: 5X.

Na Figura 4.5 (A) a porosidade é vugular do tipo equante com presença de cristais romboédricos de dolomita sobre o espáticoblocoso, além do processo de dolomitização (cristais romboedros) no restante da imagem. Com relação à Figura 4.5 (B) esta mostra uma porosidade intercrystalina, alongada, efetiva na região central da amostra com dolomitização em cimento blocoso.

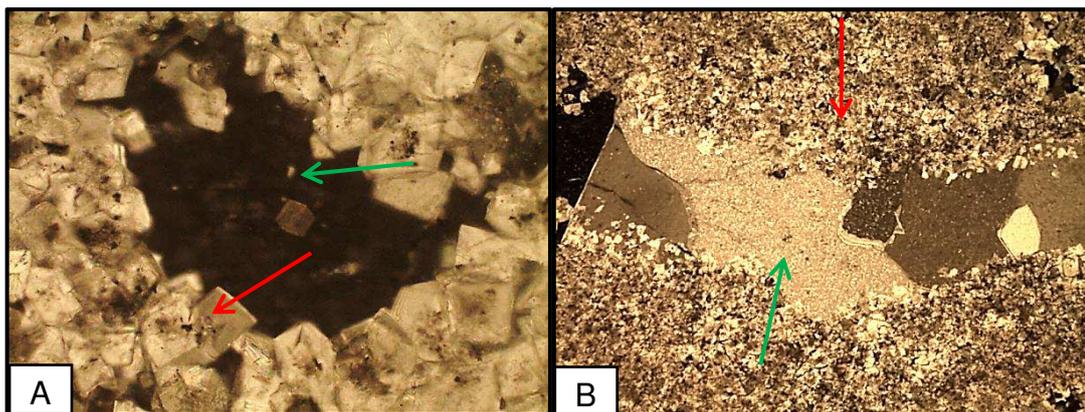


Figura 4.5 - Em (A), porosidade vulgar do tipo equante e dolomitização (romboedros, seta vermelha) em cimento blocoso (seta verde). P//.Obj: 20X. Em (B), porosidade intercrystalina, alongada, efetiva e dolomitização (romboedros, seta vermelha) em cimento blocoso (seta verde). P//.Obj: 5X.

Na lâmina A4, a porosidade encontrada foi de 7%, evidenciando uma porosidade intercrystalina do tipo alongada, efetiva entre romboedros de dolomita, vulgar do tipo equante não efetiva e intergranular alongada na micrita. A Figura 4.1.6 (A) mostra uma porosidade intercrystalina alongada e curvada entre os romboedros de dolomita, e na Figura 4.6 (B) verifica-se a presença de estruturas de estilólitos, encontrados com frequência em rochas calcárias. Os estilólitos são estruturas diagenéticas (que se formam após a sedimentação, já no interior das sequências rochosas) muito características que ocorrem, sobretudo em rochas sedimentares como resultado de dissolução por pressão direcionada. Salienta-se que essas estruturas estilólitas também foram encontradas nas lâminas delgadas do bloco B1.

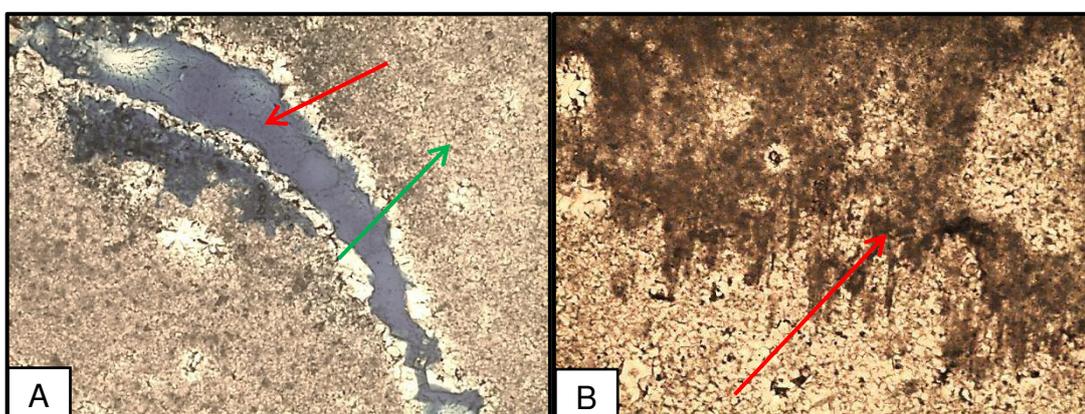


Figura 4.6 - Em (A), porosidade intercrystalina alongada (seta vermelha), entre os romboedros de dolomita (seta verde). P//.Obj: 5X. Em (B), Estilólito (seta vermelha). P//.Obj: 5X.

Com relação à Figura 4.1.7 (A) observa-se a porosidade na micrita gerando uma estrutura geopetal, que são feição geológica que permita identificar posicionamento

estratigráfico de topo e base de camadas e corpos rochosos. Enquanto que na Figura 4.1.7 (B) mostra uma geminação desenvolvida no cimento calcítico indicando, portanto, uma deformação em resposta a um cisalhamento. Nas amostras dos blocos A2 e A3 também se observa esse tipo de geminação “polissintética”, conduzindo a um entendimento que essas rochas foram afetadas possivelmente pela zona de cisalhamento de Portalegre.

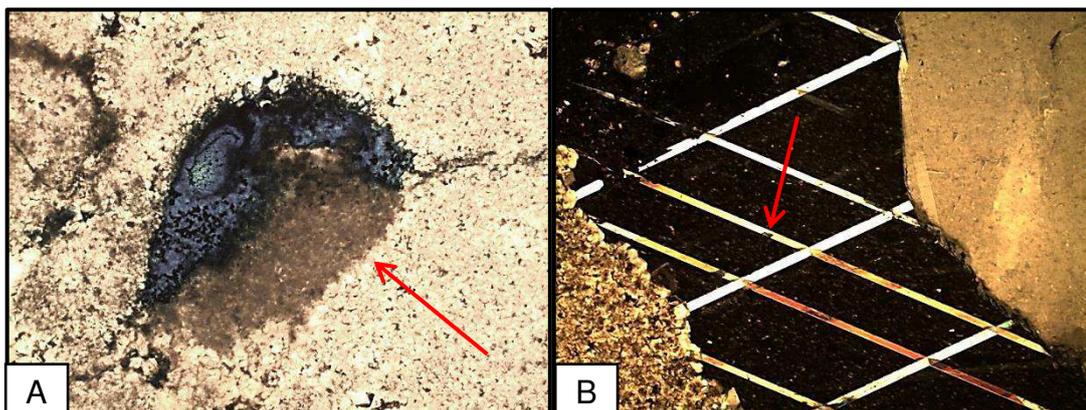


Figura 4.7 - Em (A), porosidade na micrita (seta vermelha), gerando uma estrutura geopetal. P//.Obj: 5X. Em (B), geminação em cimento calcítico (seta vermelha). PX.Obj: 5X.

4.3 – DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X

Os resultados de todas as amostras analisadas das tufas carbonáticas conduziram a obtenção dos seguintes parâmetros cristalográficos para o mineral calcita: sistema cristalino = trigonal; grupo espacial = R-3c; $a = 4,9896\text{Å}$; $c = 17,0610\text{ Å}$; $\alpha = \beta = 90^\circ$; $\gamma = 120^\circ$; densidade calculada = $2,71\text{ g/cm}^3$; volume da cela unitária $375,85\text{Å}^3$. Os maiores picos observados nos difratogramas de raios-x, com as respectivas intensidades (I), são listados para o mineral calcita, na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Relação da intensidade dos picos com dois teta para o mineral calcita.

h	k	l	d(Å)	2θ	I(%)
1	0	4	3,03555	29,400	100
1	1	3	2,28463	39,409	18,5
2	0	2	2,09443	43,158	14,3
0	1	8	1,91240	47,506	18,0
1	1	6	1,87532	48,505	19,0

O pico de intensidade 100%, correspondendo a um 2θ de $29,4^\circ$ que é característico do mineral calcita. Os outros picos de alta intensidade, correspondentes a 39° , 43° , 48° também são característicos desse mineral, observados em difratogramas padrões. A Figura 4.8, mostra um gráfico da intensidade versus 2θ de uma amostra de calcita da Formação Jandaíra.

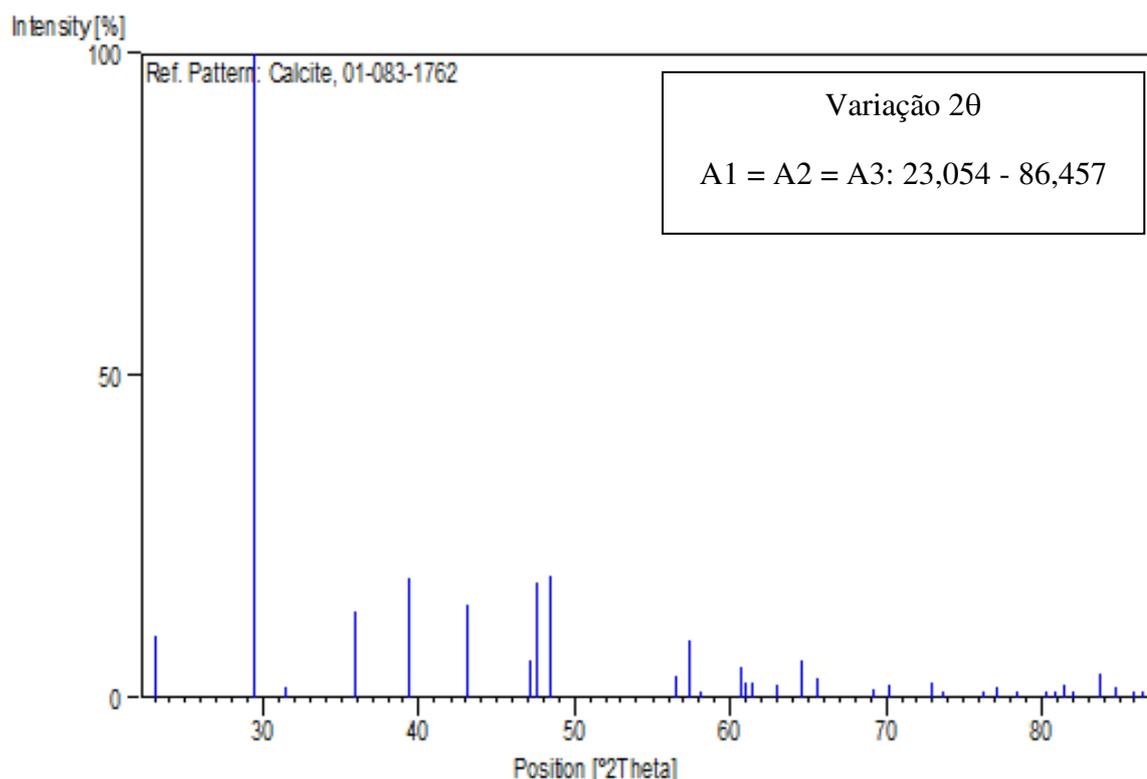


Figura 4.8 – Difratograma de uma amostra padrão de calcita.

Os resultados de todas as amostras analisadas das tufas carbonáticas mostram os seguintes parâmetros cristalográficos para o mineral ankerita: sistema cristalino = trigonal; grupo espacial = R-3; $a = 4,8287 \text{ \AA}$; $c = 16,1520 \text{ \AA}$; $\alpha = \beta = 90^\circ$; $\gamma = 120^\circ$; densidade calculada = $3,10 \text{ g/cm}^3$; volume da cela unitária $326,15 \text{ \AA}^3$. É de suma importância informar que os resultados analíticos do DRX obtidos na amostra A4, revelam que a composição mineralógica é de dolomita e calcita, entretanto, todas as outras amostras de tufas carbonáticas apresentam uma composição de ankerita e calcita. Os picos mais proeminentes observados nos difratogramas de raios-X, com as respectivas intensidades (I), são listados na Tabela 4.2 seguinte para o mineral ankerita.

Tabela 4.2 - Relação da intensidade dos picos com dois teta para o mineral ankerita.

h	k	l	d(Å)	2θ	I(%)
1	0	4	2,90600	30,742	100
0	1	2	3,71400	23,941	3,00
2	0	2	2,02400	44,740	4,00
1	1	3	2,20300	40,933	5,00
1	1	6	1,79740	50,753	6,00

O pico de intensidade 100%, correspondendo a um 2θ de $30,7^\circ$ que é característico do mineral ankerita. Os outros picos de intensidade um pouco elevada, que corresponde a 3,0%, 4,0%, 5,0% e 6,0% também são característicos desse mineral, observados em difratogramas padrões. Na Figura 4.9 está representando o gráfico da intensidade *versus* 2θ de uma amostra de ankerita da Formação Jandaíra.

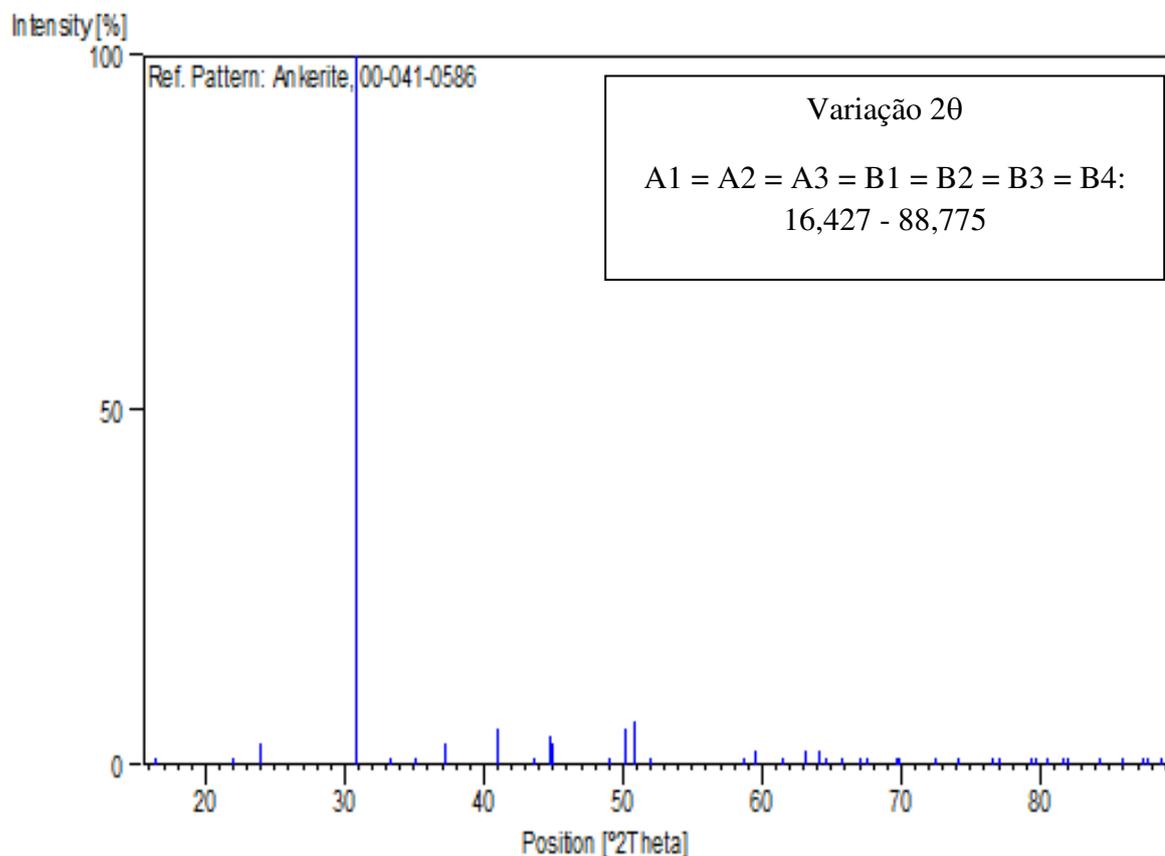


Figura 4.9 – Difratograma de uma amostra padrão de ankerita.

Os resultados apenas para a amostra A4 analisada com DRX mostram os seguintes parâmetros cristalográficos para o mineral dolomita: sistema cristalino = trigonal; grupo espacial = R-3; $a = 4,8150\text{Å}$; $c = 16,1190\text{Å}$; $\alpha = \beta = 90^\circ$; $\gamma = 120^\circ$; densidade calculada = $2,84\text{g/cm}^3$; volume da célula $323,65\text{Å}^3$. Os picos mais elevados observados nos

difratogramas de raios-X, com as respectivas intensidades (I), são listados na Tabela 4.3 seguinte para o mineral dolomita.

Tabela 4.3 - Relação da intensidade dos picos com dois teta para o mineral dolomita.

h	k	l	d(Å)	2θ	I(%)
1	0	4	2,89775	30,832	100
2	0	2	2,01851	23,941	13,1
0	1	8	1,81419	50,250	16,5
1	1	-6	1,79291	50,889	18,3
1	1	-3	2,19703	41,049	22,3

O 2θ de $30,8^\circ$ corresponde ao pico de intensidade 100%, que é característico do mineral dolomita. Os outros picos que apresentam uma intensidade proeminente correspondem a $13,1^\circ$, $16,5^\circ$, $18,3^\circ$ e $22,3^\circ$ também são característicos desse mineral, observados em difratogramas padrões. A Figura 4.10, mostra um gráfico da intensidade *versus* 2θ de uma amostra de dolomita da Formação Jandaíra.

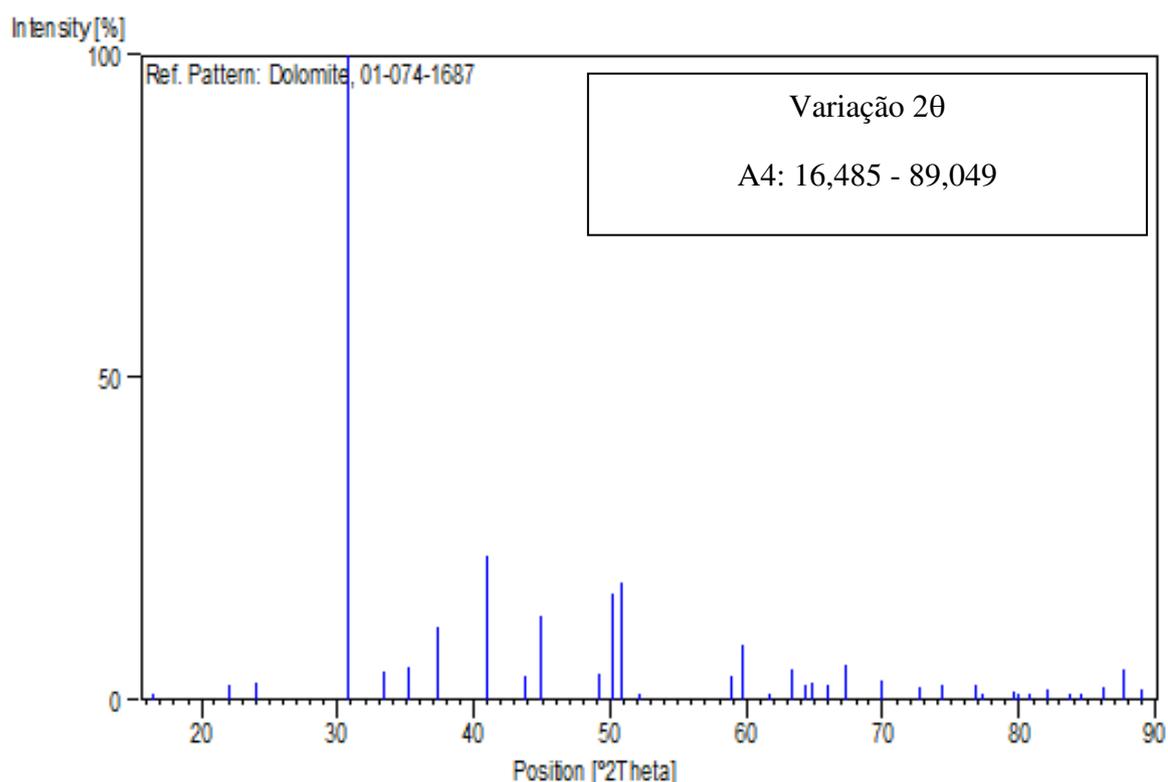


Figura 4.10 – Difratograma de uma amostra padrão de dolomita.

Nos difratogramas de raios-X de todas as amostras analisadas de tufas carbonáticas, não se observou superposição de picos, o que mostra pouca ou nenhuma mistura de outros materiais na amostra. A boa definição e pouco espalhamento dos picos induzem a uma boa cristalinidade da amostra, sem a presença de fases amorfas. Também não se observou ruído de fundo (*background*), indicando boa qualidade da análise, possibilitando uso de refinamento Rietveld para quantificação da estrutura.

Com relação à quantificação mineralógica, analisadas a partir da difração de raios-X, para as amostras da tufa carbonática de Felipe Guerra/RN da localidade de Cachoeira Roncador, verificou-se que a composição mineralógica dessas amostras é predominantemente de ankerita e calcita, onde apenas a amostra A4 apresenta uma composição de dolomita e calcita. Do exposto, analisando os resultados das lâminas delgadas com relação à composição mineralógica, observa-se que, onde se identificava o mineral dolomita ou o processo de dolomitização, com a análise dos resultados por difração de raios-x dessas amostras, verifica-se que a presença mineral predominante, corresponde a ankerita, o que pode se chamar de processo de ankeritização. Na Tabela 4.4, ressalta-se o percentual por amostra dos minerais encontrados nas amostras das tufas carbonáticas, com destaque para a presença de dolomita.

Tabela 4.4–Relação da composição mineralógica com o percentual das amostras de tufas carbonáticas.

Amostras	Mineral	Percentual (%)
Bloco A1	Ankerita	72
	Calcita	28
Bloco A2	Ankerita	81
	Calcita	19
Bloco A3	Ankerita	77
	Calcita	23
Bloco A4	Dolomita	81
	Calcita	19
Bloco B1	Ankerita	81
	Calcita	19
Bloco B2	Ankerita	75
	Calcita	25
Bloco B3	Ankerita	88
	Calcita	12
Bloco B4	Ankerita	62
	Calcita	38

Os resultados obtidos através da difração de raios-x, determinando a composição mineralógica das amostras de tufas carbonáticas são mostrados graficamente na Figura 4.11, onde as amostras A1, A2, A3, A4 corresponde ao topo, e as amostras B1, B2, B3, B4, a base da amostra padrão.

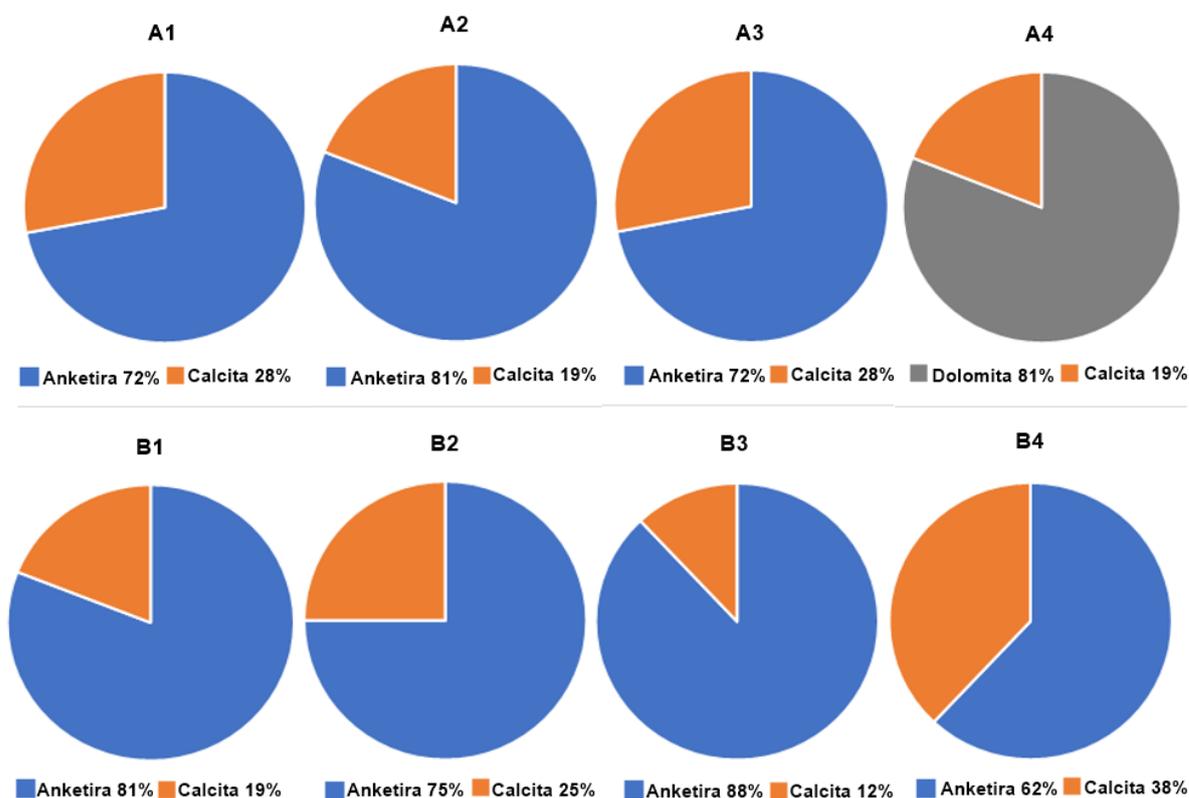


Figura 4.11 – Composição mineralógica das amostras.

4.4 – POROSIDADE E PERMEABILIDADE PELOS MÉTODOS CONVENCIONAIS

Na Tabela 4.5 estão os resultados da porosidade das oito amostras analisadas no permoporosímetro pertencente ao Laboratório de Petrofísica da UFCG. Além da porosidade entre 4.598% a 7.826%, são apresentados valores do volume total e do grão, da densidade e diâmetro do grão e o volume de poros. Observe-se que a porosidade tem uma amplitude de 3.228%, sendo esses valores uma média para cada amostra.

Tabela 4.5 – Porosidade e outros parâmetros das amostras de tufas carbonáticas.

Nº	Amostras	Volume Total(cc)	Volume do Grão (cc)	Densidade do Grão (gm/cc)	Volume dos Poros (cc)	Porosidade (%)	Diam. (cm)
1	A1	74.994	70.7693	2.794	4.225	5.634	3.789
2	A2	62.672	58.1484	2.799	4.524	7.219	3.786
3	A3	78.420	72.2834	2.77	6.137	7.826	3.801
4	A4	79.477	75.7246	2.789	3.752	4.721	3.794
5	B1	79.521	73.5967	2.791	5.924	7.450	3.771
6	B2	58.574	55.9493	2.806	2.625	4.482	3.790
7	B3	56.934	54.2308	2.799	2.703	4.748	3.791
8	B4	56.094	53.5153	2.762	2.579	4.598	3.784

Popp (1998) classifica as porosidades encontradas de acordo com a porcentagem delas presente em cada tipo específico de rocha. Os resultados da porosidade encontrada pelos ensaios de laboratório, indicam que os limites de porosidade da tufa carbonática estudada estão entre 5 e 10% (bastante porosa), conforme ilustra a Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Classificação das porosidades. Adaptado de Popp (1998).

Rochas	Porosidade (%)	Intervalos	Limites de Porosidade (%)
Granito	0,5 - 1,5	Muito Compacta	Até 1,0
Calcário	5,0 - 12	Bastante Porosa	5,0 - 10,0
Arenito	10,0 - 20,0	Muito Porosa	10,0 - 30,0
Argila	45,0 - 50,0	Extremamente Porosa	50,0

Os resultados obtidos permeabilidade para as amostras de tufas carbonáticas de Felipe Guerra (TFG) indicam uma permeabilidade muito baixa para três amostras e nulas para as outras, o que significa que as tufas da região apresentam pouca ou nenhuma conectividade entre os poros presentes, conforme Tabela 4.7 a seguir.

Tabela 4.7 – Permeabilidade e outros parâmetros das amostras de tufas carbonáticas.

Amostras	Diam. (cm)	Temp(°C)	Pressão		
			Dif. (psid)	Vazão (cc/sec)	Kair (md)
TFG_3_A	3.783	23	60.94	0.085	0.173
TFG_3_B	3.757	23	60.26	0.000	0.0000
TFG_3_C	3.716	23	59.46	0.000	0.0000
TFG_3_D	3.721	23	59.53	0.000	0.0000
TFG_3_E	3.714	23	59.45	0.000	0.0000
TFG_03	3.695	23	59.16	0.016	0.0346
TFG_23	3.746	23	60.07	0.134	0.253

Através da escala de permeabilidade, pode-se identificar o grau de permeabilidade presente na amostra. Os valores obtidos nas amostras TFG 3 A, TFG 03 e TFG 23, indicam baixa permeabilidade por estarem abaixo de 1 mD (Tabela 4.8).

Tabela 4.8 - Escala de permeabilidade. Adaptado de Gomes (2002)

<1 mD	Baixa
1 - 10mD	Regular
10 - 100 mD	Boa
100 - 1000mD	Muito Boa
>1000ou 1 D	Excelente

(1 Darcy equivale a $9,869233 \times 10^{-13} \text{ m}^2$)

4.5 – TOMOGRAFIA

Inicialmente foram analisados os quatro cubos com arestas de aproximadamente de quinze centímetros, com resoluções de 2,0 e 0,8 mm. Para o escaneamento dos quatro cubos de uma única vez, com resolução de dois milímetros, não se obteve êxito, pois a máquina esquentou devido ao tempo prolongado de exposição para o imageamento, além de restrição do próprio equipamento. Portanto, foi necessário escanear cada bloco individualizado, os quais alcançaram resultados satisfatórios. Com relação ao imageamento dos blocos com a resolução de 0,8 mm, o aparelho não apresentou nenhum problema funcional e, portanto, os resultados das imagens foram aceitáveis. As formas das estruturas porosas geradas na tomografia em aspecto tridimensional podem ser relacionadas com aquelas observadas nas lâminas degaldas em aspecto geométrico e extensão bidimensional.

Permitindo então, a análise estrutural dos poros presentes em toda a amostra por inferência, baseando-se nos poros identificados nas lâminas.

Na Figura 4.12 (A1) observa-se após a segmentação, três regiões da amostra com pequenas "nuvens" de porosidade interconectadas, porém com pequenas proporções em relação a matriz da amostra, refletindo uma baixa porosidade e permeabilidade. De acordo com o resultado da análise da lâmina delgada a qual revela uma porosidade do tipo intergranular na micrita, com baixa permeabilidade, devido a falta de conexão entre os poros, corroborando com as imagens segmentadas pelo equipamento tomográfico.

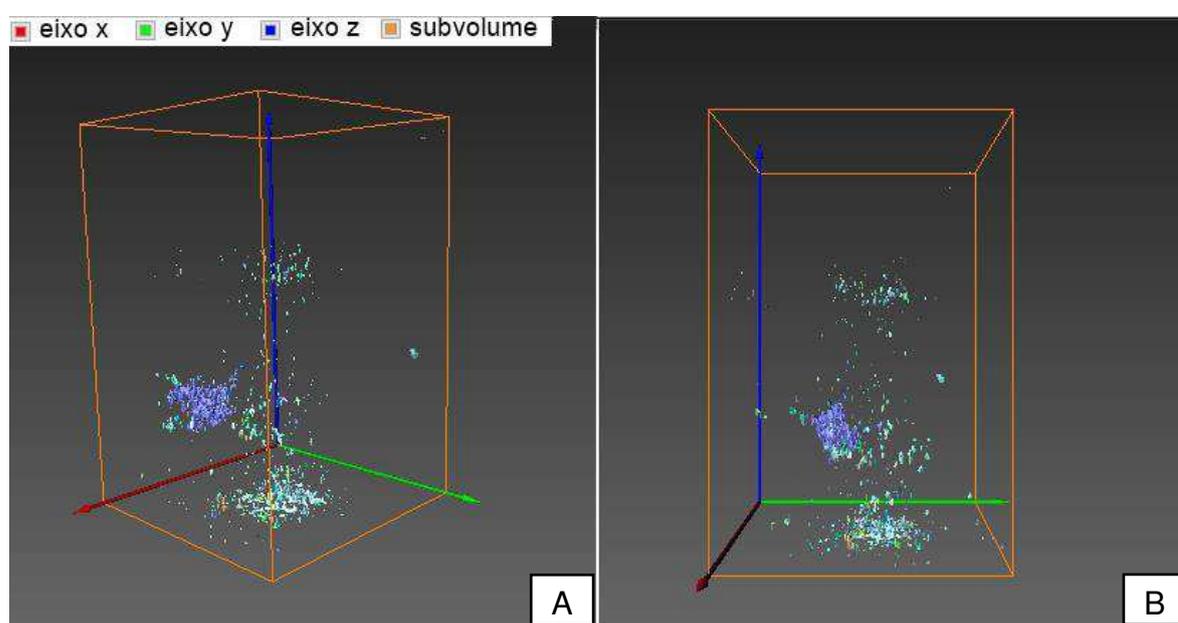


Figura 4.12 – Representação gráfica da amostra A1, mostrando as nuvens de porosidades efetivas nos planos ortogonais da imagem.

Na Figura 4.12 (A e B), observa-se nos planos ortogonais, três nuvens de porosidade interconectadas. Na Figura 4.13 (A e B) se observa as duas "nuvens" de porosidades contidas nas superfícies representadas pelos planos yz e xz, respectivamente, e a seção basal representada pelos planos xy e xy simultaneamente, exibindo um esquema de porosidade possivelmente intergranular, referindo ao que foi observado nas lâminas. A Figura 4.13 A exibe na superfície do plano xy, as nuvens das porosidades efetivas da amostra A1 de tufas carbonáticas.

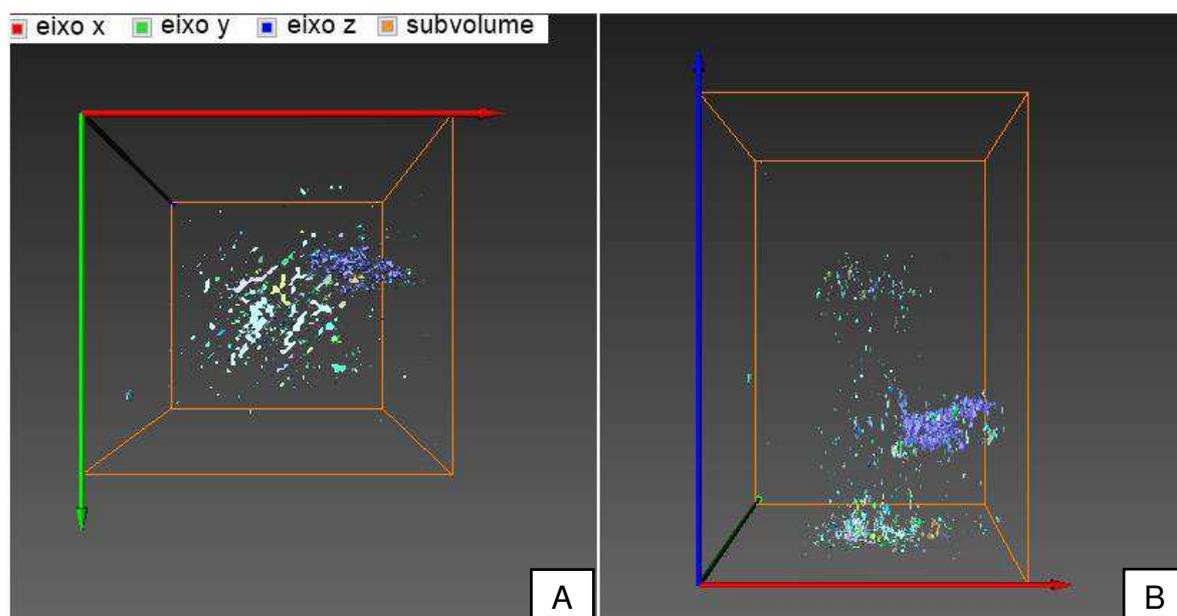


Figura 4.13 – Representação gráfica da amostra A1, mostrando as nuvens de porosidades efetivas nos planos ortogonais da imagem.

Os resultados analíticos da amostra de tufa carbonática (A2) revela, após a segmentação, porosidades interconectadas. Estas porosidades são de aproximadamente 13% foram detectadas em lâmina delgada como sendo do tipo intercrystalina alongada, vugular equante (isométrica) não efetiva e integranular alongada. Observa-se na Figura 4.14 A as superfícies que compõem o bloco, compostas pelos eixos xy e xz , os quais dão uma visão panorâmica das porosidades contidas na amostra de rocha sedimentar. Na Figura 4.14 B visualiza-se a superfície contida no plano yz uma porosidade alongada longitudinal ao eixo z .

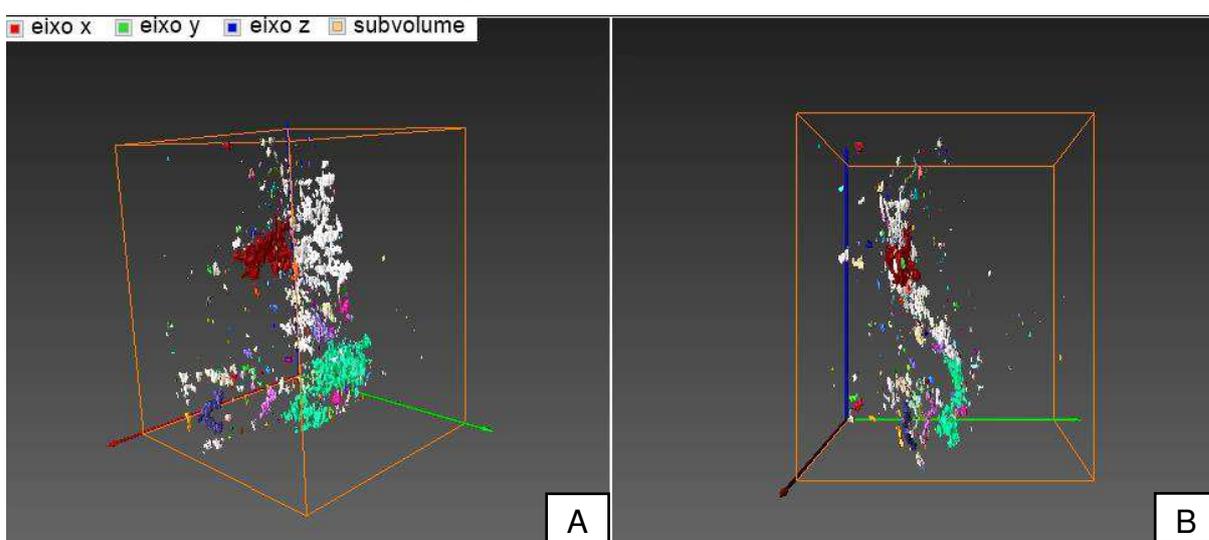


Figura 4.14 – Representação gráfica da amostra A2, mostrando porosidades efetivas intercrystalina alongada, efetiva e possivelmente vugular.

Na Figura 4. 15A o plano visualizado está representado pelos eixos xy o qual mostra uma porosidade efetiva, também alongada, longitudinal ao eixo x. Com relação a Figura 4.15 B a superfície representada pelos eixos xz, mostra as porosidades contidas na amostra de tufa carbonática A2, onde possivelmente a porosidade visualizada no centro do plano de cor vermelha seja do tipo vugular corroborando com as análises dos resultados da lâmina delgada. Este resultado demonstra que apesar das lâminas indicarem os tipos de poros presentes e sua porcentagem, este valor só corresponde ao que foi visto na área delimitada pela lâmina, não representando a amostra de forma completa, em termos de parâmetros petrofísicos. Pode-se inferir que as estruturas estão de acordo com aquelas identificadas nas lâminas delgadas, fazendo uma interpretação visual da estrutura em 3D gerada com àquela indicada pela lâmina, tendo em vista as estruturas equante e vugular.

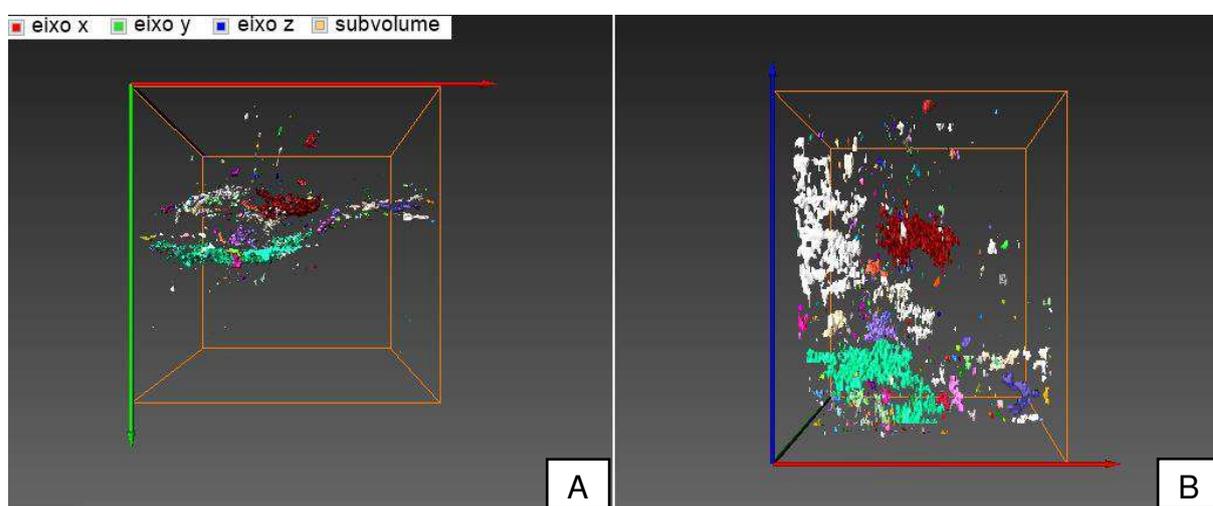


Figura 4.15 – Representação gráfica da amostra A2, mostrando porosidades efetivas intercrystalina alongada, efetiva e possivelmente vugular.

As análises dos resultados da amostra de tufa carbonática (A3) expõe, após a segmentação, porosidades interconectadas. Em lâmina delgada estas porosidades são de aproximadamente 4% sendo do tipo intercrystalina alongada e vugular equante não efetiva. Na Figura 4.16 A, tem-se uma visão geral da porosidade em quantidade significativa, localizada nas arestas que compõem os planos dos cubos. A Figura 4.16B mostra uma concentração de porosidade no centro do cubo.

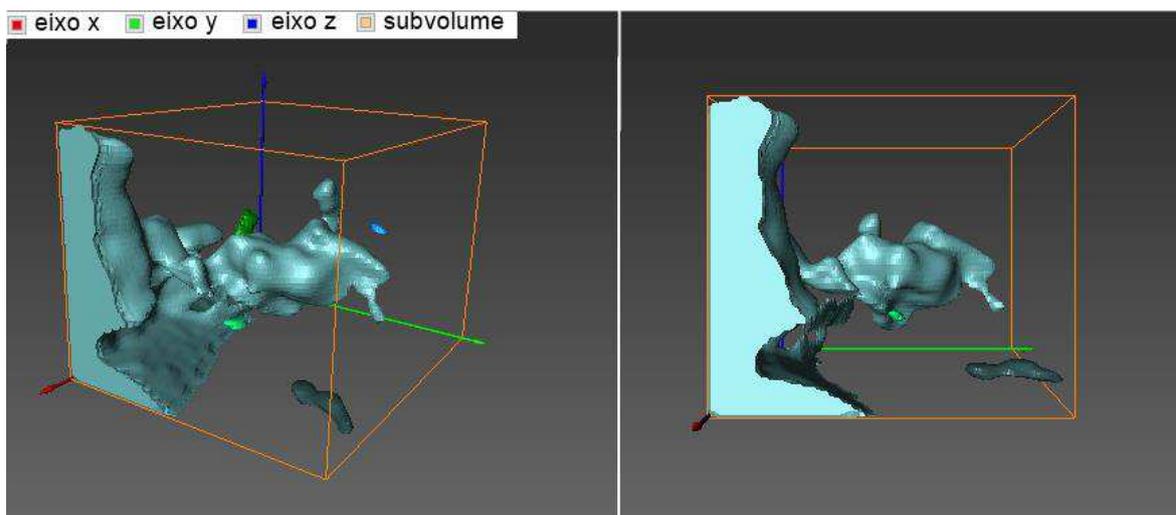


Figura 4.16– Representação gráfica da amostra A3, mostrando porosidades efetivas intercristalina alongada, efetiva e possivelmente vulgular.

Na Figura 4.17A e B existe uma porosidade interconectada exibida no plano xy, longitudinal ao eixo x e o plano xz, longitudinal ao eixo z. Supõe-se que as porosidades de cores cinza escuro, verde e azul sejam do tipo vulgular não efetiva, sendo estas estruturas porosas isoladas, não conectadas com a maior estrutura apresentada.

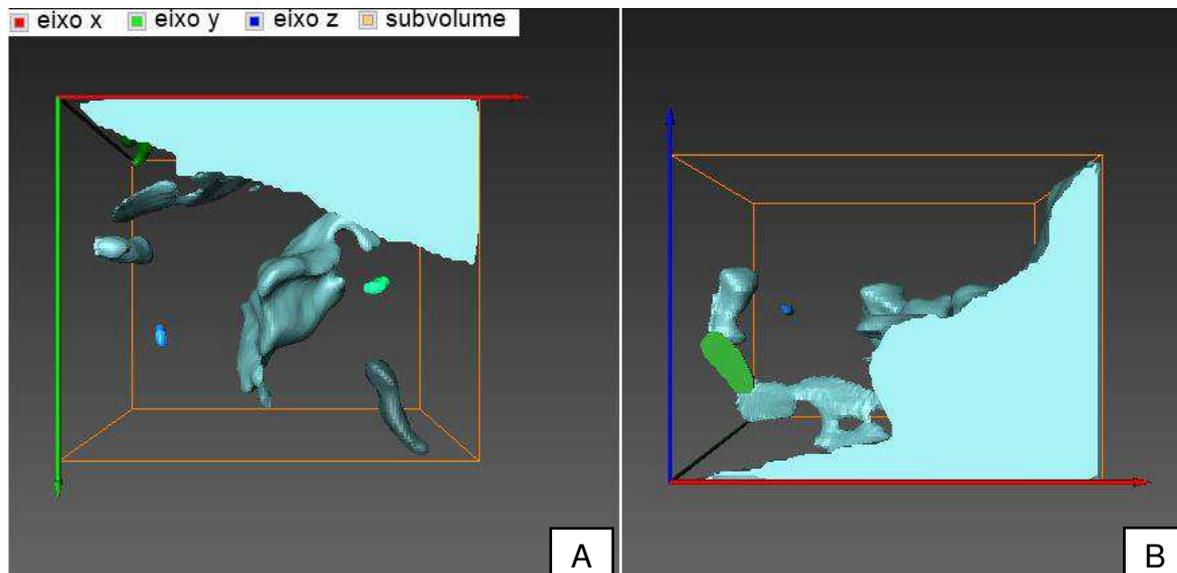


Figura 4.17– Representação gráfica da amostra A3, mostrando porosidades efetivas intercristalina alongada, efetiva e possivelmente vulgular.

A amostra de tufa carbonática (A4) apresenta, após a segmentação, porosidades interconectadas. As porosidades identificadas em lâmina delgada foram quantificadas em torno de 7% e são do tipo intercristalina alongada, efetiva, vulgular do tipo equante não efetiva

e intergranular alongada. Na Figura 4.18A observa-se a exposição das porosidades contidas na amostra de tufa carbonática, onde se verifica uma concentração das porosidades na parte superior e inferior do cubo. Na Figura 4.18 B no plano compreendido entre os eixos yz, exibe uma concentração da porosidade.

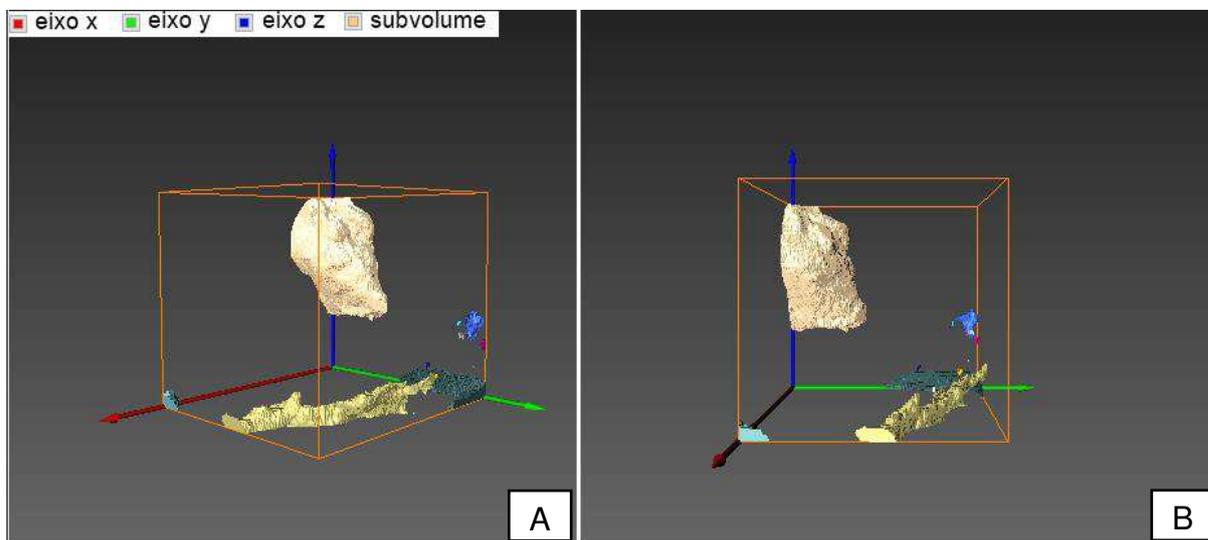


Figura 4.18 – Representação gráfica da amostra A4, mostrando porosidades efetivas provavelmente do molde intercrystalina alongada, efetiva e vulgar do tipo equante não efetiva.

Com relação a Figura 4.19 A, no plano compreendido entre os eixos xy, a porosidade que se destaca está localizada numa posição diagonal ao plano citado. Na Figura 4.19 B o plano contido entre os eixos xz, mostra além das porosidades, algumas regiões com pequenas porosidades dispersas na rocha calcária. Estas porosidades quando relacionada com a análise da lâmina delgada, indicam que provavelmente devam ser do tipo vulgar do tipo equante, enquanto que a porosidade que se encontra na posição diagonal da Figura 4.19 A, possivelmente será do tipo intercrystalina alongada e efetiva, pois em lâmina se destaca vários cristais de ankerita e calcita.

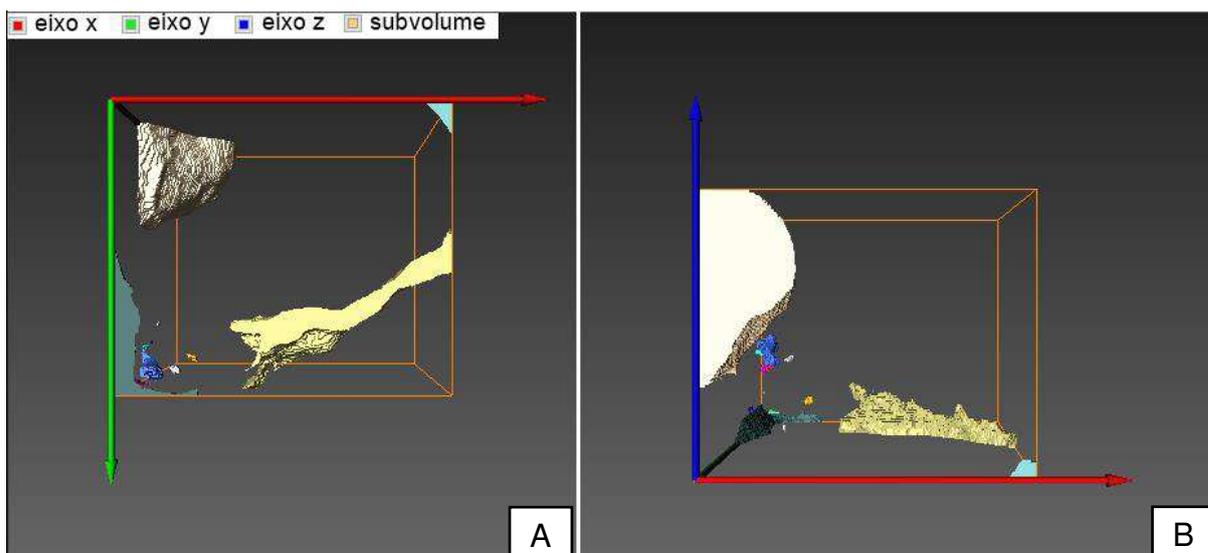


Figura 4.19 – Representação gráfica da amostra A4, mostrando porosidades efetivas provavelmente do molde intercrystalina alongada, efetiva e vugular do tipo equante não efetiva.

Os resultados analíticos da amostra de tufa carbonática (B1) revela, após a segmentação, porosidades interconectadas. Estas porosidades de aproximadamente 12% foram detectadas em lâmina delgada como sendo do tipo intercrystalina alongada e efetiva. A vista geral observada na Figura 4.20 A, expõe as porosidades compreendidas no cubo. Na Figura 4.20 B no plano formado pelos eixos yz, percebe-se uma grande concentração das porosidades interconectadas e no plano onde estão contidos os eixos xz, observa-se algumas porosidades com destaque para aquela de cor vermelha a qual provavelmente é do tipo vugular equante.

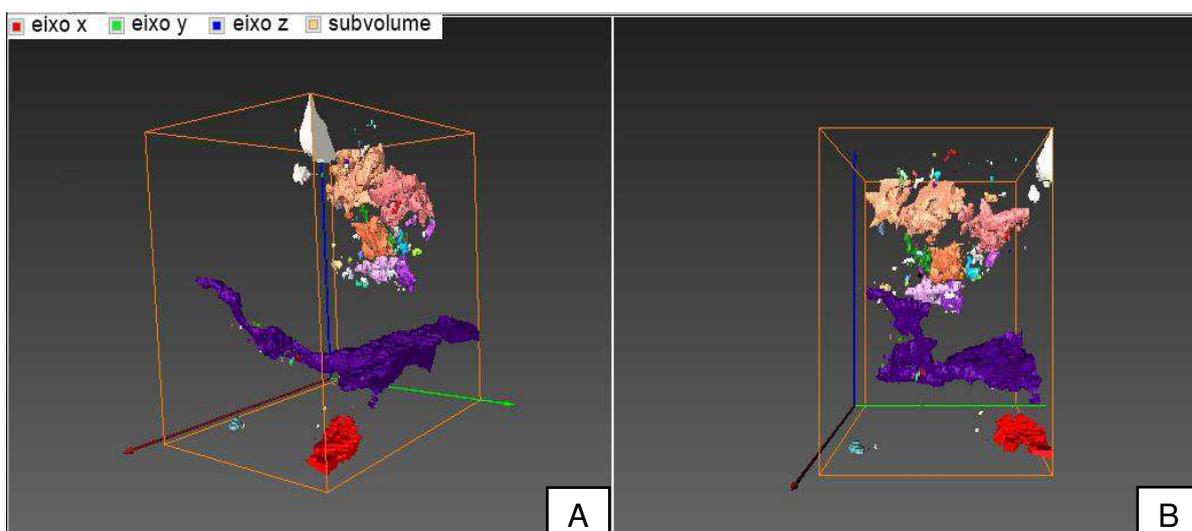


Figura 4.20– Representação gráfica da amostra B1, mostrando porosidades efetivas possivelmente do molde intercrystalina alongada, efetiva e vugular do tipo equante não efetiva.

Na Figura 4.21 A e B no plano que compreende os eixos xy, mostra em destaque na cor azul uma porosidade interconectada, sendo que, esta porosidade encontra-se localizada no centro da imagem no plano formado pelos eixos xz, vê-se essa mesma porosidade um pouco arqueada com a concavidade voltada para baixo, provavelmente uma porosidade intercrystalina alongada e efetiva. A Figura 4.21 B exibe na parte superior uma porosidade efetiva e também algumas porosidades individualizadas e espaçadas na imagem. Na parte inferior na cor vermelha vê-se uma porosidade, que supostamente é do tipo vulgar, pois na descrição das lâminas delgadas se identifica esse tipo de porosidade.

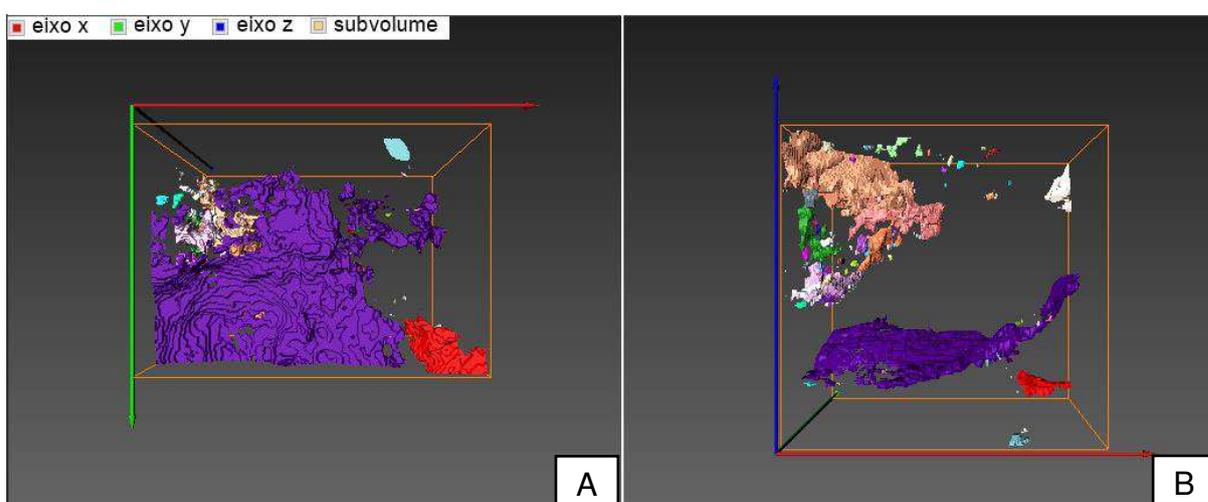


Figura 4.21 – Representação gráfica da amostra B1, mostrando porosidades efetivas possivelmente do molde intercrystalina alongada, efetiva e vulgar do tipo equante não efetiva.

As análises dos resultados da tomografia da amostra de tufa carbonática (B2) expõe, após a segmentação, porosidades interconectadas. Em lâmina delgada estas porosidades são de aproximadamente 13% sendo do tipo intercrystalina alongada e efetiva. Com relação à quantidade e o tipo de porosidade da amostra que é representada pela Figura 4.22 está, se assemelha a amostra (B1). Visualiza-se na Figura 4.22 A uma porosidade efetiva alongada no plano compreendido pelos eixos xy. A Figura 4.22 B expõe uma concentração de porosidade efetiva na parte superior do plano contido entre os eixos xz e outras porosidades dispersas na amostra de tufa carbonática, sugerindo porosidade do tipo equante não efetiva, correlacionando-as com as porosidades obtidas em lâminas delgadas.

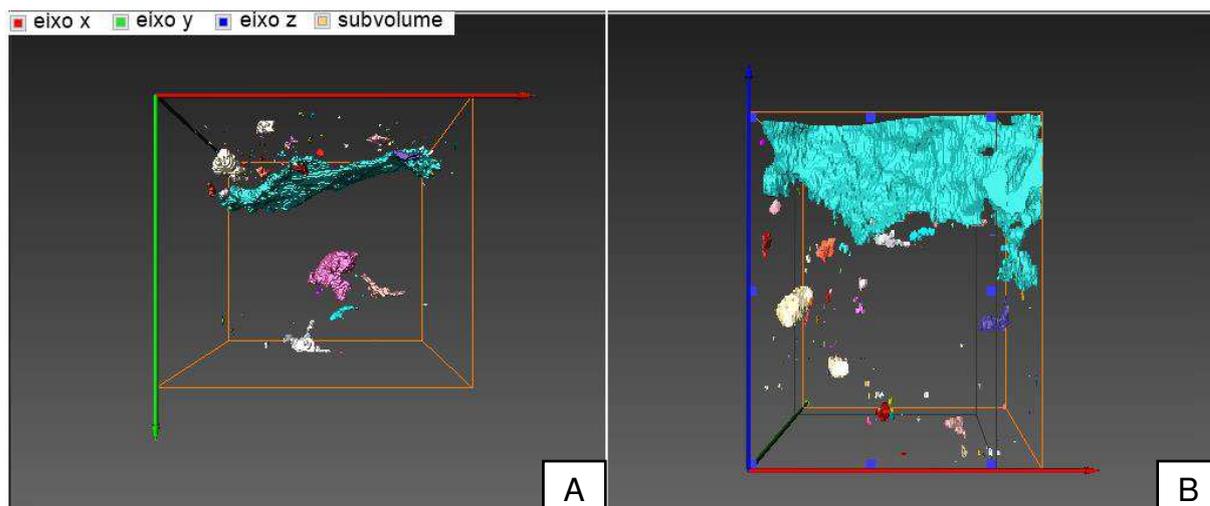


Figura 4.22– Representação gráfica da amostra B2, mostrando porosidades efetivas provavelmente do padrão intercristalina alongada, efetiva e vulgar do tipo equante não efetiva.

Os resultados da amostra de tufa carbonática (B3) revela, após a segmentação, porosidades interconectadas. As porosidades identificadas em lâmina delgada foram quantificadas em torno de 14% e são do tipo intercristalina alongada, efetiva e vulgar do tipo equante. Na Figura 4.23 A tem-se uma vista geral das porosidades contidas no bloco diagrama, onde se destaca uma porosidade concentrada no lado esquerdo do diagrama. Na Figura 4.23 B verifica-se que a porosidade efetiva, contida no plano compreendido entre os eixos xz, encontra-se concentrada na direção longitudinal ao eixo z.

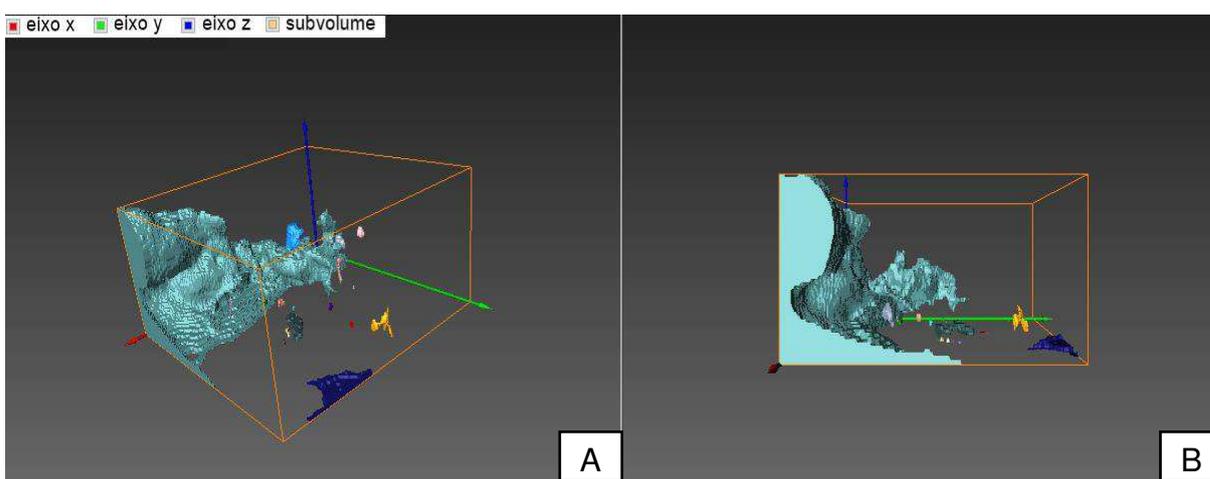


Figura 4.23 – Representação gráfica da amostra B3, mostrando porosidades efetivas possivelmente do molde intercristalina alongada, efetiva e vulgar do tipo equante não efetiva.

Para a Figura 4.24 A verifica-se da concentração da porosidade relatada como acima, além de algumas porosidades provavelmente intercristalinas alongadas, efetivas e outras porosidades vulgar do tipo equante de acordo com as descrições das lâminas delgadas.

Com relação à Figura 4.24 B verifica-se que a porosidade efetiva, contida no plano compreendido entre os eixos xz, encontra-se concentrada na direção longitudinal ao eixo x. Importante salientar que o resultado analítico da lâmina delgada para a amostra de tufa carbonática (B3), indica uma porosidade de 14%, sendo o maior percentual entre as amostras analisadas por lâminas delgadas. No entanto, o resultado obtido da porosidade através da análise tomográfica, revela um valor elevado de 4,10% para a amostra, mas não o maior. Portanto, em termos quantitativos da porosidade analisada pela lâmina delgada e pelo tomógrafo, existe uma discrepância dessas porosidades, visto que, em lâmina delgada a porosidade é de 14%, e para o resultado do tomógrafo de 4,10% com uma amplitude de quase 10% de porosidade.

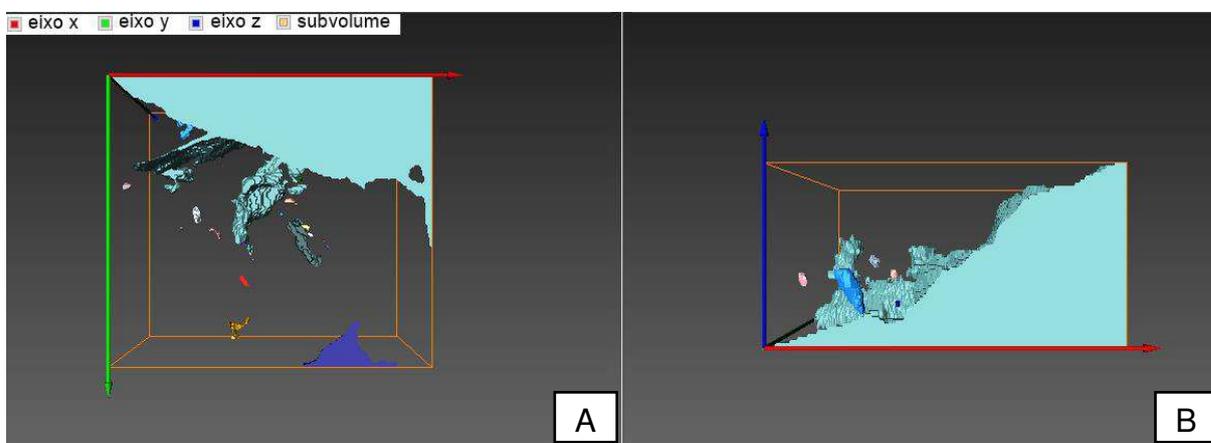


Figura 4.24 – Representação gráfica da amostra B3, mostrando porosidades efetivas possivelmente do molde intercrystalina alongada, efetiva e vulgar do tipo equante não efetiva.

As análises dos resultados da tomografia da amostra de tufa carbonática (B4) expõe, após a segmentação, porosidades interconectadas. Em lâmina delgada estas porosidades são de aproximadamente 4% sendo do tipo intercrystalina alongada e vulgar equante efetiva. A Figura 4.25 A apresenta uma visão geral da disposição das porosidades interconectadas no bloco diagrama. A representação espacial das porosidades efetivas nos planos yz e xz, vista na Figura 4.25B e Figura 4.25 A, sugerem respectivamente, porosidades intercrystalina na cor azul e vulgar na verde ocupando quase todo plano.

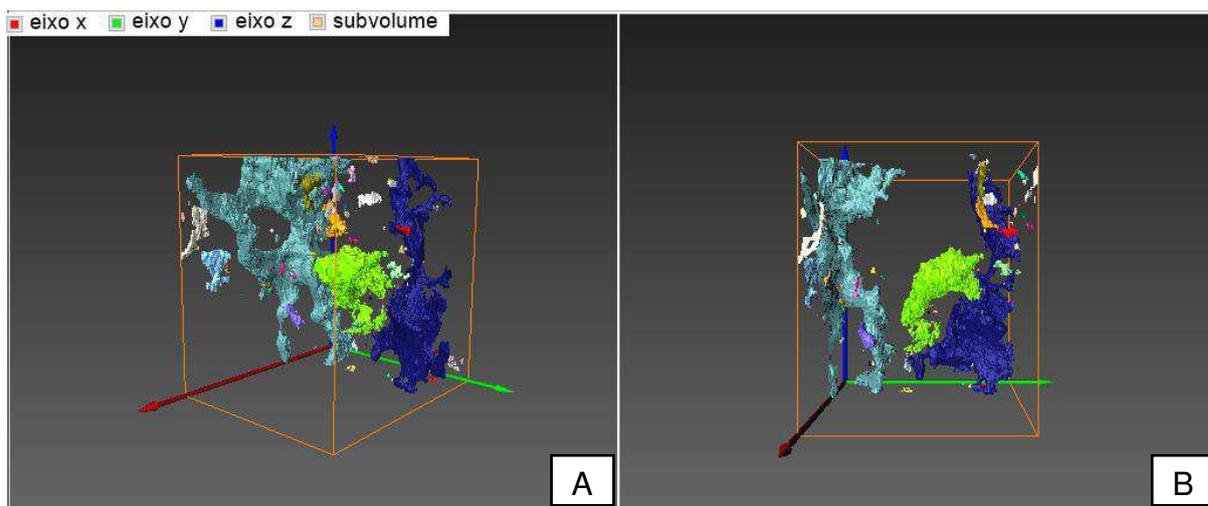


Figura 4.25– Representação gráfica da amostra B4,mostrando porosidades efetivas provavelmente dos tipos intercristalina alongada, e vulgular equante.

Com relação à Figura 4.26 B essa mostra uma concentração de porosidades ocupando grande parte do plano compreendido pelos eixos xz.

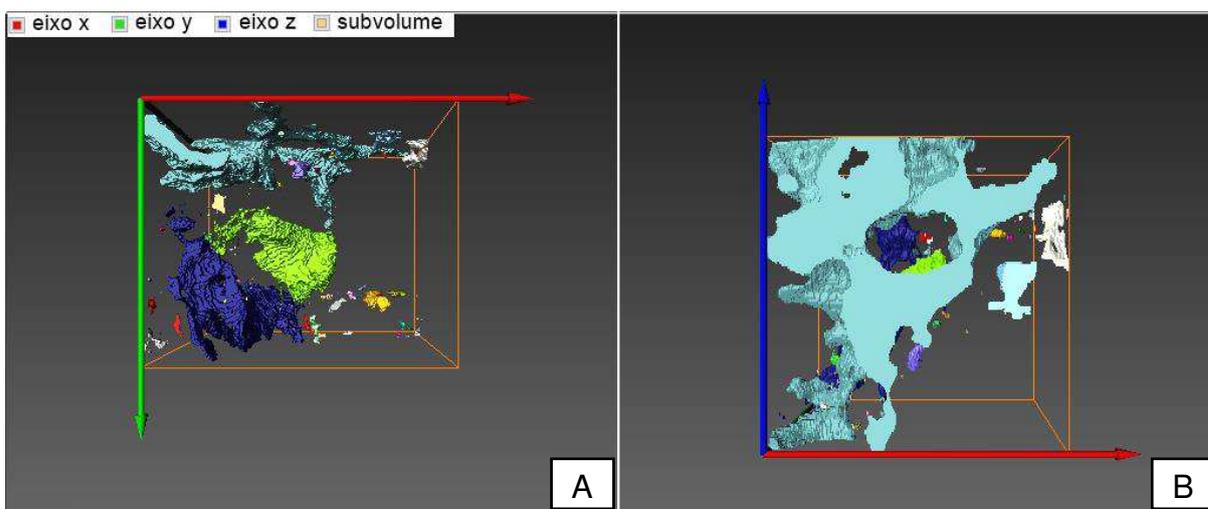


Figura 4.26– Representação gráfica da amostra B4, mostrando porosidades efetivas provavelmente dos tipos intercristalina alongada, e vulgular equante.

Na Tabela 4.9 são representados os valores das porosidades calculadas a partir dos dados obtidos pelo equipamento de tomografia e utilizando o *software* Avizo Fire®, versão 8.1. Destaca-se a maior porosidade presente no bloco B4, com 4,50%, enquanto o bloco A1 apresenta apenas 0,09%.

Tabela 4.9– Porosidade dos blocos calculada através da tomografia

Amostra	Porosidade (%)
Bloco A1	0,09
Bloco A2	0,43
Bloco A3	4,08
Bloco A4	4,06
Bloco B1	2,38
Bloco B2	1,63
Bloco B3	4,10
Bloco B4	4,50

Os resultados analíticos da amostra de tufa carbonática (PLA1) revelam, após a segmentação, porosidades e permeabilidades baixas. Estas porosidades em conformidade com o resultado da análise da lâmina delgada a qual revela uma porosidade de aproximadamente 20% do tipo intergranular na micrita, com baixa permeabilidade, corrobora com as imagens segmentadas pelo equipamento tomográfico. A representação da Figura 4.27(A) expõe as porosidades em três planos compreendidos no cubo. Com relação à Figura 4.27(B) e (C) os planos yx e xz mostram respectivamente, porosidades dispersas, e uma consequente permeabilidade baixa, provavelmente do tipo intergranular na micrita confirmando com os resultados das análises realizadas em lâminas delgadas. Analisando os resultados das lâminas delgadas, das tomografias dos blocos e dos plugues, verifica-se que há uma discordância com relação principalmente, com os percentuais de porosidades contidas na amostra de tufa carbonática.

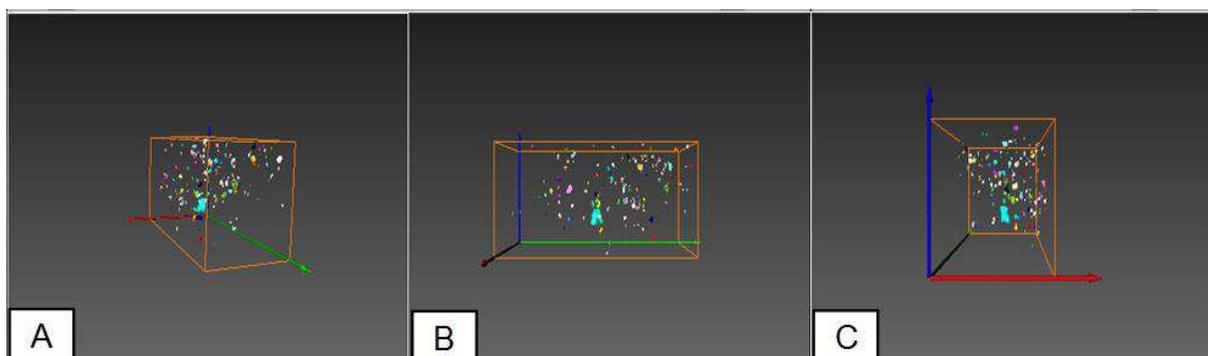


Figura 4.27 – Representação gráfica plugue (PLA1) (A), (B) e (C), mostrando porosidades efetivas dispersas nos planos ortogonais das imagens.

As análises dos resultados da tomografia da amostra de tufa carbonática (PLA2) expõem, após a segmentação, porosidades e permeabilidades baixas também. A Figura 4.28 (A e B) exhibe as porosidades não efetivas dispersas nos planos formados pelos eixos yz e xz respectivamente. Em lâmina delgada a porosidade detectada foi de aproximadamente de 13% e nos blocos e plugues encontra-se a quantidade em percentual de porosidades de 0,43% e 0,35058% respectivamente. O diagnóstico da amostra de tufa carbonática (PLA2), sugere, portanto, porosidades intercrystalias, ou microvugular e não intrcrystalina alongada como recomenda a descrição em lâmina delgada.

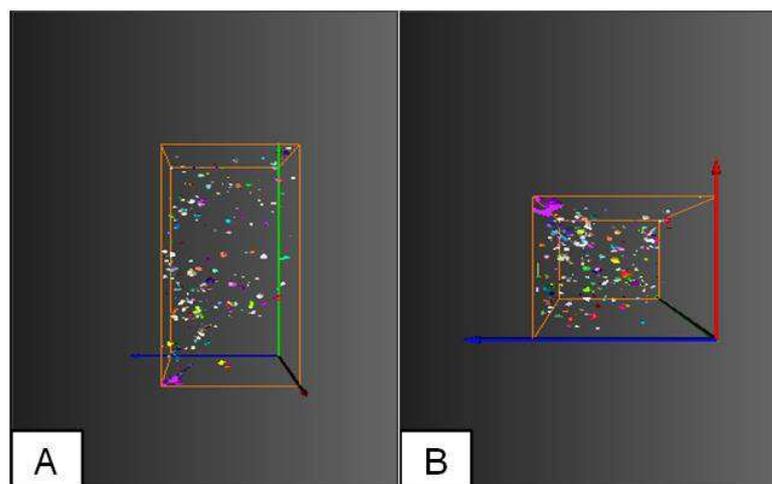


Figura 4.28– Representação gráfica plugue (PLA2), sugerindo uma porosidade intercrystalina e possivelmente microvugular.

Os resultados das análises da tomografia da amostra de tufa carbonática (PLA3) expõem, após a segmentação, baixas porosidades e permeabilidade. Em lâmina delgada estas porosidades são de aproximadamente 4% sendo do tipo intercrystalina alongada e vugular equante efetiva. A Figura 4.29 exhibe as porosidades não efetivas dispersas no bloco diagrama eno plano formado pelos eixos yz respectivamente. Em lâmina delgada a porosidade detectada foi de aproximadamente de 4,0% e nos blocos e plugues encontra-se a quantidade em percentual de porosidades de 4,08% e 0,00012% respectivamente. O diagnóstico da amostra de tufa carbonática (PLA3), sugere, portanto, porosidades intercrystalinas, ou microvugular e não intercrystalina alongada e vugular equante não efetiva, como recomenda a descrição em lâmina delgada.

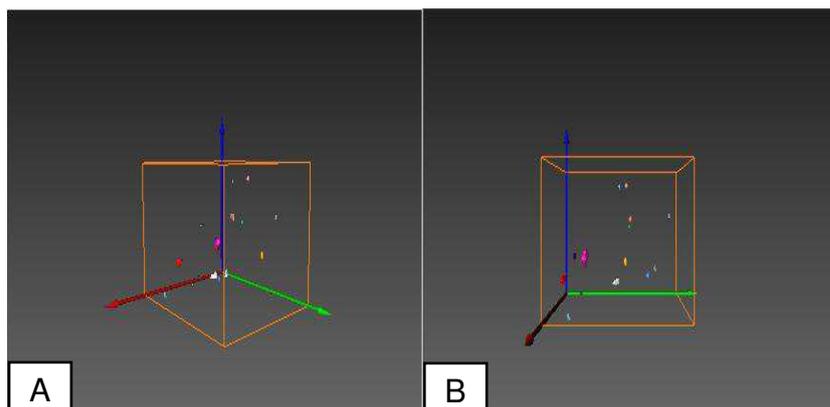


Figura 4.29 – Representação gráfica do plugue (PLA3), sugerindo uma porosidade intercrystalina e possivelmente microvugular.

A amostra de tufa carbonática (PLA4) apresenta resultados analíticos, após a segmentação, de porosidades interconectadas. As porosidades identificadas em lâmina delgada foram quantificadas em torno de 7% e são do molde intercrystalina alongada, efetiva, vugular do tipo equante não efetiva e intergranular alongada. A Figura 4.30 (A e B) expõe porosidades dispersas no bloco diagrama e no plano compreendido pelos eixos yz respectivamente. Em lâmina delgada a porosidade detectada foi em torno de 7,0% e nos blocos e plugues encontra-se a quantidade em percentual de porosidades de 4,06% e 0,02195% respectivamente. O diagnóstico da amostra de tufa carbonática (PLA4), recomenda, portanto, porosidades intercrystalinas, ou microvugular e não intercrystalina alongada, efetiva, vugular do tipo equante não efetiva e intergranular alongada, como preconiza a descrição em lâmina delgada.

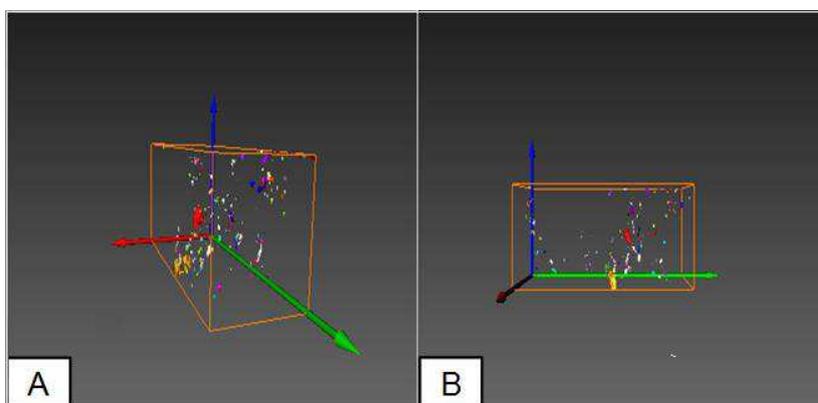


Figura 4.30 – Representação gráfica do plugue(PLA4), sugerindo uma porosidade intercrystalina e/ou vugular.

Conforme os resultados analíticos obtidos da lâmina delgada, e do tomógrafo para blocos e plugues, verifica-se que as porosidades não se alteram significativamente para cada método analisado, pois em lâmina delgada a porosidade encontrada na amostra B1 foi de 12% e na amostra B2 de 13%, por conseguinte uma variação em termos quantitativos de apenas 1,0%. Analogamente, o percentual das porosidades calculadas usando o tomógrafo, no bloco B1 foi de 2,38% e no bloco B2 de 1,63%, conseqüentemente uma variação em termos quantitativos de apenas 0,75%, um pouco inferior com relação ao resultado das amostras B1 e B2. De modo semelhante, o percentual das porosidades calculadas através dos resultados advindo do tomógrafo, para o plugue (PL B1) foi de 0,01953% e no plugue (PLB2) de 0,12352%, conseqüentemente uma variação em termos quantitativos de apenas 0,10399%, bastante inferior tanto com relação aos resultados das amostras B1 e B2 como para os plugues (PLB1) e (PLB2).

Os resultados analíticos da amostra de tufa carbonática (PLB3) revelam, após a segmentação, porosidades interconectadas. As porosidades identificadas em lâmina delgada foram quantificadas em torno de 14% e são do tipo intercrystalina alongada, efetiva e vugular do tipo equante. A Figura 4.31 indica porosidades disseminadas no bloco diagrama e no plano compreendido pelos eixos yz respectivamente. Em lâmina delgada a porosidade detectada foi em torno de 14,0% e nos blocos e plugues encontra-se a quantidade em percentual de porosidades de 4,10% e 0,98279% respectivamente. O diagnóstico da amostra de tufa carbonática (PLB3), propõe, portanto, porosidades intercrystalinas, e/ou vugular e não intercrystalina alongada, efetiva e vugular do tipo equante, como preconiza a descrição em lâmina delgada.

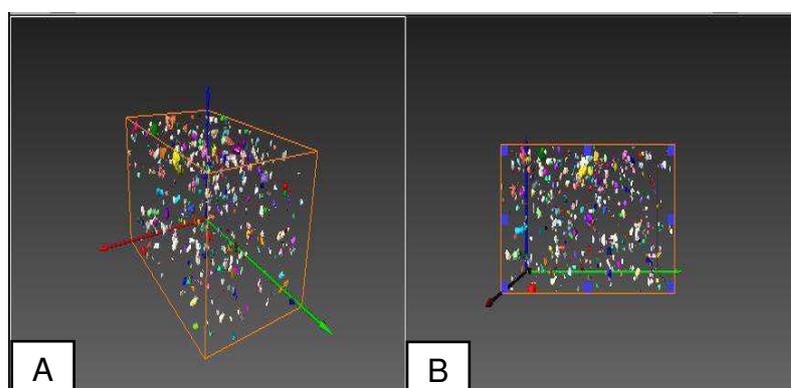


Figura 4.31– Representação gráfica do plugue (PLB3), sugerindo uma porosidade intercrystalina e/ou vugular.

A amostra de tufa carbonática (PLB4) apresenta resultados analíticos, após a segmentação, de porosidades interconectadas. As porosidades identificadas em lâmina delgada foram quantificadas em torno de 4,0% e são do molde intercrystalina alongada, vugular do tipo equante. As estruturas ilustradas na Figura 4.32 indicam porosidades dispersas no bloco diagrama e no plano compreendido pelos eixos yz respectivamente. Em lâmina delgada a porosidade detectada foi em torno de 4,0% e nos blocos e plugues encontra-se a quantidade em percentual de porosidades de 4,50% e 0,27224% respectivamente. O diagnóstico da amostra de tufa carbonática (PLB3), propõe, portanto, porosidades intercrystalinas, e/ou vugular e não intercrystalina alongada, vugular do tipo equante, como recomenda a descrição em lâmina delgada.

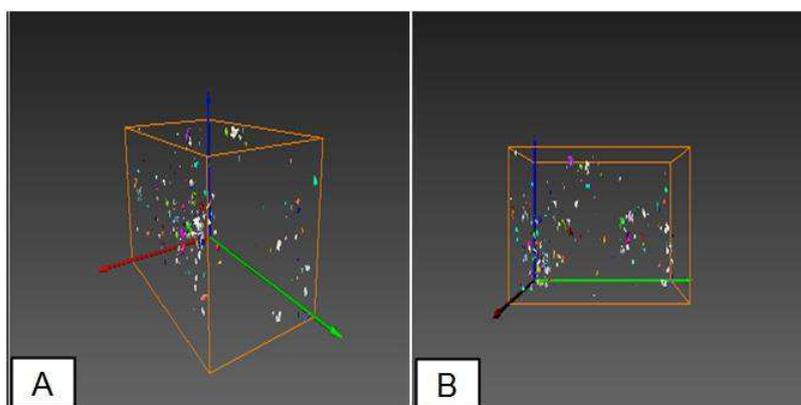


Figura 4.32 – Representação gráfica do plugue (PLB4), sugerindo uma porosidade intercrystalina e/ou vugular.

Verifica-se na Tabela 4.10, a representação da porcentagem da porosidade dos plugues calculada pela interpretação realizada no software Avizo Fire, 8.1., dos dados obtidos pelo equipamento de tomografia computadorizada. Pode-se observar que a porosidade varia de 0,01953%, no plugue A1 a 0,98279% no plugue B3.

Tabela 4.10 – Porosidade dos plugues calculada através da tomografia

Amostra	Porosidade (%)	Amostra	Porosidade (%)
Plugue A1	0,01953	Plugue B1	0,01953
Plugue A2	0,35058	Plugue B2	0,12352
Plugue A3	0,00012	Plugue B3	0,98279
Plugue A4	0,02195	Plugue B4	0,27224

Além da porosidade, os dados resultantes dos plugues foram interpretados quanto a permeabilidade da amostra, Tabela 4.11, sendo esta propriedade também quantificada pelo *software* Avizo Fire, 8.1. Pode-se notar que a permeabilidade das amostras variam do plugue B2 com o valor calculado de 0.000383 (d) e o plugue B1 com valor calculado de 0.000661 (d).

Tabela 4.11 – Permeabilidade dos plugues calculada através da tomografia

Amostra	Permeabilidadek(mD)
Plugue A1	0.00000591
Plugue A2	0.00000569
Plugue A3	0.00000590
Plugue A4	0.00000545
Plugue B1	0.00000661
Plugue B2	0.00000383
Plugue B3	0.00000570
Plugue B4	0.00000556

A Tabela 4.12 relaciona os tipos de porosidades encontradas através das lâminas delgadas, com os valores de porosidade identificados nas lâminas, nos blocos e nos plugues. Podem-se verificar nas amostras, diversos tipos de porosidades, desde intergranular e vugular à intercrystalina alongada, sendo estas efetivas ou não. A análise das lâminas identifica a maior presença da porosidade intercrystalina alongada, estando esta estrutura também relacionada as maiores porcentagens de porosidade, quando associada com outras estruturas porosas, como vugular equante e/ou intergranular. A amostra A1 apresenta o maior percentual de porosidade, 20 %, quando analisada pelo método de contagem de pontos na lâmina delgada, que indica também a presença de uma porosidade intergranular, enquanto que na tomografia, a mesma amostra apresenta 0,09 % no bloco, e 0,01953 % quando analisada em plugue. Pode-se notar certa similaridade em algumas amostras, como na amostra B4, que indica nas lâminas 4 % de porosidade, o que se aproxima do resultado da tomografia do bloco, sendo esta 4,50 %, mas difere do plugue que apresenta apenas 0,27224 %. As diferenças nos valores podem ser notadas em todas as amostras estudadas, o que evidencia a necessidade da interpretação multiescalar das propriedades petrofísicas, principalmente nas

tufas carbonáticas, devido à heterogeneidade característica de seus processos de formação, para interpretação mais representativa das estruturas porosas presentes nas amostras através da aplicação de variados métodos de análise.

Tabela 4.12 - Tipos de porosidades e percentual obtidos em lâminas delgadas [1] e tomógrafos [2] em blocos, [3] em plugues [4] Permoporosímetro.

	Tipos de porosidades	ϕ (%)	ϕ Blocos(%)	ϕ Plugues (%)	[4]
		[1]	[2]	[3]	ϕ (%)
A1	Intergranular na micrita	20	0,09	0,01953	5.634
A2	Intercristalina alongada, efetiva; Vugularequante, não efetiva; Intergranular, alongada	13	0,43	0,35058	7.219
A3	Intercristalina alongada, efetiva; Vugularequante	4	4,08	0,00012	7.826
A4	Intercristalina alongada, efetiva; Vugularequante, não efetiva; Integranular alongada	7	4,06	0,02195	4.721
B1	Intercristalina alongada, efetiva	12	2,38	0,01953	7.450
B2	Intercristalina alongada, efetiva	13	1,63	0,12352	4.482
B3	Intercristalina alongada e equante; Vugularequante	14	4,10	0,98279	4.748
B4	Intercristalina alongada, equante	4	4,50	0,27224	4.598

4.6 – MICROTOMOGRAFIA

A microtomografia é uma técnica não destrutiva que permite visualizar uma imagem em três dimensões. As amostras (TFG 03) e (TFG 23) utilizadas são da região do município de Felipe Guerra/RN. As microtomografias foram realizadas nas amostras (TFG) de tufas carbonáticas, e o diagrama do espécime (TFG 03), ilustra na Figura 4.26 A porosidades concentradas por quase toda a área da amostra. A Figura 4.33 B e C expõe

porosidades compreendidas entre os planos referentes aos eixos yz e xz respectivamente, os quais mostram porosidades interconectadas, onde os valores calculados de porosidade e permeabilidade são simultaneamente de 40,86% e 0,02822 (mD). Desse modo, a porosidade da amostra (TFG 03) apresenta um valor bastante elevado e uma permeabilidade muito baixa para tufa carbonática.

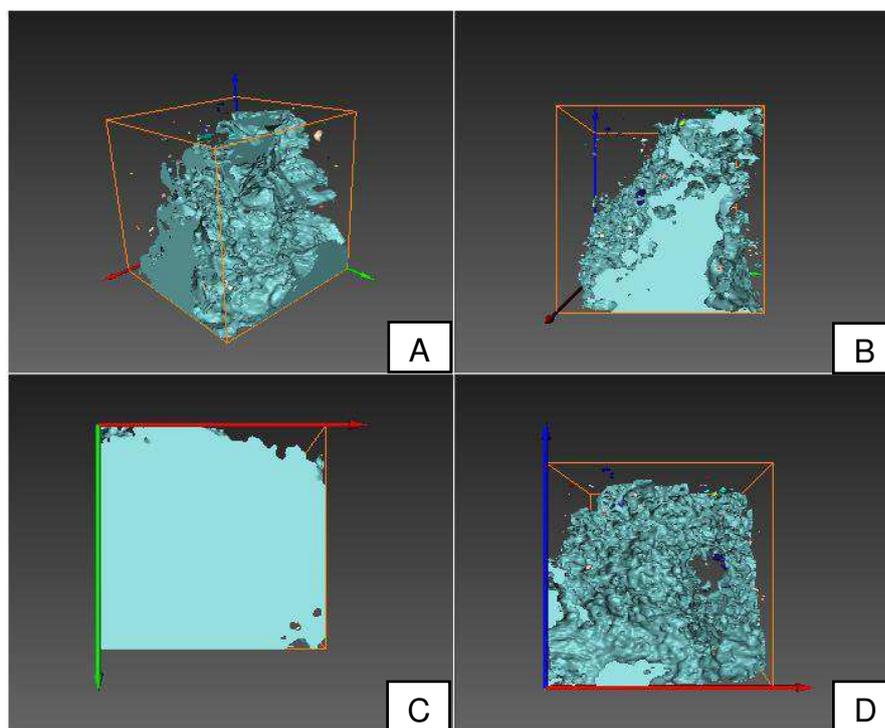


Figura 4.33 – Representação microtomográfica da amostra (TFG 03), mostrando a porosidade efetiva possivelmente elevada.

A amostra de tufa carbonática (TFG 23), analisada por microtomografia, está representada no bloco diagrama, pode-se observar a estrutura porosa em três dimensões no interior do bloco na Figura 4.34 A. É notável a presença de porosidades espaçadas por quase toda a área do diagrama. Na Figura 4.34 B e C são mostradas as porosidades compreendidas entre os planos referentes aos eixos yz e xz, respectivamente. Identificam-se porosidades interconectadas, cujos valores calculados de porosidade e permeabilidade são de 20,35% e 0,00028 (mD), respectivamente. Desse modo, a porosidade da amostra (TFG 23) apresenta um valor elevado e uma permeabilidade muito abaixo do esperado para tufa carbonática.

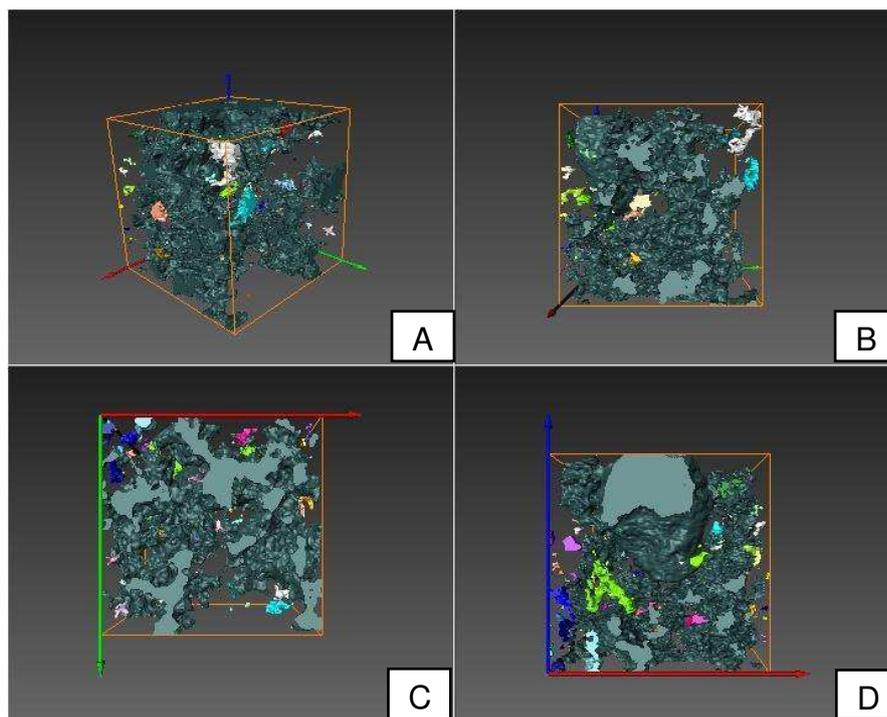


Figura 4.34 – Representação microtomográfica da amostra (TFG 23),mostrando a porosidade elevada.

Identifica-se na Tabela 4.13, os valores calculados da porosidade das amostras (TFG), revelando intensa porosidade na TFG 03, sendo essa porosidade o dobro da calculada na TFG 23.

Tabela 4.13 – Porosidade calculada das amostras (TFG)

Amostra	Porosidade (%)
TFG 03	40,86
TFG 23	20,35

Além da porosidade, foram também calculados os índices de permeabilidade de cada TFG, Tabela 4.14, o que resultou em valores abaixo do esperado para as tufas carbonáticas, sendo caracterizadas como muito baixas, segundo a Tabela 4.8.

Tabela 4.14 – Permeabilidade calculada das amostras (TFG)

Amostra	Permeabilidade k (md)
TFG 03	0,02822
TFG 23	0,00029

5.0 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio das análises realizadas, englobando estudos bibliográficos e interpretação dos dados obtidos como forma de caracterizar a amostra de tufa carbonática de forma completa e concisa, foram identificados alguns aspectos que antes passaram despercebidos por estudiosos das tufas da região.

Através da interpretação realizada nas lâminas delgadas, pôde-se identificar os tipos de poros presentes nas amostras e a porcentagem aproximada dessas estruturas, sendo estas relacionados com os grãos minerais, matriz e os tipos de cimento formadores da tufa.

De acordo com os resultados obtidos pelo difratômetro de raios-X (DRX) do Departamento de Física da Universidade Federal de Campina Grande, as amostras tiveram um comportamento relativamente similar em termos de composição mineralógica, apenas a amostra A4 não apresentou relativa similaridade composicional com as outras, pois esta indica através dos parâmetros cristalográficos a presença de dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e calcita (CaCO_3), enquanto que as amostras A1, A2, A3, B1, B2, B3 e B4 indicam uma composição mineralógica de ankerita ($\text{Ca}(\text{Fe}^{+2}, \text{Mg})\text{CO}_3$)₂ e calcita.

As lâminas indicam porosidade nas amostras variando entre 4 e 20 %. Tal análise é realizada apenas na área delimitada pela lâmina, sendo este o método mais indicado para a identificação dos poros em amostras na escala centimétrica, mas não para a quantificação 3D dessas estruturas na amostra. Pode-se destacar a presença de estruturas vulgares equantes, intergranulares alongadas, intercristalinas efetivas alongadas e intracristalinas, além da presença de cimentos característicos das rochas carbonáticas com granulação e composição referentes aos carbonatos mais comuns. Os resultados obtidos com relação à interpretação petrofísica das várias lâminas delgadas foram diferentes, devido à heterogeneidade da tufa carbonática. A análise das lâminas revelou-se de essencial importância para interpretação integral da tufa, por permitir a classificação estrutural dos poros presentes nas amostras, além da observação indicativa da baixa permeabilidade presente, fato confirmado pelos métodos de análise tomográfica. As formas geométricas dos poros identificados na análise bidimensional das lâminas delgadas foram relacionadas com as estruturas geradas pelo *software*, permitindo uma análise completa dos tipos de poros encontrados na tufa carbonática e ao ambiente de formação a que estão associados. Embora existam diversos trabalhos sobre a porosidade em rochas carbonáticas, este tipo de análise nunca antes tinha sido realizada.

Foi observada nas lâminas a atuação de processos geológicos e mineralógicos

importantes na identificação da tufa carbonática e do local de onde foi retirada, como por exemplo, a geminação polissintética, revelando processos de deformação causados por estresse resultante de forças cisalhantes que atuaram na região, indicando sua influência nas estruturas da tufa estudada. As estruturas características como geminação, estilólitos, geopetal e processos de formação do mineral ankerita, que foram denominados neste trabalho de ankeritização, podem ser observados em lâminas delgadas.

Fica evidente a necessidade da caracterização da amostra em diversas escalas, uma vez que, o que foi antes identificado como processo de dolomitização, usando apenas a interpretação das lâminas, pôde ser corretamente reconhecido, através do método de difração de raios-X, como um processo de ankeritização. Este reconhecimento do mineral ankerita apenas foi possível por intermédio dos resultados de DRX, os quais indicaram picos de 2 θ característicos do mineral ankerita, além da densidade de 3,10 g/cm³, especificando este mineral.

Apesar da análise composicional, utilizando os métodos já citados, revelarem os minerais, os tipos de poros e a sua quantificação, para a caracterização da distribuição espacial tridimensional de poros, outros métodos de imagem precisam ser aplicados.

Os métodos de tomografia e microtomografia podem ser aplicados para a captação de imagens da organização e quantificação das estruturas internas das amostras, pois este tipo de análise fornece dados multiescalares. Tais métodos apresentam a possibilidade de identificação das estruturas porosas conectadas, requisito importante para a possível produção de fluídos de interesse econômico em rochas carbonáticas.

O cálculo da porosidade e permeabilidade através da geração de imagens em 3D da estrutura interna das amostras submetidas aos aparelhos tomográficos indicam porosidade dos blocos e dos plugues variando entre 0,09% (A1) a 4,50% (B4) e 0,01953% (PL B1) a 0,98279% (PL B3), respectivamente. A permeabilidade das amostras varia de 0,000000383 mD (PL B2) a 0,000000661 mD (PL B1), apesar de essas permeabilidades tenderem a zero, nos métodos analisados elas são identificadas. Os valores diferem daqueles encontrados na microtomografia realizada nas tufas da região de Felipe Guerra/RN. As amostras TFG apresentam valores de porosidade e permeabilidade de 40% e 0,02822 mD (TFG 03); 20,35% e 0,00029 mD (TFG 23), respectivamente.

A análise da porosidade das amostras, pelos vários métodos e escalas, mostrou uma grande variação nos valores medidos, confirmando a grande heterogeneidade apresentada pela tufa carbonática. A porosidade estimada pela análise das lâminas delgadas e pela análise

petrofísica convencional apresentou valores em uma mesma ordem de grandeza, enquanto que a porosidade estimada pela tomografia nos blocos e nos plugues apresentou valores uma ordem de grandeza menor. Já a porosidade estimada pela microtomografia foi de até uma ordem de grandeza acima dos valores medidos convencionalmente. Isto indica que a porosidade nas tufas carbonáticas é muito dependente da escala de observação. Nas imagens de tomografia apenas os poros vulgares grandes são reconhecidos, o que resulta numa subestimação da porosidade pela perda da informação sobre a microporosidade. Por outro lado, a microporosidade é captada pela microtomografia, mas devido ao reduzido tamanho da amostra, os grandes poros vulgares não são captados. As diferenças observadas entre as diversas escalas e métodos sugerem ainda que os poros são essencialmente mal conectados. A permeabilidade medida por todos os métodos e escalas indica valores muito baixos, o que confirma a suspeita de baixa conectividade de poros já indicada pelos valores de porosidade medidos nas diversas escalas.

Estes dados confirmam a necessidade da análise tomográfica e microtomográfica para a caracterização integral da amostra de tufa carbonática, pois esta apresenta valores de porosidade e permeabilidade considerável nas lâminas, o que não se confirma na tomografia e na microtomografia, sendo a tufa estudada inapropriada para o acúmulo e produção de fluídos, principalmente de hidrocarbonetos.

Dentre os dados obtidos, fica evidente a necessidade da análise multiescalar das tufas carbonáticas da Formação Jandaíra. Os métodos de caracterização aqui apresentados se constituem em ferramentas importantes para aplicação em diversas áreas, principalmente aquelas que envolvem a prospecção de fluídos de relevância econômica, podendo se estender aos métodos de pesquisa dos mais diversos tipos de rochas sedimentares.

Recomenda-se para trabalhos futuros sobre esta temática, o uso do refinamento Rietveld, para a identificação completa da composição mineralógica presente na tufa carbonática através dos métodos de DRX. De acordo com os dados obtidos, destaca-se a importância de realizar a comparação do método de análise em lâminas delgadas com os métodos de tomografia e microtomografia computadorizada no estudo de outras rochas sedimentares, contribuindo para a interpretação tridimensional das estruturas porosas presentes, indicando a geometria espacial dos poros observados nas lâminas.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACOCELLA, A.; TURRINI, D. Formation, appearance and characterization of travertine: in Sienese travertine. Alinea, Florence. P. 303. 2010.
- ADAMS, A. E.; MACKENZIE, W. S.; GUILFORD, C. Atlas of sedimentary rocks under the microscope. 2.ed. Harlow, Longman. P. 104. 1984.
- AHR, W.; M. Geology of carbonate reservoirs: the identification, description, and characterization of hydrocarbon reservoirs in carbonate rocks. New Jersey, USA: John Wiley & Sons. P. 277, 2008.
- AKBAR, M., VISSARPRAGADA, B., ALGHAMDI, A. H., ALLEN, D., HERRON, M., CARNEGIE, A., DUTTA, D., OLESEN, J.-R., CHOURASIYA, R. D., LOGAN, D., STEIF, D., NETHERWOOD, R., RUSSELL, S. D. & SAXENA, K. A snapshot of carbonate reservoir valuation. Oil field Review, V. 12, p. 20-41, 2001.
- AL-KHARUSI, A. S. e BLUNT, M. J. Network extraction from sandstone and carbonate pores from images. Journal of Petroleum Science and Engineering. V. 56, n. 4, p. 219-231, 2007.
- AL-KHARUSI, A. S. Pore-scale characterization of Carbonate rocks. Dissertation (Doctor of Philosophy), Imperial College London, 2007.
- APPOLONI CR, FERNANDES CP, RODRIGUES CRO. X-ray tomography study of a sandstone reservoir rock. Nucl Inst Meth. V. 32, p. 580-629, 2007.
- ARNS, C. H., SAKELLARIOU, A., SENDEN, T. J., SHEPPARD, A. P., SOK, R., PINCZEWSKI, W. V., AND KNACKSTEDT, M. A., Digital core laboratory: Reservoir core analysis from 3D images: Petrophysics. V. 46, n. 3, 2005, to appear.
- BERGOSH, J.L., MARKS, T. R. AND MITKUS, A.F., "New Core Analysis Techniques for Naturally Fractured Reservoirs," paper 13653 presented at the SPE California Regional Meeting, Bakersfield, 27 – 29 March, 1985.
- BERNABÉ, Y.; MOK, U.; EVANS, V. Permeability – porosity Relationships in Rock Subjected to Various Evolution Processes. Pure and Applied Geophysics, V.160, p. 937 – 960, 2003.
- 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, V. 37, p. 63-78, jan, 2000.
- BROOKS, S. L. Computed tomography. Dent Clin North Am Dent, Philadelphia, V. 37, n. 4,

p. 575-590, Oct. 1993.

CAVALCANTI B.M., SOARES J.A., FREIRE L.A., SOUSA W.B., and TABOSA L.D.G. Análise Petrofísica de Carbonatos da Formação Jandaíra, Bacia Potiguar. 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 26–29 August 2013: pp. 1148-1153. 2013.

CALLISTER JR, W.D. Ciência e Engenharia de Materiais. Editora LTC: São Paulo, 2009.

CASSAB, R. C.; T. Paleontologia da formação jandaira, cretáceo superior da bacia potiguar, com ênfase na paleobiologia dos gastropodos. Instituto de Geociências - UFRJ, D. Sc. Programa de Pos-Graduação em Geologia. V. 19, p. 184. Rio de Janeiro, 2003.

CHAFETZ, H.S., AND R.L. FOLK, Travertines; depositional morphology and the bacterially constructed constituents: Journal of Sedimentary Petrology. V. 54/1, p. 289-316. 1984.

CHATZIS, I.; KANTZAS, A.; DULLIEN, F. A. I. On the Investigation of Gravity-Assisted Inert Gas Injection Using Micromodels, Long Berea Sandstone Cores, and Computer-Assisted Tomography. Society Petroleum Engineers – SPE Annual Technical Conference and Exhibition. P. 2-5 – October, Houston, Texas – USA, 1988.

CHOQUETTE, P. W., PRAY, L. C. “Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates”. AAPG Bulletin 54, p. 207-250. 1970.

CROMWELL V. KORTUM D.J. | BRADLEY D.J. The Use of a Medical Computer Tomography (CT) System To Observe Multiphase Flow in Porous Media. Society of Petroleum Engineers. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. P. 16-19. September, Houston, Texas. 1984.

CROWELL, D. C., DEAN G. W, E LOOMIS A. G. “Efficiency of gas displacement from a water-drive reservoir”, US Department of the Interior, Bureau of Mines, Washington, DC. 1966.

CULLITY, B. D.; STOCK, S. R. Elements of X-Ray Diffraction, 3 ed, Upper Saddle River: Prentice Hal. p 678. 2001.

DE FILIPPIS, L., FACCENNA, C., BILLI, A., ANZALONE, E., BRILLI, M., SOLIGO, M., TUCCIMEI, P. Plateau versus fissure ridge travertines from Quaternary geothermal springs of Italy and Turkey: interactions and feedbacks among fluid discharge, paleoclimate, and tectonics. Earth Sci. V. 123, p. 35–52. 2013.

Departamento de Ciências da Terra – Universidade do Minho. Preparação das rochas para observação ao microscópio. Disponível em: <http://www.dct.uminho.pt/rpmic/prep_amos.html> Acesso em: 23 de Novembro de 2016

- DOMINGUEZ, J.M.L. & BITTENCOURT, A.C.S.P. Utilização de padrões de sedimentação costeira como indicadores paleoclimáticos (Proxies). *Revista Brasileira de Geociências*. V. 24 (1), p. 3-12.1994.
- DOMINGUEZ, J.M.L. The coastal zone of Brazil – an overview. *Journal of Coastal Research, Special Issue*. V. 39.2004.
- DUQUE NETO, F. S.; MARANGON, M. Correlações entre parâmetros da classificação MCT dos solos e de caracterização química e geotectônica de solos argilosos, 2004.
- FLANNERY, B.P., DECKMAN, H.W., ROBERGE, W.G. & DAMICO, K.L. 3-dimensional X-ray microtomography. *Science*, 237, 1439-1444.1987.
- FOLK, R. L. Spectral subdivision in limestone type. *Memoir AAPG*. N.1, p. 62-84.1962.
- FORD, T.D.; PEDLEY, H.M. A review of tufa and travertine deposits of the world. *Earth-Science Reviews*. V. 41, p. 117-175. 1996.
- FRANSHAN, P. B.; JELEN, J. Displacement of heavy oil visualized by CAT Scan – *Petroleum Society of Canada*. 1987.
- GARCÍA-DEL-CURA M.A., BENAVENTE D., MARTÍNEZ-MARTÍNEZ J., RODRÍGUEZ-GARCÍA M. A., CUETO N. Travertinos: del Imperio Romano al siglo XXI. *Del Teatro Romano de Carthago Nova al aeropuerto de El Prat*. Mayo-Julho, 2010. V. 124, p. 46–49.
- GARIB, D. G.; JUNIOR, R. R.; RAYMUNDO, M. V.; RAYMUNDO, D. V.; FERREIRA, S. N. Tomografia Computadorizada De Feixe Cônico (Cone Beam): Entendendo Este Novo Método De Diagnóstico Por Imagem Com Promissora Aplicabilidade Na Ortodontia. *R Dental Press Ortodon Ortop Facial*. Maringá. V. 12, n. 2, p. 139-156, mar./abr. 2007.
- Gaspari Menotti. Máquina monofio estacionário. Disponível em: <<http://www.gasparimenotti.it/po/instala%C3%A7%C3%B5es-chapa-marmore/gswseries.asp>> Acesso em 10 de agosto de 2017.
- Geologia de Engenharia. Propriedades Índice e Classificação das Rochas. Ed. 1. Cap. 3. 1998. Disponível em: <http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_3_GE.pdf>. Acesso em: 21 jan 2017.
- GEE, J. C.; MAINTZ, J. B. A.; VANNIER, M. W. High-Dimensional Multi-modal Image Registration: Second International Workshop, WBIR 2003, Philadelphia, PA, USA, Revised Papers. V. 2717- Springer Berlin Heidelberg. New York, USA. P. 23-24. June, 2003.
- GOAZ, P. W., & WHITE, S. C. Oral radiology: principles and interpretation. St. Louis, Mosby. 1994.

GOMES, O. D. F. M. Processamento e análise de imagens aplicados à caracterização automática de materiais. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais e Metalurgia)- Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

GOMES, L. G. Estimativa dos perfis de porosidade e permeabilidade utilizando rede neural artificial (dissertação de mestrado). UFPA. Belém, 2002.

HONARPOUR, M.M., CROMWELL, V., HATTON, D. AND SATCHWELL, R., "Reservoir Rock Descriptions Using Computed Tomography," SPE 14272 presented at the 60th Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE held in Las Vegas, NV. P. 22-25 Sept., 1985.

HUILLCA, C.A.L. Estudo experimental do comportamento geomecânico do travertino. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. Dissertação. Rio de Janeiro, 2014.

KANTZAS, A., CHATZIS I.; AND DULLIEN F. A. L. "Enhanced Recovery by Inert Gas Injection", in proceedings of the SPE/DOE Enhanced Oil Recovery Symposium, SPE 17379, Tulsa, Oklahoma. 1988.

KLOBES, P.; Riesemeier by combination of X ray computerized tomography with mercury porosimetry, V. 357, Issue 5, p. 543–547. February, 1997.

KNACKSTEDT, M, ARNS PHD, C, GHOU, A. 3D imaging and characterization of the pore space of carbonate core: implications to single and two phase flow properties', Annual Logging Symposium of the Society of Petrophysicists & Well. 2006.

KRONBAUER, D. P. Determinação de propriedades petrofísicas de rochas reservatórios usando modelos de redes de poros. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais – UFSC. 2014

LEITNER, J. Application of mercury porosimetry in evaluating the quality of iron ore pellets. Powder Technology. v. 29, p. 199-203. 1981.

Log Analysts (SPWLA), Society of Petrophysicists and Well Log Analysts (SPWLA), USA. 2006.

LIN, C.; MILLER, J. Cone beam X-ray microtomography: a new facility for three-dimensional analysis of multiphase materials. Minerals & Metallurgical Processing, v. 19, n. 2, p. 65-71, 2002.

LUCIA, F. J. Petrophysical parameters estimated from visual description of carbonate rocks: a field classification of carbonate pore space. JOURNAL OF PETROLEUM GEOLOGY. V.35, p. 626-637. 1983

LUCIA, F. J. B. Characterization of petrophysical flow units in carbonate reservoirs:

Discussion. AAPG Bulletin-American Association of Petroleum Geologists. V. 83, p. 1161-1163.1999.

MARZORATI, L., AZZELINI, C.G., CORIO, P., CAMARGO, P.H.C. Guia de Laboratório. Universidade de São Paulo/Instituto de Química. 2012.

MILLER, J. D.; LIN, C. L. Three-dimensional analysis of particulates in mineral processing systems by cone beam X-ray microtomography. *Minerals & Metallurgical Processing*. V.21, n.3, p. 113-124. 2004.

MURRAY, R. C. *Origin Of Porosity In Carbonate Rock*. *Journal Of Sedimentary Petrology*, v. 30, p. 59-84, 1960.

NUTTING, P. G.; AAPG Bulletin 14, 1337.1930.

OLIVEIRA, M.A. Técnicas de caracterização microestrutural. Universidade Federal de Pernambuco, UFPE. Disponível em: <<http://docslide.com.br/documents/trabaho-de-caracterizacao-microestrutural1.html>>. Brasil, 2014.

PADILHA, A. F. *Materiais de Engenharia - Microestruturas e Propriedades* - Editora: Hemus Livraria, Distribuição e Editora S.A. 2000.

PENTECOST, A. *Travertine*. P. 445. Berlin: Springer-Verlag, 2005.

PENTECOST, A., VILES, H. A review and reassessment of travertine classification. *Géographi. Physique et Quaternaire*. V. 48, p. 305-314.1994.

PESSOA NETO, O.C.; SOARES, U.M.; SILVA, J.G.F.; ROESNER, E.H.; FLORENCIO, C.P.; SOUZA, C.A.V. Bacia Potiguar. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 15, n. 2, p. 357-369, maio/Nov. 2007.

PETUNIN V.V.; YIN X.; TUTUNCU A.N. Porosity and Permeability Changes in Sandstone and Carbonates Under Stress and their Correlation to Rock Texture. *Society of Petroleum Engineers*. P. 1-14. 2011.

Principio Org. Aula Teórica de Difração de Raios – X. Disponível em: <<http://principio.org/1-0-aula-terica-de-difracao-de-raios--x-2-introduco.html>> Acesso em 10 de agosto de 2017.

POPP, José Henrique. *Geologia Geral*. 5ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. Editora S/A: 1998.

PORTO, A. L. *Estimação de Propriedades Petrofísicas de Rochas Sedimentares a partir de Imagens Microtomográficas de Raios-X* -Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Brasil. Tese de Doutorado. 2015.

QAJAR, J., FRANCOIS, N., AND ARNS, C. H. Microtomographic Characterization of Dissolution-Induced Local Porosity Changes Including Fines Migration in Carbonate

Rock.SPE Journal, ed. 18(3). P. 545–562. 2013.

RAITH, M. M., RAASE, P. REINHARDT, J. GUIA PARA MICROSCOPIA DE MINERAIS EM LÂMINAS DELGADAS. v. 1. p. 1-134. Maio, 2004.

REIMERS, P. & GOEBBELS, J. New possibilities of non destructive evaluation by x-ray computed tomography. V. 41, p. 732–737.1983

REVECO, L. A. Introducción a la descripción de Rocas Sedimentarias. Departamento de Geología da Universidade de Chile. 2005.

REYES-PEREZ, Y.A., LIMA-FILHO, SANT'ANNA, L.G., F. P. BEZERRA, F.H. Tufas Calcárias na Bacia Potiguar, Nordeste do Brasil. In: IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário e II Congresso do Quaternário de Países de Língua Ibéricas. 2003.

RIDING, R. Structure and composition of organic reefs and carbonate mud mounds: concepts and categories. Department of Earth Sciences, Cardiff University, Cardiff CF10 3YE, United Kingdom. Earth-Science Reviews 58 p. 163–23.2002.

RODRIGUEZ, A.M., PIAMARO, S.A., BERG, E.A., "Propriedades de matérias-primas selecionadas para produção de grés porcelanato", Cerâmica Industrial. V. 9, n. 1, p. 33-38, jan./fev. 2004.

SALDIN, D. K. PENDRY, J. B. VAN HOVE M. A., AND SOMORJAIG. A. Interpretation of diffuse low-energy electron diffraction intensities Phys. Rev. B 31, 1216(R) – Published 15 January 1985.

SCHLUMBERGER. Yacimientos carbonatados: enfrentando sus singulares para maximizar la recuperación de desafíos. P. 16. 2008.

SCHOLLE, P. A. ULMER-SCHOLLE AND, D. S. A Color Guide to the Petrography of Carbonate Rocks: AAPG Memoir 77, p. 474. 2003.

SHULAKOVA V, PERVUKHINA M, MULLER TM, LEBEDEV H, MAYO S, S SCHMID. Computacional elástica up-scaling de arenito na base de raios-X micro-tomografia imagens . Prospecção geofísica . 2013; 61 (2): 287-301.

SILVA, Angelus G. P. Estruturas Cristalinas de Materiais Cerâmicos. Disponível em: <<http://www.e-agps.info>>. Acesso em: 22 de jan de 2017.

SOARES, J.A., BATISTA, J.T., DIAS, C.H. Petrofísica de Folhelhos Negros da Bacia do Araripe. VII Simpósio Brasileiro de Geofísica - SBGF. Ouro Preto, 25 a 27 de outubro de 2016.

SOARES, J.A. Petrofísica de Carbonatos do Nordeste Brasileiro. IV Semana de Inverno de Geofísica, IMECC/UNICAMP, Campinas - São Paulo, 22 a 26 de julho de 2013.

- SUBBARAO, E. C.; CHAKRAVORTY, D. MERRIAM, M. F. e SINGHAL, L. K. “Experiencias de Ciências dos Materiais”, Editora da USP, São Paulo, 1973.
- SUGUIO, K. Geologia Sedimentar. Editora Edgard Blucher. 1ª Edição. São Paulo, 2003.
- SUKOVIC, P. Cone beam computed tomography in craniofacial imaging. *Orthodontics & Craniofacial Research*. V. 6, p. 31–36. DOI:10.1034/j.1600-0544.2003.2.2003.
- TERRA, G. J. S. ; SPADINI, A.; FRANÇA, A.; SOMBRA, C.; ZAMBONATO, E.; JUSCHAKS, L. C.; ARIENTI, L.; ERTHAL, M.; BLAETH, M.; FRANCO, M. Classificação de rochas carbonáticas aplicável às bacias sedimentares brasileiras, *Boletim de Geociências da Petrobras*. V. 18, n. 1, p. 9-29. Rio de Janeiro, maio, 2010.
- THOMAS, J.E. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. Editora Interciências. 2ª Edição. Petrobras. Rio de Janeiro, 2004.
- TUCKER, M. & WRIGHT, V. Carbonate Sedimentology. Ed. Blackwell Science Ltd, Oxford. 1990.
- WANG, S.Y., AYRAL, S. AND GRYTE, C.C., “Computer-Assisted Tomography for the Observation of Oil Displacement in Porous Media,” *SPEJ* 53. Feb, 1984.
- WELLINGTON, S.L. AND VINEGAR, H.J., “X-ray Computerized Tomography,” *JPT*. Aug., 1987.
- WITHJACK, E. M. “Computed tomography for rock-property determination and fluid flow visualization”, *SPE Formation Evaluation*, SPE 16951. 1998.

ANEXOS

ANEXO I

Amostra A1

Name and formula

Reference code:	00-041-0586
Mineral name:	Ankerite
PDF index name:	Calcium Iron Magnesium Carbonate
Empirical formula:	$C_2CaFe_{0.6}Mg_{0.4}O_6$
Chemical formula:	$Ca(Fe_{+2}, Mg)(CO_3)_2$

Crystallographic parameters

Crystal system:	Rhombohedral
Space group:	R-3
Space group number:	148
a (Å):	4,8287
b (Å):	4,8287
c (Å):	16,1520
Alpha (°):	90,0000
Beta (°):	90,0000
Gamma (°):	120,0000
Calculated density (g/cm ³):	3,10
Measured density (g/cm ³):	3,04
Volume of cell (10 ⁶ pm ³):	326,15
Z:	3,00
RIR:	2,80

Subfiles and Quality

Subfiles:	Inorganic Mineral Cement and Hydration Product Corrosion Common Phase Forensic
Quality:	Star (S)

Comments

Color:	Light brown
Sample source:	Specimen collected from Lower Slaty Member, Biwabic Formation, Mesabi Range, Minntac Mine, Mountain Iron, Minnesota, USA.
Analysis:	Energy dispersive X-ray analysis mine (wt.%): CaO 27.85, FeO 19.15, MgO 8.18, MnO 1.07, CO ₂ 43.03, SiO ₂ 0.10, Al ₂ O ₃ 0.34: $Ca(Fe_{0.545}Mg_{0.413}Mn_{0.031}Ca_{0.011})(CO_3)_2$.
Optical data:	A=1.529(19), B=1.720(30), Sign=-
Additional pattern:	To replace 33-282 and 34-517.

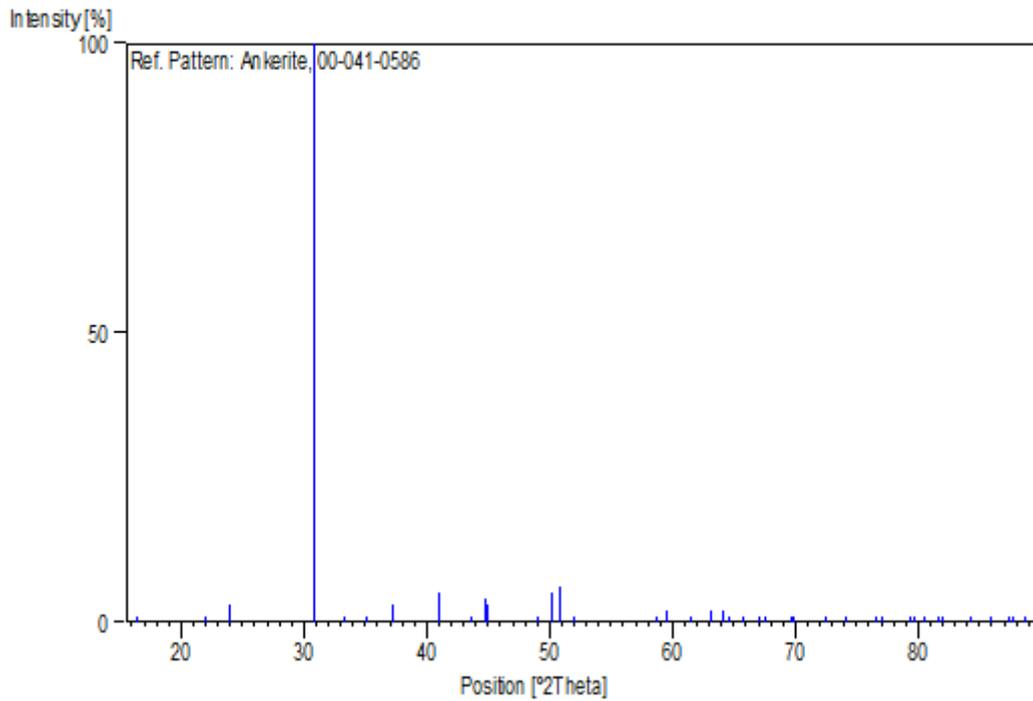
References

Primary reference: Keller, L., McCarthy, G., North Dakota State University, Fargo, North Dakota, USA., *ICDD Grant-in-Aid*, (1985)
 Structure: Reeder, R., Dollase, W., *Am. Mineral.*, **74**, 1159, (1989)
 Optical data: Deer, W., Howie, R., Zussmann, J., *Rock Forming Minerals*, **5**, 295, (1962)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	0	3	5,39200	16,427	1,0
2	1	0	1	4,05100	21,923	1,0
3	0	1	2	3,71400	23,941	3,0
4	1	0	4	2,90600	30,742	100,0
5	0	0	6	2,69300	33,242	1,0
6	0	1	5	2,55600	35,080	1,0
7	1	1	0	2,41400	37,217	3,0
8	1	1	3	2,20300	40,933	5,0
9	0	2	1	2,07300	43,627	1,0
10	2	0	2	2,02400	44,740	4,0
11	1	0	7	2,02000	44,833	3,0
12	0	2	4	1,85600	49,043	1,0
13	0	1	8	1,81800	50,138	5,0
14	1	1	6	1,79740	50,753	6,0
15	0	0	9	1,79470	50,835	3,0
16	2	0	5	1,75570	52,047	1,0
17	2	1	1	1,57300	58,642	1,0
18	1	2	2	1,55030	59,586	2,0
19	1	0	10	1,50680	61,490	1,0
20	2	1	4	1,47180	63,118	2,0
21	2	0	8	1,45220	64,070	2,0
22	1	1	9	1,44020	64,668	1,0
23	1	2	5	1,42000	65,703	1,0
24	3	0	0	1,39390	67,094	1,0
25	0	1	11	1,38540	67,561	1,0
26	3	0	3	1,34940	69,619	1,0
27	0	0	12	1,34600	69,820	1,0
28	2	1	7	1,30390	72,423	1,0
29	0	2	10	1,27810	74,126	1,0
30	1	2	8	1,24460	76,474	1,0
31	3	0	6	1,23780	76,971	1,0
32	2	2	0	1,20720	79,299	1,0
33	2	0	11	1,20160	79,742	1,0
34	1	0	13	1,19100	80,597	1,0
35	2	2	3	1,17790	81,682	1,0
36	1	1	12	1,17560	81,876	1,0
37	3	1	2	1,14810	84,278	1,0
38	2	1	10	1,12960	85,988	1,0
39	1	3	4	1,11480	87,415	1,0
40	0	1	14	1,11220	87,671	1,0
41	2	2	6	1,10120	88,775	1,0

Stick Pattern



Name and formula

Reference code: 01-083-1762

Mineral name: Calcite

ICSD name: Calcium Carbonate

Empirical formula: CCaO_3

Chemical formula: $\text{Ca}(\text{CO}_3)$

Crystallographic parameters

Crystal system: Rhombohedral

Space group: R-3c

Space group number: 167

a (Å): 4,9896

b (Å): 4,9896

c (Å): 17,0610

Alpha (°): 90,0000

Beta (°): 90,0000

Gamma (°): 120,0000

Calculated density (g/cm^3): 2,71

Volume of cell (10^6 pm^3): 367,85

Z: 6,00

RIR: 3,25

Subfiles and Quality

Subfiles: Inorganic
Mineral
Modelled additional pattern
Quality: Calculated (C)

Comments

Sample source: Specimen from Iceland.
ICSD collection code: 100676

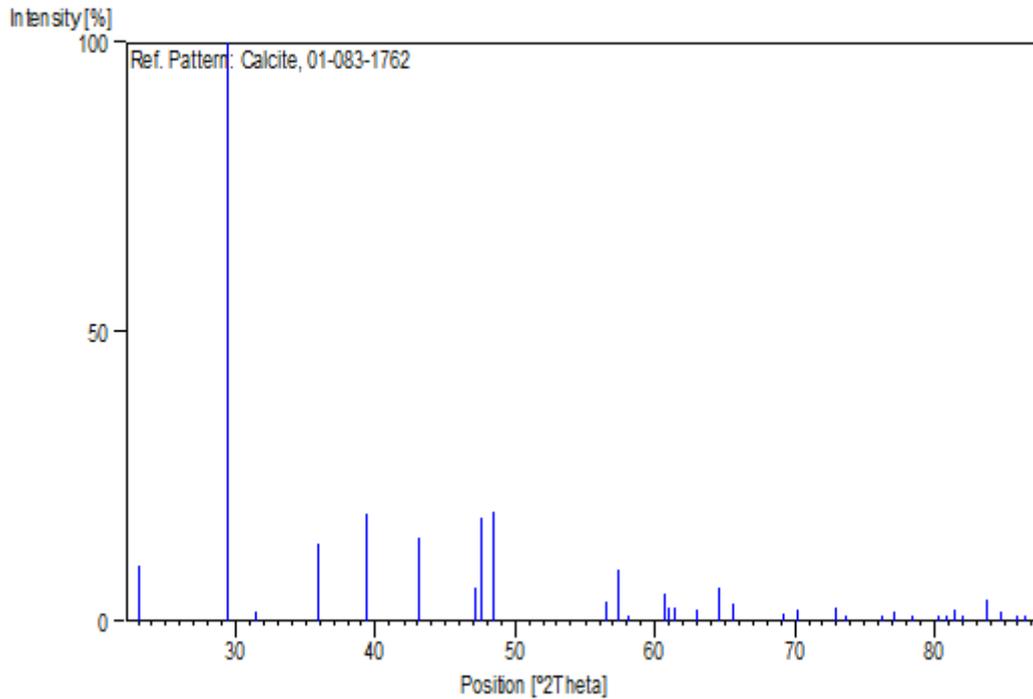
References

Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++*, (1997)
Structure: Effenberger, H., Mereiter, K., Zemann, J., *Z. Kristallogr.*, **156**, 233, (1981)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	1	2	3,85478	23,054	9,6
2	1	0	4	3,03555	29,400	100,0
3	0	0	6	2,84350	31,435	1,8
4	1	1	0	2,49480	35,969	13,3
5	1	1	3	2,28463	39,409	18,5
6	2	0	2	2,09443	43,158	14,3
7	0	2	4	1,92739	47,114	5,8
8	0	1	8	1,91240	47,506	18,0
9	1	1	6	1,87532	48,505	19,0
10	2	1	1	1,62580	56,562	3,5
11	1	2	2	1,60409	57,398	8,8
12	1	0	10	1,58689	58,079	1,0
13	2	1	4	1,52524	60,667	4,7
14	2	0	8	1,51777	60,998	2,4
15	1	1	9	1,50937	61,374	2,5
16	1	2	5	1,47317	63,052	2,0
17	3	0	0	1,44037	64,660	5,7
18	0	0	12	1,42175	65,612	3,1
19	2	1	7	1,35677	69,186	1,2
20	0	2	10	1,33897	70,240	2,0
21	1	2	8	1,29666	72,892	2,3
22	3	0	6	1,28493	73,666	0,5
23	2	2	0	1,24740	76,271	0,9
24	1	1	12	1,23524	77,160	1,8
25	2	2	3	1,21843	78,426	0,1
26	1	3	1	1,19552	80,230	0,1
27	3	1	2	1,18681	80,940	0,4
28	2	1	10	1,17979	81,523	2,1
29	0	1	14	1,17289	82,106	0,3
30	1	3	4	1,15378	83,769	3,8
31	2	2	6	1,14232	84,804	1,8
32	3	1	5	1,13075	85,880	0,1
33	1	2	11	1,12467	86,457	0,4

Stick Pattern



Amostra A2

Name and formula

Reference code:	00-041-0586
Mineral name:	Ankerite
PDF index name:	Calcium Iron Magnesium Carbonate
Empirical formula:	$C_2CaFe_{0.6}Mg_{0.4}O_6$
Chemical formula:	$Ca(Fe_{+2}, Mg)(CO_3)_2$

Crystallographic parameters

Crystal system:	Rhombohedral
Space group:	R-3
Space group number:	148
a (Å):	4,8287
b (Å):	4,8287
c (Å):	16,1520
Alpha (°):	90,0000
Beta (°):	90,0000
Gamma (°):	120,0000
Calculated density (g/cm ³):	3,10
Measured density (g/cm ³):	3,04
Volume of cell (10 ⁶ pm ³):	326,15

Z: 3,00

RIR: 2,80

Subfiles and Quality

Subfiles: Inorganic
Mineral
Cement and Hydration Product
Corrosion
Common Phase
Forensic
Quality: Star (S)

Comments

Color: Light brown
Sample source: Specimen collected from Lower Slaty Member, Biwabic Formation, Mesabi Range, Minntac Mine, Mountain Iron, Minnesota, USA.
Analysis: Energy dispersive X-ray analysis mine (wt.%): CaO 27.85, FeO 19.15, MgO 8.18, MnO 1.07, CO₂ 43.03, SiO₂ 0.10, Al₂O₃ 0.34: Ca (Fe_{0.545}Mg_{0.413}Mn_{0.031}Ca_{0.011}) (CO₃)₂ .
Optical data: A=1.529(19), B=1.720(30), Sign=-
Additional pattern: To replace 33-282 and 34-517.

References

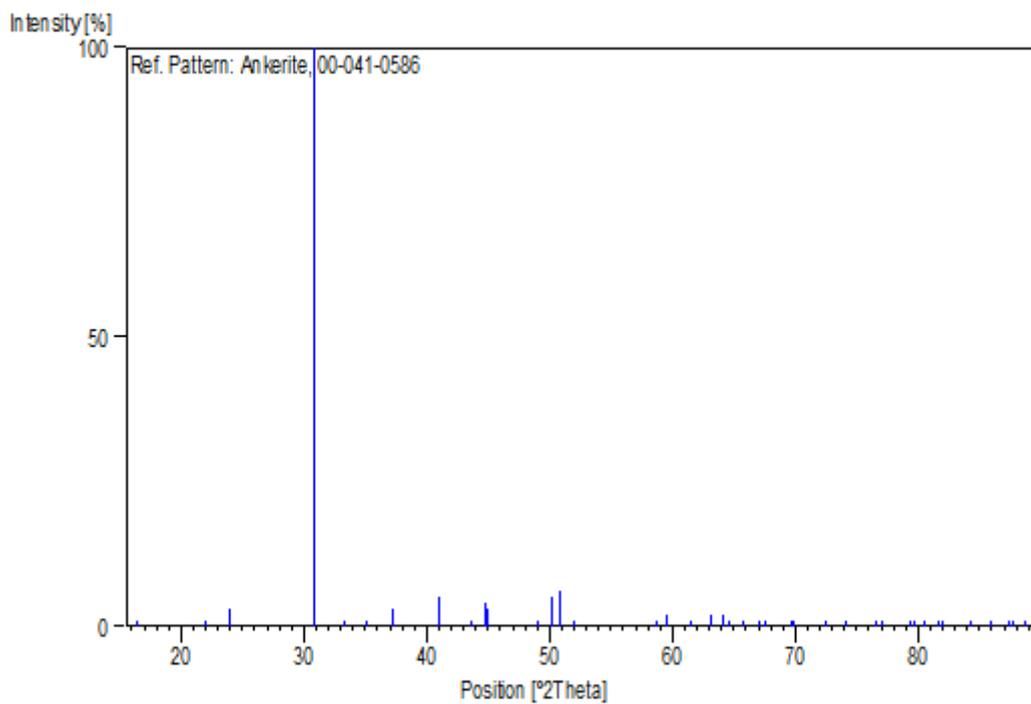
Primary reference: Keller, L., McCarthy, G., North Dakota State University, Fargo, North Dakota, USA., *ICDD Grant-in-Aid*, (1985)
Structure: Reeder, R., Dollase, W., *Am. Mineral.*, **74**, 1159, (1989)
Optical data: Deer, W., Howie, R., Zussmann, J., *Rock Forming Minerals*, **5**, 295, (1962)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	0	0	3	5,39200	16,427	1,0
2	1	0	1	4,05100	21,923	1,0
3	0	1	2	3,71400	23,941	3,0
4	1	0	4	2,90600	30,742	100,0
5	0	0	6	2,69300	33,242	1,0
6	0	1	5	2,55600	35,080	1,0
7	1	1	0	2,41400	37,217	3,0
8	1	1	3	2,20300	40,933	5,0
9	0	2	1	2,07300	43,627	1,0
10	2	0	2	2,02400	44,740	4,0
11	1	0	7	2,02000	44,833	3,0
12	0	2	4	1,85600	49,043	1,0
13	0	1	8	1,81800	50,138	5,0
14	1	1	6	1,79740	50,753	6,0
15	0	0	9	1,79470	50,835	3,0
16	2	0	5	1,75570	52,047	1,0
17	2	1	1	1,57300	58,642	1,0
18	1	2	2	1,55030	59,586	2,0
19	1	0	10	1,50680	61,490	1,0
20	2	1	4	1,47180	63,118	2,0
21	2	0	8	1,45220	64,070	2,0
22	1	1	9	1,44020	64,668	1,0

23	1	2	5	1,42000	65,703	1,0
24	3	0	0	1,39390	67,094	1,0
25	0	1	11	1,38540	67,561	1,0
26	3	0	3	1,34940	69,619	1,0
27	0	0	12	1,34600	69,820	1,0
28	2	1	7	1,30390	72,423	1,0
29	0	2	10	1,27810	74,126	1,0
30	1	2	8	1,24460	76,474	1,0
31	3	0	6	1,23780	76,971	1,0
32	2	2	0	1,20720	79,299	1,0
33	2	0	11	1,20160	79,742	1,0
34	1	0	13	1,19100	80,597	1,0
35	2	2	3	1,17790	81,682	1,0
36	1	1	12	1,17560	81,876	1,0
37	3	1	2	1,14810	84,278	1,0
38	2	1	10	1,12960	85,988	1,0
39	1	3	4	1,11480	87,415	1,0
40	0	1	14	1,11220	87,671	1,0
41	2	2	6	1,10120	88,775	1,0

Stick Pattern



Name and formula

Reference code: 01-083-1762
 Mineral name: Calcite
 ICSD name: Calcium Carbonate
 Empirical formula: CCaO_3

Chemical formula: Ca (CO₃)

Crystallographic parameters

Crystal system: Rhombohedral
Space group: R-3c
Space group number: 167

a (Å): 4,9896
b (Å): 4,9896
c (Å): 17,0610
Alpha (°): 90,0000
Beta (°): 90,0000
Gamma (°): 120,0000

Calculated density (g/cm³): 2,71
Volume of cell (10⁶ pm³): 367,85
Z: 6,00

RIR: 3,25

Subfiles and Quality

Subfiles: Inorganic
Mineral
Modelled additional pattern
Quality: Calculated (C)

Comments

Sample source: Specimen from Iceland.
ICSD collection code: 100676

References

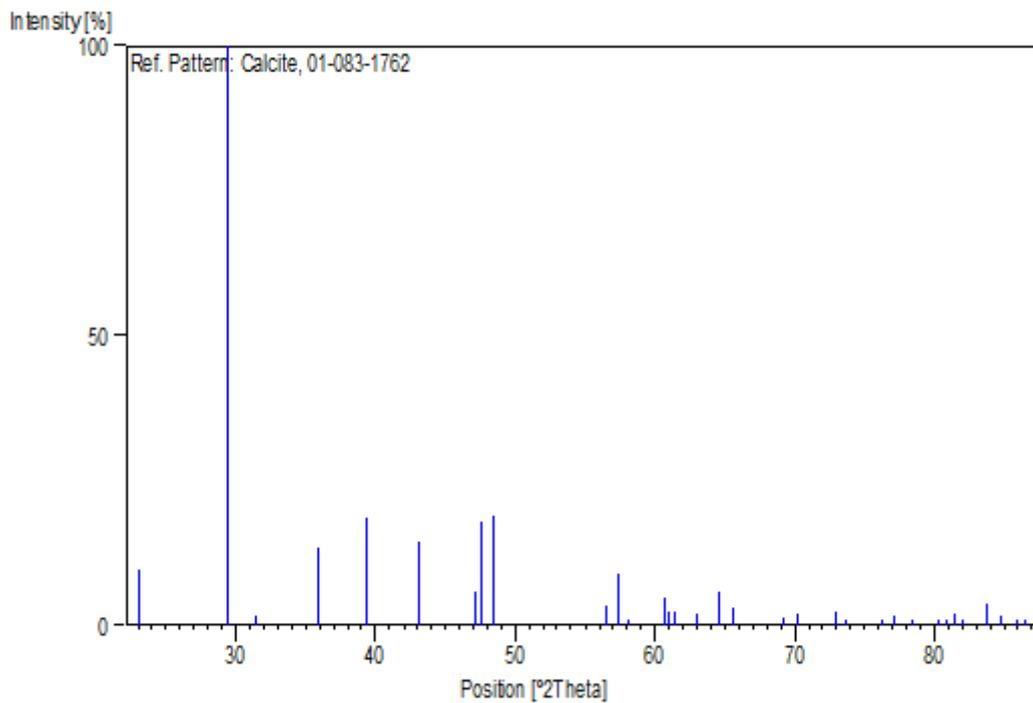
Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++*, (1997)
Structure: Effenberger, H., Mereiter, K., Zemmann, J., *Z. Kristallogr.*, **156**, 233, (1981)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	1	2	3,85478	23,054	9,6
2	1	0	4	3,03555	29,400	100,0
3	0	0	6	2,84350	31,435	1,8
4	1	1	0	2,49480	35,969	13,3
5	1	1	3	2,28463	39,409	18,5
6	2	0	2	2,09443	43,158	14,3
7	0	2	4	1,92739	47,114	5,8
8	0	1	8	1,91240	47,506	18,0
9	1	1	6	1,87532	48,505	19,0
10	2	1	1	1,62580	56,562	3,5
11	1	2	2	1,60409	57,398	8,8
12	1	0	10	1,58689	58,079	1,0
13	2	1	4	1,52524	60,667	4,7
14	2	0	8	1,51777	60,998	2,4
15	1	1	9	1,50937	61,374	2,5

16	1	2	5	1,47317	63,052	2,0
17	3	0	0	1,44037	64,660	5,7
18	0	0	12	1,42175	65,612	3,1
19	2	1	7	1,35677	69,186	1,2
20	0	2	10	1,33897	70,240	2,0
21	1	2	8	1,29666	72,892	2,3
22	3	0	6	1,28493	73,666	0,5
23	2	2	0	1,24740	76,271	0,9
24	1	1	12	1,23524	77,160	1,8
25	2	2	3	1,21843	78,426	0,1
26	1	3	1	1,19552	80,230	0,1
27	3	1	2	1,18681	80,940	0,4
28	2	1	10	1,17979	81,523	2,1
29	0	1	14	1,17289	82,106	0,3
30	1	3	4	1,15378	83,769	3,8
31	2	2	6	1,14232	84,804	1,8
32	3	1	5	1,13075	85,880	0,1
33	1	2	11	1,12467	86,457	0,4

Stick Pattern



Amostra A3

Name and formula

Reference code: 00-041-0586

Mineral name: Ankerite

PDF index name: Calcium Iron Magnesium Carbonate

Empirical formula: $C_2CaFe_{0.6}Mg_{0.4}O_6$

Chemical formula: $\text{Ca}(\text{Fe}_{+2}, \text{Mg})(\text{CO}_3)_2$

Crystallographic parameters

Crystal system: Rhombohedral
Space group: R-3
Space group number: 148

a (Å): 4,8287
b (Å): 4,8287
c (Å): 16,1520
Alpha (°): 90,0000
Beta (°): 90,0000
Gamma (°): 120,0000

Calculated density (g/cm³): 3,10
Measured density (g/cm³): 3,04
Volume of cell (10⁶ pm³): 326,15
Z: 3,00

RIR: 2,80

Subfiles and Quality

Subfiles: Inorganic
Mineral
Cement and Hydration Product
Corrosion
Common Phase
Forensic
Quality: Star (S)

Comments

Color: Light brown
Sample source: Specimen collected from Lower Slaty Member, Biwabic Formation, Mesabi Range, Minntac Mine, Mountain Iron, Minnesota, USA.
Analysis: Energy dispersive X-ray analysis mine (wt.%): CaO 27.85, FeO 19.15, MgO 8.18, MnO 1.07, CO₂ 43.03, SiO₂ 0.10, Al₂O₃ 0.34: $\text{Ca}(\text{Fe}_{0.545}\text{Mg}_{0.413}\text{Mn}_{0.031}\text{Ca}_{0.011})(\text{CO}_3)_2$.
Optical data: A=1.529(19), B=1.720(30), Sign=-
Additional pattern: To replace 33-282 and 34-517.

References

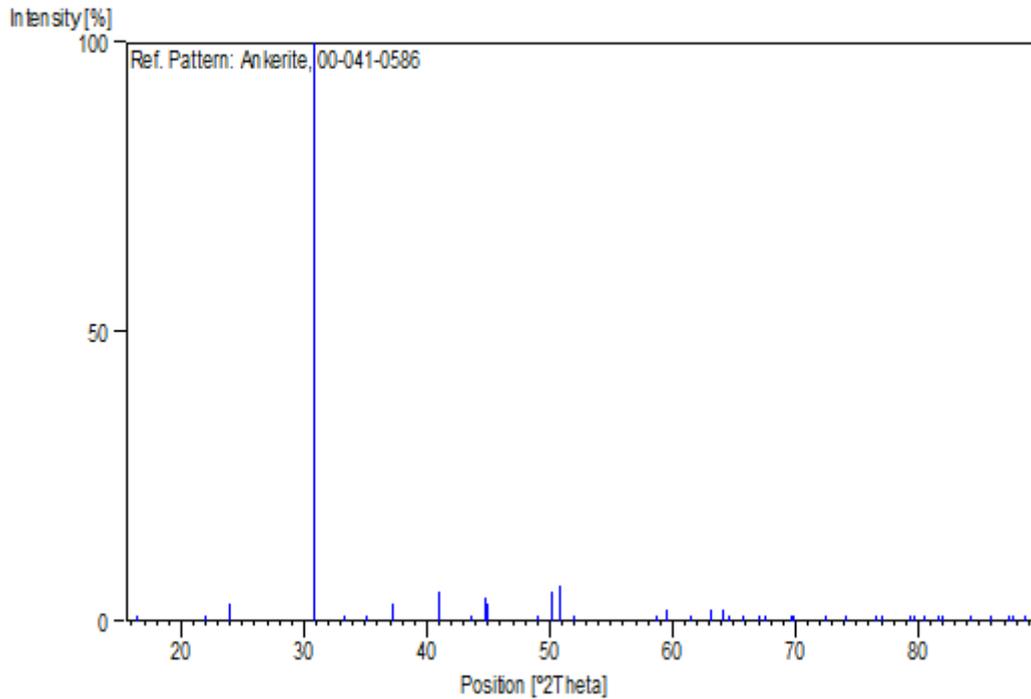
Primary reference: Keller, L., McCarthy, G., North Dakota State University, Fargo, North Dakota, USA., *ICDD Grant-in-Aid*, (1985)
Structure: Reeder, R., Dollase, W., *Am. Mineral.*, **74**, 1159, (1989)
Optical data: Deer, W., Howie, R., Zussmann, J., *Rock Forming Minerals*, **5**, 295, (1962)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	0	0	3	5,39200	16,427	1,0
2	1	0	1	4,05100	21,923	1,0

3	0	1	2	3,71400	23,941	3,0
4	1	0	4	2,90600	30,742	100,0
5	0	0	6	2,69300	33,242	1,0
6	0	1	5	2,55600	35,080	1,0
7	1	1	0	2,41400	37,217	3,0
8	1	1	3	2,20300	40,933	5,0
9	0	2	1	2,07300	43,627	1,0
10	2	0	2	2,02400	44,740	4,0
11	1	0	7	2,02000	44,833	3,0
12	0	2	4	1,85600	49,043	1,0
13	0	1	8	1,81800	50,138	5,0
14	1	1	6	1,79740	50,753	6,0
15	0	0	9	1,79470	50,835	3,0
16	2	0	5	1,75570	52,047	1,0
17	2	1	1	1,57300	58,642	1,0
18	1	2	2	1,55030	59,586	2,0
19	1	0	10	1,50680	61,490	1,0
20	2	1	4	1,47180	63,118	2,0
21	2	0	8	1,45220	64,070	2,0
22	1	1	9	1,44020	64,668	1,0
23	1	2	5	1,42000	65,703	1,0
24	3	0	0	1,39390	67,094	1,0
25	0	1	11	1,38540	67,561	1,0
26	3	0	3	1,34940	69,619	1,0
27	0	0	12	1,34600	69,820	1,0
28	2	1	7	1,30390	72,423	1,0
29	0	2	10	1,27810	74,126	1,0
30	1	2	8	1,24460	76,474	1,0
31	3	0	6	1,23780	76,971	1,0
32	2	2	0	1,20720	79,299	1,0
33	2	0	11	1,20160	79,742	1,0
34	1	0	13	1,19100	80,597	1,0
35	2	2	3	1,17790	81,682	1,0
36	1	1	12	1,17560	81,876	1,0
37	3	1	2	1,14810	84,278	1,0
38	2	1	10	1,12960	85,988	1,0
39	1	3	4	1,11480	87,415	1,0
40	0	1	14	1,11220	87,671	1,0
41	2	2	6	1,10120	88,775	1,0

Stick Pattern



Name and formula

Reference code:	01-083-1762
Mineral name:	Calcite
ICSD name:	Calcium Carbonate
Empirical formula:	CCaO ₃
Chemical formula:	Ca (CO ₃)

Crystallographic parameters

Crystal system:	Rhombohedral
Space group:	R-3c
Space group number:	167
a (Å):	4,9896
b (Å):	4,9896
c (Å):	17,0610
Alpha (°):	90,0000
Beta (°):	90,0000
Gamma (°):	120,0000
Calculated density (g/cm ³):	2,71
Volume of cell (10 ⁶ pm ³):	367,85
Z:	6,00
RIR:	3,25

Subfiles and Quality

Subfiles: Inorganic
Mineral
Modelled additional pattern
Quality: Calculated (C)

Comments

Sample source: Specimen from Iceland.
ICSD collection code: 100676

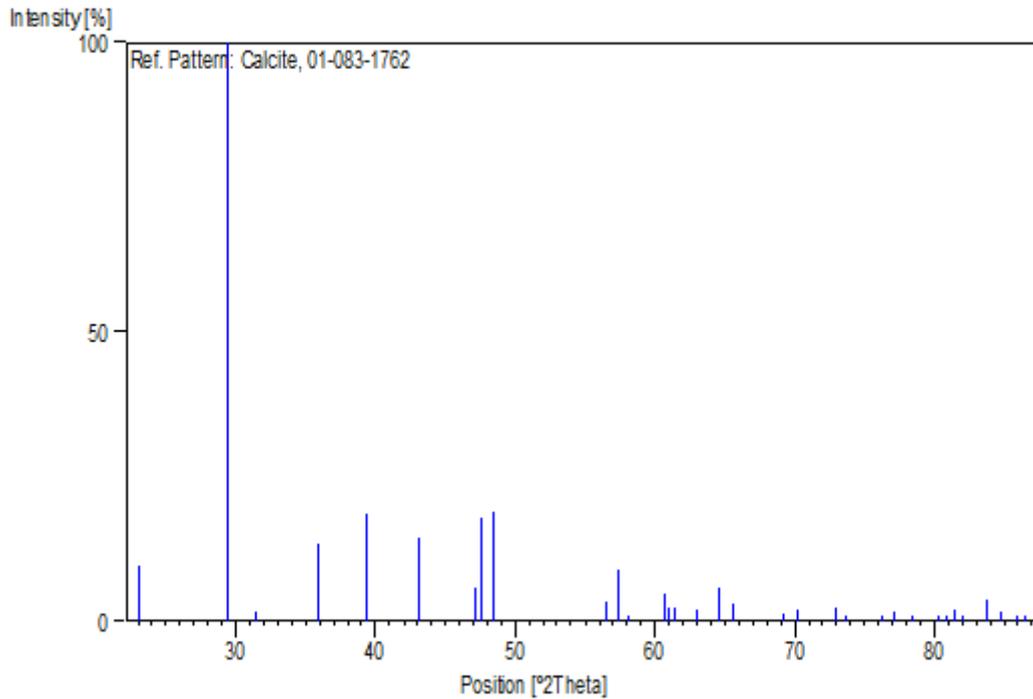
References

Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++*, (1997)
Structure: Effenberger, H., Mereiter, K., Zemmann, J., *Z. Kristallogr.*, **156**, 233, (1981)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	1	2	3,85478	23,054	9,6
2	1	0	4	3,03555	29,400	100,0
3	0	0	6	2,84350	31,435	1,8
4	1	1	0	2,49480	35,969	13,3
5	1	1	3	2,28463	39,409	18,5
6	2	0	2	2,09443	43,158	14,3
7	0	2	4	1,92739	47,114	5,8
8	0	1	8	1,91240	47,506	18,0
9	1	1	6	1,87532	48,505	19,0
10	2	1	1	1,62580	56,562	3,5
11	1	2	2	1,60409	57,398	8,8
12	1	0	10	1,58689	58,079	1,0
13	2	1	4	1,52524	60,667	4,7
14	2	0	8	1,51777	60,998	2,4
15	1	1	9	1,50937	61,374	2,5
16	1	2	5	1,47317	63,052	2,0
17	3	0	0	1,44037	64,660	5,7
18	0	0	12	1,42175	65,612	3,1
19	2	1	7	1,35677	69,186	1,2
20	0	2	10	1,33897	70,240	2,0
21	1	2	8	1,29666	72,892	2,3
22	3	0	6	1,28493	73,666	0,5
23	2	2	0	1,24740	76,271	0,9
24	1	1	12	1,23524	77,160	1,8
25	2	2	3	1,21843	78,426	0,1
26	1	3	1	1,19552	80,230	0,1
27	3	1	2	1,18681	80,940	0,4
28	2	1	10	1,17979	81,523	2,1
29	0	1	14	1,17289	82,106	0,3
30	1	3	4	1,15378	83,769	3,8
31	2	2	6	1,14232	84,804	1,8
32	3	1	5	1,13075	85,880	0,1
33	1	2	11	1,12467	86,457	0,4

Stick Pattern



Amostra A4

Name and formula

Reference code:	01-074-1687
Mineral name:	Dolomite
ICSD name:	Calcium Magnesium Carbonate
Empirical formula:	C_2CaMgO_6
Chemical formula:	$CaMg (CO_3)_2$

Crystallographic parameters

Crystal system:	Rhombohedral
Space group:	R-3
Space group number:	148
a (Å):	4,8150
b (Å):	4,8150
c (Å):	16,1190
Alpha (°):	90,0000
Beta (°):	90,0000
Gamma (°):	120,0000
Calculated density (g/cm ³):	2,84
Volume of cell (10 ⁶ pm ³):	323,64
Z:	3,00
RIR:	2,79

Subfiles and Quality

Subfiles: Inorganic
Mineral
Corrosion
Modelled additional pattern
Quality: Calculated (C)

Comments

ICSD collection code: 027540

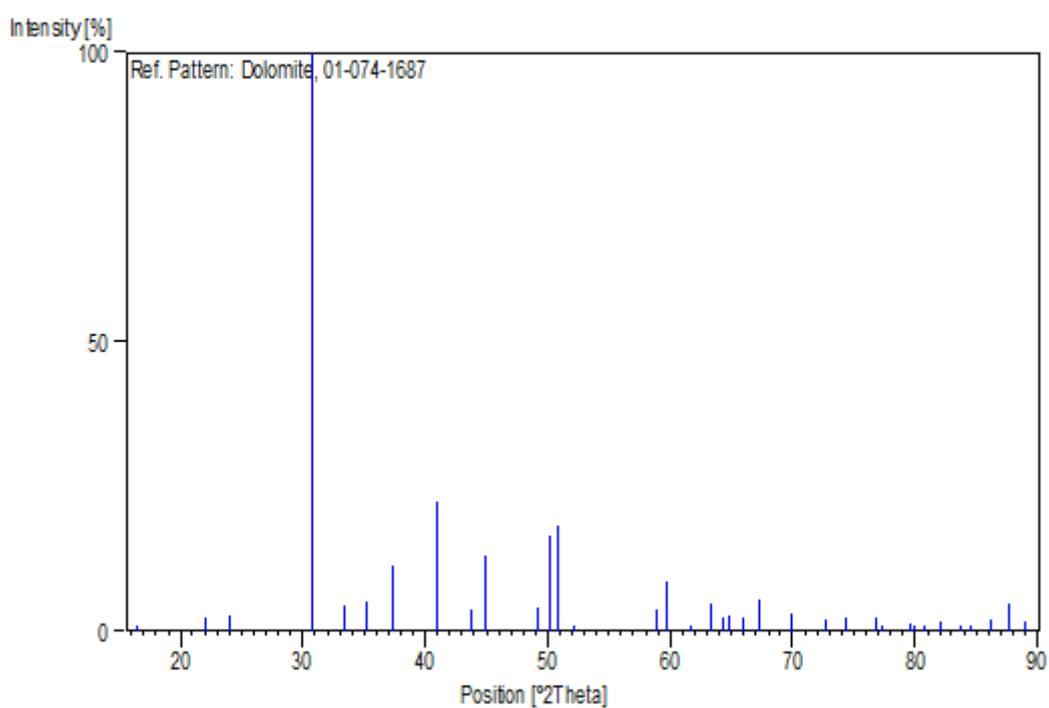
References

Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++*, (1997)
Structure: Steinfink, H., Sans, F.J., *Am. Mineral.*, **44**, 679, (1959)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	0	0	3	5,37300	16,485	0,1
2	1	0	1	4,03702	22,000	2,4
3	0	1	2	3,70356	24,009	2,8
4	1	0	4	2,89775	30,832	100,0
5	0	0	6	2,68650	33,325	4,3
6	0	1	5	2,55047	35,158	5,2
7	1	1	0	2,40750	37,321	11,3
8	1	1	-3	2,19703	41,049	22,3
9	0	2	1	2,06773	43,744	3,9
10	2	0	2	2,01851	44,868	13,1
11	0	2	4	1,85178	49,162	4,1
12	0	1	8	1,81419	50,250	16,5
13	1	1	-6	1,79291	50,889	18,3
14	2	0	5	1,75072	52,207	0,2
15	1	2	-1	1,56860	58,823	3,8
16	2	1	-2	1,54678	59,736	8,7
17	1	0	10	1,50348	61,640	0,6
18	1	2	-4	1,46781	63,309	4,9
19	2	0	8	1,44887	64,235	2,3
20	1	1	-9	1,43698	64,831	2,7
21	2	1	-5	1,41592	65,917	2,5
22	3	0	0	1,38997	67,309	5,5
23	0	0	12	1,34325	69,984	3,1
24	1	2	-7	1,30061	72,635	1,9
25	0	2	10	1,27524	74,320	2,4
26	2	1	-8	1,24140	76,707	2,4
27	0	3	6	1,23452	77,213	0,6
28	2	2	0	1,20375	79,571	1,2
29	2	0	11	1,19888	79,959	0,4
30	1	0	13	1,18849	80,802	0,2
31	1	1	-12	1,17302	82,094	1,8
32	1	3	1	1,15356	83,789	0,1
33	3	1	2	1,14480	84,578	0,7
34	1	2	-10	1,12691	86,243	1,9
35	3	1	-4	1,11165	87,726	4,6
36	2	2	6	1,09852	89,049	1,8

Stick Pattern



Name and formula

Reference code: 01-085-1108
 ICSD name: Calcium Carbonate
 Empirical formula: CCaO_3
 Chemical formula: CaCO_3

Crystallographic parameters

Crystal system: Rhombohedral
 Space group: R-3c
 Space group number: 167

a (Å): 4,9803
 b (Å): 4,9803
 c (Å): 17,0187
 Alpha (°): 90,0000
 Beta (°): 90,0000
 Gamma (°): 120,0000

Calculated density (g/cm³): 2,73
 Volume of cell (10⁶ pm³): 365,57
 Z: 6,00

RIR: 3,39

Subfiles and Quality

Subfiles: Inorganic
Modelled additional pattern
Quality: Calculated (C)

Comments

ICSD collection code: 037241
ICSD Space group comment: Origin translated by (1/4,1/4,1/4) prior to calculation.
Test from ICSD: No R value given.
At least one TF missing.

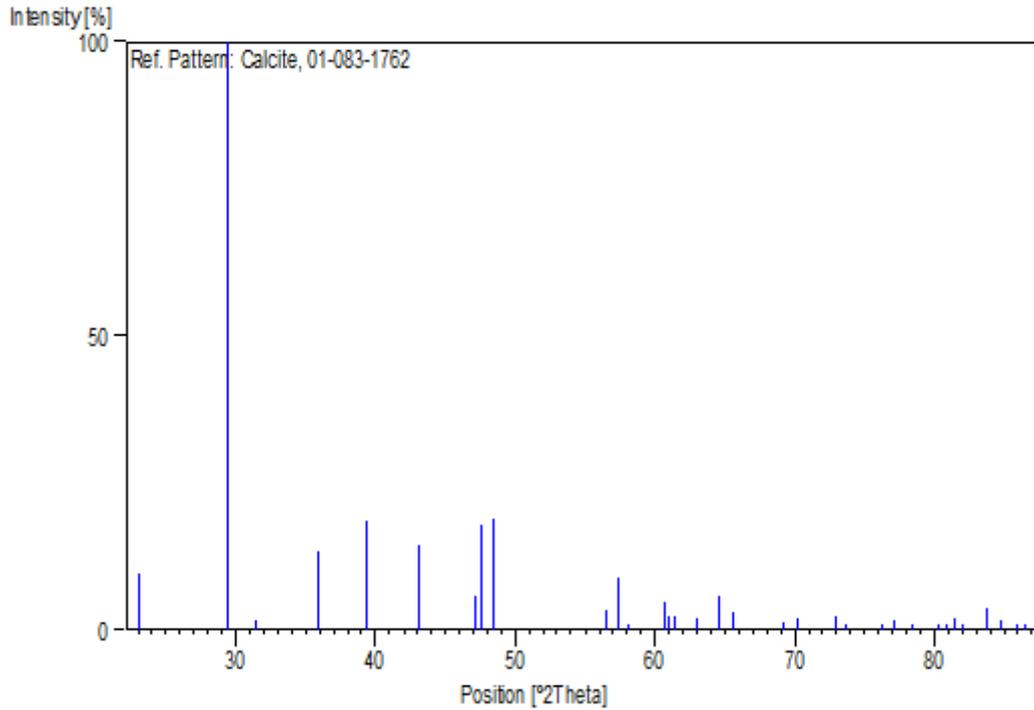
References

Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++*, (1997)
Structure: Wyckoff, R.W.G., *Am. J. Sci.*, **50**, 317, (1920)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	0	1	2	3,84712	23,101	7,5
2	1	0	4	3,02895	29,466	100,0
3	0	0	6	2,83645	31,516	2,0
4	1	1	0	2,49016	36,039	14,2
5	1	1	3	2,28015	39,489	16,1
6	2	0	2	2,09045	43,244	13,2
7	0	2	4	1,92356	47,213	5,7
8	0	1	8	1,90789	47,625	17,8
9	1	1	6	1,87133	48,615	17,1
10	2	1	1	1,62276	56,678	3,4
11	1	2	2	1,60107	57,517	8,8
12	1	0	10	1,58309	58,232	0,8
13	2	1	4	1,52228	60,798	4,2
14	2	0	8	1,51447	61,145	2,2
15	1	1	9	1,50597	61,527	2,3
16	1	2	5	1,47026	63,191	2,0
17	3	0	0	1,43769	64,795	4,8
18	0	0	12	1,41822	65,796	3,1
19	2	1	7	1,35399	69,349	1,3
20	0	2	10	1,33597	70,421	1,9
21	1	2	8	1,29396	73,069	2,0
22	0	3	6	1,28237	73,838	0,6
23	2	2	0	1,24508	76,439	0,9
24	1	1	12	1,23237	77,373	1,7
25	3	1	2	1,18459	81,123	0,5
26	2	1	10	1,17724	81,737	2,1
27	0	1	14	1,17004	82,349	0,2
28	1	3	4	1,15158	83,966	3,4
29	2	2	6	1,14008	85,010	1,8
30	1	2	11	1,12221	86,694	0,5

Stick Pattern



Amostra B1

Name and formula

Reference code:	01-083-1762
Mineral name:	Calcite
ICSD name:	Calcium Carbonate
Empirical formula:	CCaO ₃
Chemical formula:	Ca (CO ₃)

Crystallographic parameters

Crystal system:	Rhombohedral
Space group:	R-3c
Space group number:	167

a (Å):	4,9896
b (Å):	4,9896
c (Å):	17,0610
Alpha (°):	90,0000
Beta (°):	90,0000
Gamma (°):	120,0000

Calculated density (g/cm ³):	2,71
Volume of cell (10 ⁶ pm ³):	367,85
Z:	6,00

RIR:	3,25
------	------

Subfiles and Quality

Subfiles: Inorganic
Mineral
Modelled additional pattern
Quality: Calculated (C)

Comments

Sample source: Specimen from Iceland.
ICSD collection code: 100676

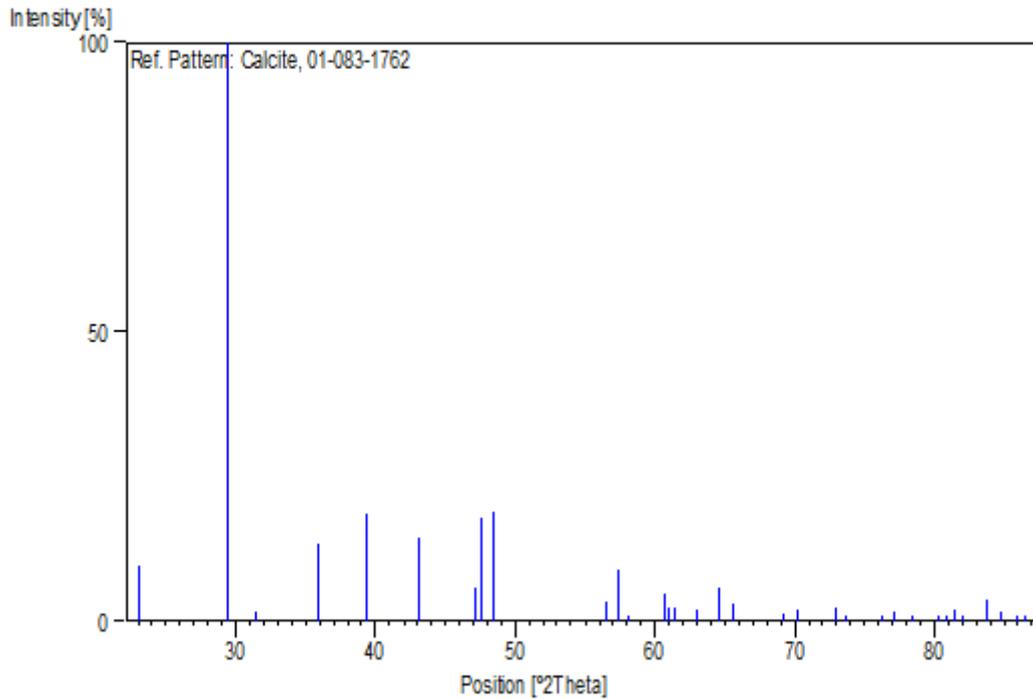
References

Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++*, (1997)
Structure: Effenberger, H., Mereiter, K., Zemmann, J., *Z. Kristallogr.*, **156**,
233, (1981)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	0	1	2	3,85478	23,054	9,6
2	1	0	4	3,03555	29,400	100,0
3	0	0	6	2,84350	31,435	1,8
4	1	1	0	2,49480	35,969	13,3
5	1	1	3	2,28463	39,409	18,5
6	2	0	2	2,09443	43,158	14,3
7	0	2	4	1,92739	47,114	5,8
8	0	1	8	1,91240	47,506	18,0
9	1	1	6	1,87532	48,505	19,0
10	2	1	1	1,62580	56,562	3,5
11	1	2	2	1,60409	57,398	8,8
12	1	0	10	1,58689	58,079	1,0
13	2	1	4	1,52524	60,667	4,7
14	2	0	8	1,51777	60,998	2,4
15	1	1	9	1,50937	61,374	2,5
16	1	2	5	1,47317	63,052	2,0
17	3	0	0	1,44037	64,660	5,7
18	0	0	12	1,42175	65,612	3,1
19	2	1	7	1,35677	69,186	1,2
20	0	2	10	1,33897	70,240	2,0
21	1	2	8	1,29666	72,892	2,3
22	3	0	6	1,28493	73,666	0,5
23	2	2	0	1,24740	76,271	0,9
24	1	1	12	1,23524	77,160	1,8
25	2	2	3	1,21843	78,426	0,1
26	1	3	1	1,19552	80,230	0,1
27	3	1	2	1,18681	80,940	0,4
28	2	1	10	1,17979	81,523	2,1
29	0	1	14	1,17289	82,106	0,3
30	1	3	4	1,15378	83,769	3,8
31	2	2	6	1,14232	84,804	1,8
32	3	1	5	1,13075	85,880	0,1
33	1	2	11	1,12467	86,457	0,4

Stick Pattern



Name and formula

Reference code: 00-041-0586

Mineral name: Ankerite

PDF index name: Calcium Iron Magnesium Carbonate

Empirical formula: $C_2CaFe_{0.6}Mg_{0.4}O_6$

Chemical formula: $Ca(Fe_{+2}, Mg)(CO_3)_2$

Crystallographic parameters

Crystal system: Rhombohedral

Space group: R-3

Space group number: 148

a (Å): 4,8287

b (Å): 4,8287

c (Å): 16,1520

Alpha (°): 90,0000

Beta (°): 90,0000

Gamma (°): 120,0000

Calculated density (g/cm³): 3,10

Measured density (g/cm³): 3,04

Volume of cell (10⁶ pm³): 326,15

Z: 3,00

RIR: 2,80

Subfiles and Quality

Subfiles: Inorganic
Mineral
Cement and Hydration Product
Corrosion
Common Phase
Forensic
Quality: Star (S)

Comments

Color: Light brown
Sample source: Specimen collected from Lower Slaty Member, Biwabic Formation, Mesabi Range, Minntac Mine, Mountain Iron, Minnesota, USA.
Analysis: Energy dispersive X-ray analysis mine (wt.%): CaO 27.85, FeO 19.15, MgO 8.18, MnO 1.07, CO₂ 43.03, SiO₂ 0.10, Al₂O₃ 0.34: Ca (Fe_{0.545}Mg_{0.413}Mn_{0.031}Ca_{0.011}) (CO₃)₂ ·
Optical data: A=1.529(19), B=1.720(30), Sign=-
Additional pattern: To replace 33-282 and 34-517.

References

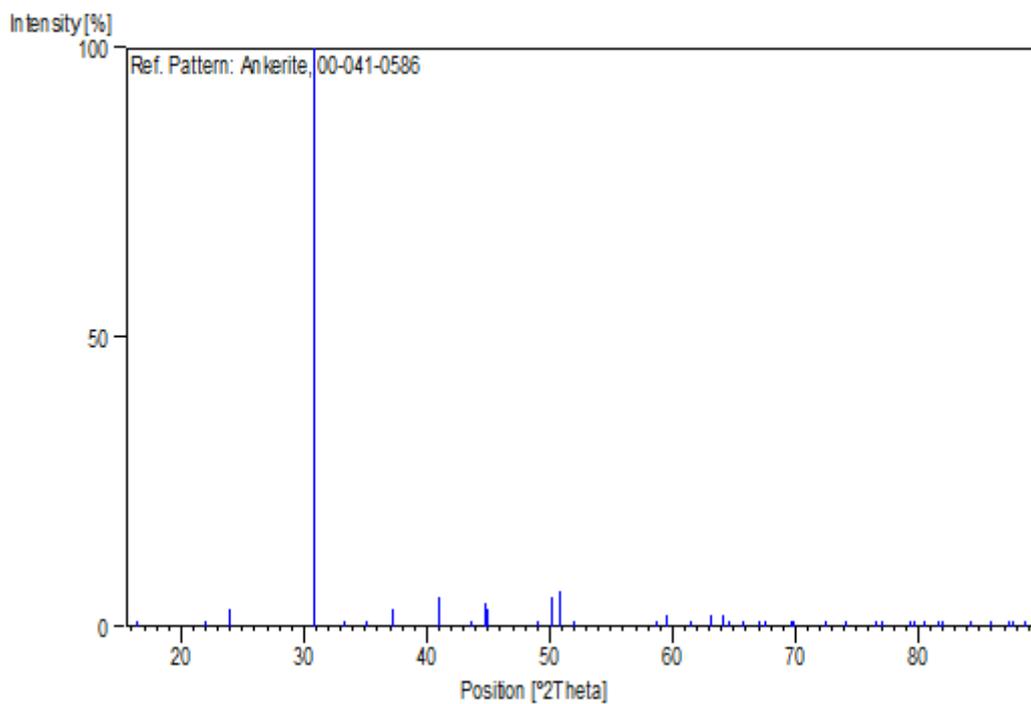
Primary reference: Keller, L., McCarthy, G., North Dakota State University, Fargo, North Dakota, USA., *ICDD Grant-in-Aid*, (1985)
Structure: Reeder, R., Dollase, W., *Am. Mineral.*, **74**, 1159, (1989)
Optical data: Deer, W., Howie, R., Zussmann, J., *Rock Forming Minerals*, **5**, 295, (1962)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	0	3	5,39200	16,427	1,0
2	1	0	1	4,05100	21,923	1,0
3	0	1	2	3,71400	23,941	3,0
4	1	0	4	2,90600	30,742	100,0
5	0	0	6	2,69300	33,242	1,0
6	0	1	5	2,55600	35,080	1,0
7	1	1	0	2,41400	37,217	3,0
8	1	1	3	2,20300	40,933	5,0
9	0	2	1	2,07300	43,627	1,0
10	2	0	2	2,02400	44,740	4,0
11	1	0	7	2,02000	44,833	3,0
12	0	2	4	1,85600	49,043	1,0
13	0	1	8	1,81800	50,138	5,0
14	1	1	6	1,79740	50,753	6,0
15	0	0	9	1,79470	50,835	3,0
16	2	0	5	1,75570	52,047	1,0
17	2	1	1	1,57300	58,642	1,0
18	1	2	2	1,55030	59,586	2,0
19	1	0	10	1,50680	61,490	1,0
20	2	1	4	1,47180	63,118	2,0
21	2	0	8	1,45220	64,070	2,0
22	1	1	9	1,44020	64,668	1,0
23	1	2	5	1,42000	65,703	1,0
24	3	0	0	1,39390	67,094	1,0
25	0	1	11	1,38540	67,561	1,0
26	3	0	3	1,34940	69,619	1,0

27	0	0	12	1,34600	69,820	1,0
28	2	1	7	1,30390	72,423	1,0
29	0	2	10	1,27810	74,126	1,0
30	1	2	8	1,24460	76,474	1,0
31	3	0	6	1,23780	76,971	1,0
32	2	2	0	1,20720	79,299	1,0
33	2	0	11	1,20160	79,742	1,0
34	1	0	13	1,19100	80,597	1,0
35	2	2	3	1,17790	81,682	1,0
36	1	1	12	1,17560	81,876	1,0
37	3	1	2	1,14810	84,278	1,0
38	2	1	10	1,12960	85,988	1,0
39	1	3	4	1,11480	87,415	1,0
40	0	1	14	1,11220	87,671	1,0
41	2	2	6	1,10120	88,775	1,0

Stick Pattern



Amostra B2

Name and formula

Reference code:	00-041-0586
Mineral name:	Ankerite
PDF index name:	Calcium Iron Magnesium Carbonate
Empirical formula:	$C_2CaFe_{0.6}Mg_{0.4}O_6$
Chemical formula:	$Ca(Fe_{+2}, Mg)(CO_3)_2$

Crystallographic parameters

Crystal system: Rhombohedral
Space group: R-3
Space group number: 148

a (Å): 4,8287
b (Å): 4,8287
c (Å): 16,1520
Alpha (°): 90,0000
Beta (°): 90,0000
Gamma (°): 120,0000

Calculated density (g/cm³): 3,10
Measured density (g/cm³): 3,04
Volume of cell (10⁶ pm³): 326,15
Z: 3,00

RIR: 2,80

Subfiles and Quality

Subfiles: Inorganic
Mineral
Cement and Hydration Product
Corrosion
Common Phase
Forensic
Quality: Star (S)

Comments

Color: Light brown
Sample source: Specimen collected from Lower Slaty Member, Biwabic Formation, Mesabi Range, Minntac Mine, Mountain Iron, Minnesota, USA.
Analysis: Energy dispersive X-ray analysis mine (wt.%): CaO 27.85, FeO 19.15, MgO 8.18, MnO 1.07, CO₂ 43.03, SiO₂ 0.10, Al₂O₃ 0.34: Ca (Fe_{0.545}Mg_{0.413}Mn_{0.031}Ca_{0.011}) (CO₃)₂ ·
Optical data: A=1.529(19), B=1.720(30), Sign=-
Additional pattern: To replace 33-282 and 34-517.

References

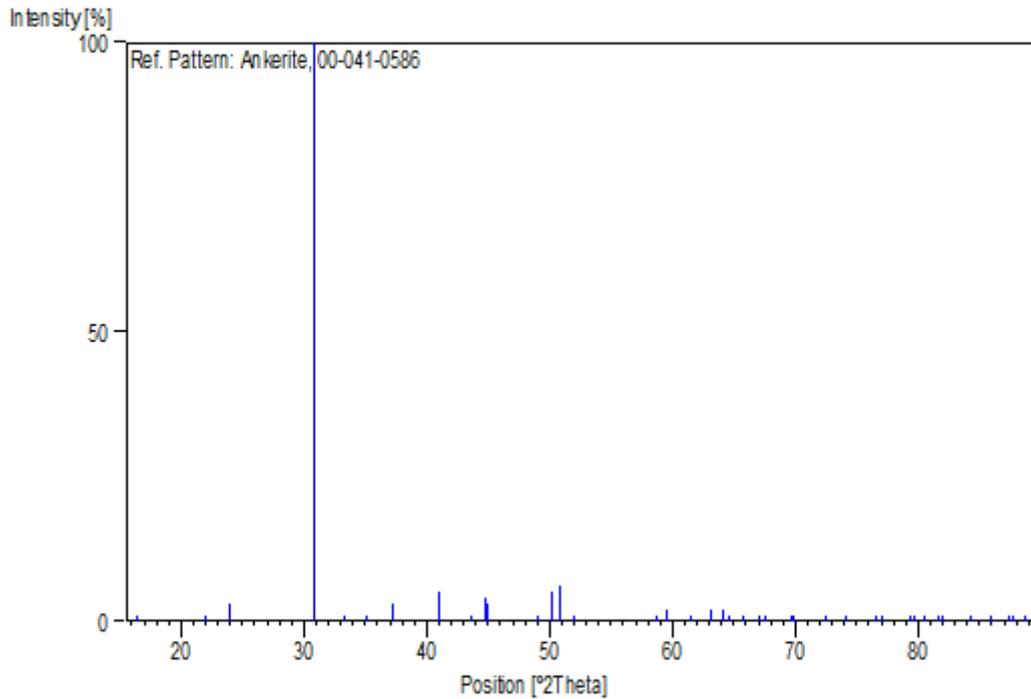
Primary reference: Keller, L., McCarthy, G., North Dakota State University, Fargo, North Dakota, USA., *ICDD Grant-in-Aid*, (1985)
Structure: Reeder, R., Dollase, W., *Am. Mineral.*, **74**, 1159, (1989)
Optical data: Deer, W., Howie, R., Zussmann, J., *Rock Forming Minerals*, **5**, 295, (1962)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	0	3	5,39200	16,427	1,0
2	1	0	1	4,05100	21,923	1,0
3	0	1	2	3,71400	23,941	3,0
4	1	0	4	2,90600	30,742	100,0
5	0	0	6	2,69300	33,242	1,0
6	0	1	5	2,55600	35,080	1,0
7	1	1	0	2,41400	37,217	3,0

8	1	1	3	2,20300	40,933	5,0
9	0	2	1	2,07300	43,627	1,0
10	2	0	2	2,02400	44,740	4,0
11	1	0	7	2,02000	44,833	3,0
12	0	2	4	1,85600	49,043	1,0
13	0	1	8	1,81800	50,138	5,0
14	1	1	6	1,79740	50,753	6,0
15	0	0	9	1,79470	50,835	3,0
16	2	0	5	1,75570	52,047	1,0
17	2	1	1	1,57300	58,642	1,0
18	1	2	2	1,55030	59,586	2,0
19	1	0	10	1,50680	61,490	1,0
20	2	1	4	1,47180	63,118	2,0
21	2	0	8	1,45220	64,070	2,0
22	1	1	9	1,44020	64,668	1,0
23	1	2	5	1,42000	65,703	1,0
24	3	0	0	1,39390	67,094	1,0
25	0	1	11	1,38540	67,561	1,0
26	3	0	3	1,34940	69,619	1,0
27	0	0	12	1,34600	69,820	1,0
28	2	1	7	1,30390	72,423	1,0
29	0	2	10	1,27810	74,126	1,0
30	1	2	8	1,24460	76,474	1,0
31	3	0	6	1,23780	76,971	1,0
32	2	2	0	1,20720	79,299	1,0
33	2	0	11	1,20160	79,742	1,0
34	1	0	13	1,19100	80,597	1,0
35	2	2	3	1,17790	81,682	1,0
36	1	1	12	1,17560	81,876	1,0
37	3	1	2	1,14810	84,278	1,0
38	2	1	10	1,12960	85,988	1,0
39	1	3	4	1,11480	87,415	1,0
40	0	1	14	1,11220	87,671	1,0
41	2	2	6	1,10120	88,775	1,0

Stick Pattern



Name and formula

Reference code:	01-083-1762
Mineral name:	Calcite
ICSD name:	Calcium Carbonate
Empirical formula:	CCaO ₃
Chemical formula:	Ca (CO ₃)

Crystallographic parameters

Crystal system:	Rhombohedral
Space group:	R-3c
Space group number:	167

a (Å):	4,9896
b (Å):	4,9896
c (Å):	17,0610
Alpha (°):	90,0000
Beta (°):	90,0000
Gamma (°):	120,0000

Calculated density (g/cm ³):	2,71
Volume of cell (10 ⁶ pm ³):	367,85
Z:	6,00

RIR:	3,25
------	------

Subfiles and Quality

Subfiles: Inorganic
Mineral
Modelled additional pattern
Quality: Calculated (C)

Comments

Sample source: Specimen from Iceland.
ICSD collection code: 100676

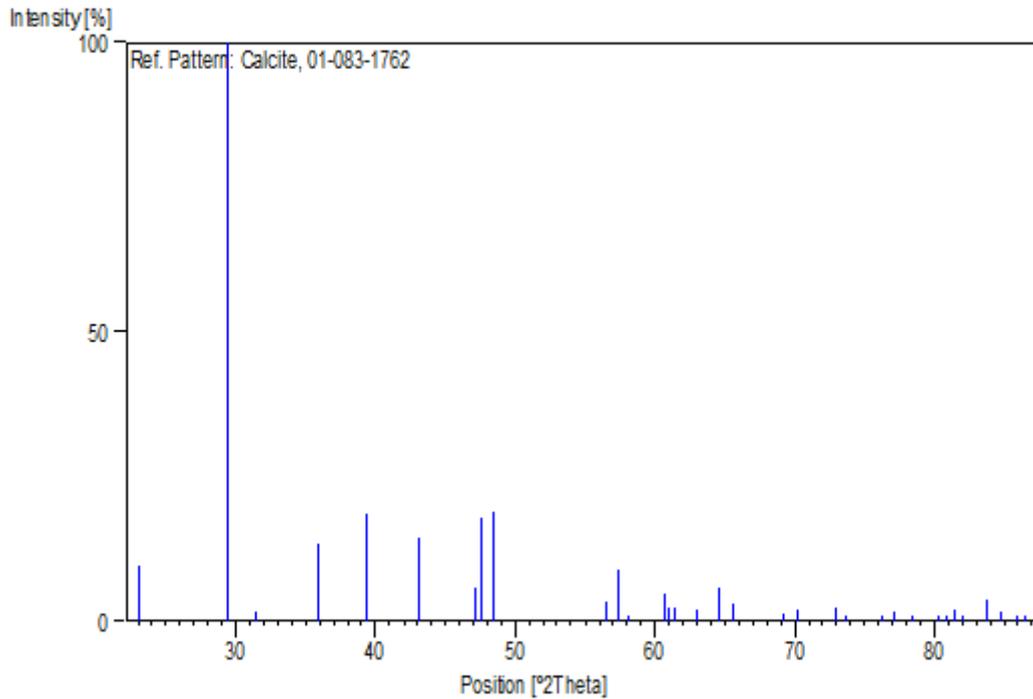
References

Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997)*
Structure: Effenberger, H., Mereiter, K., Zemmann, J., *Z. Kristallogr.*, **156**,
233, (1981)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	1	2	3,85478	23,054	9,6
2	1	0	4	3,03555	29,400	100,0
3	0	0	6	2,84350	31,435	1,8
4	1	1	0	2,49480	35,969	13,3
5	1	1	3	2,28463	39,409	18,5
6	2	0	2	2,09443	43,158	14,3
7	0	2	4	1,92739	47,114	5,8
8	0	1	8	1,91240	47,506	18,0
9	1	1	6	1,87532	48,505	19,0
10	2	1	1	1,62580	56,562	3,5
11	1	2	2	1,60409	57,398	8,8
12	1	0	10	1,58689	58,079	1,0
13	2	1	4	1,52524	60,667	4,7
14	2	0	8	1,51777	60,998	2,4
15	1	1	9	1,50937	61,374	2,5
16	1	2	5	1,47317	63,052	2,0
17	3	0	0	1,44037	64,660	5,7
18	0	0	12	1,42175	65,612	3,1
19	2	1	7	1,35677	69,186	1,2
20	0	2	10	1,33897	70,240	2,0
21	1	2	8	1,29666	72,892	2,3
22	3	0	6	1,28493	73,666	0,5
23	2	2	0	1,24740	76,271	0,9
24	1	1	12	1,23524	77,160	1,8
25	2	2	3	1,21843	78,426	0,1
26	1	3	1	1,19552	80,230	0,1
27	3	1	2	1,18681	80,940	0,4
28	2	1	10	1,17979	81,523	2,1
29	0	1	14	1,17289	82,106	0,3
30	1	3	4	1,15378	83,769	3,8
31	2	2	6	1,14232	84,804	1,8
32	3	1	5	1,13075	85,880	0,1
33	1	2	11	1,12467	86,457	0,4

Stick Pattern



Amostra B3

Name and formula

Reference code:	00-041-0586
Mineral name:	Ankerite
PDF index name:	Calcium Iron Magnesium Carbonate
Empirical formula:	$C_2CaFe_{0.6}Mg_{0.4}O_6$
Chemical formula:	$Ca(Fe_{+2}, Mg)(CO_3)_2$

Crystallographic parameters

Crystal system:	Rhombohedral
Space group:	R-3
Space group number:	148
a (Å):	4,8287
b (Å):	4,8287
c (Å):	16,1520
Alpha (°):	90,0000
Beta (°):	90,0000
Gamma (°):	120,0000
Calculated density (g/cm ³):	3,10
Measured density (g/cm ³):	3,04
Volume of cell (10 ⁶ pm ³):	326,15
Z:	3,00
RIR:	2,80

Subfiles and Quality

Subfiles: Inorganic
Mineral
Cement and Hydration Product
Corrosion
Common Phase
Forensic
Quality: Star (S)

Comments

Color: Light brown
Sample source: Specimen collected from Lower Slaty Member, Biwabic Formation, Mesabi Range, Minntac Mine, Mountain Iron, Minnesota, USA.
Analysis: Energy dispersive X-ray analysis mine (wt.%): CaO 27.85, FeO 19.15, MgO 8.18, MnO 1.07, CO₂ 43.03, SiO₂ 0.10, Al₂O₃ 0.34: Ca (Fe_{0.545}Mg_{0.413}Mn_{0.031}Ca_{0.011}) (CO₃)₂ .
Optical data: A=1.529(19), B=1.720(30), Sign=-
Additional pattern: To replace 33-282 and 34-517.

References

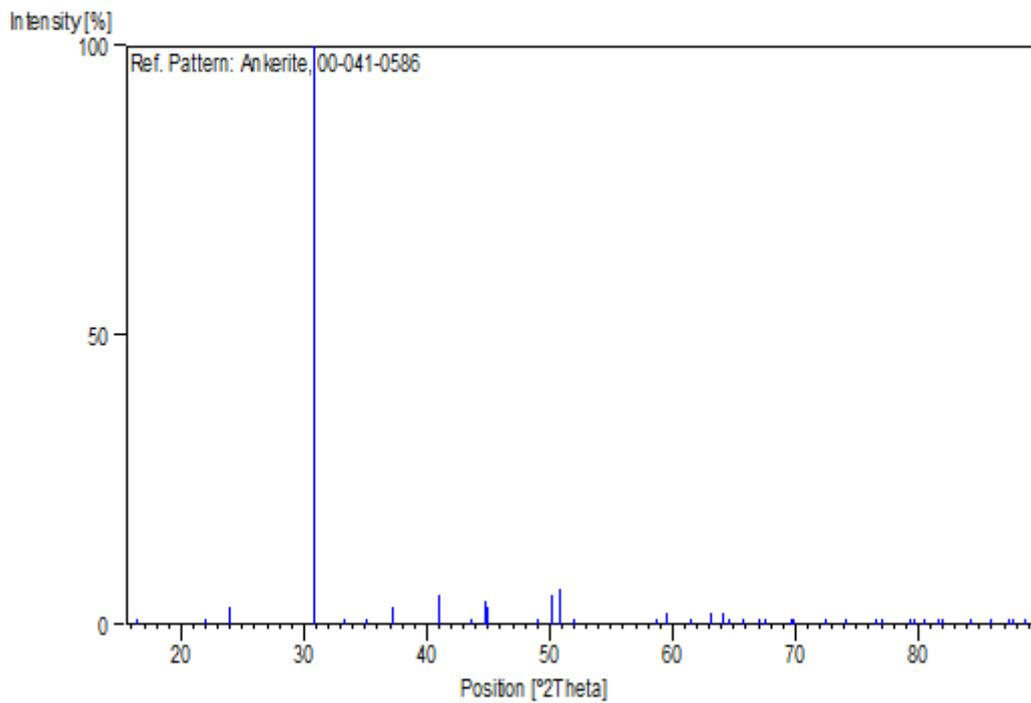
Primary reference: Keller, L., McCarthy, G., North Dakota State University, Fargo, North Dakota, USA., *ICDD Grant-in-Aid*, (1985)
Structure: Reeder, R., Dollase, W., *Am. Mineral.*, **74**, 1159, (1989)
Optical data: Deer, W., Howie, R., Zussmann, J., *Rock Forming Minerals*, **5**, 295, (1962)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	0	3	5,39200	16,427	1,0
2	1	0	1	4,05100	21,923	1,0
3	0	1	2	3,71400	23,941	3,0
4	1	0	4	2,90600	30,742	100,0
5	0	0	6	2,69300	33,242	1,0
6	0	1	5	2,55600	35,080	1,0
7	1	1	0	2,41400	37,217	3,0
8	1	1	3	2,20300	40,933	5,0
9	0	2	1	2,07300	43,627	1,0
10	2	0	2	2,02400	44,740	4,0
11	1	0	7	2,02000	44,833	3,0
12	0	2	4	1,85600	49,043	1,0
13	0	1	8	1,81800	50,138	5,0
14	1	1	6	1,79740	50,753	6,0
15	0	0	9	1,79470	50,835	3,0
16	2	0	5	1,75570	52,047	1,0
17	2	1	1	1,57300	58,642	1,0
18	1	2	2	1,55030	59,586	2,0
19	1	0	10	1,50680	61,490	1,0
20	2	1	4	1,47180	63,118	2,0
21	2	0	8	1,45220	64,070	2,0
22	1	1	9	1,44020	64,668	1,0
23	1	2	5	1,42000	65,703	1,0
24	3	0	0	1,39390	67,094	1,0
25	0	1	11	1,38540	67,561	1,0

26	3	0	3	1,34940	69,619	1,0
27	0	0	12	1,34600	69,820	1,0
28	2	1	7	1,30390	72,423	1,0
29	0	2	10	1,27810	74,126	1,0
30	1	2	8	1,24460	76,474	1,0
31	3	0	6	1,23780	76,971	1,0
32	2	2	0	1,20720	79,299	1,0
33	2	0	11	1,20160	79,742	1,0
34	1	0	13	1,19100	80,597	1,0
35	2	2	3	1,17790	81,682	1,0
36	1	1	12	1,17560	81,876	1,0
37	3	1	2	1,14810	84,278	1,0
38	2	1	10	1,12960	85,988	1,0
39	1	3	4	1,11480	87,415	1,0
40	0	1	14	1,11220	87,671	1,0
41	2	2	6	1,10120	88,775	1,0

Stick Pattern



Name and formula

Reference code: 01-083-1762

Mineral name: Calcite

ICSD name: Calcium Carbonate

Empirical formula: CCaO_3

Chemical formula: $\text{Ca}(\text{CO}_3)$

Crystallographic parameters

Crystal system: Rhombohedral
Space group: R-3c
Space group number: 167

a (Å): 4,9896
b (Å): 4,9896
c (Å): 17,0610
Alpha (°): 90,0000
Beta (°): 90,0000
Gamma (°): 120,0000

Calculated density (g/cm³): 2,71
Volume of cell (10⁶ pm³): 367,85
Z: 6,00

RIR: 3,25

Subfiles and Quality

Subfiles: Inorganic
Mineral
Modelled additional pattern
Quality: Calculated (C)

Comments

Sample source: Specimen from Iceland.
ICSD collection code: 100676

References

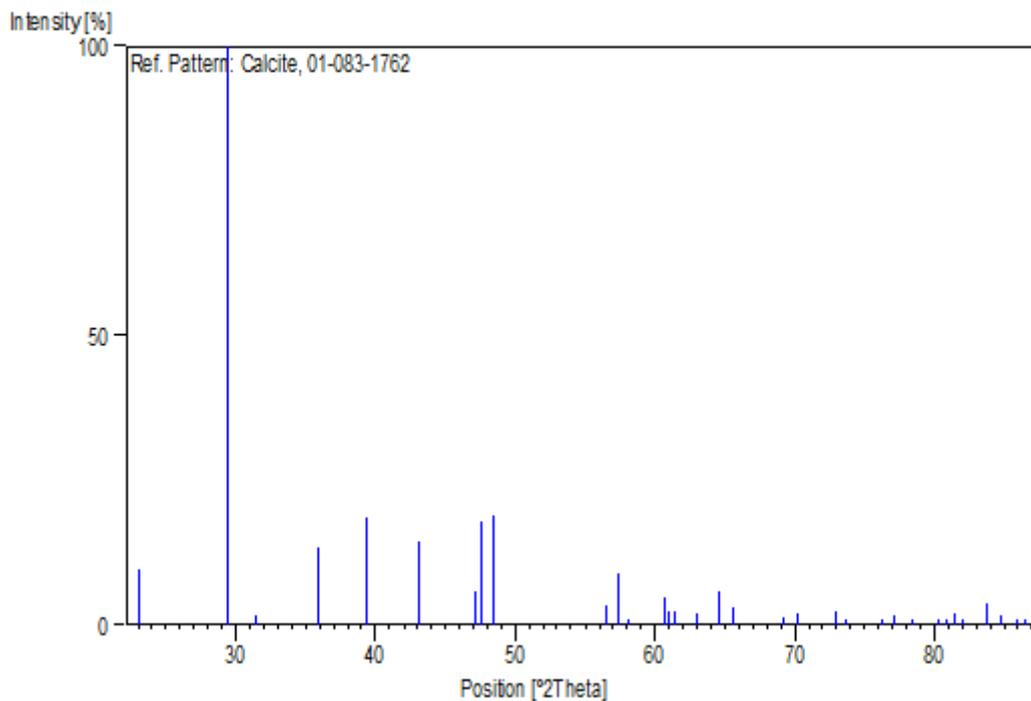
Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++*, (1997)
Structure: Effenberger, H., Mereiter, K., Zemmann, J., *Z. Kristallogr.*, **156**, 233, (1981)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	0	1	2	3,85478	23,054	9,6
2	1	0	4	3,03555	29,400	100,0
3	0	0	6	2,84350	31,435	1,8
4	1	1	0	2,49480	35,969	13,3
5	1	1	3	2,28463	39,409	18,5
6	2	0	2	2,09443	43,158	14,3
7	0	2	4	1,92739	47,114	5,8
8	0	1	8	1,91240	47,506	18,0
9	1	1	6	1,87532	48,505	19,0
10	2	1	1	1,62580	56,562	3,5
11	1	2	2	1,60409	57,398	8,8
12	1	0	10	1,58689	58,079	1,0
13	2	1	4	1,52524	60,667	4,7
14	2	0	8	1,51777	60,998	2,4
15	1	1	9	1,50937	61,374	2,5
16	1	2	5	1,47317	63,052	2,0
17	3	0	0	1,44037	64,660	5,7
18	0	0	12	1,42175	65,612	3,1
19	2	1	7	1,35677	69,186	1,2
20	0	2	10	1,33897	70,240	2,0
21	1	2	8	1,29666	72,892	2,3

22	3	0	6	1,28493	73,666	0,5
23	2	2	0	1,24740	76,271	0,9
24	1	1	12	1,23524	77,160	1,8
25	2	2	3	1,21843	78,426	0,1
26	1	3	1	1,19552	80,230	0,1
27	3	1	2	1,18681	80,940	0,4
28	2	1	10	1,17979	81,523	2,1
29	0	1	14	1,17289	82,106	0,3
30	1	3	4	1,15378	83,769	3,8
31	2	2	6	1,14232	84,804	1,8
32	3	1	5	1,13075	85,880	0,1
33	1	2	11	1,12467	86,457	0,4

Stick Pattern



Amostra B3

Name and formula

Reference code:	00-041-0586
Mineral name:	Ankerite
PDF index name:	Calcium Iron Magnesium Carbonate
Empirical formula:	$C_2CaFe_{0.6}Mg_{0.4}O_6$
Chemical formula:	$Ca(Fe_{+2}, Mg)(CO_3)_2$

Crystallographic parameters

Crystal system:	Rhombohedral
Space group:	R-3
Space group number:	148

a (Å): 4,8287
 b (Å): 4,8287
 c (Å): 16,1520
 Alpha (°): 90,0000
 Beta (°): 90,0000
 Gamma (°): 120,0000

Calculated density (g/cm³): 3,10
 Measured density (g/cm³): 3,04
 Volume of cell (10⁶ pm³): 326,15
 Z: 3,00

RIR: 2,80

Subfiles and Quality

Subfiles: Inorganic
 Mineral
 Cement and Hydration Product
 Corrosion
 Common Phase
 Forensic
 Quality: Star (S)

Comments

Color: Light brown
 Sample source: Specimen collected from Lower Slaty Member, Biwabic Formation, Mesabi Range, Minntac Mine, Mountain Iron, Minnesota, USA.
 Analysis: Energy dispersive X-ray analysis mine (wt.%): CaO 27.85, FeO 19.15, MgO 8.18, MnO 1.07, CO₂ 43.03, SiO₂ 0.10, Al₂O₃ 0.34: Ca (Fe_{0.545}Mg_{0.413}Mn_{0.031}Ca_{0.011}) (CO₃)₂ ·
 Optical data: A=1.529(19), B=1.720(30), Sign=-
 Additional pattern: To replace 33-282 and 34-517.

References

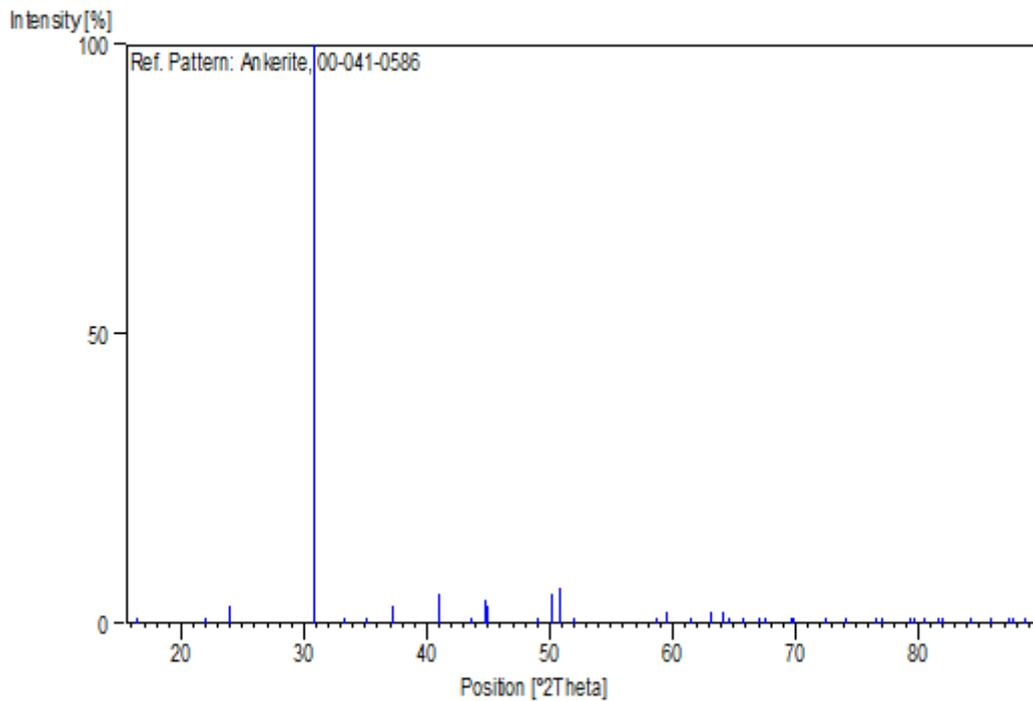
Primary reference: Keller, L., McCarthy, G., North Dakota State University, Fargo, North Dakota, USA., *ICDD Grant-in-Aid*, (1985)
 Structure: Reeder, R., Dollase, W., *Am. Mineral.*, **74**, 1159, (1989)
 Optical data: Deer, W., Howie, R., Zussmann, J., *Rock Forming Minerals*, **5**, 295, (1962)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	0	3	5,39200	16,427	1,0
2	1	0	1	4,05100	21,923	1,0
3	0	1	2	3,71400	23,941	3,0
4	1	0	4	2,90600	30,742	100,0
5	0	0	6	2,69300	33,242	1,0
6	0	1	5	2,55600	35,080	1,0
7	1	1	0	2,41400	37,217	3,0
8	1	1	3	2,20300	40,933	5,0
9	0	2	1	2,07300	43,627	1,0
10	2	0	2	2,02400	44,740	4,0
11	1	0	7	2,02000	44,833	3,0

12	0	2	4	1,85600	49,043	1,0
13	0	1	8	1,81800	50,138	5,0
14	1	1	6	1,79740	50,753	6,0
15	0	0	9	1,79470	50,835	3,0
16	2	0	5	1,75570	52,047	1,0
17	2	1	1	1,57300	58,642	1,0
18	1	2	2	1,55030	59,586	2,0
19	1	0	10	1,50680	61,490	1,0
20	2	1	4	1,47180	63,118	2,0
21	2	0	8	1,45220	64,070	2,0
22	1	1	9	1,44020	64,668	1,0
23	1	2	5	1,42000	65,703	1,0
24	3	0	0	1,39390	67,094	1,0
25	0	1	11	1,38540	67,561	1,0
26	3	0	3	1,34940	69,619	1,0
27	0	0	12	1,34600	69,820	1,0
28	2	1	7	1,30390	72,423	1,0
29	0	2	10	1,27810	74,126	1,0
30	1	2	8	1,24460	76,474	1,0
31	3	0	6	1,23780	76,971	1,0
32	2	2	0	1,20720	79,299	1,0
33	2	0	11	1,20160	79,742	1,0
34	1	0	13	1,19100	80,597	1,0
35	2	2	3	1,17790	81,682	1,0
36	1	1	12	1,17560	81,876	1,0
37	3	1	2	1,14810	84,278	1,0
38	2	1	10	1,12960	85,988	1,0
39	1	3	4	1,11480	87,415	1,0
40	0	1	14	1,11220	87,671	1,0
41	2	2	6	1,10120	88,775	1,0

Stick Pattern



Name and formula

Reference code: 01-083-1762
Mineral name: Calcite
ICSD name: Calcium Carbonate
Empirical formula: CCaO_3
Chemical formula: $\text{Ca}(\text{CO}_3)$

Crystallographic parameters

Crystal system: Rhombohedral
Space group: R-3c
Space group number: 167

a (Å): 4,9896
b (Å): 4,9896
c (Å): 17,0610
Alpha (°): 90,0000
Beta (°): 90,0000
Gamma (°): 120,0000

Calculated density (g/cm³): 2,71
Volume of cell (10⁶ pm³): 367,85
Z: 6,00

RIR: 3,25

Subfiles and Quality

Subfiles: Inorganic
Mineral
Modelled additional pattern
Quality: Calculated (C)

Comments

Sample source: Specimen from Iceland.
ICSD collection code: 100676

References

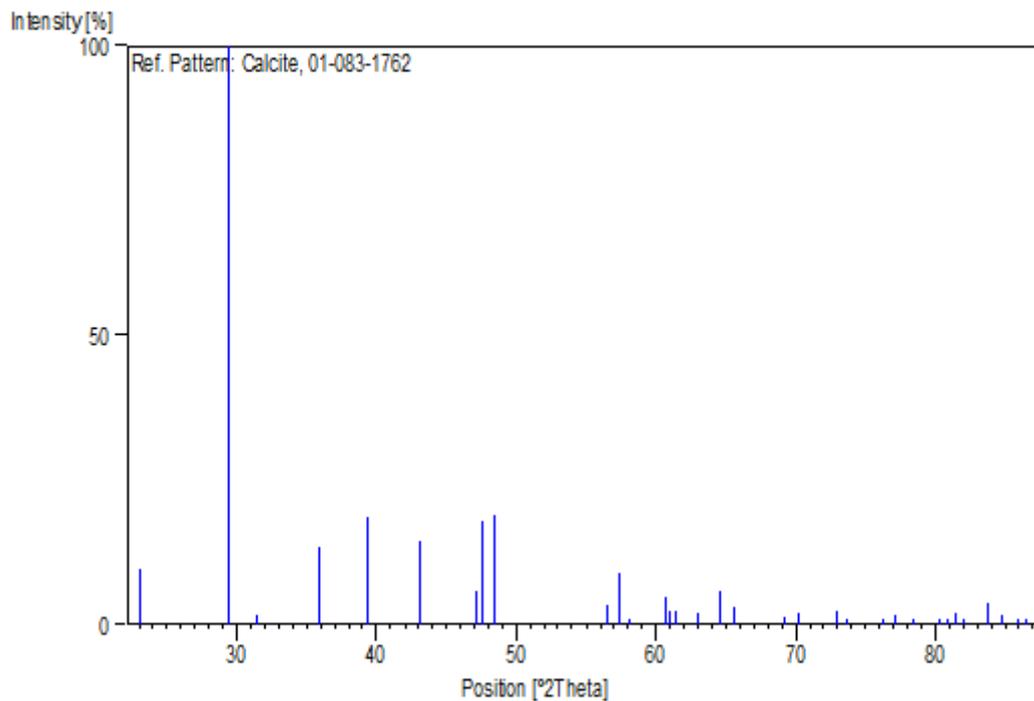
Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++*, (1997)
Structure: Effenberger, H., Mereiter, K., Zemmann, J., *Z. Kristallogr.*, **156**, 233, (1981)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	0	1	2	3,85478	23,054	9,6
2	1	0	4	3,03555	29,400	100,0
3	0	0	6	2,84350	31,435	1,8
4	1	1	0	2,49480	35,969	13,3

5	1	1	3	2,28463	39,409	18,5
6	2	0	2	2,09443	43,158	14,3
7	0	2	4	1,92739	47,114	5,8
8	0	1	8	1,91240	47,506	18,0
9	1	1	6	1,87532	48,505	19,0
10	2	1	1	1,62580	56,562	3,5
11	1	2	2	1,60409	57,398	8,8
12	1	0	10	1,58689	58,079	1,0
13	2	1	4	1,52524	60,667	4,7
14	2	0	8	1,51777	60,998	2,4
15	1	1	9	1,50937	61,374	2,5
16	1	2	5	1,47317	63,052	2,0
17	3	0	0	1,44037	64,660	5,7
18	0	0	12	1,42175	65,612	3,1
19	2	1	7	1,35677	69,186	1,2
20	0	2	10	1,33897	70,240	2,0
21	1	2	8	1,29666	72,892	2,3
22	3	0	6	1,28493	73,666	0,5
23	2	2	0	1,24740	76,271	0,9
24	1	1	12	1,23524	77,160	1,8
25	2	2	3	1,21843	78,426	0,1
26	1	3	1	1,19552	80,230	0,1
27	3	1	2	1,18681	80,940	0,4
28	2	1	10	1,17979	81,523	2,1
29	0	1	14	1,17289	82,106	0,3
30	1	3	4	1,15378	83,769	3,8
31	2	2	6	1,14232	84,804	1,8
32	3	1	5	1,13075	85,880	0,1
33	1	2	11	1,12467	86,457	0,4

Stick Pattern



ANEXO II

Core Data Report			
File Name	C:\Winperm\Data\TFG-2.cor	Well	
Location		Latitude/Longitude	
Field		Formation	JANDAIRA
Company	UFCG	Country	
Lab		Client	
Operator	BLACK	Current Time	11/20/2013 12:35:10 PM

NO.	Sample ID	Depth (m)	Length (cm)	Diam. (cm)	Temp(C)	Baro Pres (PSI)	Conf Pres	Diff Pres (psid)	Upstr Pres (psig)	P1 (psia)	P2 (psia)	Flow Rate (cc/sec)	Kair (md)	Pmean (psia)	Kinf (md)	b (psi)	Beta	Comments
1	TFG_3_A	0	5.326	3.783	23	14.7	2000	60.94	58.93	73.63	12.70	0.085	0.173	43.166	0.0	0.0	0.0	#
2	TFG_3_B	0	5.357	3.757	23	14.7	2000	60.26	58.28	72.98	12.71	0.000	0.0000	42.845	0.0	0.0	0.0	#
3	TFG_3_C	0	5.269	3.716	23	14.7	2000	59.46	57.49	72.19	12.73	0.000	0.0000	42.462	0.0	0.0	0.0	#
4	TFG_3_D	0	5.348	3.721	23	14.7	2000	59.53	57.54	72.24	12.71	0.000	0.0000	42.473	0.0	0.0	0.0	#
5	TFG_3_E	0	4.762	3.714	23	14.7	2000	59.45	57.47	72.17	12.72	0.000	0.0000	42.446	0.0	0.0	0.0	#
6	TFG_3	0	5.004	3.695	23	14.7	2000	59.16	57.25	71.95	12.79	0.016	0.0346	42.369	0.0	0.0	0.0	#
7	TFG_23	0	4.844	3.746	23	14.7	2000	60.07	58.14	72.84	12.77	0.134	0.253	42.803	0.0	0.0	0.0	#

Core Data Report

File Name	C:\Winpore\Data\Gonzaga-Doutorado.cor	Well	
Location		Latitude/Longitude	
Field		Formation	
Company		Country	
Lab		Client	
Operator		Current Time	5/2/2016 8:55:11 AM

NO.	Sample ID	Depth (m)	Dry Weight (gm)	Grain Volume (cc)	Grain Density (gm/cc)	Pore Volume (cc)	Porosity (%)	Hg BulkVol (cc)	Length (cm)	Diam. (cm)	Caliper BulkVol (cc)	Temp(C)	Dated	Comments
1	A1	0.00	197.70	70.7693	2.794	4.225	5.634	0.0	6.651	3.789	74.994	0.0	3/18/2016 10:18:38 AM	
2	A2	0.00	162.74	58.1484	2.799	4.524	7.219	0.0	5.567	3.786	62.672	0.0	3/18/2016 10:20:51 AM	
3	A3	0.00	200.25	72.2834	2.77	6.137	7.826	0.0	6.911	3.801	78.42	0.0	3/18/2016 10:22:47 AM	
4	A4	0.00	211.16	75.7246	2.789	3.752	4.721	0.0	7.030	3.794	79.477	0.0	3/18/2016 10:25:21 AM	
5	B1	0.00	205.43	73.5967	2.791	5.924	7.450	0.0	7.120	3.771	79.521	0.0	3/18/2016 10:27:03	

													AM	
6	B2	0.00	157.02	55.9493	2.806	2.625	4.482	0.0	5.192	3.790	58.574	0.0	3/18/2016 10:30:40 AM	
7	B3	0.00	151.77	54.2308	2.799	2.703	4.748	0.0	5.044	3.791	56.934	0.0	3/18/2016 10:33:39 AM	
8	B4	0.00	147.79	53.5153	2.762	2.579	4.598	0.0	4.988	3.784	56.094	0.0	3/18/2016 10:36:23 AM	