

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

**CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DO SISTEMA POROSO EM ROCHAS
BÁSICAS E ÁCIDAS DO GRUPO SERRA GERAL**

MONIQUE BECKER

ORIENTADOR – Prof. Dr. Evandro Fernandes de Lima

CO-ORIENTADOR – Prof. Dr. Breno Leitão Waichel

Volume I

Porto Alegre – 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

**CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DO SISTEMA POROSO EM ROCHAS
BÁSICAS E ÁCIDAS DO GRUPO SERRA GERAL**

MONIQUE BECKER

ORIENTADOR – Prof. Dr. Evandro Fernandes de Lima

CO-ORIENTADOR – Prof. Dr. Breno Leitão Waichel

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Augusto Sommer – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Claiton Marlon dos Santos Scherer – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dra. Iara Frangiotti Mantovani – Universidade Federal de Santa Catarina

Dissertação de Mestrado apresentada
como requisito parcial para a obtenção do
Título de Mestre em Geociências.

Porto Alegre – 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitor: Jane Fraga Tutikian

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Becker, Monique

Caracterização e quantificação do sistema poroso em rochas básicas e ácidas do Grupo Serra Geral. / Monique Becker. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2017.
[57 f.] il.

Dissertação (Mestrado).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2017.

Orientador(es): Evandro Fernandes de Lima
Coorientador(es): Breno Leitão Waichel

1. Província Paraná-Etendeka. 2. Grupo Serra Geral. 3. Propriedades petrofísicas. 4. Sistema poroso complexo. 5. Microtomografia de raios-x.
I. Título.

CDU 911

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Miriam Alves

CRB 10/1947

AGRADECIMENTOS

À minha família por sempre ser e dar o apoio, não só nesta, mas em todas as etapas e conquistas de minha vida. Aos meus pais principalmente porque sei que fizeram e fazem tudo o que lhes está ao alcance para que eu e o Isac busquemos os nossos objetivos.

Ao João, cujo companheirismo faz meus dias mais felizes.

Aos queridos orientadores, Evandro e Breno, por todos os ensinamentos deste mundo apaixonante das vulcânicas e pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

Ao Bagé, Carla, Jonas, Marcos, Natália Gauer e Natália Famelli pelos debates e por todo o auxílio. Estendo também meus agradecimentos ao Lucas Debatin, Lucas Del Mouro e Luis Biagioni.

À Laryssa, Matheus e Pedro, por dividirem abrigo, serem ouvidos e fomentarem boas jantas durante minhas estadias em Porto Alegre.

Ao Prof. Clóvis por toda sua ajuda na etapa de corte nas amostras, e quando da impossibilidade, por ter oportunizado o contato com a CIENTEC para a realização desta atividade.

Ao Prof. De Ros e seus orientandos por terem auxiliado as fotomicrografias.

Aos membros da banca pela avaliação deste trabalho.

À CAPES pela concessão de bolsa durante meu primeiro ano de mestrado.

À CIENTEC pelos cortes das amostras.

À PETROBRAS, em especial ao Kayo Delorenzo, Isabela Carmo, Marcelo Soares de Almeida e Márcia Zucchetti, por ter oportunizado as aquisições dos dados de petrofísica.

Ao LMPT/UFSC, em especial ao Anderson, Celso, Iara e Vanderlei, pelas aquisições das imagens microtomográficas.

À FEPAM, em especial ao Luiz Fernando e Gustavo e demais chefias imediatas, pela concessão dos dias de capacitação que foram fundamentais para a finalização deste trabalho.

Por fim, minha gratidão a todos com quem convivi e muito aprendi nesta etapa.

RESUMO

A Província Basáltica Continental Paraná-Etendeka registra o vulcanismo fissural que precedeu a fragmentação do Gondwana no Cretáceo. Este imenso vulcanismo denominado no Brasil de Grupo Serra Geral tem sido investigado especialmente por estudos geoquímicos e geocronológicos. Estudos recentes no Rio Grande do Sul incluíram o mapeamento de detalhe e associação de litofácies como ferramentas para a construção estratigráfica deste vulcanismo. Descobertas de hidrocarbonetos em bacias vulcanossedimentares promoveram o estudo das relações estratigráficas e propriedades petrofísicas de sistemas vulcânicos, sendo que devido aos processos primários e secundários, estas rochas geralmente são descritas como sistemas porosos complexos. Na área de estudo, porção sul da Província, há a ocorrência de derrames básicos e ácidos sendo possível caracterizar e quantificar o espaço poroso de amostras de diferentes morfologias e também em diferentes zonas internas de derrames. A quantificação das propriedades petrofísicas comumente é realizada a partir de métodos experimentais, como porosímetro e permeâmetro. Através destas técnicas, as amostras estudadas evidenciaram diferentes valores de propriedades petrofísicas, sendo que a porosidade apresentou uma variação entre 0,11 e 13,08% e a permeabilidade, para a maioria das amostras, ficou abaixo de 0,0004mD. Já a microtomografia de raios-X, técnica recente no estudo de rochas, permite a caracterização tridimensional do sistema poroso através de imagens. A partir desta caracterização, constatou-se que os valores de porosidade obtidos em três diferentes resoluções de imagens não alcançaram os valores obtidos pelo porosímetro, o que pode ser devido à limitação do método, mas que também evidencia que o sistema poroso das rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral é multi-escalar. As heterogeneidades do sistema poroso destas rochas foram observadas principalmente quando são comparados litotipos vulcanoclásticos e coerentes, e diferentes zonas internas de derrames. Além disso, a influência de processos secundários também favorece a complexidade do sistema poroso.

Palavras-chave: Província Paraná-Etendeka; Grupo Serra Geral; propriedades petrofísicas; sistema poroso complexo; Microtomografia de raios-X.

ABSTRACT

The Paraná-Etendeka Volcanic Province records the fissural volcanism that preceded the Gondwana fragmentation during Cretaceous. This huge volcanism is denominated as Grupo Serra Geral in Brazil and has been investigated specially by geochemical and geochronological studies. Recently, researches in Rio Grande do Sul have focused on a detailed mapping and lithofacies association as tools for the construction of the volcanic stratigraphic framework. The discovery of hydrocarbon in volcano-sedimentary basins promoted the study of stratigraphical relations and petrophysical properties of volcanic systems. These features are generally described in volcanic rocks as complex porous systems due to primary and secondary processes. In the south portion of the Province, the occurrence of basic and acid flows enables the characterization and quantification of the pore space in samples from different flow morphologies and different internal flow zones. The quantification of petrophysical properties is commonly executed through experimental methods, such as the porosimeter and permeameter. Through these techniques, the studied samples demonstrated different petrophysical properties. The porosity displays values ranging from 0,11 and 13,08%, and permeability remains lower than 0,0004mD. The X-ray microtomography is a recent technique in rock studies that allows the tridimensional characterization of the porous system through images. Using this technique, the porosity values obtained with three different image resolutions do not reach the results calculated by the porosimeter. These records can be explained due to the method limitation and indicate a multi-scalar porous system for the rocks of Grupo Serra Geral. The heterogeneity of these rocks was mainly observed when lava flows and volcanoclastic samples were compared, as well as different internal zones of the flows. Additionally, the influence of secondary processes also contributes for the complexity of the pore system.

Key-words: Paraná-Etendeka Province; Serra Geral Group; petrophysical properties; complex pore system; X-ray microtomography.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – a) Localização da área de estudo (extraída de Barreto <i>et al.</i> , 2014). b) Localização do Grupo Serra Geral na Bacia do Paraná (modificado de Waichel <i>et al.</i> , 2012).	10
Figura 2 - Perfil estratigráfico (modificado em Rossetti <i>et al.</i> , 2017) com a localização das amostras coletadas e seus aspectos de campo.	13
Figura 3 – Imagem microtomográfica original da amostra NP1A-1 em 3 diferentes resoluções: a) Resolução 1 – aproximadamente 27 μ m. B) Resolução 2 – aproximadamente 2 μ m e c) Resolução 3 – aproximadamente 10 μ m.	15
Figura 4 - Passo a passo do processamento das imagens microtomográficas. a) Imagem original adquirida em tons de cinza, com o VOI selecionado. b) VOI após o recorte (600x600xZ), onde os filtros foram aplicados. c) VOI binarizado, onde as cores preta e azul representam as fases não porosa e porosa, respectivamente.	16

SUMÁRIO

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	5
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	6
1.1 Justificativa	7
1.2 Problemas	8
1.3 Objetivos	8
1.4 Localização	9
CAPÍTULO 2 - CONTEXTO GEOLÓGICO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 Província Basáltica Continental Paraná-Etendeka	9
2.2 Porosidade e permeabilidade em rochas vulcânicas	11
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS	12
3.1 Amostras e área de estudo	12
3.2 Petrografia	14
3.3 Métodos experimentais	14
3.4 Microtomografia de Raios-X	14
CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO DO ARTIGO CIENTÍFICO	17
CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS DA DISSERTAÇÃO	46
ANEXO – COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO ARTIGO	52

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada conforme normas do Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

No capítulo 1 é apresentada a introdução da dissertação, bem como a justificativa, os problemas, os objetivos e a área de estudo.

O capítulo 2 trata brevemente sobre a Província Paraná-Etendeka e também sobre porosidade e permeabilidade em rochas vulcânicas.

No capítulo 3 consta a descrição dos métodos utilizados durante o desenvolvimento deste trabalho.

No capítulo 4 é apresentado o artigo científico *Volcanic pore system quantification and characterization: a case study from Serra Geral Group, southern Brazil* submetido à revista *Journal of Petroleum Geology*. Este artigo foi escrito pela autora durante o desenvolvimento do mestrado e nele são apresentados os resultados obtidos, discussões e conclusões. Destaca-se que a numeração das figuras deste capítulo segue a ordem de apresentação no próprio artigo. Sendo assim, a numeração é independente daquela apresentada nos capítulos 1-3.

O capítulo 5 sintetiza as considerações finais do tema e, por fim, o capítulo 6 lista as referências bibliográficas citadas nos capítulos 1-3. As referências do artigo permanecem no capítulo dedicado ao mesmo (4).

Em anexo consta o comprovante de submissão do artigo.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Grandes Províncias Ígneas (Large Igneous Provinces – LIP's) foram definidas como “...qualquer atividade magmática anômala, onde grandes volumes de magmas, predominantemente basálticos, foram produzidos por mecanismos diferentes daquele responsável pela geração e espalhamento do assoalho oceânico (Coffin e Eldholm, 1994). Dado ao fato desta definição ser muito abrangente, novas definições tem sido propostas por diversos autores (Sheth, 2007; Bryan e Ernst, 2008; Cañón-Tapia, 2010; Bryan e Ferrari, 2013). Bryan e Ernst (2008) sugerem que LIPs sejam definidas como “províncias magmáticas predominantemente máficas (+ultramáficas) intraplaca com extensão areal $>0,1 \text{ Mkm}^2$, e volumes $>0,1 \text{ Mkm}^3$, onde a maior parte do volume de magma foi produzido durante pulsos magmáticos de curta duração (1-5 Ma) e o evento como um todo não excedeu um tempo máximo de $\sim 50 \text{ Ma}$ ”. LIP's podem ser agrupadas em LIPs continentais e LIPs oceânicas (Coffin e Eldholm, 1994). Bryan e Ernst (2008) sugerem também uma subdivisão destas duas grandes categorias, sendo elas: 1) LIP's oceânicas, podendo ser divididas em platôs oceânicos e basaltos de fundo oceânico; 2) LIP's continentais, podendo ser subdivididas em províncias basálticas continentais, margens vulcânicas rifteadas, greenstone belts arqueanos, enxames de dikes gigantes e complexos intrusivos máfico- ultramáficos, e grandes províncias ígneas ácidas (ou silicosas – do inglês Silicic LIPs).

As Províncias Basálticas Continentais são construídas a partir de imensos volumes de lava e intrusões acumuladas em curtos períodos de tempo geológico (Self *et al.*, 1998), tendo sua gênese relacionada principalmente com a formação e fragmentação de supercontinentes. A compreensão destes eventos vulcânicos como modos de colocação e correlações estratigráficas destas sucessões vulcânicas (Jerram, 2002; Waichel *et al.*, 2012) permite uma organização e um melhor posicionamento dos dados geoquímicos e geocronológicos.

Reservatórios de hidrocarbonetos em rochas vulcânicas vêm sendo descritos, principalmente ao longo do Círculo Pacífico e na Ásia, em países como Austrália, Indonésia, Azerbaijão, Namíbia, Japão, Argentina, China e México (Sruoga *et al.*, 2004; Lenhardt e Gotz, 2011; Zou *et al.*, 2013; Pujun *et al.*, 2015). Embora estes reservatórios geralmente sejam influenciados por fraturas (Spence *et al.*, 2014), são considerados como complexos devido a diferentes características físicas dependendo dos processos que controlam a origem e o desenvolvimento do sistema

poroso. Valores de porosidade e permeabilidade variáveis são descritos por diversos autores (Sruoga e Rubinstein, 2007; Schutter, 2003; Zou *et al.*, 2008; Zou *et al.*, 2013; Pujun *et al.*, 2015).

As interpretações sobre as propriedades petrofísicas em rochas vulcânicas envolvem, além das medidas adquiridas, as relações estratigráficas (Couves *et al.*, 2016) que permite localizar no conjunto vulcânico as características associadas aos padrões medidos. No Grupo Serra Geral (Rossetti *et al.*, 2017) foram descritas associações de litofácies e arquitetura de fácies (Waichel *et al.*, 2012; Barreto *et al.*, 2014; Rossetti *et al.*, 2017) e inclusive é considerado um modelo análogo para reservatórios vulcânicos (Reis *et al.*, 2014). Desta forma, este trabalho apresenta a caracterização e quantificação do sistema poroso vulcânico, integrando as relações estratigráficas previamente descritas no estado do Rio Grande do Sul com análises de porosidade e permeabilidade em rochas vulcânicas básicas e ácidas da sucessão vulcânica.

1.1 Justificativa

Reservatórios relacionados com bacias vulcanossedimentares são cada vez mais comuns, sendo fundamental o entendimento de características petrofísicas, como porosidade e permeabilidade, em rochas vulcânicas. Reservatórios com a presença de rochas vulcânicas são descritos como complexos e devido a suas heterogeneidades e diversidade litológica, características físicas e estruturas observadas (Farooqui *et al.*, 2009; Zou *et al.*, 2013), são muito diferentes das rochas epiclásticas de reservatórios convencionais.

Esta realidade estimulou a realização de estudos que busquem entender o potencial destas rochas como reservatórios, avaliando especialmente o sistema poroso nos diferentes litotipos, tanto em rochas vulcanoclásticas como coerente (derrames maciços), bem como em diferentes composições, desde básicas até ácidas.

A imensa exposição de rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral no estado do Rio Grande do Sul, com abrangência desde litotipos básicos até ácidos em diferentes morfologias, aliada aos estudos de associação de litofácies recentes (Barreto *et al.*, 2014; Rossetti *et al.*, 2017) permite a realização de estudos petrofísicos vinculados a estratigrafia. Até o presente momento, estudos voltados a quantificação de porosidade e permeabilidade através de métodos experimentais amplamente utilizados pela indústria de hidrocarbonetos, como porosímetro e permeâmetro, não foram realizados nas rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral.

1.2 Problemas

Estudos no Grupo Serra Geral priorizaram especialmente a compreensão da evolução geoquímica e geocronológica (Bellieni *et al.*, 1984; Mantovani *et al.*, 1985; Melfi *et al.*, 1988; Renne *et al.*, 1992; Peate; Hawkeswort; Mantovani, 1992; Turner *et al.*, 1994; Milner *et al.*, 1995). As limitações destes estudos não favoreceram a construção de uma coluna estratigráfica que correspondesse às sucessões vulcânicas observadas em campo. Estudos recentes, fundamentados em associação de litofácies e apoiados em geoquímica (Waichel *et al.*, 2012; Barreto *et al.*, 2014; Rossetti *et al.*, 2017) permitiram construir uma coluna estratigráfica para o extremo sul do Brasil e compreender a dinâmica do vulcanismo dentro desta porção da Bacia do Paraná.

Zou *et al.*,(2013) define os reservatórios vulcânicos como complexos e que podem ser divididos em poros primários, poros secundários e poros de fraturas. Vários são os processos que controlam o desenvolvimento do sistema poroso, resultando em propriedades, como porosidade e permeabilidade, variáveis. Estas em grande parte estão associadas às texturas originais que podem ser agrupadas em vulcanoclásticas e coerentes (McPhie *et al.*, 1993).

A investigação das rochas do Grupo Serra Geral como potencial reservatório, tanto de óleo e gás, como de água, destacam especialmente o estudo dos padrões das fraturas (Reis *et al.*, 2014) enquanto outros autores destacam os tipos de porosidade (Vieira, 2016; Barreto *et al.*, 2017). Entretanto, até o presente momento, não foi realizada quantificação por métodos experimentais convencionais das propriedades petrofísicas destas rochas.

1.3 Objetivos

Este trabalho envolve a investigação petrofísica (porosidade e permeabilidade) por métodos distintos aplicados nas rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral. As amostras coletadas são de diferentes derrames vulcânicos e de diferentes zonas internas destes derrames, tanto básicos quanto ácidos, compreendendo uma variedade de fácies vulcânicas estudadas. Os objetivos principais foram a quantificação das propriedades petrofísicas a partir de métodos experimentais convencionais e por Microtomografia de Raios-X e de análise petrográfica.

A microtomografia permite a visualização tridimensional do sistema poroso, e por esta razão, objetiva-se também a caracterização dos diferentes tipos de poros das amostras.

1.4 Localização

A região de estudo deste trabalho foi dividida em duas áreas principais, ambas no estado do Rio Grande do Sul (figura 1a). A primeira delas é no perfil Santa Cruz do Sul – Herveiras, onde as exposições ocorrem em cortes de estrada ao longo da Rodovia RSC 153. A outra área compreende afloramentos em corte de estrada e em pedreiras nos municípios de Nova Pádua e São Marcos.

CAPÍTULO 2 - CONTEXTO GEOLÓGICO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Província Basáltica Continental Paraná-Etendeka

A Província Basáltica Continental Paraná-Etendeka tem sua origem relacionada ao vulcanismo fissural que precedeu a fragmentação do supercontinente Gondwana no Cretáceo, entre 135 e 131 Ma (Janasi *et al.*, 2011). Esta Província ocorre nos continentes africano e sul-americano, sendo que neste encontra-se distribuído aproximadamente 90% do volume de magma produzido. No Brasil, esta sucessão de rochas vulcânicas foi por muito tempo descrita como Formação Serra Geral, atingindo cerca de 1700 metros no centro da Bacia do Paraná (Almeida, 1986; figura 1b).

Na porção sul da Província, basaltos e andesitos basálticos de afinidade toleítica são predominantes, sendo que no topo da sequência vulcânica efusivas de composição ácida são descritas (Melfi *et al.*, 1988; Lima *et al.*, 2012; Waichel *et al.*, 2012; Polo e Janasi, 2014). Ambas as rochas foram geoquimicamente divididas em grupos de alto - Ti ou baixo - Ti de acordo com os conteúdos de TiO_2 (Bellieni *et al.*, 1984; Mantovani *et al.*, 1985). Peate, Hawkeswort e Mantovani (1992) subdividiram a sequência básica em 6 tipos de magma com base em elementos maiores e traços, sendo eles Urubici, Pitanga, Paranapanema, Gramado, Esmeralda e Ribeira. Já as rochas ácidas foram descritas nos grupos Palmas e Chapecó por Mantovani *et al.* (1985).

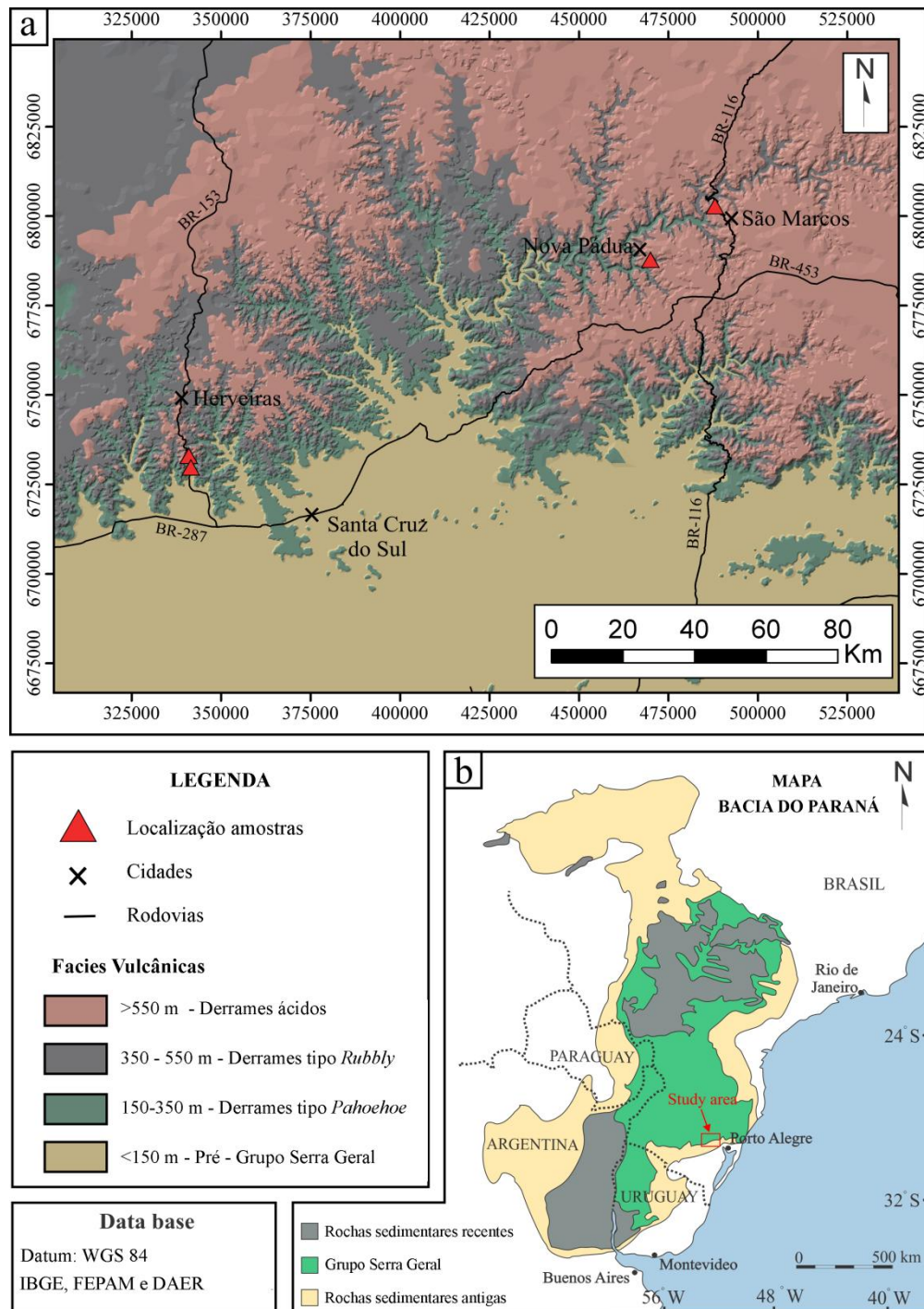


Figura 1 – a) Localização da área de estudo (extraída de Barreto *et al.*, 2014). b) Localização do Grupo Serra Geral na Bacia do Paraná (modificado de Waichel *et al.*, 2012).

Recentemente Rossetti *et al.* (2017) propôs a divisão do Grupo Serra Geral para a sequência de baixo - Ti, definindo as Formações Torres, Vale do Sol, Palmas e Esmeralda de acordo com a arquitetura e estruturas internas dos derrames. A Formação Torres compreende as primeiras manifestações do vulcanismo, sendo caracterizada por derrames do tipo *pahoehoe*, que quimicamente são os mais

primitivos. Andesitos basálticos com morfologia de derrames *rubbly pahoehoe* correspondem à Formação Vale do Sol, que marca o clímax da atividade magmática do Grupo. Dacitos e riolitos em derrames tabulares, domos de lavas ou sistemas de condutos compreendem a Formação Palmas. No topo do Grupo, a Formação Esmeralda é caracterizada por estruturas de fluxo e distribuição de derrames semelhantes à Formação Torres.

2.2 Porosidade e permeabilidade em rochas vulcânicas

De acordo com suas texturas originais as rochas vulcânicas podem ser divididas em litotipos vulcanoclásticos ou coerentes (McPhie *et al.*, 1993). Esta ampla diversidade é vinculada a diferentes e complexos processos de *emplacement*, o que explica a variedade dos reservatórios vulcânicos e suas heterogeneidades (Zou *et al.*, 2013). Adicione-se o fato das características petrofísicas iniciais dependerem de processos primários, mas que também podem ser modificadas por diferentes processos secundários (Sruoga *et al.*, 2004; Sruoga e Rubinstein, 2007; Couves *et al.*, 2016).

A porosidade primária tem sua origem e desenvolvimento em processos como fragmentação de fluxo, liberação de gases, taxas de resfriamento, cristalização, soldagem e compactação. Sruoga e Rubinstein (2007) e Barreto *et al.* (2017) descrevem como porosidade primária os tipos vesicular, intergranular, interclastos, intercrystalino e intracrystalinos. A vesiculação e coalescência pode desenvolver a conectividade dos poros (Colombier *et al.*, 2017), favorecendo a percolação de fluidos.

Os processos secundários são responsáveis por modificar ou criar poros e se devem a interação entre a rocha e o ambiente (fraturamentos e alteração hidrotermal, por exemplo). Estes processos geralmente estão relacionados à dissolução dos constituintes primários, mas precipitação de minerais secundários também ocorre, o que pode parcialmente ou completamente obstruir os poros (Rogers *et al.*, 2006), reduzindo tanto a porosidade quanto a permeabilidade. Como porosidade secundária, podem-se citar os tipos esponjiforme, drusa, móldico e fraturas (Sruoga e Rubinstein, 2007; Barreto *et al.*, 2017).

A permeabilidade em rochas vulcânicas geralmente desenvolve-se por processos de resfriamento, brechação ou faturamento tectônico (Couves *et al.*, 2016).

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Amostras e área de estudo

Ao longo de um perfil estratigráfico que compreende basicamente duas áreas do Grupo Serra Geral (figura 1a), um total de 11 amostras foram coletadas (figura 2). A primeira área refere-se aos derrames básicos que afloram ao longo da Rodovia RSC-153. Esta sucessão vulcânica e sua estratigrafia foi previamente descrita por Barreto *et al.* (2014) e Rossetti *et al.* (2017), onde são relatados derrames do tipo *pahoehoe* e *rubbly*, além de pequenos lobos (lava toes) e intertraps de arenitos. Nos derrames, as zonas de base, núcleo e topo são identificadas. As amostras S1 e S2 compreendem a crosta superior de lobos *pahoehoe* com espessura de 0,5 e 1 metro, respectivamente. As amostras S4 e S6 são da crosta inferior, com presença de vesículas esféricas e do tipo *pipe*. Tanto na crosta inferior, quanto superior, as vesículas são preenchidas por minerais secundários (Barreto *et al.*, 2017). Já a amostra S3 foi coletada no núcleo do derrame, onde estruturas de segregação como cilindro de vesículas foram observadas.

Os derrames *rubbly pahoehoe* apresentam um núcleo maciço (amostra S5) com juntas de resfriamento. A amostra NP1A, foi coletada no município de Nova Pádua, e corresponde ao topo brechado de *rubbly pahoehoe*. Neste local, ocorre o contato com derrame ácido (amostra NP1B), sendo caracterizado por apresentar foliação de fluxo horizontal na base e vesículas alongadas.

As demais amostras (SM01, SM02 e SM03) também são de derrames ácidos e foram coletadas no município de São Marcos. Nestes derrames observa-se foliação de fluxo vertical que ascende e que apresenta variações entre vitrófiros cinzas a cinza-avermelhado. Lima *et al.* (2012) descreveu estes derrames como raízes de diques alimentadores de riódacitos. Vesículas e fraturas preenchidas por uma assembleia mineral de quartzo e zeólitas em derrames ácidos foram identificadas por Murata *et al.* (1989).

As amostras estudadas neste trabalho pertencem aos magmas tipos Gramado e Palmas (Peate *et al.*, 1992) e as Formações Torres, Vale do Sol e Palmas descritas por Rossetti *et al.* (2017).

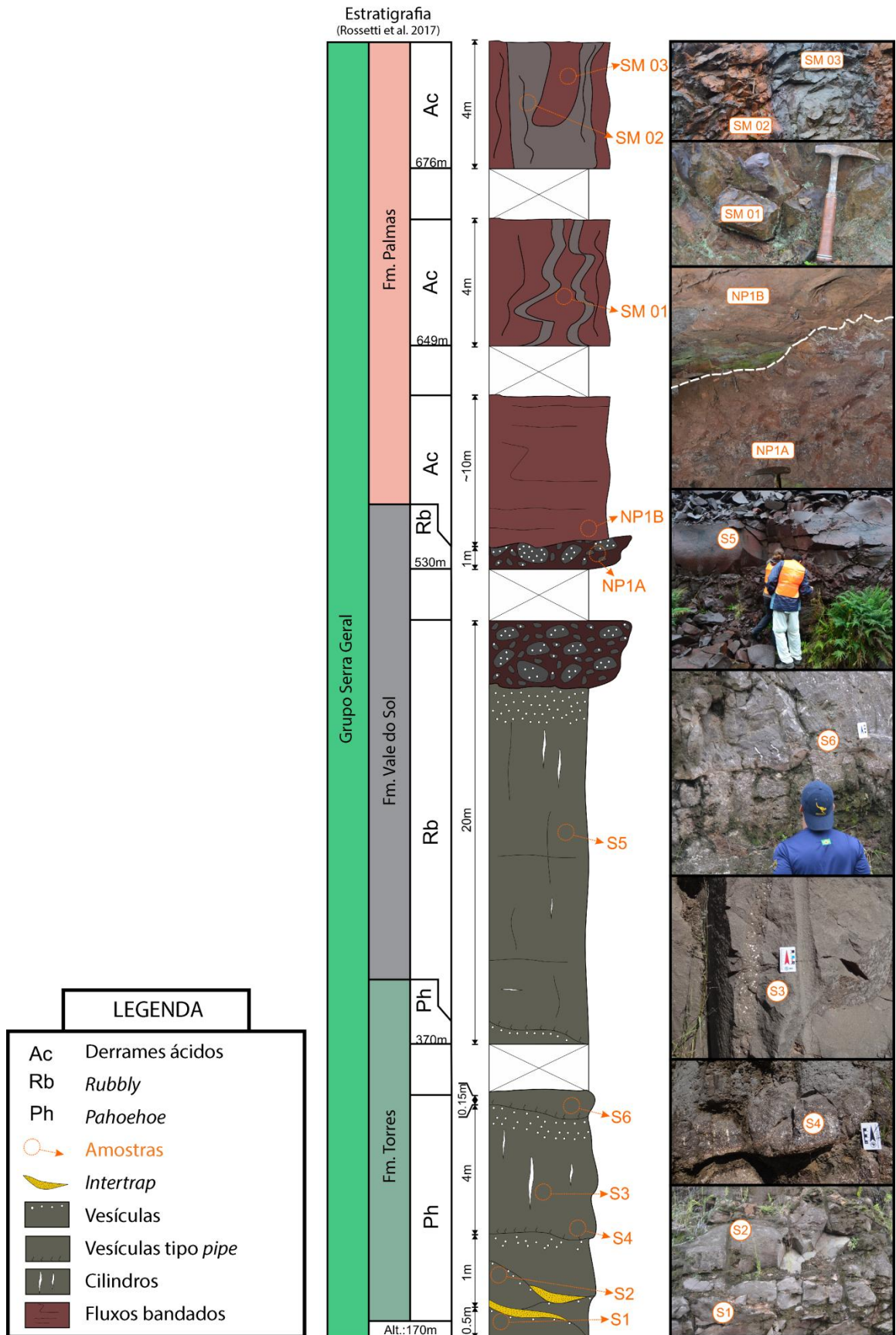


Figura 2 - Perfil estratigráfico (modificado de Rossetti *et al.*, 2017) com a localização das amostras coletadas e seus aspectos de campo.

3.2 Petrografia

A etapa da petrografia envolveu a descrição de lâminas delgadas, impregnadas com resina epóxi azul. A análise microscópica, além de identificar as fases minerais e texturas das amostras, foi conduzida com a contagem de 300 pontos através do software Hardledge que se baseia no Petroledge (De Ros *et al.*, 2007). Como as lâminas estavam impregnadas, foi possível identificar e quantificar os poros existentes nas amostras.

A terminologia dos tipos de porosidade descritos neste trabalho, basearam-se nas descrições de Sruoga e Rubinstein (2007) e Barreto *et al.* (2017).

3.3 Métodos experimentais

Para se obterem valores de porosidade, densidade e permeabilidade foram utilizados porosímetro a gás (He) e permeâmetro a gás (N), sendo estes métodos comumente utilizados na indústria do petróleo. As análises foram feitas pelo Laboratório Weatherford (<https://labs.weatherford.com>) com apoio da PETROBRAS, e para tal foi utilizado como pressão de confinamento 1000 psi, aproximando-se as condições de *emplacement* das lavas. Para estas análises, as amostras coletadas foram cortadas em plugues verticais e horizontais, com as dimensões de 1 polegada de diâmetro por aproximadamente 2 polegadas de comprimento.

3.4 Microtomografia de Raios-X

A microtomografia é uma técnica, inicialmente usada em investigações na área médica, mas que recentemente tem sido aplicada também para análise de rochas (Baker *et al.*, 2012). A aquisição das imagens por esta técnica baseia-se no mapeamento do coeficiente de atenuação linear de raios-X que passam pela amostra (Fernandes *et al.*, 2012), sendo este coeficiente uma propriedade intrínseca de cada material, em função de sua densidade e composição (Baker *et al.*, 2012). Detalhamento e uso deste método podem ser obtidos em Voltolini *et al.* (2011), Fernandes *et al.* (2012) e Mantovani (2013).

A partir da técnica, obtém-se uma imagem tridimensional em tons de cinza das estruturas internas do material em escala micrométrica (Landis e Keane, 2010). Desta forma é possível, no caso de sistemas porosos, realizar um mapeamento tridimensional das fases porosas e não porosas das amostras. Esta técnica recentemente vem sendo utilizada para análises de rochas, uma vez que obtém características qualitativas e quantitativas 3D de volume, tamanho, forma, distribuição e conectividade de poros em microescala (Machado, 2012).

No caso de rochas vulcânicas, Voltolini *et al.* (2011) utilizou este método para estudar as texturas e orientação preferencial de cristais e vesículas em escórias e púmices do Stromboli, Etna e Campi Flegrei (Itália). Mais recentemente, Couves *et al.* (2016) utilizou o método em amostras geologicamente recentes de diferentes derrames basálticos de Tenerife (Ilhas Canárias). O estudo quantificou a porosidade e a conectividade das amostras vulcânicas, demonstrando que a aplicação desta técnica pode ser fundamental para o entendimento de rochas reservatório.

Neste trabalho, as imagens microtomográficas foram adquiridas pelo equipamento ZEISS XRadia Versa XRM-500 no Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas (LMPT) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) (<http://www.lmpt.ufsc.br>). Para as aquisições, foram utilizados os mesmos plugues previamente usados nos métodos experimentais, com uma resolução espacial das imagens de aproximadamente 27 μm (Resolução 1 - figura 3a). Posteriormente, os plugues S3-2, S4-1, S6-2, NP1A-1 e SM02-2 foram imageados com resolução aproximada de 2 μm (Resolução 2 - figura 3b) e o plugue NP1A-1 também na resolução intermediária de 10 μm (Resolução 3 - figura 3c).

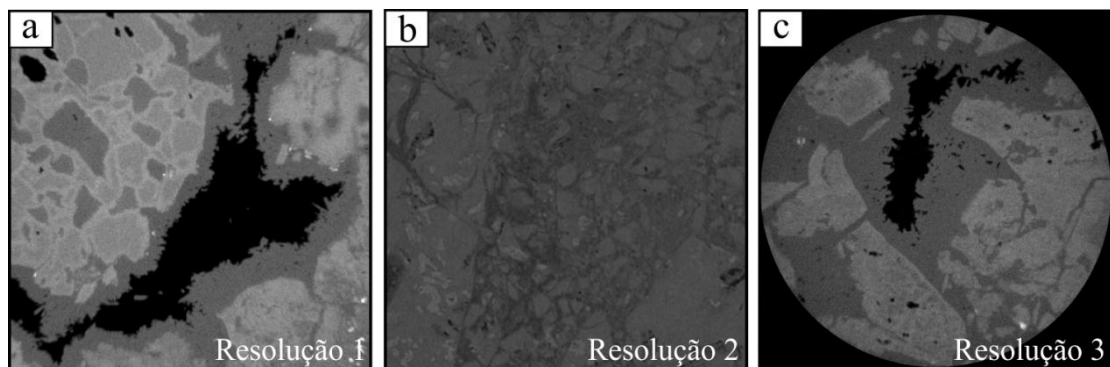


Figura 3 – Imagem microtomográfica original da amostra NP1A-1 em 3 diferentes resoluções: a) Resolução 1 – aproximadamente 27 μm . B) Resolução 2 – aproximadamente 2 μm e c) Resolução 3 – aproximadamente 10 μm .

A escolha destes plugues para a aquisição de dados em diferentes resoluções fundamentou-se no fato destes apresentarem valores de porosidade muito diferentes quando se comparou os resultados obtidos pelo método experimental e pelas imagens da primeira resolução do microtomógrafo. Desta forma, buscou-se em outras resoluções encontrar a porosidade que não foi observada em 27 μm .

Após a aquisição das imagens, foi realizado o processamento dos dados com o software Avizo Fire (FEI). As imagens originais (figura 4a) são recortadas em Volumes de Interesse (VOI), sendo este o volume selecionado para efetivamente

ocorrer a análise (figura 4b) porque as imagens originais são muito grandes e, devido à limitação computacional, não conseguem ser processadas. Em cada resolução obtida, o VOI possui as dimensões de $600 \times 600 \times Z$ voxels, sendo Z o eixo de comprimento dos plugs. Desta forma, buscou-se sempre o maior valor possível de Z para os plugs, fazendo com que o VOI fosse o maior possível e, portanto, mais representativo. Após o recorte, as imagens foram filtradas e binarizadas. A binarização é o procedimento na qual as imagens, originalmente em tons de cinza, são segmentadas em apenas duas cores, sendo uma delas a fase porosa e a outra a fase não porosa (figura 4c). Após este procedimento, ocorreu a caracterização do sistema poroso.

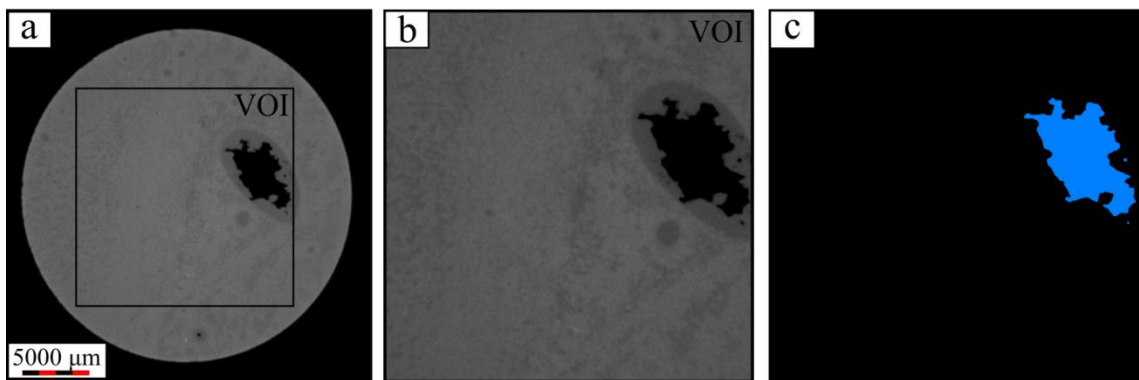


Figura 4 - Passo a passo do processamento das imagens microtomográficas. a) Imagem original adquirida em tons de cinza, com o VOI selecionado. b) VOI após o recorte ($600 \times 600 \times Z$), onde os filtros foram aplicados. c) VOI binarizado, onde as cores preta e azul representam as fases não porosa e porosa, respectivamente.

CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO DO ARTIGO CIENTÍFICO

VOLCANIC PORE SYSTEM QUANTIFICATION AND CHARACTERIZATION: A CASE STUDY FROM SERRA GERAL GROUP, SOUTHERN BRAZIL

BECKER, M.¹, LIMA, E.F.¹ and WAICHEL, B.L.²

¹ Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul; e-mail address: mobecker29@gmail.com; evandro.lima@ufrgs.br;

² Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail address: breno@cfh.ufsc.br;

Abstract: Pahoehoe, rubbly pahoehoe and acid flows samples from Serra Geral Group (southern Brazil) were investigated in order to quantify and characterize the pore system in volcanic rocks, considering stratigraphic relations previously reported in Paraná-Etendeka Igneous Province. The study was based on experimental petrophysical measurements integrated with X-Ray Microtomography (μ -CT) image analysis in vertical and horizontal plugs of each sample. The work also provides petrographic analyses in order to recognize the pore types in thin section. The experimental measurements display porosities between 0.11 and 13.08%, with the highest value obtained for the volcanoclastic sample, and most of the plugs exhibited permeability values lower than 0.0004mD. The diversity of experimental values was mainly observed when different volcanic textures (lava flows and volcanoclastics), different internal flow zones (flow core and upper crust pahoehoe) and even the same internal zone (lower crust pahoehoe) of different flows were compared. These results indicate the variable porosity and permeability values for volcanic rocks. In the petrographic study and μ -CT images, primary porosity types, such as sieve intracrystalline, vesicular and interflow laminar, were observed. The pore system also reveals the influence of secondary processes, with secondary mineralogy precipitation and secondary porosity generation, such as fracture, spongy, interclast and intra-matrix porosity types. The porosity values obtained by μ -CT in three scale images resolutions do not reach those measured by experimental methods, which is attributed to the multi-scale pores in volcanic rocks. The resolution limitation should also be considered to these results, since pores smaller than the resolution image are not observed. On the other hand, the use of μ -CT allowed the visualization of porosity variation, being useful to characterize the pore system. The results presented demonstrate that volcanic rocks from Serra Geral Group have heterogeneous pore systems due to the varied porosity and permeability values,

which can be attributed to the processes that control the origin and development of pores.

Key words: Serra Geral Group, volcanic rocks, pore system, petrophysical properties, X-Ray Microtomography.

1. INTRODUCTION

Recent discoveries of hydrocarbon reservoirs or even petroliferous basins which are influenced by volcanic rocks have increased the interest on volcanic systems. Examples of effective volcanic reservoirs are reported in basins from Argentina (Sruoga *et al.*, 2004), China (Pujun *et al.*, 2015) and Mexico (Lenhardt & Gotz, 2011), comprising lava flows and volcanoclastic rocks, of which the most are distributed around the Pacific Rim and in Asia (Zou *et al.*, 2013). Besides the importance to the oil and gas industry, these rocks are also related to groundwater reservoirs (Saar & Manga, 1999; Jefferson *et al.*, 2006), geothermal systems (Sigurdsson & Stefansson, 2002) and CCS (Carbon Capture and Storage) studies (Matter *et al.*, 2016).

All of them are closely related to the capacity of volcanic rocks to be effective reservoirs, which requires studies to understand the processes controlling the origin and development of porous space (Sruoga & Rubinstein, 2007). Volcanic rocks are generally characterized by complex and diverse formation conditions, inducing structures and physical characteristics different from each other (Farooqui *et al.*, 2009; Zou *et al.*, 2008). High heterogeneity and variable porosity and permeability values are widely reported (Sruoga & Rubinstein, 2007; Schutter, 2003; Zou *et al.*, 2008; Zou *et al.*, 2013; Pujun *et al.*, 2015).

The outcrops from the Serra Geral Group (Rossetti *et al.*, 2017) can be widely studied, including as analogues to reservoir rocks. Reis *et al.* (2014) reported that this volcanic sequence can constitute a reservoir of hydrocarbons and groundwater due to its late-stage fracturing. However, the comprehension of stratigraphic relations and petrophysical measurements is substantial in order to achieve a full interpretation (Couves *et al.*, 2016), considering the wide range of petrophysical properties previously described. In this context, the present work aims to quantify and characterize the volcanic pore system using petrophysical measurements through experimental methods in addition to X-Ray Microtomography (μ -CT) image analysis and petrographic studies.

2. GEOLOGICAL CONTEXT

The Paraná-Etendeka Igneous Province (PEIP) has preceded the opening of the South Atlantic Ocean in Early Cretaceous time, with the marked eruption peak at 135 to 131 Ma (Janasi *et al.*, 2011). The volcanic rocks are distributed over South America and south-western Africa portions, and in Brazil it comprises an area of approximately 900,000 km² in Paraná basin (Frank *et al.*, 2009; Figure 1b), reaching up to 700 m thickness in average (Piccirillo & Melfi, 1988).

This volcanic succession is predominantly composed of tholeiitic and andesitic basalts, divided by Bellieni *et al.* (1984) in low-TiO₂ and high-TiO₂ groups. In the southern PEIP the Gramado and Esmeralda magma types from the low-Ti group are dominant (Peate *et al.*, 1992). Acid lava flows are also present on the top of the pile, mainly in southern Brazil (Melfi *et al.*, 1988), corresponding to Palmas magma-type (Peate *et al.*, 1992).

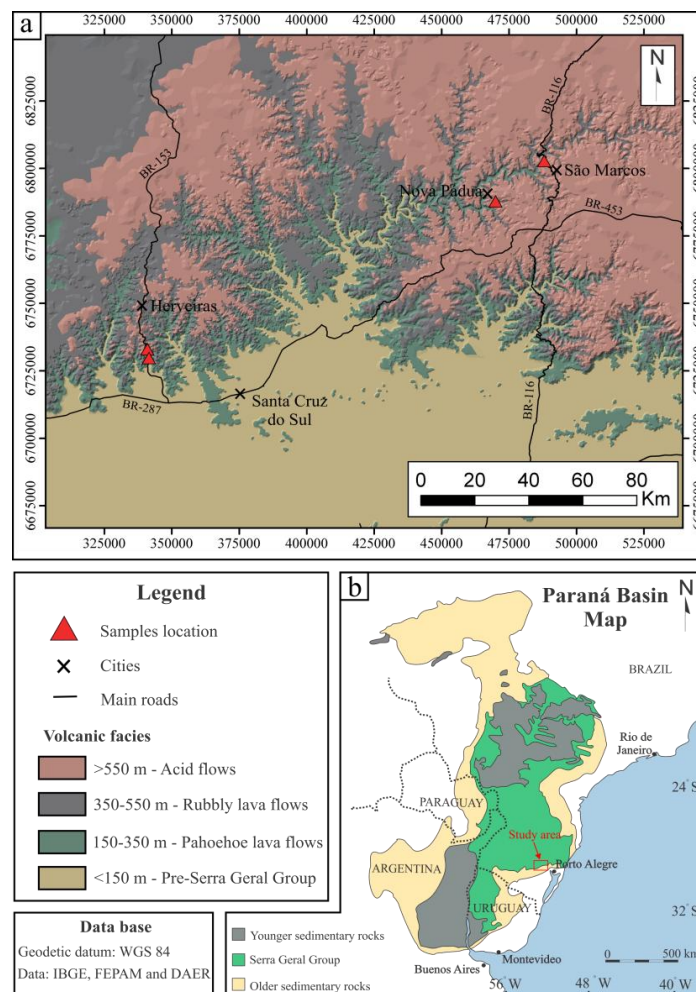


Figure 5 – a) Geological map of the studied area with the sampling location (based on Barreto *et al.*, 2014). b) Simplified geological map of the Paraná Basin (Waichel *et al.*, 2012), highlighting the Serra Geral Group (Rossetti *et al.*, 2017) and the study area.

The volcanic sequence was initially referred as Serra Geral Formation, though recently Rossetti *et al.* (2017) proposed to name the southern portion of the volcanic package as Serra Geral Group (Figure 1b), comprising Torres, Vale do Sol, Palmas and Esmeralda formations. Torres Formation (TF) is formed by pahoehoe lava flows from early stages of volcanic activity, which chemically are the most primitive basalts. These flows are formed by lava toes (<0.5m), lobes (0.5-2.5m) and sheet-like lobes. TF is covered by basaltic andesitic lavas from Vale do Sol Formation (VSF), which are lava flows of rubbly pahoehoe morphology with an average thickness of 35-45m and correspond to the climax of volcanic activity (Rossetti *et al.*, 2017).

Palmas Formation (PF) corresponds to tabular flow units, lava domes and complex conduit systems of acid composition such as dacites and rhyolites. Esmeralda Formation (EF) is the uppermost unit and is characterized by flow structures and a distribution similar to Torres Formation, though with a smaller areal extent (Rossetti *et al.*, 2017).

3. POROSITY AND PERMEABILITY IN VOLCANIC ROCKS

Volcanic reservoirs are dependent on the emplacement conditions and the late diagenesis, controlled by primary and secondary processes that can modify the original porosity and permeability (Sruoga *et al.*, 2004; Sruoga & Rubinstein, 2007; Zou *et al.*, 2013; Couves *et al.*, 2016). Primary processes, such as welding, cooling and crystallization, gas release and flow fragmentation are responsible for the origin and development of primary porosity. On the other hand, secondary processes take place from the interaction between rock and the environment, including hydrothermal alteration and fracturing, which are responsible for modifying the original pore space or creating a new one.

Vesicular, intergranular, interclast, interflow laminar, intercrystalline and intracrystalline sieve are examples of primary porosity types in volcanic rocks described by Sruoga & Rubinstein (2007) and Barreto *et al.* (2017). According to Zou *et al.* (2013), the primary pore types in lavas are favorable for deep hydrocarbon reservoirs since they are not vulnerable to compaction. Still, vesiculation and bubble coalescence could develop pore connectivity, while densification processes such as compaction, sintering and welding decrease the percolation (Colombier *et al.*, 2017).

Secondary porosity in volcanic rocks are described as spongy, lacy, drusy, moldic and fracture (Sruoga and Rubinstein, 2007; Barreto *et al.*, 2017). Except from

tectonic fractures, the other types are closely related to dissolution of primary constituents and precipitation of secondary minerals. This precipitation can partially or completely occlude the open spaces (Rogers *et al.*, 2006), reducing dramatically porosity and permeability. Among the post-cooling processes, both hydrothermal alteration and tectonic deformation might cause significant changes in the porosity and permeability.

According to Couves *et al.* (2016), permeability is mainly developed either through primary cooling joints and brecciation, or through the development of tectonic fractures. The same authors described that circulation of fluids through a flow sequence may result in the deposition of secondary minerals, which tends to occlude porosity, although the amount of microporosity within the rock may increase.

4. MATERIALS AND METHODS

4.1 SAMPLES

A total of 11 samples were collected along a stratigraphic profile (Figure 2), comprising two main study areas as shown in Figure 1a. The volcanic succession and stratigraphic relations in this region have already been studied by Barreto *et al.* (2014) and Rossetti *et al.* (2017). The Santa Cruz do Sul – Herveiras profile corresponds to lava toes, lava lobes and sheet-like lobes with typical pahoehoe structures, in addition to rubbly pahoehoe lava flows. In pahoehoe lava flows (Torres Formation) internal zones are observed, such as an upper crust (S1 and S2 samples), a massive core (S3 sample) and a lower crust with pipes or spherical vesicles (S4 and S6 samples). The vesicles are typically filled by secondary minerals and the flows display segregation structures such as vesicle cylinders and diktytaxitic voids (Barreto *et al.*, 2017). Aeolian sandstones intertraps are present between pahoehoe lava flows. Rubbly pahoehoe lava flows (Vale do Sol Formation) display a massive core with irregular joints (S5 sample) and a brecciated flow top (Barreto *et al.*, 2014; Rossetti *et al.*, 2017).

At Nova Padua location, acid lavas (Palmas Formation) cover the rubbly brecciated flow top (NP1A) and are characterized by elongated vesicles and horizontal flow foliation at the base of the flow (NP1B). On the other hand, in São Marcos, it is possible to recognize a vertical flow foliation ascending, which varies between a red-brown to grey vitrophyre (SM01, SM02 and SM03), described as the root of feeder dykes of rhyodacites (Lima *et al.*, 2012). Murata *et al.* (1987) described

in the acid flows of Serra Geral Group the presence of a few vesicles and an assemblage of quartz and silicic zeolites filling the fractures.

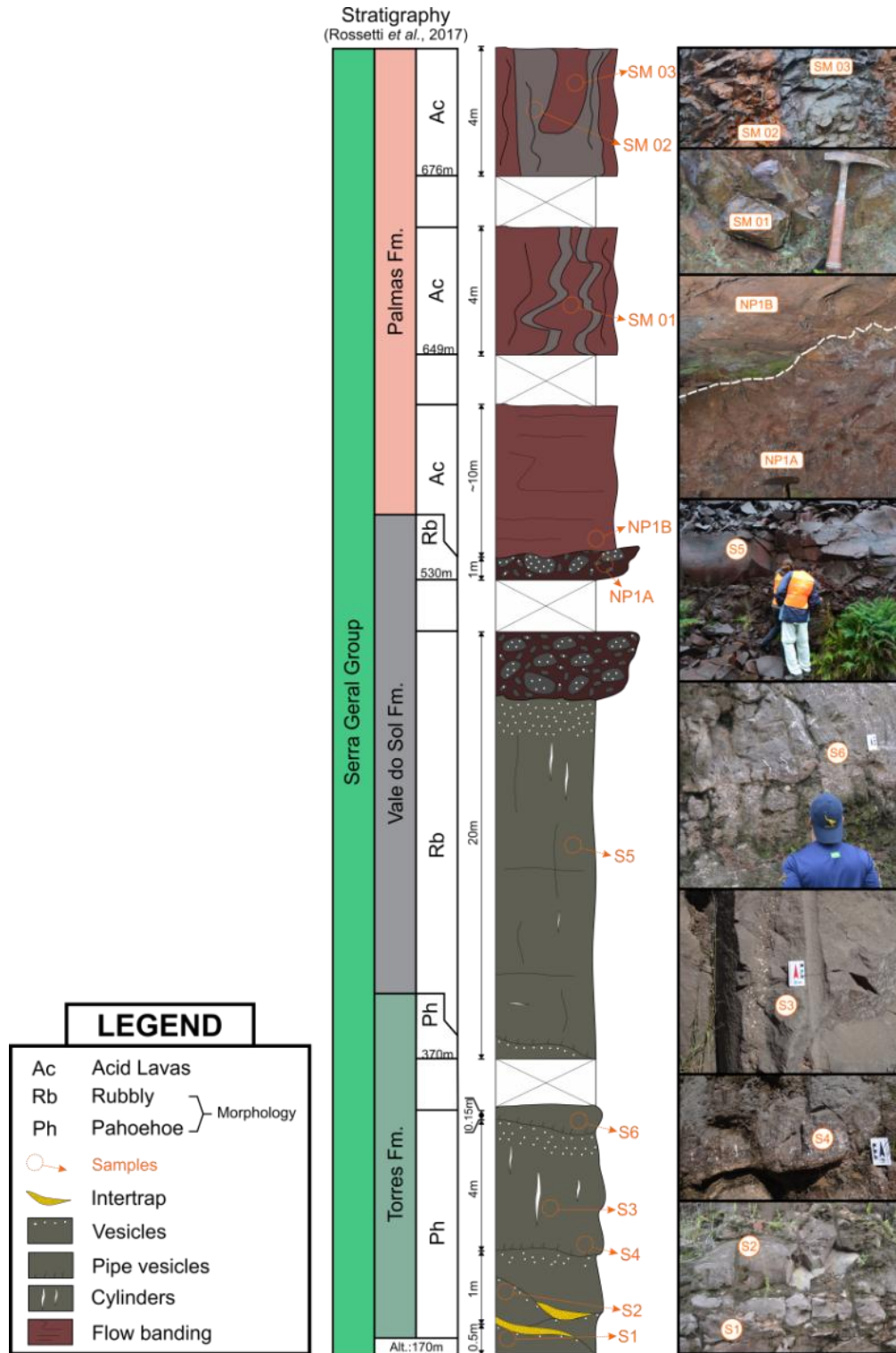


Figure 6 – Schematic stratigraphic log from Serra Geral Group comprising Torres, Vale do Sol and Palmas Formation. The stratigraphic framework is based on Rossetti *et al.*, 2017. The illustration evidences the samples internal zone position inside the lava flows and the field photographs.

Besides the 11 thin sections, samples were cut off in vertical (name ending with -1) and horizontal (name ending with -2) plugs, both 1 inch in diameter and 2 inches long. The plugs were used for experimental petrophysical measurements and X-ray microtomography imaging. Some of these plugs were resampled in order to acquire different spatial resolution images.

4.2 PETROGRAPHY

The modal analysis was conducted to describe the textures and distribution of primary and secondary mineralogy and pore types, using optical microscopy. The modal counting of 300 points was executed to quantify the porosity of the thin sections impregnated with blue epoxy resin. This step was performed through the software Hardledge based on the Petroledge system and adapted to igneous rocks (De Ros *et al.*, 2007). The porosity terminology used in this paper follows the pattern of Sruoga and Rubinstein (2007) and Barreto *et al.* (2017).

4.3 EXPERIMENTAL PETROPHYSICAL MEASUREMENTS AND μ -CT ANALYSIS

Porosimetry and permeameter measurements are methods commonly used in oil and gas industry to obtain absolute values. In this work, a helium gas porosimeter and a nitrogen permeameter were used to obtain porosity, density and permeability data of each plug. The measurements were taken by Weatherford Laboratories with a 1000 psi confining pressure.

It should be noted that the analysis in experimental methods only consider the connected pores. Furthermore, the porosity values determined by these methods comprehend every sample scale (Mantovani, 2013) and the fluids (for example He gas) are capable to achieve pores in nanometric scale (Mikhail and Robens, 1983), which means that porosity and permeability are normally higher than those calculated by μ -CT images.

The X-ray microtomography is a non-invasive technique that recently has been applied to rock studies (Baker *et al.*, 2012). From this technique, a gray-scale 3D image from the internal structure of the material with micrometric spatial resolution is obtained (Landis & Keane, 2010). The images are generated by the mapping of the linear attenuation coefficient - which is a particular property of each material, depending on composition and density (Baker *et al.*, 2012) - of X-ray

passing through a sample. In this way, the technique allows the 3D mapping of porous rocks since they are composed by different phases: porous phase and non-porous phase (or mineral phase).

Image acquisition and data analysis

The μ -CT images were acquired through ZEISS XRadia Versa XRM-500 scanner at Laboratory of Porous Media and Thermophysical Properties (LMPT), Federal University of Santa Catarina. The images were acquired in Scale 1 (approximately 27 μm of resolution) to all plugs, in Scale 2 (approximately 2 μm of resolution) to S3-2, S4-1, S6-2, NP1A-1 and SM02-2 plugs, and finally Scale 3 (10 μm of resolution) to NP1A-1 plug. Details of each scale are found in Table 1.

Avizo Fire software (FEI) was used to image processing as well as to the characterization and quantification of the porous system observed. The Volume of Interest (VOI), which is the relevant region where the analyses were taken, was initially reduced to a rectangular cube with 600x600xZ voxels, where Z is the maximum slices number obtained from each sample (Table 1) and correspond to the orthogonal direction to all generated slices (Z axis). The X and Y axis are parallel do the basal plane of the plugs. After the VOI selection, the 3D images were processed and segmented in two different phases (pores and non-pores) for, the pore characterization and quantification.

5. RESULTS

5.1 PETROGRAPHY

The primary mineral composition of the pahoehoe lava flows from Torres Formation is constituted by plagioclase, augite, olivine and opaque minerals. The upper crust (S1 and S2 samples) and flow core of pahoehoe (S3 sample) are aphanitic, comprising a holocrystalline groundmass, with intergranular and sub-ophitic textures. Olivine crystals are replaced by iddingsite/bowlingite. Intracrystalline sieve porosity occurs in plagioclase crystals (Figure 3a) and dyktytaxitic texture is characterized by microcavities which are partially (spongy porosity) to completely filled (amygdaloidal texture) by secondary mineral assemblages (Figure 3b and d). Fracture porosity is also identified (Figure 3c).

Table 1- Description of vertical (-1) and horizontal (-2) plugs and image resolutions obtained to each scale image. The respective Z size used to VOI analysis of each Scale* are also presented. X and Y sizes of all VOI are 600. *Scale 3 was done only to NP1A-1 plug, with a resolution of 10 μm and VOI of 600x600x800 voxels.

Samples	Internal zone and flow type description	Plug	Scale 1		Scale 2	
			Resolution (μm)	Z size	Resolution (μm)	Z size
S1	Upper crust pahoehoe	S1-1	27.2	1550	-	-
		S1-2	27.2	1350	-	-
S2	Upper crust pahoehoe	S2-1	27.2	1620	-	-
		S2-2	27.2	1100	-	-
S3	Flow core pahoehoe	S3-1	26.6	1600	3.1	450
		S3-2	27.4	910	-	-
S4	Lower crust pahoehoe	S4-1	27.2	1500	2	830
		S4-2	27.2	1500	-	-
S5	Flow core rubbly pahoehoe	S5-1	27.2	1400	-	-
S6	Lower crust pahoehoe	S6-1	27.4	1000	-	-
		S6-2	27.2	1200	1.6	800
NP1A	Brecciated flow top rubbly pahoehoe	NP1A-1	27	1280	0.9*	600*
		NP1A-2	27.2	880	-	-
NP1B	Lower crust acid flow	NP1B-1	27.2	1200	-	-
		NP1B-2	27.2	1600	-	-
SM01	Granophyric acid flow	SM01-1	26.6	1530	-	-
		SM01-2	26.5	1400	-	-
SM02	Granophyric acid flow	SM02-1	27.2	1000	-	-
		SM02-2	27.2	1000	1.47	600
SM03	Granophyric acid flow	SM03-1	27.4	1650	-	-
		SM03-2	27.4	1300	-	-

The lower crust of the pahoehoe (S4 and S6 samples) displays a glomeroporphyritic texture, crystal fracture and lacy porosity types are observed in olivine and augite crystals (Figure 3e). The pipe or spherical vesicles are unfilled or just partially filled, generating vesicular porosity (Figure 3f).

Although the primary mineral composition of rubbly pahoehoe is similar to pahoehoe lava flows, comprising plagioclase, augite and opaque minerals, the hypocrySTALLINE texture and high density of plagioclase microlites differentiate the flow types of Vale do Sol Formation. The flow core (S5) shows plagioclase microlites of

the matrix surrounding augite and plagioclase phenocrysts, which are altered due to incipient zeolitization. The only porosity observed is fracture type. The flow top (NP1A) is constituted by hypocrySTALLINE basalt fragments (brecciated pattern) rich in plagioclase microlites, highly oxidized. Small vesicles and spaces among basalt fragments are completely or partially filled by zeolites and quartz, forming the interclast porosity (Figure 3g). Intra-matrix porosity occurs by the groundmass dissolution (Figures 3g and h).

The acid flows from Palmas Formation exhibit flow banding in devitrified and zeolitized groundmass with micropoikilitic texture and feldspar microliths. Similar to the amigdales filling, thin bands of secondary quartz coarser than the matrix is noticed. As in pahoehoe and rubbly samples, secondary porosity occurs when these structures are partially filled. Fractures filled by quartz and zeolite are also present and, occasionally, expose percolation pathways until the precedent vesicle (Figure 3i). Several bands revealed a brecciated pattern, including encompassing groundmass fragments, and interflow laminar porosity (Figure 3j).

5.2 PETROPHYSICAL EVALUATION AND POROSITY CHARACTERIZATION

Experimental measurements revealed porosity values ranging from 0,11% to 13.08% and permeability from 0.001 to 0.1463mD (Table 2). Density data were also obtained, showing that the upper crust, flow core pahoehoe and flow core rubbly have values higher than 2.80 g/cm³, while other samples have density lower than 2.75 g/cm³.

The μ -CT analysis using the maximum VOI possible of plugs from Scale 1 images (Table 1) revealed porosity values varying from <0.01 to 3.37%. Representative 3D porous network and porosity profile from vertical and horizontal plugs are shown in Figures 4 and 5, in which is also possible to note a large oscillation of slice-by-slice porosity according to the stratigraphic orientation. Furthermore, no pore connectivity is observed along the plug, precluding the simulation of permeability using the μ -CT images acquired in this work.

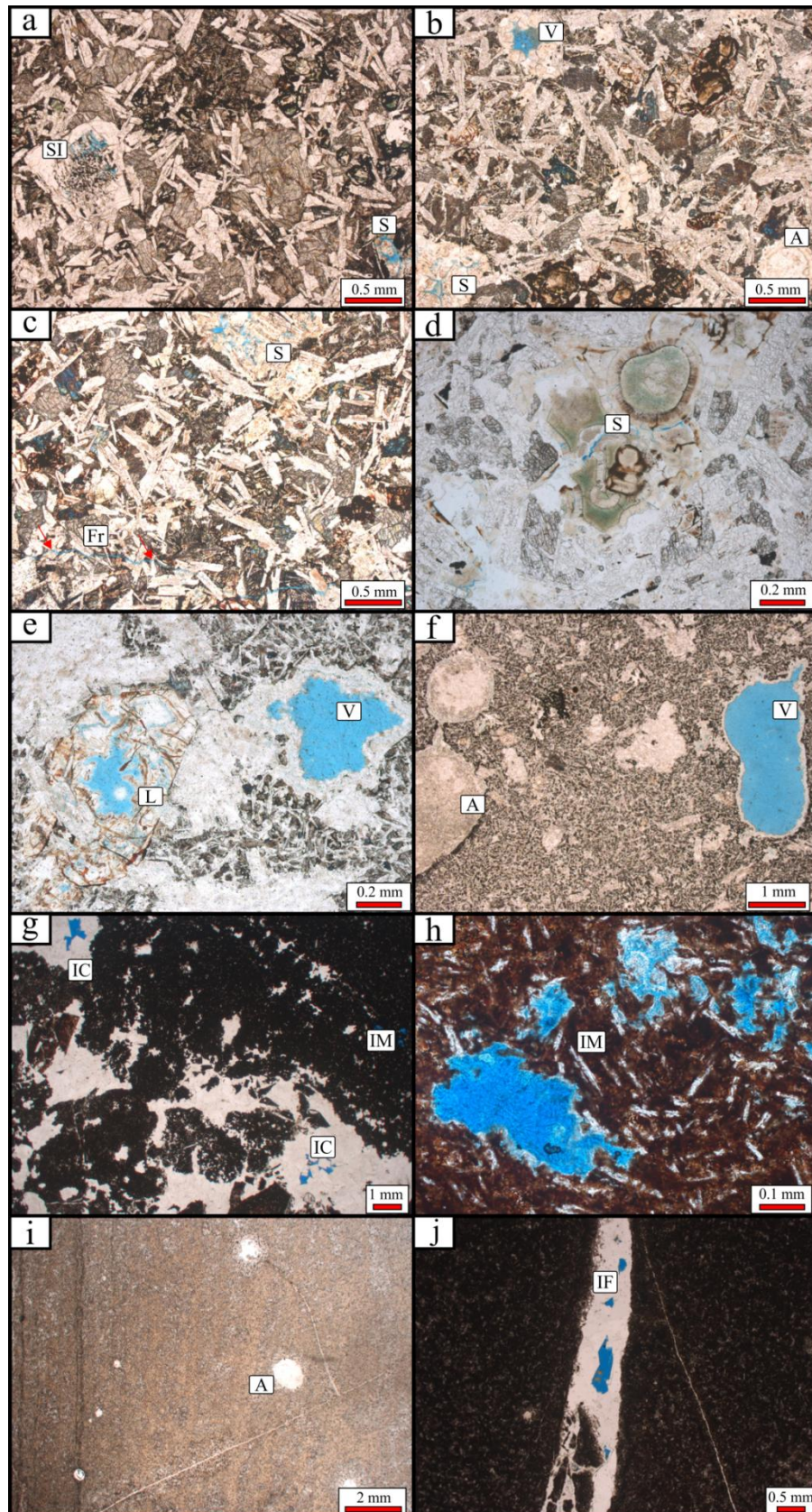


Figure 3 – Photomicrographs showing some features and porosity types in samples of Serra Geral Group: a) S1 sample with sieve intracrystalline (SI) porosity with tiny spaces scattered in plagioclase crystal and spongy (S) porosity. b) S2 sample with vesicular (V) porosity and amygdaloidal texture (A) originated by diktytaxitic cavities completely filled by smectites and zeolites. c) S2 sample with fracture (Fr – red arrows) and spongy porosity types. d) S3

sample with secondary mineral assemblage (smectite, zeolite, oxides and celadonite) and spongy porosity. e) S4 sample with lacy (L) and vesicular porosity in evidence. f) S4 sample exhibiting vesicular and amygdaloidal texture. g) NP1A sample with basalt fragments cemented by quartz and prismatic zeolites. Presence of interclast (IC) and intra-matrix (IM) porosity. h) NP1A showing intra-matrix porosity in the basalt fragments in detail. i) SM02 displays amygdales filled by quartz and zeolite, and flow banding texture. The percolation pathway until the amygdale can be noted. j) NP1B sample with interflow laminar (IF) porosity. Photomicrographs in parallel polarisers.

From upper crust pahoehoe (S1 and S2), porosity values obtained by experimental methods are 0.69-0.62% and 1.72-1.4%, whereas permeability ones are lower than 0.0004mD. Porosity obtained by μ -CT ranges from <0.01-0.06%, with dominant spongy porosity as seen in the S2 plugs (Figures 4a and 5a). The vertical plug from a pahoehoe flow core (S3-1) presents rare spongy pores (Figure 4b), resulting in porosity values lower than 0.01%. In the horizontal plug (S3-2), besides spongy, it is possible to observe fracture porosity (Figure 5b). Experimental values range from 2.10 to 2.73% and 0.0003 to 0.1463mD in S3-1 and S3-2 plugs, respectively.

Elongated and spherical vesicles occur in lower crust pahoehoe (S4 and S6), most of them isolated in the pore network (Figures 4c-d and 5c-d). In μ -CT images the S6 plugs show a considerable amount of small pores, while S4 reveals an increase of vesicles sizes, resulting in a porosity of 0.77-0.05% and 1.84-1.74%, respectively. Porosimeter estimation supports the μ -CT results, with higher values to S4 (8.1 - 10.01%) rather than S6 sample (3.07 - 5.22%). Additionally, permeability remained at 0.0003mD in S4 and varied between 0.0002-0.0665mD in S6 samples.

The flow core rubbly pahoehoe (S5) exhibited no pores in μ -CT images, however values of 1.04% and 0.0003mD were obtained for porosity and permeability from experimental methods. Brecciated flow top of rubbly pahoehoe (NP1A) is dominated by basalt fragments with interclast porosity, but intra-matrix smaller pores can also be identified (Figures 4e and 5e). The 3D network and porosity profile indicate a high variance of porosity, from 0 to 15% in both vertical and horizontal plugs, with an average porosity of 2.14 and 3.37%, respectively. In experimental quantification, porosity ranges from 12.75 to 13.08%, while very low permeability (0.0001-0.0003mD) was obtained.

Table 2 – Porosity, permeability and density data obtained from experimental helium porosimetry and air permeametry compared with porosity obtained by petrography (modal analysis by counting points) and X-ray microtomography images of Scale 1.

Samples	Internal zone and flow type	Petrography	Plug	Experimental measurements			μ -CT – Scale 1
		Porosity (%)		Porosity (%)	Density (g/cm ³)	Permeability (mD)	Porosity (%)
S1	Upper crust pahoehoe	2.3	S1-1	0.69	2.82	0.0004	<0.01
			S1-2	0.62	2.83	0.0003	0.06
S2	Upper crust pahoehoe	2.6	S2-1	1.72	2.81	0.0004	0.01
			S2-2	1.4	2.80	0.0004	0.03
S3	Flow core pahoehoe	3.3	S3-1	2.1	2.81	0.0003	<0.01
			S3-2	2.75	2.82	0.1463	0.04
S4	Lower crust pahoehoe	4.3	S4-1	10.01	2.65	0.0003	1.84
			S4-2	8.1	2.65	0.0003	1.74
S5	Flow core rubbly pahoehoe	1	S5-1	1.04	2.83	0.0003	0
S6	Lower crust pahoehoe	0.6	S6-1	5.22	2.71	0.0002	0.77
			S6-2	3.07	2.66	0.0665	0.55
NP1A	Brecciated flow top rubbly pahoehoe	3.6	NP1A-1	13.08	2.64	0.0003	2.14
			NP1A-2	12.75	2.59	0.0001	3.37
NP1B	Lower crust acid flow	0.3	NP1B-1	0.73	2.63	0.0003	0.01
			NP1B-2	0.59	2.63	0.0002	0.02
SM01	Granophyric acid flow	0	SM01-1	0.11	2.69	0.0003	<0.01
			SM01-2	0.86	2.69	0.0003	<0.01
SM02	Granophyric acid flow	2	SM02-1	1.28	2.66	0.0003	0.78
			SM02-2	2.04	2.66	0.0002	0.55
SM03	Granophyric acid flow	0	SM03-1	1.01	2.68	0.0004	0.09
			SM03-2	1.03	2.69	0.0003	<0.01

In the acid flows, the porosity values varies between <0.01 to 0.78% in μ -CT images analysis and 0.59 to 2.04% in experimental measurements. Permeability ranges between 0.0001 and 0.0004mD. The highest values were obtained in SM02 samples, in which porosity is formed by small and sparsely distributed vesicular pores and interflow laminar porosity. Latter is responsible for peak values as shown in Figures 4f and 5f.

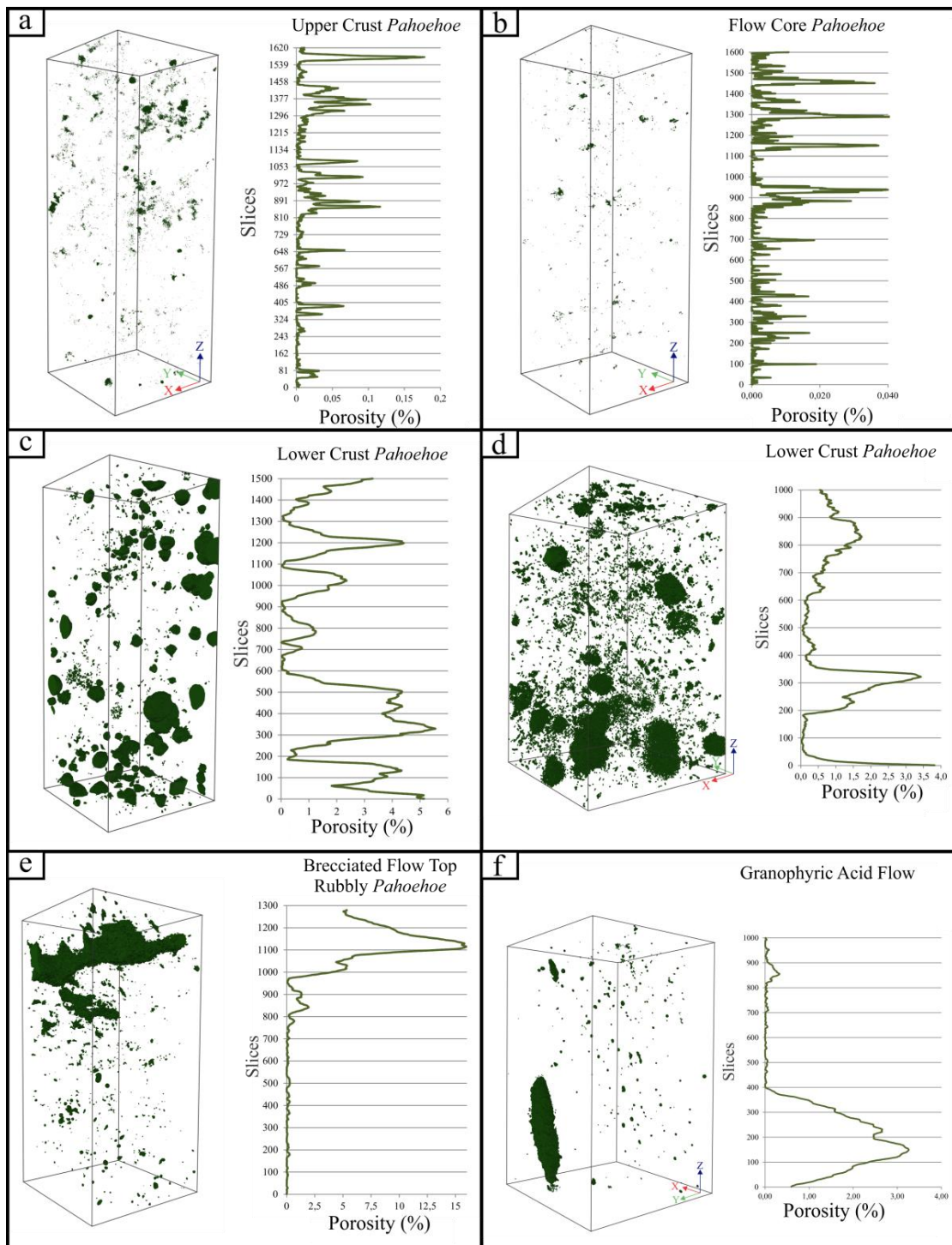


Figure 4 – Visualization of porosity variation in vertical plugs obtained by μ -CT images with Scale 1 of resolution. In the bulk, 3D pore network where pore phase is modeled in the occupied space and mineral phase is the empty space. Porosity profile, in the right position of 3D networks, represents the values of porosity variation along the 3D pore network. a) S2-1 plug with spongy pores. b) S3-1 plug with spongy pores. c) S4-1 plug with elongated and spherical vesicles. d) S6-1 plug with elongated and spherical vesicles, in addition to small pores. e) NP1A-1 plug with interclast porosity (top of the plug) and intra-matrix smaller pores. f) SM02-1 plug with interflow laminar (base of the plug) and sparsely vesicular pores.

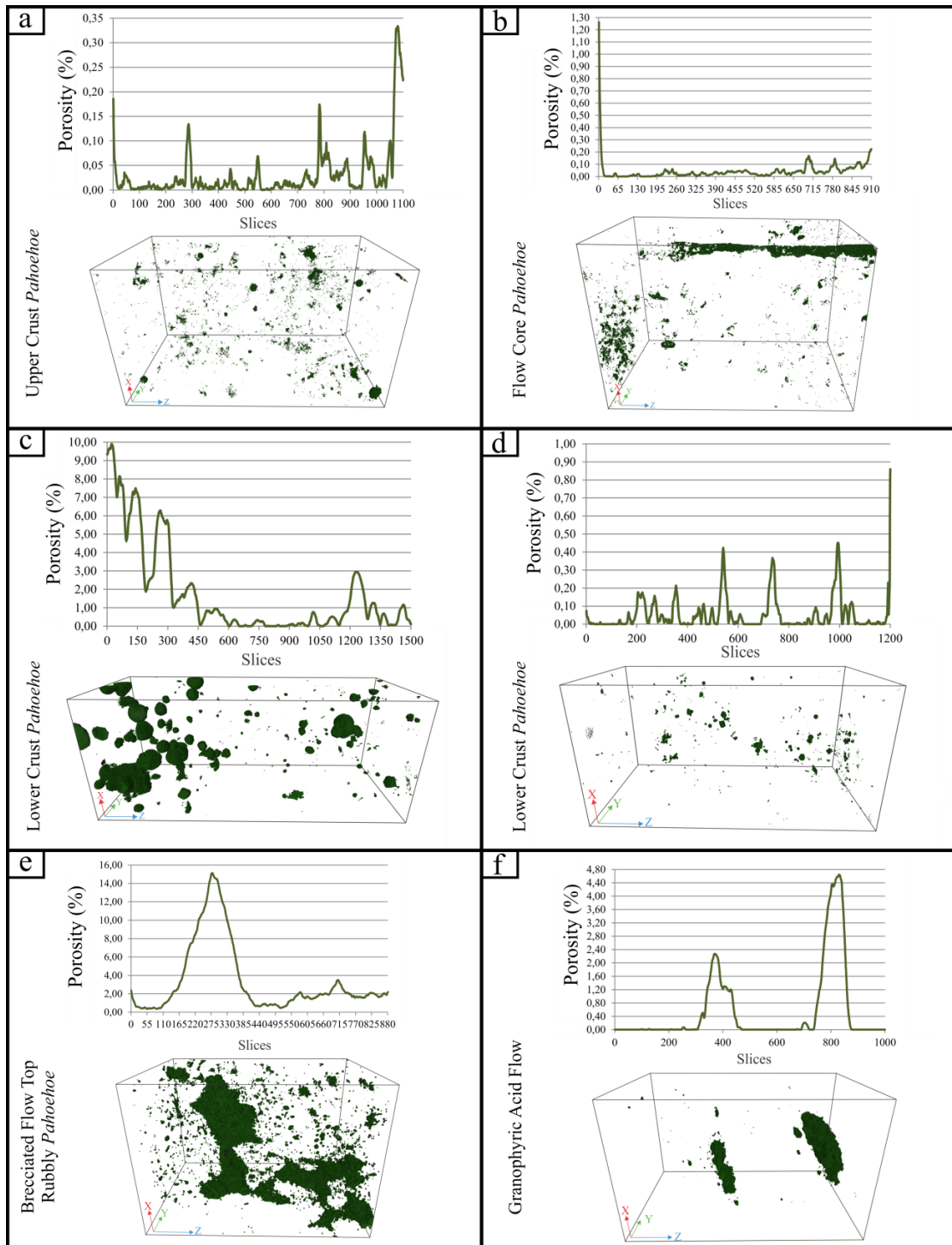


Figure 5 - Visualization of porosity variation in horizontal plugs obtained by μ -CT images with Scale 1 of resolution. In the bulk, 3D pore network where pore phase is modeled in the occupied space and mineral phase is the empty space. Porosity profile, in the upper position of 3D networks, represents the values of porosity variation along the 3D pore network. a) S2-2 plug with spongy pores. b) S3-2 with spongy and fracture pores. c) S4-2 plug with spherical vesicles. d) S6-2 plug with small pores. e) NP1A-2 plug with interclast porosity (top of the plug) and intra-matrix smaller pores. f) SM02-2 plug with interflow laminar porosity.

S3-1, S4-1, S6-2, NP1A-1 and SM02-2 plugs were selected for Scale 2 images (Table 1). The choice was made considering that these plugs showed the most discrepant values between experimental and μ -CT analysis using Scale 1 images. In the second scale, porosity varies between 0.07% to 1.33% as seen in Table 3. The S4-1, NP1A-1 and SM02-2 plugs display a decrease in porosity values, whereas S3-1 and S6-2 show an increment. An intermediary resolution image (Scale 3) was also acquired to NP1A-1 plug, which displays 1.89% of porosity.

Table 3 – Porosity data comparison between values obtained by experimental measurements and different image scale resolutions.

Internal zone and flow type	Plug	Experimental measurements – Porosity (%)	μ -CT – Porosity (%)		
			Scale 1	Scale 2	Scale 3
Core pahoehoe	S3-1	2.1	<0.01	0.31	-
Lower crust pahoehoe	S4-1	10.01	1.84	1.33	-
Lower crust pahoehoe	S6-2	3.07	0.05	0.07	-
Brecciated flow top rubbly pahoehoe	NP1A-1	13.08	2.14	0.3	1.89
Granophyric acid flow	SM02-2	2.04	0.55	0.11	-

Representative 3D porous network of Scale 2 and 3 images are shown in Figure 6, where total porosity is represented for both scales. In the second resolution, most of the visualized pores are still very small, but differently from Scale 1 (Figure 4), the pores seem to occur closer to each other (Figures 6a-e). The image of Scale 3 is similar to the top of the first resolution of NP1A-1, where the interclast porosity is evidenced (Figure 6f).

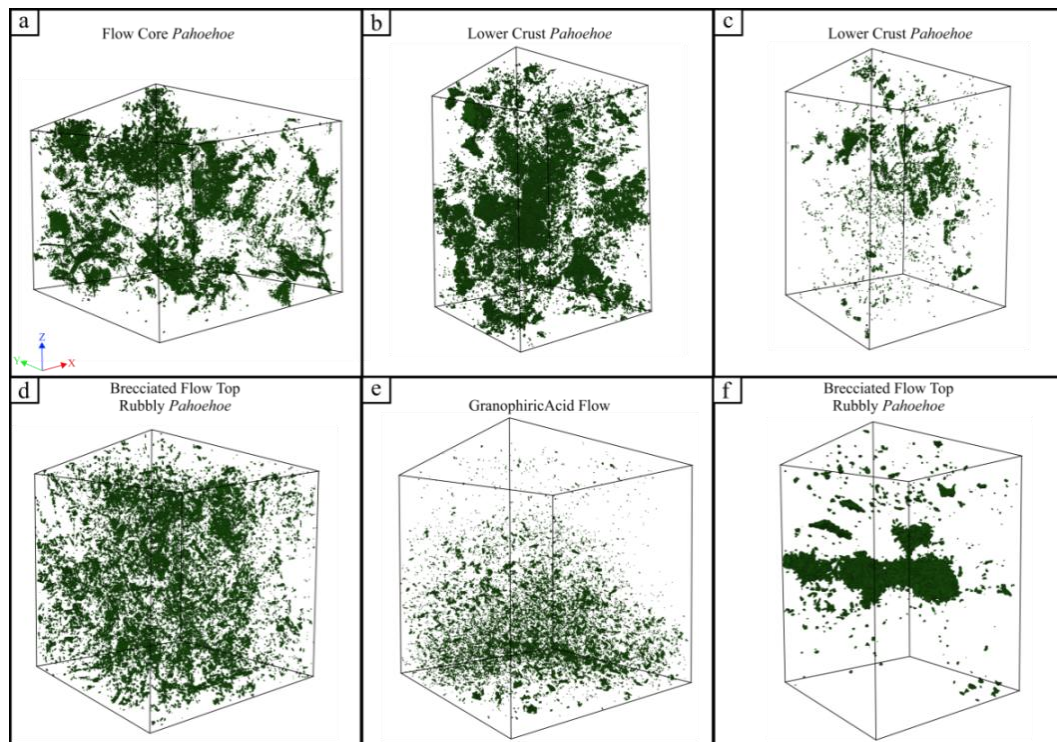


Figure 6 - Visualization of porosity variation of vertical plugs obtained by μ -CT images with scale 2 (a-e) and 3 (f). 3D pore network where pores are modeled in the occupied space and mineral phase is the empty space. a) S3-1 in $3.1\mu\text{m}$ of image resolution. b) S4-1 in $2\mu\text{m}$ of image resolution. c) S6-2 in $1.6\mu\text{m}$ of image resolution. d) NP1A-1 in $0.9\mu\text{m}$ of image resolution. e) SM02-2 in $1.47\mu\text{m}$ of image resolution. f) NP1A-1 in $10\mu\text{m}$ of image resolution.

Different volumes of interest (VOI) were tested in S2-1, S4-1, NP1A-1 and SM02-1 plugs. For this investigation, the length of X and Y in 600 voxels was maintained, but the Z axes was modified to 100, 200, 400, 600 and 800 voxels. In Figure 7, the porosity values obtained for each VOI is represented with porosity obtained with the maximum VOI of the plugs, as mentioned in Table 1 and illustrated in Figure 4.

The analysis of S2-1 showed the porosity does not change with VOI variance as can be seen in Figure 7a. Porosity in S4-1 varies from 3.45%, in the smallest VOI, to 2.4% in $600 \times 600 \times 800$ voxels (Figure 7b), while for SM02-1 the lowest and highest values are 0.67 and 1.87% with the Z values of 100 and 400 voxels, respectively (Figure 7d). The interclast porosity of NP1A-1 is not detected even for $600 \times 600 \times 800$ VOI, thus porosity remains lower or equal to 0.1% (Figure 7c).

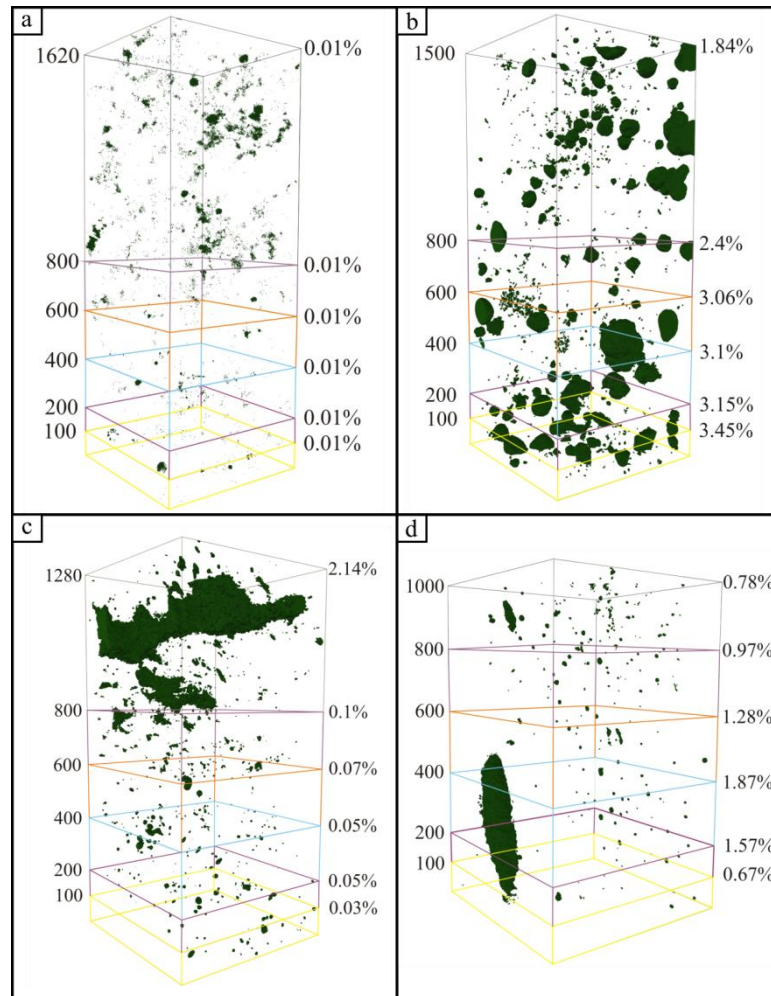


Figure 7 – 3D pore network subdivided in different VOI along the plug images. The VOI's illustrated corresponding to 600x600x100, 600x600x200, 600x600x400, 600x600x600, 600x600x800 and 600x600xZ, where Z is the maximum value to Z axis for each plug as in Table 1. The corresponding porosity value of each VOI is expressed in the right side of pore network 1. Pores are modeled in the occupied space and mineral phase is the empty space. a) S2-1 plug with porosity values of 0.01%. b) S4-1 plug with porosity values varying from 1.84 in 600x600x1500 VOI to 3.45% in 600x600x600x600x100. c) NP1A-1 plug with porosity varying from 0.03% in 600x600x100 VOI to 2.14 in 600x600x1280 VOI. d) SM02-1 plug with porosity varying from 0.67% in 600x600x100 VOI to 1.87% in 600x600x400 VOI.

The diversity of volcanic porous system can also be visualized in original gray-scale μ -CT images. Figure 8 illustrates in Scale 1 and 2 images, two slices from different positions along the plug (following a stratigraphic orientation) and a 3D representation of the original gray-scale image. The S4-1 in Scale 1 displays a variety of sizes and in the amount of vesicles and amygdales between the slices (Figure 8a), while NP1A-1 evidences the disparateness between slices with interclast porosity and those with no interclast porosity (Figure 8b). Another similar effect is also observed in SM02-2, in which most of the porosity is restricted to banding structures (Figure 8c). Furthermore, these figures also display the filling of pores by

secondary mineral assemblage which is seen in a different grey-colour from non-porous phase.

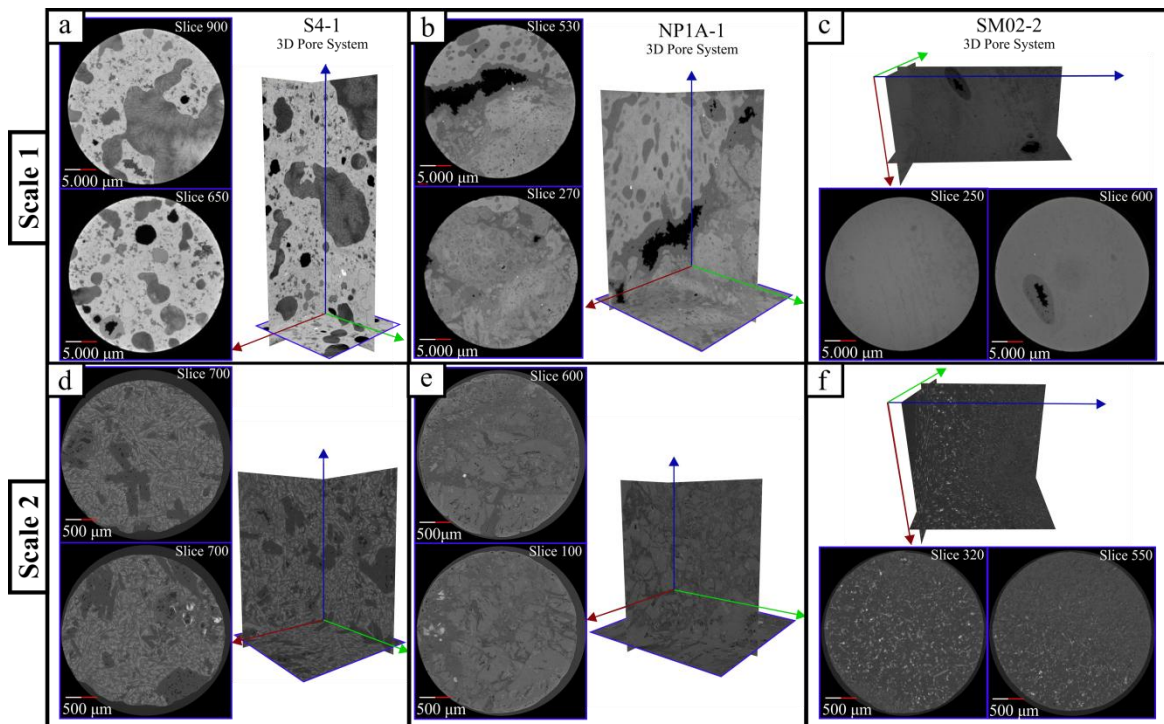


Figure 8 – Sketch of three volcanic porous systems revealed by gray-scale images of scale 1 and 2. Two slices of different positions within the plug are illustrated, as well as 3D representation of the images. a-d) S4-1 plug represents the lower crust pahoehoe pore system. b-e) NP1A-1. c-f) SM02-1.

Nevertheless, in Scale 2 images, the pores variance along the slices decreases and the porosity observed is restricted to the matrix of the rock. In the lower crust pahoehoe, the porosity is mainly within the phenocrysts – sieve intracrystalline porosity (Figure 8d), while in the rubbly the pores occur mainly within the basalt fragments – vesicular and intra-matrix porosity (Figure 8e). In acid flows, the pores are sparsely distributed in the matrix and do not necessarily occur in the banding structures (Figure 8f).

6. DISCUSSION

Volcanic reservoirs are complex and according to genetic features are classified in various types (Zou *et al.*, 2013). The diversity of volcanic rocks is determined by different emplacement processes, which involves effusions (lava flows) and explosions (pyroclastic deposits). According to McPhie *et al.* (1993), based on original textures, the volcanic rocks can be classified in volcanoclastic or coherent categories. The volcanoclastic reservoirs are products of clast accumulation from volcanic eruption or of weathering, transportation and sedimentation of volcanic

rocks, resulting generally in a reservoir with high porosity and varied permeability (Zou *et al.*, 2013). In fact, many studies report this. Tuff reservoirs from Georgia display porosity and permeability higher than 27% and 400 mD (Grynberg *et al.*, 1993). High porosity (26%) and permeability (42-164 mD) are recorded in non-welded ignimbrites with gas pipes from Argentina (Sruoga & Rubinstein, 2007). The effective reservoirs from Songliao Basin (China) are mainly distributed in rhyolites, rhyolitic tuffaceous lava, rhyolitic tuffs and rhyolitic volcanic breccias (Pujun *et al.*, 2015).

Coherent textures occur mainly in lava flows and intrusions (McPhie *et al.*, 1993) and according to Zou *et al.* (2013), the lava-type reservoirs comprise eruptive-effusion facies lava where the predominant reservoir space are vesicles and fractures. Diktytaxitic basalts from Oregon show porosities smaller than 5% and permeability between 10 mD – 1000 mD, whereas samples with only micropores have permeability up to 0.01mD (Saar & Manga, 1999). In Qikou Depression (China), Wu *et al.* (2010) reported porosity between 24.5-27% and 109-158 mD in average for vesicular basalt. For dense basalt, porosity decays to 6.3% and permeability to 0.0014 mD, or even to 0.0007mD. In pahoehoe lava flows from Tenerife, porosity varies between 0.03-32.63% and permeability between <0.001-2.75mD, considering that the highest values were reported in flow top internal zones (Couves *et al.*, 2016).

In this work, the majority of the samples are coherent lavas, comprising pahoehoe lava flows, rubbly flow core and acid flows, but an autoclastic sample is also described (brecciated flow top rubbly pahoehoe). The experimental measurements display porosities values varying from 0.11 to 13.08% and permeability is generally lower than 0.0004 mD, although some samples presented values of 0.0665 mD and 0.1463 mD (Table 2). The volcanoclastic sample from Vale do Sol Formation exhibited the highest porosity values, corroborating with previous studies that revealed good values for this volcanic group. Moreover, it is relevant to notice the areal extent of this formation in the Serra Geral Group (Rossetti *et al.*, 2017), indicating the importance of this volcanoclastic rocks as possible reservoirs.

These experimental data show no correlation between porosity and permeability as seen in Figure 9a. Even in core plugs in which porosity is relatively high, such as S4-1 and NP1A-1, permeability is very low. On the other hand, plugs S3-2 and S6-2 show higher permeability values, but porosity values are around 3%.

In Table 2 and Figure 9a the diversity of experimental values can be observed mainly in three situations: 1°) when lava flows and volcanoclastic types are compared, such as in the case of NP1A relative to other samples; 2°) when different internal zones of flows are compared, such as flow core and upper crust pahoehoe, e. g. S3 and S1 samples; 3°) when the same internal zone is compared, such as lower crust pahoehoe (S4 and S6 samples) or even between vertical and horizontal plugs position of the same sample (SM02-1 and SM02-2). These data corroborate with previous studies, demonstrating a wide range of petrophysical values for volcanic rocks.

Despite porosity and permeability variations, density characteristics of basalt sequences are, in general, highly variable, as exposed by Nelson *et al.* (2009). In this work it is not different (Table 2) and three main arrangements are illustrated in Figure 9b. The first one has density values greater than 2.80 g/cm^3 and porosity lower than 3%, comprising pahoehoe and rubbly samples with olivine and oxides in the mineralogical composition. The second arrangement has density values lower than 2.75 g/cm^3 and porosity lower than 6%, composed mainly of acid flows with low porosities, which also results in low density. The last one shows density values lower than 2.65 g/cm^3 and porosity greater than 8% comprising samples with the highest porosity values, resulting in lower density. These data are similar to the results of Japsen *et al.* (2005), Nelson *et al.* (2009) and Jerram *et al.* (2009) that obtained density values through seismic investigation at Faroe Islands.

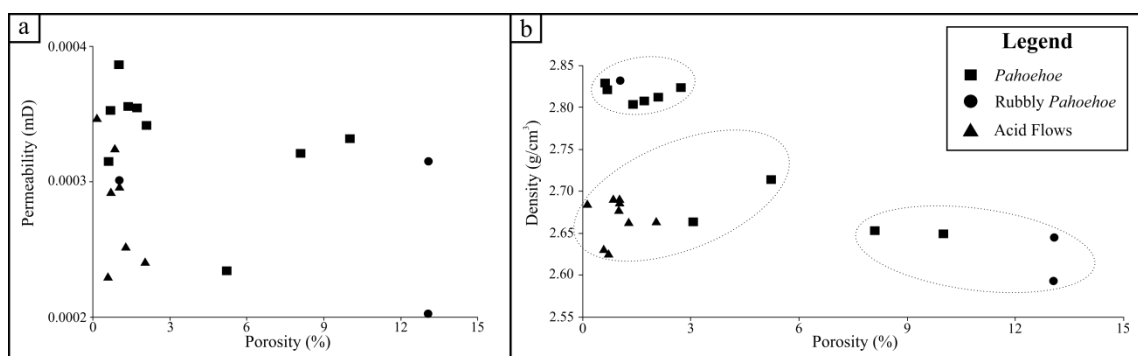


Figure 9 – Plots showing experimental data for Serra Geral samples analyzed. a) Cross-plot of experimental air permeability versus helium porosity measurements. The S3-2 and S6-2 values are not illustrated due to plot limitation. b) Cross-plot of density data against porosity measurements. In this graph, three arrangements marked by the dotted ellipses can be seen.

The porous systems of the studied samples show considerable influence of secondary processes, such as precipitation of secondary minerals and generation of secondary porosity that can be observed in petrography and also in μ -CT images

(Figures 3 and 8). Figure 3i demonstrates the ancient fractures acting as migration pathways for the isolated pores, considering that both are now filled by secondary mineralogy. Even though diagenetic features are not the focus of this work, it is possible to infer that fluids had circulated and filled the rock porous space at some point. According to Couves *et al.* (2016), the capacity of the flows to allow the fluids circulation suggests they had sufficient permeability.

In the petrographic study of S6 sample, the fracture porosity type is described and the same porosity is observed in S3-2 microtomographic 3D image (Figure 5b), both samples with the highest values of permeability. Since permeability is related to the porous structure, fractures generally play a key role in volcanic reservoirs because they act as a connection or a migration pathway between the existing pores (Katahira & Ukai, 1976; Wu *et al.*, 2010, Couves *et al.*, 2016). In comparison, the permeability in carbonate rocks is more related to the quantity and type of pore that connects the macroporosity than the total porosity (Melim *et al.*, 2001).

The precipitation of secondary minerals, such as those described here, could occlude or seal the open spaces, decreasing the porosity (Gustavson, 2006; Rogers *et al.*, 2006). As described by Demina *et al.* (2015), precipitation of zeolites in pores causes reduction in porosity and permeability. Besides that, smectites are a common diagenetic alteration of volcanic materials (Jeans *et al.*, 2000) and can be replaced by zeolites and chlorites.

Figure 8 evidences, in gray-scale images, different pore systems that can be found in volcanic rocks. In pahoehoe flows, the occurrence of vesicular porosity (Figure 8a) is common, due to the exsolution of volatile magma contents during lava cooling. At higher resolution, sieve intracrystalline porosity is observed in the matrix (Figure 8d). On the top of the rubble, porosity is mainly related to open spaces between basalt fragments due to rupturing and brecciation (Figure 8b), but small vesicles and intra-matrix pores are also found (Figure 8e). On the other hand, in the acid flows it is possible to identify the porosity in thin bands controlled by the flow foliation (Figure 8c) and in the groundmass in smaller proportions (Figure 8f). Furukawa & Uno (2015) observed that high porosity zones in acid rocks are formed by ductile – brittle tearing of the lava and the lateral stretching and flattening during its spreading creates pervasive thin bands, similar to those studied here. Besides that, high porosity bands zones act as degassing pathways to the lava surface, as indicated by Furukawa *et al.* (2010).

The samples show different results obtained by experimental and μ -CT measurements, which is due to the constraints of the methods. The μ -CT image resolution limitation does not allow the visualization of pores smaller than the resolution. On the other hand, the experimental measurements are capable to achieve even nanometric pores. These differences generally are minor in homogeneous systems such as clastic rocks (Appoloni *et al.*, 2007), but are significant in heterogeneous rocks, such as carbonates (Mantovani, 2013) and volcanic rocks. The total porosity obtained by images of Scale 1 on μ -CT is lower than those from experimental values (Table 2), suggesting that the contribution of the 27 μ m resolution to comprehend the porous system of the analyzed plugs is very small and that the macropores have a low contribution to the connected porosity. For this reason, some plugs were analyzed in other resolutions, such as \sim 2 μ m (Scale 2) and 10 μ m (Scale 3), in order to consider the pores that were not observed at Scale 1.

Nevertheless, even after using other resolutions, the total porosity values from μ -CT analysis in S3-1, S4-1, S6-2, NP1A-1 and SM02-2 plugs do not reach the effective porosity of the porosimetry data (Table 3). These results support that the resolutions used in μ -CT imaging are not sufficient to contemplate all pores in the analyzed samples and that the visualized pores do not form a connected pore network. However, porosimeter measurements indicate the presence of effective porosity. Hence, the difference of porosity values between the methods can be interpreted as microporosity, which is not completely observed even at the \sim 2 μ m images. According to Couves *et al.* (2016), samples with abundant micropores can provoke an underestimation of total porosity. Similarly, considering carbonate rocks, Mantovani (2013) reported that the petrophysical analysis by μ -CT method is close to the experimental only when multi-scales are used, including nanometric image resolution. For the volcanic rocks of Serra Geral Group, micropores are related to clay-minerals (Reis *et al.*, 2014). In fact, the increasing alteration of the rock, that means the influence of secondary processes, led to an increment of micropores as described by Sigurdsson & Stefansson (2002).

The presence of pores in three different image resolutions and the missing porosity reported here affirm that volcanic rocks have an heterogeneous pore system, similar to carbonate rocks. The texture and pore structure of volcanic rocks simulate the complexity of carbonate rocks (GuoXin *et al.*, 2008; Farooqui *et al.*,

2009). According to Knackstedt *et al.*, (2006), differently from the sandstones, many carbonates have a bi- or tri-modal pore size distributions. Furthermore, in carbonate rocks, secondary porosity types are more frequent than primary pores (Selley, 1998) and, due to their high variability, the pore system is complex.

7. CONCLUSIONS

Porosity and permeability in volcanic rocks are highly dependent, not only of primary, but also of secondary processes, resulting in complex reservoirs with heterogeneous porous system. In Serra Geral Group samples, the heterogeneity was mainly observed due to:

- a) Different emplacement processes: lava flows and volcanoclastic rocks have different genetic features, which implies in different porous system in each one. In this study, lava flows exhibited a considerable variation of the porosity values, but autoclastic rubbly pahoehoe displays the highest porosity values;
- b) Different internal flow zones: heterogeneity in porous system is noted in different internal zones of lava flows. Lower and upper crust pahoehoe display different porosity types, as well as flow cores and brecciated flow tops of rubbly pahoehoe. Variance of porosity is also observed when the same internal zone is compared in different lava flows. In the upper crust pahoehoe, for example, the thickest lava flow presents the highest porosity values.
- c) Secondary processes: besides the original porosity variations, post-emplacement processes played a key role in the volcanic pore system. While secondary mineralogy can occlude or seal porosity, fractures can connect isolated pores.

The X-ray microtomography (μ -CT) has provided a good quantification of the petrophysical properties when compared to the experimental measurements. The difference between the values obtained through the methods can be explained by the multi-scale pores found in the images, in addition to the resolution limitation. On the other hand, μ -CT has demonstrated to be a useful method to characterize and provide a 3D morphology of volcanic pores, promoting the visualization of the porosity variation, which is helpful to comprehend its heterogeneities.

Considering the complexity of volcanic reservoirs, future studies should focus on diagenetic features and structural controls integrated to the stratigraphic relations and petrophysical measurements in volcanic rocks.

8. ACKNOWLEDGMENTS

The authors want to thank PETROBRAS, especially to Kayo, Isabela, Marcelo and Márcia for providing the experimental petrophysical measurements at Weatherford Laboratories. We also want to acknowledge the LMPT/UFSC, especially Anderson, Celso, Iara and Vanderlei, for the acquisition of μ -CT images and discussion about the technique. Special thanks to the financial support of FAPERGS 2311-2551/14-8, CNPq 44812-2015-9-; 402400-0 and PQ 322125-2016-7 projects. The first author thanks CAPES for providing the master's degree scholarship.

9. REFERENCES

- APPOLONI, C. R., FERNANDES, C. P. and RODRIGUES, C. R. O., 2007. X-ray microtomography study of a sandstone reservoir rock. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 580, 629-632.
- BAKER, D.R., MANCINI, L., POLACCI, M., HIGGINGS, M.D., GUALDA, G.A.R., HILL, R.J. and RIVERS, M.L., 2012. An introduction to the application of X-ray microtomography to the three-dimensional study of igneous rocks. *Lithos*, 148, 262-276.
- BARRETO, C., LIMA, E.F., SCHERER, C.M. and ROSSETTI, L.M.M., 2014. Lithofacies analysis of basic lava flows of the Paraná igneous province in the south hinge of Torres Syncline, southern Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 285, 81-99.
- BARRETO, C.J., LIMA, E.F. and GOLDBERG, K., 2017. Primary vesicles, vesicle-rich segregation structures and recognition of primary and secondary porosities in lava flows from the Paraná igneous province, southern Brazil. *Bull Volcanol*, 79.
- BELLIENI, G., COMIN-CHIARAMONTI, P., MARQUES, L.S., MELFI, A. J., PICCIRILLO, E.M., NARDY, A.J.R. and ROISEMBERG, A., 1984. High- and low-Ti flood basalts from the Paraná plateau (Brazil): petrogenetic and geochemical aspects bearing on their mantle origin. *Mineralogie (Abh)*, 150, 272-306.
- COLOMBIER, M., WADSWORTH, F.B., GURIOLI, L., SCHEU, B., KUEPPERS, U., DI MURO, A. and DINGWELL, D.B., 2017. The evolution of pore connectivity in volcanic rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 462, 99-109.
- COUVES, C., ROBERTS, S., RACEY, A., TROTH, I. and BEST, A., 2016. Use of X-ray computed tomography to quantify the petrophysical properties of volcanic rocks: a case study from Tenerife, Canary Islands. *Journal of Petroleum Geology*, 39 (1), 79-94.
- DEMINA, Y., FROLOVA, J. and RYCHAGOV, S., 2015. Hydrothermal Alterations and Petrophysical Properties: a case study of Yagodninskoe Zeolite Deposit, Kamchatka Peninsula. Conference Paper, Proceedings World Geothermal Congress, Australia.
- DE ROS, L.F, GOLDBERG, K., ABEL, M., VICTORINETTI, F., MASTELLA, L. and CASTRO, E., 2007. Advanced acquisition and management of petrographic information from reservoir rocks using the Petroledge® System. AAPG Annual Conference and Exhibition, Long Beach, CA, USA, Extended Abstracts, 6.

- FAROOQUI, M. Y., HOU, H., LI, G., MACHIN, N., NEVILLE, T., PAL, A., SHRIVASTVA, C., WANG, Y., YANG, F., YIN, C., ZHAO, J. and YANG, X., 2009. Evaluating Volcanic Reservoirs. *Oilfield Review*, Spring, 21 (1), 36-46.
- FRANK, H.T., GOMES, M.E.B. and FORMOSO, M.L.L., 2009. Review of the areal extent and the volume of the Serra Geral Formation, Paraná Basin, South America. *Pesquisas em Geociências*, 36 (1), 49–57.
- FURUKAWA, K., and UNO, K., 2015. Origin and deformation of high porosity bands in the Takanoobane Rhyolite lava of Aso volcano, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 305, 76-83.
- FURUKAWA, K., UNO, K. and MIYAGI, I., 2010. Mechanisms of oxidation and degassing in the Takanoobane rhyolite lava of Aso Volcano, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 198, 348–354.
- GRYNBERG, M.E., PAPAVAL, D., SHENGELIA, M., TAKAISHVILLI, A., NANADZE, A. and PATTON, D.K., 1993. Petrophysical characteristics of the middle Eocene laumontite tuff reservoir, Samgori field, Republic of Georgia. *J Petrol Geol*, 16,312–322.
- GUOXIN, L., YUHUA, W., JIE, Z., FENGPING, Y., CHANGHAI, Y., NEVILLE, T.J., FARAG, S., XINGWANG, Y. and YOUQING, Z., 2008. Petrophysical Characterization of a Complex Volcanic Reservoir, YingCheng Group, Daqing, China. *Society of Petrophysicists and Well – Log Analysts*, 49.
- GUSTAVSON, J.E., 2006. Analysis of porosity evolution during low temperature metamorphism of basaltic lavas and implications for fluid flow. University of Florida, Master of Science Thesis.
- JANASI, V.D.A., FREITAS, V.A. and HEAMAN, L.H., 2011. The onset of flood basalt volcanism, Northern Paraná Basin, Brazil: a precise U–Pb baddeleyite/zircon age for a Chapecó type dacite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 302, 147–153.
- JAPSEN, P., ANDERSEN, C., ANDERSEN, H.L., ANDERSEN, M.S., BOLDREEL, L.O., MAVKO, G., MOHAMMED, N.G., PEDERSEN, J.M., PETERSEN, U.K., RASMUSSEN, R., SHAW, F., SPRINGER, N., WAAGSTEIN, R., WHITE, R.S. and WORTHINGTON, M., 2005. Preliminary results from investigations of seismic and petrophysical properties of Faroes basalts in the SeiFaBa project. In: DORE, A. G. and VINING, B. A. (eds) *Petroleum Geology: North-West Europe and Global Perspectives—Proceedings of the 6th Petroleum Geology Conference*, 1461–1470. Petroleum Geology Conferences Ltd. Published by the Geological Society, London.
- JEANS, C.V., WRAY, D.S., MERRIMAN, R.J. and FISHER, M.J., 2000. Volcanogenic clays in Jurassic and Cretaceous strata of England and the North Sea Basin. *Clay Minerals*, 35, 25-55.
- JEFFERSON, A., GRANT, G. and ROSE, T., 2006. Influence of volcanic history on groundwater patterns on the west slope of the Oregon high cascades. *Water Resour Res*, 42, 1–15.
- JERRAM, D. A., SINGLE, R.T., HOBBS, R.W., and NELSON, C.E., 2009. Understanding the offshore flood basalt sequence using onshore volcanic facies analogues: an example from the Faroe – Shetland basin. *Geol. Mag*, 146 (3), 353-367.
- KATAHIRA, T. and UKAI, M., 1976. Petroleum fields of Japan with volcanic-rock reservoirs – summary. In: HALBOUTY MT, MAHER JC, LIAN HM. (eds) *Circum-*

- Pacific energy and mineral resources. *Am Assoc Petrol Geologists Mem*, 25, 276-279.
- KNACKSTEDT, M., ARNS, C., GHOUS, A., SAKELLARIOU, A., SENDEN, T., SHEPPARD, A.D., SOK, R., AVERDUNK, H., PINCZEWSKI, W.V., PADHY, G. S. and IOANNIDIS, M.A., 2006. 3D imaging and flow characterization of the pore space of carbonate core samples. Paper presented at the International Symposium of the Society of Core Analysts, Norway.
- LANDIS, E.N. and KEANE, D.T., 2010. X-ray microtomography. *Materials characterization*, 61, 1305-1316.
- LENHARDT, N. and GOTZ, A.E., 2011. Volcanic settings and their reservoir potential: an outcrop analog study on the Miocene Tepoztlán formation, Central Mexico. *J. Volcanol Geotherm Res*, 204, 66-75.
- LIMA E.F., PHILIPP R.P., RIZZON G.C., WAICHEL B.L., ROSSETTI L.M.M., 2012. Sucessões Vulcânicas e Modelo de Alimentação e Geração de Domos de Lava Ácidos da Formação Serra Geral na Região de São Marcos Antonio Prado (RS). *Geologia USP Série Científica*, 12, 49-64.
- MANTOVANI, I.F., 2013. Microtomografia e nanotomografia de raios X aplicada à caracterização multiescalar de sistemas porosos carbonáticos. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- MATTER, J.M., STUTE, M., SNAEBJORNSDOTTIR, S.O., OELKERS, E.H., GISLASON, S.R., ARADOTTIR, E.S., SIGFUSSON, B., GUNNARSSON, I., SIGURDARDOTTIR, H., GUNNALAUGSSON, E., AXELSSON, G., ALFREDSSON, H.A., WOLF-BOENISCH, D., MESFIN, K., TAYA, D.F.R., HALL, J., DIDERIKSEN, K. and BROECKER, W.S., 2016. Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions. *Science*, 352 (6291), 1312-1314.
- MCPHIE, J., DOYLE, M. and ALLEN, R., 1993. *Volcanic Textures. A guide to the interpretation of textures in volcanic rocks.* Hobart, University of Tasmania.
- MELFI, A.J., PICCIRILLO, E.M. and NARDY, A.J.R., 1988. Geological and magmatic aspects of the Parana Basin: an introduction. *In: PICCIRILLO, E.M., MELFI, A.J. (Eds.), The Mesozoic Flood Volcanism of the Parana Basin: Petrogenetic and Geophysical Aspects.* IAG-USP, São Paulo, Brazil, 1-13.
- MELIM, L. A., ANSELMETTI, F.S. and EBERLI, G.P., 2001. The importance of pore type on permeability of neogene carbonates. Great Bahama Bank. *In: Subsurface Geology of a Prograding Carbonate Margin, Great Bahama Bank: Results of the Bahamas Drilling Project* (ed. Ginsburg, R.N.), SEPM Special Publication 70.
- MIKHAIL, R. Sh. and ROBENS, E., 1983. *Microstructure and Thermal Analysis of Solid Surfaces*, Wiley, Chichester.
- MURATA, K.J., FORMOSO, M.L.L., and ROISENBERG, A., 1987. Distribution of zeolites in lavas of southeastern Parana Basin, State of Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Geology*, 98, 455-467.
- NELSON, C.E., JERRAM, D.A., and HOBBS, R.H., 2009. Flood basalt facies from borehole data: implications for prospectivity and volcanology in volcanic rifted margins. *Petroleum Geoscience*, 15, 313-324.
- PEATE, D., HAWKESWORTH, C. and MANTOVANI, M., 1992. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. *Bull. Volcanol.* 55, 119–139.

- PICCIRILLO, E.M. and MELFI, A.J., 1988. The Mesozoic Flood Volcanism from the Paraná Basin (Brazil): Petrogenetic and Geophysical Aspects. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- PUJUN, W., CHONGYANG, C., YING, Z., YOUFENG, G., XUEJIAO, Q. and JIAN, Y., 2015. Characteristics of volcanic reservoirs and distribution rules of effective reservoirs in the Changling fault depression, Songliao Basin. *Natural Gas Industry*, 2, 440-448.
- REIS, G. L., MIZUSAKI, A.M., ROISENBERG, A. and RUPERT, R.R., 2014. Formação Serra Geral (Cretáceo da Bacia do Paraná): um análogo para os reservatórios ígneo – básicos da margem continental brasileira. *Pesquisas em Geociências*, 41 (2), 155-168.
- ROGERS, K.L., NEUHOFF, P.S., PEDERSEN, A.K. and BIRD, D.K., 2006. CO₂ metassomatism in a basalt-hosted petroleum reservoir, Nuussuaq, West Greenland. *Lithos*, 92, 55–82.
- ROSSETTI, L.M., LIMA, E.F., WAICHEL, B.L., HOLE, M.J., SIMOES, M.S. and SCHERER, C.M.S., 2017. Lithostratigraphy and volcanology of the Serra Geral Group, Paraná-Etendeka Igneous Province in Southern Brazil: Towards a formal stratigraphical framework. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.
- SAAR, M.O. and MANGA, M., 1999. Permeability – porosity relationship in vesicular basalts. *Geophysical Research Letters*, 26 (1), 111-114.
- SCHUTTER, S.R., 2003. Hydrocarbon occurrence and exploration in and around igneous rocks. In: PETFORD, N., MCCAFFREY, K.J.W (eds). *Hydrocarbons in crystalline rocks*. *Geol Soc Spec Publ*, 214, 7–33.
- SELLEY, R. C., 1998. *Elements of petroleum geology*. Academic Press, Second Edition.
- SIGURDSSON, O. and STEFANSSON, V., 2002. Porosity structure of Iceland basalt. *Proc. Estonian Acad. Sci. Geol.*, v. 51 (1), 33-46.
- SRUOGA, P., RUBINSTEIN, N. and HINTERWIMMER, G., 2004. Porosity and permeability in volcanic rocks: a case study on the Serie Tobifera, South Patagonia, Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 132 (1), 31-43.
- SRUOGA, P. and RUBINSTEIN, N., 2007. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquén basins, Argentina. *AAPG Bull.*, 91 (1), 115-129.
- WAICHEL, B.L., LIMA, E.F., VIANA, A.R., SCHERER, C.M., BUENO, G.V. and DUTRA, G., 2012. Stratigraphy and volcanic facies architecture of the Torres Syncline, Southern Brazil, and its role in understanding the Paraná–Etendeka Continental Flood Basalt Province. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 215–216, 74–82.
- WU, X., LIU, T., SU, L. and SU, J., 2010. Lithofacies and reservoir properties of Tertiary igneous rocks in Qikou Depression, East China. *Geophysical Journal International*, 181, 847-857.
- ZOU, C., ZHAO, W., JIA, C., ZHU, R., ZHANG, G., ZHAO, X. and YUAN X., 2008. Formation and distribution of volcanic hydrocarbon reservoirs in sedimentary basins of China. *Petroleum Exploration and Development*, 35(3), 257-271.

ZOU, C., GUANGYA, Z., RUKAI, Z., XUANJUN, Y., XIA, Z., LIANHUA, H., BAIHONG, W. and XIAOZHI, W., 2013. Volcanic Reservoirs in Petroleum Exploration. Elsevier.

CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os resultados deste trabalho, foram observadas heterogeneidades nos sistemas porosos de amostras do Grupo Serra Geral. Esta diversidade ocorre principalmente devido aos processos de emplacement e processos secundários, porém também foi notada entre diferentes zonas internas dos derrames.

Nas amostras de derrames coerentes as porosidades encontradas são variáveis, porém as amostras com os maiores valores são do litotipo autoclástica (topo brechado de *rubbly pahoehoe*). Nos derrames coerentes, a variação foi principalmente percebida quando diferentes zonas internas dos derrames foram comparadas: base e topo de lobos *pahoehoe* exibem diferentes tipos de poros e valores de porosidade. A influência de processos secundários (pós-*emplacement*) também foi observada nas amostras estudadas, sendo que se constatou o preenchimento de poros por assembleia de minerais secundários e a presença de fraturas que podem conectar poros isolados.

A porosidade obtida através da análise das imagens obtidas pela técnica de μ -CT não foi equivalente aos valores obtidos pela técnica experimental. Mesmo analisando as amostras em três diferentes resoluções de imagens, os valores medidos pelo porosímetro não são alcançados. Esta diferença, em parte é explicada pela limitação da resolução de imagem, isto é, os poros cujos tamanhos são menores do que a resolução da imagem adquirida não são observados. Adicionalmente, a análise destas imagens permitiu constatar que o sistema poroso das amostras do Grupo Serra Geral é multiescalar, o que indica que poros menores (dimensões nanométricas) não puderam ser observados nem contabilizados. Entretanto, a técnica demonstrou ser útil para a caracterização dos poros vulcânicos, permitindo a visualização tridimensional das variações de porosidade ao longo dos plugues, o que auxiliou na compreensão das heterogeneidades destas rochas.

CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS DA DISSERTAÇÃO

Almeida, F.F.M. 1986. Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós Paleozóico no Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 16: 325-349.

- Baker, D.R., Mancini, L., Polacci, M., Higgins, M.D., Gualda, G.A.R., Hill, R.J., Rivers, M.L. 2012. An introduction to the application of X-ray microtomography to the three-dimensional study of igneous rocks. *Lithos*, 148, 262-276.
- Barreto, C.J.S., Lima, E.F., Scherer, C.M., Rossetti, L.M.M. 2014. Lithofacies analysis of basic lava flows of the Paraná igneous province in the south hinge of Torres Syncline, Southern Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 285: 81–99.
- Barreto, C.J.S., Lima, E.F., Goldberg, K. 2017. Primary vesicles, vesicle-rich segregation structures and recognition of primary and secondary porosities in lava flows from the Paraná igneous province, southern Brazil. *Bulletin of Volcanology*, 79: 31.
- Bellieni, G., Comin-Chiaromonte, P., Marques, L.S., Melfi, A.J., Piccirillo, E.M., Nardy, A.J.R.; Roisenberg, A. 1984. High- and Low-Ti flood basalts from the Paraná plateau (Brazil): Petrogenetic and geochemical aspects bearing on their mantle origin. *Neues Jahrbuch für Mineralogie (Abhandlungen)*, 150: 272-306.
- Bryan, S.E. & Ernst, R.E. 2008. Revised definition of Large Igneous Provinces (LPIs). *Earth-Science Reviews*, 86: 175-202.
- Bryan, S.E. & Ferrari, L. 2013. Large Igneous Provinces and Silicic Large Igneous Provinces: progress in our understanding over the last 25 years. *Geological Society of America Bulletin*, 125: 1053-1078.
- Cañón-Tapia, E. 2010. Origin of Large Igneous Provinces: The importance of a definition. *The Geological Society of America*. Special Paper 470.
- Coffin, M.F. & Eldholm, O. 1994. Large igneous provinces: Crustal structure, dimensions and external consequences. *Reviews of Geophysics*, 32 (1): 1-36.
- Colombier, M., Wadsworth, F.B., Gurioli, L., Scheu, B., Kueppers, U., Di Muro, A., Dingwell, D.B. 2017. The evolution of pore connectivity in volcanic rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 462, 99-109.
- Couves, C., Roberts, S., Racey, A., Troth, I., Best, A. 2016. Use of X-ray computed tomography to quantify the petrophysical properties of volcanic rocks: a case study from Tenerife, Canary Islands. *Journal of Petroleum Geology*, 39 (1), 79-94.
- De Ros, L.F, Goldberg, K., Abel, M., Victorinetti, F., Mastella, L., Castro, E. 2007. Advanced acquisition and management of petrographic information from reservoir

rocks using the Petroledge® System. AAPG Annual Conference and Exhibition, Long Beach, CA, USA, Extended Abstracts, 6.

Farooqui, M. Y., Hou, H., Li, G., Machin, N., Neville, T., Pal, A., Shrivastva, C., Wang, Y., Yang, F., Yin, C., Zhao, J., Yang, X. 2009. Evaluating Volcanic Reservoirs. *Oilfield Review*, 21 (1), 36-46.

Fernandes, C.P. Moreira, A.C., Mantovani, I.F., Appoloni, C.R., Fernandes, J.S., Souza, M. K., Santos, V.S.S. 2012. Caracterização do sistema poroso de rochas-reservatório com microtomografia computadorizada de raios X. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 20, (1/2): 129-144.

Janasi, V.A., Freitas, V.A., Heaman, L.H. 2011. The onset of flood basalt volcanism, Northern Paraná Basin, Brazil: a precise U–Pb baddeleyite/zircon age for a Chapecó type dacite. *Earth and Planetary Science Letters*, 302 (1): 147–153.

Jerram, D. 2002. Volcanology and facies architecture of flood basalts. In: Menzies, M.A., Klemperer, S.L., Ebinger, C.J., Baker, J. (Eds.). *Volcanic Rifted Margins. Geological Society of America Special Paper*, 362: 121-135.

Landis, E.N. & Keane, D.T. 2010. X-ray microtomography. *Materials characterization*, 61: 1305-1316.

Lenhardt, N. & Gotz, A.E. 2011. Volcanic settings and their reservoir potential: an outcrop analogue study on the Miocene Tepoztlán Formation, Central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 204: 66-75.

Lima, E.F., Philipp, R.P, Rizzon, G.C., Waichel, B.L., Rossetti, L.M.M. 2012. Sucessões vulcânicas e Modelo de Alimentação e Geração de Domos de Lava Ácidos da Formação Serra Geral na Região de São Marcos-Antônio Prado (RS). *Revista Geologia da USP, Série Científica*, 12: 49-64.

Machado, A.C. 2012. Estudo de parâmetros microestruturais de rochas-reservatório para diferentes resoluções utilizando microtomografia computadorizada 3D. Dissertação de mestrado, Rio de Janeiro: UFRJ.

Mantovani, I.F. 2013. Microtomografia e nanotomografia de raios X aplicada à caracterização multiescalar de sistemas porosos carbonáticos. Tese de doutorado, Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Florianópolis: UFSC.

- Mantovani, M.S.M., Marques, L.S. Sousa, M.A., Civetta, L., Atalla, L., Innocenti, F. 1985. Trace element and strontium isotope constraints on the origin and evolution of Paraná continental flood basalts of Santa Catarina State, southern Brazil. *Journal of Petrology*, 26: 187-209.
- McPhie, J., Doyle, M., Allen, R. 1993. *Volcanic Textures: A guide to the interpretation of textures in volcanic rocks*. Tasmania, 191 p.
- Melfi, A.J., Nardy, A.J.R., Piccirillo, E.M. 1988. Geological and magmatic aspects of the Paraná Basin: An introduction. In: Piccirillo, E.M. & Melfi, A.J. (eds.). *The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin: Petrogenetic and geophysical aspects*. IAG-USP, pp. 1-13.
- Milner, S.C., Duncan, A.R., Whittingham, A.M., Ewart, A. 1995. Trans-Atlantic correlation of eruptive sequences and individual silicic volcanic units within the Paraná-Etendeka Igneous Province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 69: 137-157.
- Murata, K.J., Formoso, M.L.L., Roisenberg, A. 1987. Distribution of zeolites in lavas of southeastern Parana Basin, State of Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Geology*, 98: 455-467.
- Peate, D.W., Hawkeswort, C.J., Mantovani, M.S.M. 1992. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. *Bulletin of Volcanology*, 55: 119-139.
- Polo, L.A. & Janasi, V.A. 2014. Volcanic stratigraphy of intermediate to acidic rocks in southern Paraná Magmatic Province, Brazil. *Revista Geologia USP, Série Científica*, 14 (2): 83-100.
- Pujun, W., Chongyang, C., Ying, Z., Youfeng, G., Xuejiao, Q., JIAN, Y. 2015. Characteristics of volcanic reservoirs and distribution rules of effective reservoirs in the Changling fault depression, Songliao Basin. *Natural Gas Industry*, 2: 440-448.
- Reis, G. L., Mizusaki, A.M., Roisenberg, A., Rupert, R.R. 2014. Formação Serra Geral (Cretáceo da Bacia do Paraná): um análogo para os reservatórios ígneo – básicos da margem continental brasileira. *Pesquisas em Geociências*, 41 (2): 155-168.

- Renne, P., Ernesto, M., Pacca, I.G., Coe, R.S., Glen, J.M., Prevot, M., Richards, M.A. 1992. The age of Paraná flood volcanism, rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-Cretaceous Boundary. *Science*, 258: 975-979.
- Rogers, K.L., Neuhoff, P.S., Pedersen, A.K., Bird, D.K. 2006. CO₂ metassomatism in a basalt-hosted petroleum reservoir, Nuussuaq, West Greenland. *Lithos*, 92: 55–82.
- Rossetti, L.M.M., Lima, E.F., Waichel, B.L., Hole, M.J., Simoes, M.S., Scherer, C.M. 2017. Lithostratigraphy and volcanology of the Serra Geral Group, Paraná-Etendeka Igneous Province in Southern Brazil: Towards a formal stratigraphical framework. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.
- Sheth, H.C. 2007. 'Large Igneous Provinces (LIPs)': Definition, recommended terminology, and a hierarchical classification. *Earth-Science Reviews*, 85 (3-4): 117-124.
- Schutter, S.R. 2003. Hydrocarbon occurrence and exploration in and around igneous rocks. In: Petford, N., Mccaffrey, K.J.W (eds). Hydrocarbons in crystalline rocks. *Geological Society, London, Special Publications*, 214: 7–33.
- Spence, G.H., Couples, G.D., Bevan, T.G., Aguilera, R., Cosgrove, J.W., Daniel, J.M., Redfern, J. 2014. Advances in the study of naturally fractured hydrocarbon reservoirs: a broad integrated interdisciplinary applied topic. *Geological Society, London, Special Publications*, 374: 1-22.
- Sruoga, P. & Rubinstein, N. 2007. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquén basins, Argentina. *AAPG Bulletin*, 91(1): 115-129.
- Sruoga, P., Rubinstein, N., Hinterwimmer, G. 2004. Porosity and permeability in volcanic rocks: a case study on the Serie Tobifera, South Patagonia, Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 132(1): 31-43.
- Turner, S., Regelous, M., Kelley, S., Hawkesworth, C.J, Mantovani, M.S.M. 1994. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 121: 333-348.
- Vieira, L.D. 2016. Caracterização dos tipos de porosidade em rochas vulcânicas da Formação Serra Geral por Microtomografia de Raios X de radiação síncroton. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina.

Voltolini, M., Zandomenoghi, D., Mancini, L., Polacci, M. 2011. Texture analysis of volcanic rock samples: Quantitative study of crystals and vesicles shape preferred orientation from X- ray microtomography data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 202: 83-95.

Waichel, B.L., Lima, E.F., Viana, A., Scherer, C.M.S, Bueno, G., Dutra, G.T. 2012. Stratigraphy and volcanic facies architecture of the Torres Syncline, Southern Brazil, and its role in understanding the Paraná-Etendeka Continental Flood Basalt Province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 215: 74-82.

Zou, C., Zhao, W., Jia, C., Zhu, R., Zhang, G., Zhao, X., Yuan, X. 2008. Formation and distribution of volcanic hydrocarbon reservoirs in sedimentary basins of China. *Petroleum Exploration and Development*, 35(3): 257-271.

Zou, C., Guangya, Z., Rukai, Z., Xuanjun, Y., Xia, Z., Lianhua, H., Baihong, W., Xiaozhi, W., 2013. *Volcanic Reservoirs in Petroleum Exploration*. Elsevier.

ANEXO – COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO ARTIGO

Journal of Petroleum Geology <onbehalfof+ct+jpg.co.uk@manuscriptcentral.com> 16:22 (Há 3 horas) ☆ ↶ ▾
para mim, mim, evandro.lima, breno ▾

inglês ▾ > português ▾ Traduzir mensagem Desativar para: inglês ×

31-Aug-2017

Dear Miss Becker:

Your manuscript entitled "Volcanic pore system quantification and characterization: a case study from Serra Geral Group, Southern Brazil" by Becker, Monique; Lima, Evandro; Waichel, Breno, has been successfully submitted online and is presently being given full consideration for publication in Journal of Petroleum Geology.

Co-authors: Please contact the Editorial Office as soon as possible if you disagree with being listed as a co-author for this manuscript.

Your manuscript ID is JPG-OA-2017-0099.

Please mention the above manuscript ID in all future correspondence or when calling the office for questions. If there are any changes in your street address or e-mail address, please log in to Manuscript Central at <https://mc.manuscriptcentral.com/jpg> and edit your user information as appropriate.

You can also view the status of your manuscript at any time by checking your Author Center after logging in to <https://mc.manuscriptcentral.com/jpg>.

Thank you for submitting your manuscript to Journal of Petroleum Geology.

Sincerely,
Journal of Petroleum Geology Editorial Office

CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DO SISTEMA POROSO EM ROCHAS BÁSICAS E ÁCIDAS DO Grupo Serra Geral

Área de Concentração: Geoquímica

Autor: Monique Becker

Orientador: Evandro Fernandes de Lima

Co-orientador: Breno Leitão Weichel

Examinador: Claiton M.S.Scherer

Data: 26/09/2017

Conceito: A

Parecer:

A dissertação da aluna Monique Becker consiste em trabalho de excelente qualidade, com objetivos claros e bem definidos, que foram plenamente alcançados. O estudo é inédito, tendo um amplo interesse internacional. O trabalho foca na caracterização e quantificação do sistema permo-poroso de rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral no Rio Grande do Sul, tendo como base o arcabouço estratigráfico proposto por Rossetti et al., (2017). A metodologia é adequada para resolução do problema geológico, integrando diferentes técnicas (petrografia convencional, microtomografia e petrofísica convencional). Os dados foram integrados, discutindo-se as similaridades e incongruências entre as diferentes técnicas, conseguindo-se um entendimento da distribuição da porosidade e permeabilidade em derrames vulcânicos. A diferença nos valores de porosidade entre a microtomografia e a petrofísica convencional foi discutida de forma competente, estabelecendo-se as diferenças escalas de análise de cada uma das técnicas. A bibliografia utilizada é atual e pertinente ao tema da dissertação. As figuras são de boa qualidade e complementares ao texto, embora as figuras referentes visualização 3D da porosidade pudessem ser de tamanho maior.

Entre os aspectos que podem ser melhorados no artigo, destaco os seguintes aspectos:

- 1) A numeração das primeiras figuras do artigo encontra-se errada. Não existem as figuras 1 e 2 no artigo.
- 2) A autora poderia ter elaborado figuras esquemáticas ilustrativas da distribuição do espaço permo-poroso dentro de cada tipologia de derrames vulcânicos (pahohoe, rubbly, ...), auxiliando na visualização espacial das características petrofísicas
- 3) Apesar de não ter sido objetivo da dissertação, acredito que a autora poderia ter discutido, mesmo que rapidamente, a distribuição espacial das fácies reservatórios e das prováveis barreiras de fluxo nas diferentes tipologias de derrames vulcânicos.

Em suma, considero a dissertação de muito boa qualidade, estando a Mestre Monique Becker e o seus orientadores de parabéns.



Prof. Dr. Claiton M. S. Scherer
IG/UFRGS

Prof. Claiton M. S. Scherer
Instituto de Geociências
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS
Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia
CEP 91501-970 Porto Alegre, RS

Tel.: (+55) 51 33086920
Fax: (+55) 51 33087047
E-mail: claiton.scherer@ufrgs.br

ANEXO I

Título da Dissertação/Tese:

“CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DO SISTEMA POROSO EM ROCHAS BÁSICAS E ÁCIDAS DO GRUPO SERRA GERAL”

Área de Concentração: GEOQUÍMICA

Autor: **MONIQUE BECKER**

Orientador: Prof. Dr. Evandro Fernandes de Lima

Examinador: Prof. Dr. Carlos Augusto Sommer

Data: 11/09/2017

Conceito: A

PARECER:

A Dissertação de Mestrado da Sra. MONIQUE BECKER, intitulada “CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DO SISTEMA POROSO EM ROCHAS BÁSICAS E ÁCIDAS DO GRUPO SERRA GERAL” tem como objetivos principais investigar a petrofísica (porosidade e permeabilidade) através de métodos experimentais convencionais, microtomografia de Raios-X e de análise petrográfica em rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral, vinculados a diferentes fácies de derrames, tanto básicos quanto ácidos. Para este estudo foram focadas duas áreas da Província Magmática Paraná-Etendeka no Rio Grande do Sul: i) perfil Santa Cruz do Sul – Herveiras; ii) região de Nova Pádua e São Marcos.

A dissertação está estruturada na forma de artigo científico, seguindo as normas do PPGEO desta Universidade, no qual um artigo submetido, corresponde ao capítulo principal da dissertação. A obra é complementada por uma parte introdutória, constituída de Introdução, Estado da Arte, Materiais e Métodos e uma parte final, composta pelas Conclusões e Referências Bibliográficas.

A dissertação está muito bem organizada, apresentando uma redação correta o que facilita a leitura e compreensão do texto. A disposição e organização dos capítulos permitem ao leitor um aprofundamento gradual e constante sobre o tema trabalho. Todas as figuras e tabelas são pertinentes e editadas com uma resolução adequada.

A **Introdução** apresenta a temática a ser desenvolvida na dissertação, bem como os objetivos propostos e a organização do trabalho.

O capítulo II, **Revisão bibliográfica e contexto geológico regional**, traz uma excelente revisão sobre as Províncias Basálticas Continentais e o contexto geológico regional da PBC do Paraná-Etendeka. Discute ainda, as questões relacionadas a temática de porosidade e permeabilidade em rochas vulcânicas e a importância para a exploração de óleo, gás e recursos hídricos. Merece, com certeza, um destaque especial pela organização e temática abordada, baseada em bibliografia recente, fornecendo uma base sólida para a leitura e compreensão de toda a dissertação.

O capítulo de **Metodologia** (III) apresenta todas as etapas de trabalho e métodos utilizados na execução do projeto. Destaca-se neste capítulo o método de microtomografia de Raio-X, não muito utilizado em geologia, mas com um potencial muito grande para esta área de conhecimento.

O capítulo IV é a principal parte da dissertação e é representado pelo artigo científico **“VOLCANIC PORE SYSTEM QUANTIFICATION AND CHARACTERIZATION: A CASE STUDY FROM SERRA GERAL GROUP, SOUTHERN BRAZIL”** submetido a revista *Journal of Petroleum Geology*. O artigo está muito bem organizado e tem como objetivos principais os mesmos da própria dissertação, descritos na parte introdutória. Os resultados obtidos pelas duas metodologias foram muito interessantes e satisfatórios. É muito provável que o artigo seja publicado e será uma ótima fonte de consulta para pesquisas focadas na mesma temática.

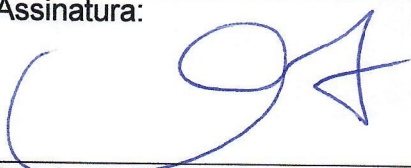
No quinto capítulo são apresentadas as principais conclusões do trabalho, baseadas nas interpretações e resultados discutidos nos capítulos anteriores.

As **Referências Bibliográficas** relacionadas ao corpo e ao artigo são todas pertinentes, atualizadas e apresentadas com formatação correta.

Em síntese, pode-se constatar através desta Dissertação que a mestranda atingiu plenamente todos os objetivos propostos para um mestrado acadêmico, utilizando diferentes técnicas e métodos na resolução de questões relacionadas a porosidade e permeabilidade de rochas vulcânicas, um tema pouco investigado na comunidade científica nacional e internacional. Com certeza, pode ser considerada uma excelente contribuição que proporcionará um grande avanço científico na compreensão sobre esta temática e será uma referência para trabalhos futuros e para a exploração de óleo e gás.

Ante ao exposto, sou de parecer positivo e considero a dissertação em análise plenamente aprovada e parabeno o aluno, seu orientador e a instituição pelo nível de excelência do trabalho.

Assinatura:



Data:

11/09/2017

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

ANEXO I

Título da Dissertação/Tese:

"CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DO SISTEMA POROSO EM ROCHAS BÁSICAS E ÁCIDAS DO GRUPO SERRA GERAL"

Área de Concentração: GEOQUÍMICA

Autor: **MONIQUE BECKER**

Orientador: Prof. Dr. Evandro Fernandes de Lima

Examinador: Dra. Iara Frangiotti Mantovani

Data: 20/09/2017

Conceito: A

PARECER:

Primeiramente desejo agradecer a indicação de meu nome para integrar a Comissão Examinadora da Dissertação de Mestrado de Monique Becker. Foi com muito prazer que fiz a leitura do texto e espero que meus comentários contribuam ao trabalho final.

Mesmo sendo de área diferente da Geociências e por vezes me deparando com terminologias desconhecidas por mim, a leitura da dissertação foi uma tarefa prazerosa e bastante enriquecedora. Esta abordou um tema muito interessante que necessita de grande atenção devido à complexidade do material de estudo.

A seguir gostaria de fazer alguns comentários, mais pontuais, que são apenas sugestões, competindo ao autor e seus orientadores decidirem se são significativos ao trabalho.

O termo raios X é, em geral, mais comum do que o apresentado no texto por raios-X (com hífen). Em inglês está correto o uso do hífen: X-ray.

O termo network no artigo não é adequado para se referir a fase porosa da rocha (após a binarização). Na verdade, as figuras 4 (p. 30), 5 (p. 31), 6 (p. 33) e 7 (p. 34) são visualizações tridimensionais da fase porosa (ou apenas, dos poros). A rede de poros (network) é uma simplificação do sistema poroso da amostra, geralmente representadas por esferas e cilindros, ou qualquer forma simples. A rede só é utilizada na determinação da permeabilidade (na referida dissertação) ou de qualquer outra propriedade de escoamento de fluido (como permeabilidade absoluta e relativa, pressão capilar, etc). Assim, sugiro a alteração do termo pore network para pore phase ou apenas pore ao longo do artigo.

Gostei muito de como a autora apresentou as figuras 4 (p. 30) e 5 (p. 31). Ótimo exemplo de como as análises qualitativas (visualização 3D dos poros) e quantitativas (perfil de porosidade) se complementam e enriquecem a compreensão e descrição do material em estudo. Apenas uma observação, as Fig. 4c e 4e (p. 30) são apresentadas sem os eixos.

Página 15, linha 14 e 15, os plugues das escalas 2 e 3 são na verdade subplugues. Foram retirados plugues menores do plugue original da escala 1. E similarmente para página 24, linha 9 e 10, subplug no lugar de plugs das escalas 2 e 3.

Página 34 na legenda da Fig. 7b linha 9, onde se lê: 600x600x600x600x100, acredito ser na verdade 600x600x100.

Sem dúvida as discussões e conclusões da autora são importantes para a investigação das rochas básicas e ácidas do grupo Serra Geral, mas não se restringem a elas. O trabalho aqui exposto poderá ser utilizado como referência na análise de rochas que apresentem sistemas porosos similares em complexidade.

Considerado o exposto nestas linhas, sou de parecer favorável à aprovação da dissertação de Monique Becker, Caracterização e quantificação do sistema poroso em rochas básicas e ácidas do grupo Serra Geral e atribuo o conceito A.

Assinatura:

Data:

Lara F. Mantovani

20/09/17

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno: