**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Condicionamento Estrutural e Litológico da Porosidade Cárstica da Formação
Sete Lagoas, Município de Sete Lagoas (MG)**

Jorge Ramón Peñaranda Salgado

Orientador: Dr. Ivo Karmann

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
VERSÃO CORRIGIDA**

Programa de Pós-graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

**SÃO PAULO
2016**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica preparada pelo Serviço de Biblioteca e Documentação do
Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo

Penaranda Salgado, Jorge Ramon
Condicionamento estrutural e litológico da
porosidade cárstica da Formação Sete Lagoas,
Município de Sete Lagoas (MG) / Jorge Ramon
Penaranda Salgado. - São Paulo, 2016.

75 p.: il. + anexos

Dissertação (Mestrado) : IGc/USP
Orient.: Karmann, Ivo

1. Carste 2. Porosidade 3. Hidrogeologia 4.
Sete Lagoas 5. Hidrocarbonetos I. Título

Dedico este trabalho à minha família, aos meus amigos, a todos aqueles que de maneira direta ou indireta colaboraram na formação do meu caráter, mas especialmente aos professores com os quais eu convivi aprendendo, e conseguiram me tornar o geólogo que eu sou.

“Entre o vazio e cheio, parece-nos haver uma perfeita correlação. Um não é inteligível sem o outro, e sobretudo uma ação não se esclareceria sem a outra. Se nos recusam a intuição do vazio, estamos no direito de recusar a intuição do cheio”
(Bachelard)

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento desta dissertação de mestrado foi uma experiência marcada pelo contexto de limitações orçamentárias que a universidade pública vem sofrendo, igual acontece com muitas outras instituições no nosso país. O meu trabalho não foi alheio ao momento de dificuldades e como bom brasileiro, encontrei uma maneira criativa de concretizar esta dissertação, a qual espero que esteja à altura da nossa escola. Preciso agradecer, em primeiro lugar, ao meu orientador Ivo Karmann, inteligente, solidário, isento de qualquer preconceito e muito paciente diante das minhas deficiências. Como ninguém, ele soube aproveitar também as minhas aptidões e, em conjunto, conseguimos realizar um trabalho do qual me sinto orgulhoso. Em segundo lugar, à PETROBRÁS e ao programa de formação de recursos humanos representado e tão competentemente dirigido pelo professor André Sakauchi. Gostaria de agradecer também ao CEPAS (Centro de Pesquisas em Águas Subterrâneas), especificamente aos professores Reginaldo Bertolo e Ricardo Hirata que me apoiaram incondicionalmente para poder dar continuidade à pesquisa no momento mais crítico. Ao Paulo Galvão, colaborador nos debates e um imenso amigo, só comparável ao Ninguém (Renato Paes de Almeida), que me apoiou desde o dia que nos conhecemos há mais de vinte anos. De forma muito pessoal, também ao Augusto Auler, que me colocou em contato com as instituições e pessoas em Minas Gerais vinculadas ao estudo do carste de Sete Lagoas e região.

Os grupos e instituições colaboradoras aos quais devo um agradecimento especial: ao SAAE, à DBIO/IEF/SISEMA, ao Grupo Espeleológico Bambuí, à CPRM, ao grupo de escalada de Sete Lagoas e à CARSTE.

Finalmente uma lembrança especial à família Mattar representada pelo Ricardo, me acolheram com solidariedade e compreensão no momento mais crítico, sem a sua generosidade este projeto pessoal seria impossível,

RESUMO

A seleção da área de pesquisa, localizada na região do município de Sete Lagoas (MG), surgiu pelo interesse em desenvolver o conhecimento de aspectos específicos da geologia do carste pouco estudados das rochas carbonáticas neoproterozoicas de uma área representativa da Formação Sete Lagoas (FSL). O estudo dos aspectos litológicos, geoquímicos, estruturais e cársticos abordados neste trabalho permitiram estabelecer algumas diferenças importantes para o desenvolvimento da porosidade de dissolução das rochas dos membros Pedro Leopoldo (MPL) e Lagoa Santa (MLS) da FSL. O estudo estrutural da porosidade secundária permitiu distinguir três conjuntos principais de descontinuidades rúpteis, cujas direções principais C1, C2 e C3, com orientações subverticais são: N10-20E, N30-40E e N80-W, respectivamente; estes conjuntos combinados com a superfície de acamamento individualizaram 3 linhas de interseção L1, L2 e L3: N20E/6-10°, N40E/6-10° e N80W/6-10°, as quais guiam grande parte do desenvolvimento da porosidade terciária cárstica das rochas da FSL. As diferenças geoquímicas e litológicas entre os membros da FSL são outro fator determinante para os diferentes graus de carstificação observados em campo, sendo que o MLS é mais susceptível à dissolução e à formação de porosidade terciária devido aos baixos teores médios de MgO e de resíduo insolúvel, em relação ao MPL. O sistema cárstico do MLS apresenta um sistema de drenagem subterrânea bem desenvolvido, com feições de iniciação freática atualmente na zona vadosa que indicam a presença de um sistema de condutos freáticos em desenvolvimento. Interpretou-se, também, a presença de provável carste subjacente (interestratal) no MLS abaixo da cobertura metapelítica da Formação Serra de Santa Helena, a qual recarrega os calcários através do seu sistema de fraturamento. A sistemática aplicada no presente estudo permitiu determinar os fatores condicionantes litológicos e estruturais para a evolução da porosidade nas rochas carbonáticas da FSL, e pode ser aplicada como análogo ao estudo da porosidade terciária em rochas desta Formação em outros setores da Bacia do São Francisco.

ABSTRACT

The research area, located in the region of Sete Lagoas municipality (MG) has been selected in order to develop specific aspects of karst geology on the neo proterozoic carbonate rocks of a representative area of the Sete Lagoas Formation (SLF). The study of lithological, geochemical, structural, and karst issues addressed in this study allowed to establish some important differences in the development of dissolution porosity of the Pedro Leopoldo (PLM) and Lagoa Santa (LSM) members of the SLF. The structural study of the secondary porosity allowed to distinguish three main sets of fractures called C1, C2, and C3, their main directions are N10-20E, N30-40E, and N80-W respectively, with subvertical dips. These sets combined with the bedding surface defined three interception lines called L1, L2 and L3: N20E/6-10°, N40E/6-10°, and N80W/6-10°, which guides much of the development of the tertiary porosity of the SLF carbonate rocks. The geochemical and lithological differences between the members of the SLF are also determining factors for the different degrees of karstification observed in the field, LSM is more susceptible to dissolution and to form tertiary porosity due to lower mean levels of MgO and insoluble residue, compared to PLM. The LSM karst system has a well-developed groundwater drainage system with phreatic features (anastomosis and proto conduits) currently at the vadose zone, which indicate the presence of a developing phreatic conduit system. The morphological pattern and geological setting of the Rei do Mato cave suggests the presence of a probable subjacent karst (interstratal) in the LSM, below the metapelitic cover of the Serra de Santa Helena Formation, which recharges the limestone through its fracture system. The results of the present study allowed to determine the lithological and structural conditioning factors for the evolution of porosity in the SLF carbonate rocks, which can be applied as analogous to the study of the tertiary porosity in rocks of this formation in other sectors of the São Francisco Basin.

ÍNDICE

ABSTRACT	vii
Índice de Figuras	x
Índice de tabelas	xi
Índice de fotografias	xii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Apresentação do tema	1
1.2 Seleção da área de estudo	2
1.3 Objetivos da dissertação	4
2 MÉTODOS E TÉCNICAS	5
2.1 Geologia de campo e amostragem espeleológica	5
2.2 Porosidade primária	7
2.3 Porosidade secundária	10
2.4 Porosidade terciária	11
2.5 Geoquímica dos membros da Formação Sete Lagoas	13
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	15
4 ESTUDO DA POROSIDADE NA FORMAÇÃO SETE LAGOAS	20
4.1 Porosidade primária - (deposicional e diagenética)	20
4.2 Porosidade secundária	25
4.2.1 Estratificação e superfície dobrada da Formação Sete Lagoas	25
4.2.2 Falhas e falhamentos	29
4.2.3 Sistema de fraturas	30
4.2.4 Fotolineamentos	33
4.3 Porosidade terciária: estudo das feições de dissolução.	35

4.3.1	Condicionamento estrutural da porosidade de dissolução	35
4.3.2	Porosidade associada a condutos	38
4.3.3	Controle litológico da porosidade terciária	54
5	ASPECTOS DO SISTEMA CÁRSTICO ASSOCIADOS AOS	
	MEMBROS PEDRO LEOPOLDO E LAGOA SANTA	63
6	CONCLUSÕES	66
	REFERÊNCIAS	68
	Anexo I	72
	Anexo II	85

Índice de Figuras

Figura 1. Localização da área de pesquisa. Em posição central, contorno de linha continua o Município de Sete Lagoas.	Pg. 3
Figura 2. Localização de pontos de amostragem e de cavernas estudadas.	Pg. 6
Figura 3. Tipos básicos de porosidade e os critérios de classificação proposto.	Pg. 9
Figura 4. Mapa geológico mostra o perfil esquemático e coluna estratigráfica simplificada da área de estudo.	Pg. 19
Figura 5. Representação em estereograma das medidas de direção e mergulho de acamamento obtidas em campo.	Pg. 28
Figura 6. Estereograma e o histograma do tratamento estatístico de medidas.	Pg. 31
Figura 7. Interseção dos planos de acamamento (S0, representados pelas linhas contínuas) com os conjuntos principais de fraturas dominantes, linhas tracejadas. L1, L2 e L3.	Pg. 32
Figura 8. Imagem superior, mapa da localização dos lineamentos coincidentes com as rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas.	Pg. 34
Figura 9. 9A) Histograma de comprimentos acumulados de segmentos de cavernas medidos a partir da projeção planimétrica versus sua direção. 9B) Projeção planimétrica simplificada da caverna Rei do Mato. 9C). Rosácea, 180º das orientações de fraturas medidas da Formação Sete Lagoas, intervalos de 10º em 10º graus.	Pg. 41
Figura 10. 10A) Histograma de comprimentos acumulados de segmentos de cavernas medidos a partir da projeção planimétrica versus sua direção. 10B) Projeção planimétrica simplificada da Caverna Cascata II. 11C) Rosácea, 180º das orientações de fraturas medidas da Formação Sete Lagoas, intervalos de 10º em 10º graus.	Pg. 43
Figura 11. 11A) Histograma de comprimentos acumulados de segmentos de cavernas medidos a partir da projeção planimétrica versus sua direção. 11B) Projeção planimétrica simplificada da Caverna Taboa. 11C) Rosácea, 180º das orientações de fraturas medidas da Formação Sete Lagoas, intervalos de 10º em 10º graus.	Pg. 45
Figura 12. 12A) Histograma de comprimentos acumulados de segmentos de cavernas medidos a partir da projeção planimétrica versus sua direção. Projeção planimétrica simplificada. 12C) Rosácea, 180º das orientações de fraturas medidas da Formação Sete Lagoas, intervalos de 10º em 10º graus.	Pg. 48
Figura 13. 13A) Histograma de comprimentos acumulados de segmentos de cavernas medidos a partir da projeção planimétrica versus sua direção. Projeção planimétrica simplificada da Caverna Lapa do Ninho.	Pg. 50
Figura 14. 14A) Histograma de comprimentos acumulados de segmentos de cavernas medidos a partir da projeção planimétrica versus sua direção.	Pg. 51
Figura 15. Mapa de feições cársticas.	Pg. 55
Figura 16. Mapa de distribuição de cavernas da área.	Pg. 56
Figura 17. Classificação química das rochas carbonáticas da área de estudo, com base no diagrama de Martinet e Sougy (1961).	Pg. 60
Figura 18. Classificação com base no diagrama de Miche et al. (2013).	Pg. 62

Índice de tabelas

Tabela 1. Principais características da porosidade microscópica.	Págs. 20 e 21
Tabela 2. Resumo dos teores em óxidos das rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas (30 amostras). Média (média simples), Max (valor máximo), Min (valor mínimo), DP (Desvio padrão) e CV (Coeficiente de variação).	Pg. 57
Tabela 3. Limites deduzidos por Rauch e White (1970) para alto potencial de formação de porosidade (PFP) de condutos (cavernas) comparados aos teores obtidos	Pg. 58

Índice de fotografias

Fotografia 1. Laminação marcada pela presença de óxidos (até 30%).	Pg. 23
Fotografia 2. Macroporo (1,5 mm). Microestilólitos ou faixas pelíticas preferenciais à dissolução.	Pg. 23
Fotografia 3. Óxidos se aglomeram em glóbulos (0,2-0,3 mm) e concentram formam estratos concordantes com o acamamento.	Pg. 23
Fotografias 4 e 5. Micro-poros no aumento de 4 x.	Pg. 23
Fotografias 6 e 7. Nicóis descruzados e cruzados de meso-poro no Membro Lagoa Santa.	Pg. 24
Fotografia 8. Composição de imagens (A, B e C) em diferentes escalas de observação da dissolução preferencial em descontinuidades do Membro Pedro Leopoldo na pedreira Paraíso.	Pg. 24
Fotografia 9. Membro Pedro Leopoldo, planos de estratificação ressaltados pela dissolução diferencial em função da composição pelítica ou carbonática dos estrados.	Pg. 26
Fotografia 10, planos de acamamento indicando percolação de água, marcada pelo crescimento de vegetação. Fotografia 11, estilólitos.	Pg. 26
Fotografia 12. pseudomorfos de aragonita da pedreira Samba.	Pg. 26
Fotografia 13. Estrutura de falha inversa, associada a fraturas preenchidas com calcita, caverna Taboa. (imagem modificada para tons de cinza). Escala corresponde a 5 cm.	Pg. 29
Fotografias 14a, 14b e 15 fendas de epicarste e pequenos condutos freáticos, acompanhando preferencialmente planos de estratificação.	Pg. 36
Fotografia 16 a 19. Dissolução formando corredores cársticos profundos sobre morros residuais do Membro Lagoa Santa na Fazenda Roxane. Fotografias 17 e 19. Dissolução nos planos de acamamento na fazenda Topazio e Roxane respectivamente. Fotografia 18. Condutos de dissolução desenvolvidas na linha de intersecção entre acamamento e fratura e no plano de acamamento.	Pg. 37
Fotografias 20 a 23. Conduto desenvolvido sobre a superfície de estratificação. Fotografia 21. Condutos que se desenvolvem na interseção acamamento-fratura. Fotografia 22: proto-condutos acompanhando S0. Fotografia 23: protoconduto isolado na interseção acamamento-fratura.	Pg. 39
Fotografias 24 a 27. Canalículos anastomosados no plano de camadas, caverna Cascata. Fotografia 25. Canalículos de anastomose na iniciação freática em acamamento. Fotografia 26. Conduto meandrante no acamamento, na Cascata I. Fotografia 27. Conduto principal acompanha o plano de acamamento com padrão suavemente sinuoso na Caverna Taboa.	Pg. 46
Fotografia 28 a 30. Seção transversal do conduto principal da Lapa do Boi, com morfologia de fenda do tipo canyon de entalhamento vadoso. Fotografia 29. Fotograma da filmagem do poço 105 a 45 m. de profundidade, mostra conduto, com aparente padrão meandrante sobre o acamamento. Fotografia 30. Fotograma da filmagem do poço 99 a 84 m. de profundidade, mostra um plano de estratificação com dissolução de 2 cm. de espessura. Fotografia 31. Pedreira Samba, Membro Pedro Leopoldo, exibindo feições de dissolução com morfologia freática.	Pg 53

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do tema

Os sistemas porosos em rochas carbonáticas são mais complexos que os de outras rochas sedimentares, pois sua solubilidade as faz mais suscetíveis a uma variedade de processos que influenciam tanto a porosidade primária que se instala durante o processo de formação destas rochas, como a porosidade que surge posterior à diagênese. A natureza solúvel das rochas carbonáticas está relacionada com a solubilidade dos seus constituintes minerais maiores: calcita, aragonita e dolomita; ou seja, o potencial de dissolução da rocha carbonática deve ser entendido do ponto de vista da sua litologia e da sua geoquímica. Trabalhos clássicos como o de Rauch e White (1970) estabeleceram relações claras entre diversos parâmetros litológicos para o potencial de geração de cavernas, um deles o teor de MgO das rochas carbonáticas.

Ao mesmo tempo, as estruturas de deposição e de deformação das rochas carbonáticas e, em especial, a formação da porosidade secundária de fraturas são cruciais para o desenvolvimento da porosidade terciária de dissolução em cavernas e cavidades.

A esta complexidade de processos de geração de vazios deve, se somar o caráter aparentemente caótico, ou errático da frequência e distribuição da porosidade nas rochas carbonáticas que influencia as propriedades intrínsecas, como a permeabilidade de formações carbonáticas Tucker e Wright (1990). Kilary (1975) e Galvão et al (2015) demonstram que a permeabilidade pode variar em até cinco ordens de grandeza, enquanto que Halihan et al (2000) calculou variações de até nove ordens de grandeza dependendo da escala de análise da porosidade em rochas carbonáticas.

O caráter solúvel das rochas carbonáticas, o condicionamento estrutural para o desenvolvimento de espaços por dissolução, a tendência à heterogeneidade da distribuição da porosidade e o problema de escala de observação dão ao estudo da

porosidade em rochas carbonáticas uma relevância ainda maior sob o ponto de vista da formação de reservatórios. Assim, um ponto fundamental para os modelos exploratórios de gás, de petróleo ou da água subterrânea em bacias carbonáticas são os condicionantes estruturais e litológicos que dão origem e distribuem a porosidade.

1.2 Seleção da área de estudo

A área de pesquisa (Figura 1) foi selecionada por apresentar diferentes compartimentos morfológicos sobre rochas carbonáticas, onde seria possível testar relações entre tipos litológicos e seu potencial para o desenvolvimento de porosidade cárstica e sua expressão morfológica em superfície. Assim, surgiu a proposta de desenvolver o conhecimento de aspectos relacionados à geração de espaço por dissolução nas rochas carbonáticas da área representada pela Formação Sete Lagoas.

A Formação Sete Lagoas foi selecionada por permitir contribuir ao conhecimento da distribuição e características da porosidade dos seus dois membros (Pedro Leopoldo e Lagoa Santa), pois a porosidade cárstica desta unidade pode ter semelhanças com o sistema poroso secundário mais antigo encontrado em subsuperfície, na mesma unidade, no centro da Bacia do São Francisco.

A área também é favorável para estudos específicos, pois já contava com levantamentos básicos e pesquisas relevantes de geologia (Pessoa, 1996, CPRM, 1991,), espeleologia (mapas de cavidades disponibilizados pelo Grupo de Espeleologia Bambuí) e hidrogeologia (Galvão, P., 2015), disponíveis na época de elaboração da proposta de pesquisa, o que facilitou a composição de uma base de dados, especialmente em relação à cartografia de cavernas, dados de poços de abastecimento e base geológica, inseridos em sistemas geográficos de informação.

O contexto de rochas carbonáticas no qual se insere a cidade de Sete Lagoas condiciona vários aspectos em seu desenvolvimento: desde o uso e ocupação do solo, dada a variabilidade da geomorfologia, ao geotécnico dado o histórico de

abatimentos de terreno, ou o hidrogeológico, pois a cidade depende integralmente da água subterrânea do carste para o abastecimento. O presente estudo pode contribuir na compreensão de alguns dos condicionantes litológicos e estruturais, que possam ajudar à gestão do uso do solo ou dos recursos hídricos do município.

Figura 1. Localização da área de pesquisa. Em posição central, contorno de linha contínua o município de Sete Lagoas, a leste o Município de Prudente de Moraes e no sentido horário a partir deste: Municípios de Capim Branco, Esmeralda, Inhaúma, Paraopeba, Caetanópolis, Araçá e Funilândia.

1.3 Objetivos da dissertação

O objetivo geral é identificar os controles litológicos e estruturais que condicionam a porosidade associada ao sistema cárstico da Formação Sete Lagoas (membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa).

Os objetivos específicos são:

I. Caracterizar os diferentes tipos de porosidade e a sua origem.

- Porosidade primária: identificar e classificar o tipo de porosidade microscópica presente nas amostras da Formação Sete Lagoas.
- Porosidade secundária: Caracterizar o sistema de fraturamento e descontinuidades nas rochas carbonáticas.
- Porosidade terciária: identificar as feições de dissolução freáticas e vadosas associadas ao desenvolvimento de condutos, desde o epicarste até a zona freática atual, com a análise morfológica dos condutos nas diferentes escalas, desde proto-condutos até cavernas.

II. Elaborar um modelo conceitual do sistema cárstico da área. O sistema cárstico da área de estudo deverá ser caracterizado através da integração dos dados de porosidade primária, secundária e terciária, hidrogeológicos, geoespeleológicos (ocorrências de cavernas e seu significado no contexto do condicionamento estrutural da porosidade terciária).

2 MÉTODOS E TÉCNICAS

2.1 Geologia de campo e amostragem espeleológica

Com o objetivo de obter amostras litológicas representativas, realizar medidas estruturais das porosidades secundária e terciária, e entender a morfologia de dissolução nas escalas de afloramento e de paisagem, foram planejadas e executadas atividades de campo que consistiram no reconhecimento das principais unidades lito-estratigráficas e das estruturas sedimentares e tectônicas das rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas. Foi realizado o reconhecimento de feições morfológicas cársticas do epicarste e de cavidades a fim de identificar as morfologias de relevância, especialmente a geologia de condutos. Foram coletadas medidas estruturais e amostras litológicas em cavidades subterrâneas, pedreiras e afloramentos da área mediante as técnicas habituais de mapeamento geológico para a orientação de estruturas, geolocalização e coleta de amostras litológicas. As pedreiras visitadas foram as pedreiras Canaã e Samba (Fazenda Braúna) e as mineradoras Ilcom, Paraíso I e Paraíso II, e Topazio; os outros pontos visitados não seguiram nenhuma organização de escala de mapeamento, mas o critério de ocorrência de afloramentos de relevância ao estudo das rochas de interesse. Também foram avaliados os perfis óticos provenientes de 29 poços de produção que foram gerados pelo SAAE e cedidos para este projeto.

Na Figura 2 apresenta-se a localização dos afloramentos, das perfilagens óticas e das cavernas estudadas de maior relevância. A tabela completa com a localização em coordenadas UTM e os resultados das medidas estruturais medidas em campo encontra-se no anexo I.

Figura 2 - Mapa simplificado de localização de pontos, cavernas e poços estudados.

2.2 Porosidade primária

Com o objetivo de identificar e classificar a porosidade presente na matriz microscópica das amostras de rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas foram confeccionadas e analisadas 30 lâminas petrográficas. As amostras escolhidas pertencem aos dois membros da Formação Sete Lagoas, Membro Pedro Leopoldo e Lagoas Santa. Cabe destacar que a técnica de impregnação das amostras sofreu limitações decorrentes da incipiente porosidade depois verificada nas lâminas. Por este motivo, a porosidade foi deduzida pelas propriedades óticas contrastantes entre poros e matriz, principalmente relevo e extinção. As amostras escolhidas pertencem aos dois membros da Formação Sete Lagoas, membros Pedro Leopoldo e Lagoas Santa. A classificação da porosidade das rochas carbonáticas teve como base a sistemática definida por Choquette e Pray (1970) que enfatiza a descrição da porosidade da petrotrama e fornece critérios descritivos básicos e de uso corriqueiro na geologia de reservatórios. Quando é possível estabelecer uma relação de dependência entre a porosidade e os elementos da petrotrama, então a porosidade será chamada de petrotrama seletiva, se não é possível estabelecer a relação de dependência, a porosidade é de petrotrama não seletiva. A classificação consiste, essencialmente, no reconhecimento do tamanho, forma, gênese e a relação do poro com os elementos sólidos da petrotrama. Trata-se de uma classificação complexa, e os limites de aplicabilidade dependem do grau de preservação da porosidade, e pode ser relativamente singela quando o tipo de porosidade é analisado sob a ótica de tamanho e abundância (características mais evidentes nas amostras que foram selecionadas para a produção de lâminas delgadas), entretanto definir os “termos modificantes” (que dizem respeito aos processos genéticos e de formação da porosidade) é tarefa árdua, baseada na experiência e na qualidade das amostras. Scholle e Ulmer-Scholle (2003) definiram um glossário dos termos da classificação de Choquette e Pray (1970), e a Figura 3 ilustra os tipos básicos de porosidade e os critérios de classificação:

A porosidade interparticular é porosidade entre as partículas da petrotrama. A porosidade intrapartícula é a porosidade no interior das partículas individuais da

rocha (por exemplo, um poro dentro de uma calcita). A porosidade intercristalina é a porosidade entre os cristais, onde a origem pode ser primária ou secundária. A móldica é resultante da retirada seletiva de um constituinte da rocha e em rochas carbonáticas, ocorre pela dissolução seletiva de alguns tipos de partículas deposicionais. A porosidade fenestral é consequência de aberturas na estrutura da rocha de dimensões maiores (largura e comprimento) que as dos interstícios suportados pelas partículas. Os poros fenestrais podem ser parcial ou totalmente preenchidos por sedimentos, ou cimento. A porosidade do tipo *shelter* (abrigo) é interpartícula, criada no espaço ao abrigo de partículas sedimentares maiores. A porosidade *growth-framework* (estrutura em crescimento) constitui uma porosidade de caráter primário gerada a partir do crescimento de estruturas nas rochas carbonáticas, um crescimento *in situ*.

A porosidade de petrotrama não seletiva se refere a fraturas ou a dissolução de cavidades de variados tamanhos que cortam a petrotrama da rocha, ou seja, que não se relacionam com ela. A porosidade fratural é a formada por fraturas, e as suas causas são as habituais para as rochas, como forças tectônicas (deformação das rochas), falhas ou motivos mais específicos às rochas carbonáticas, como abatimentos por dissolução. A porosidade do tipo canal está relacionada ao desenvolvimento de sistemas de poros alongados e a sua continuidade é tridimensional. Os poros denominados de vulgares possuem diâmetros maiores do que 1 milímetro e menores do que 16 milímetros. O importante é que não obedecem a posição, forma ou contorno dos elementos da petrotrama. Já uma porosidade do tipo caverna é caracterizada por longas aberturas; o termo aqui é meramente descritivo não genético, pois a maior parte da porosidade do tipo caverna tem como gatilho o processo de dissolução.

Um terceiro tipo, a porosidade de trama seletiva ou não seletiva, inclui subtipos específicos e apesar do nome ambíguo, é possível entender a qual tipo de poro elase refere. O poro tipo brecha (*breccia*) é do tipo interpartícula e ocorre especificamente em brechas sedimentares, comuns em determinadas fácies carbonáticas. Este tipo de porosidade ocorre em zonas de falhas, em zonas de dissolução, ou em zonas em fluxo de detritos. A porosidade de perfuração (*boring*) são aberturas geradas em rochas pela perfuração de organismos, semelhante à

porosidade do tipo toca (*burrow*), só que a primeira está vinculada a rochas rígidas, e o segundo a sedimentos não consolidados. A porosidade de gretas de contração (*shrinkage*) é produzida pela contração de sedimento pelo ressecamento de superfícies argilosas expostas à atmosfera.

TIPOS BÁSICOS DE POROSIDADE									
Petrotrama seletiva	Petrotrama não seletiva								
		Interparticular		Fratural					
		Intraparticular				Canal			
		Intercristalina						Vugular	
		Moldica							Caverna
		Fenestral							
		Abrigo							
		Estrutura em crescimento							
* Caverna aplica-se a tamanho de uma pessoa ou poros largos de formatos de canal ou vugular									

Petrotrama seletiva ou não							
	Brecha		Buraco		Toca		Greta de contração

TERMOS MODIFICANTES				
Modificadores Genéticos		Modificadores de Tamanho		
Processos	Direção ou estágio	Classes		mm
Solução	Alargamento	Megaporos	grande	256
Cimentação	Redução		pequeno	32
Sedimentação interna	Preenchimento	Mesoporos	grande	4
			pequeno	1/2
Tempo de Formação		Microporos	1/16	
Primário				
Pré-deposicional		Modificadores Abundantes		
deposicional		Percentual de porosidade		(15%)
Secundário		Razão dos tipos de porosidade		(1:2)
eogenético		Razão e percentual		(1:2) (15%)
mesogenético				
telogenético				
Processo + direção + tempo Ex: Primária cimentação reduzida				

Figura 3 – Extraída e adaptada de Choquette e Pray (1970). Tipos de porosidade e seus termos modificantes: se genéticos, de tamanho e de abundância relativa à matriz.

2.3 Porosidade Secundária

Com o objetivo de analisar a expressão morfológica das estruturas presentes na área de estudo em diferentes escalas e relacionar a geometria destas estruturas com a ocorrência da porosidade de dissolução das rochas carbonáticas, realizou-se uma análise geométrica de lineamentos de relevo que se manifestam sobre as rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas em imagens aéreas. Fez-se uso de dois conjuntos de dados: imagens aéreas e mapas preexistentes, e as medidas estruturais realizadas em afloramentos. Finalmente os dados estruturais foram integrados em uma base geográfica para produzir resultados em mapas que mostrassem as relações estruturais da porosidade secundária de fraturas.

O trabalho com imagens aéreas e mapas partiu da combinação dos seguintes dados:

- O levantamento de imagens aéreas, escala 1: 35.000, de voos feitos em 1989 para a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Estas imagens permitiram a identificação e o desenho de uma base digital, dos principais lineamentos e do sistema de drenagem;
- O levantamento de lineamentos, em escala, 1:100.000, do mapa da Companhia de pesquisa de recursos minerais (CPRM, 2003)
- A análise do mapa de feições cársticas de Sete Lagoas do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAEE, 2013) ;
- A localização de cavidades existentes na região conforme o levantamento do registro nacional de cavernas e cavidades do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – CECAV (data da incorporação dos dados: 31/07/2016, extraído de <http://www.icmbio.gov.br/cecav/canie.html>);

Foram traçados os lineamentos indicados por fundos de vale, linhas de drenagem ou diferenças na textura ou rugosidade do terreno que denotam algum padrão linear. Estes dados foram superpostos aos mapas geológicos que delimitam a ocorrência da Formação Sete Lagoas.

Em campo foram identificadas as estruturas associadas ao desenvolvimento da porosidade secundária: planos de acamamento, fraturas e fissuras. A notação de campo para as medidas de atitude feitas com a bússola Brunton foi do tipo azimute e direção de mergulho. Com relação às fraturas e fissuras, foram estabelecidas escalas de classificação de dimensões: centimétricas (até 1 m), métricas (até 10 m) e decamétricas (mais do que 10 m).

Com o objetivo de definir a geometria dos conjuntos de fraturas que compõem o sistema de fraturamento associado às rochas carbonáticas, realizou-se a projeção estereográfica (projeção bidimensional da rede Schmidt) e a confecção de histogramas de frequência (em intervalos de 10°) da direção das atitudes de fraturas obtidas em campo para visualização de direções preferencias de planos subverticais, esta análise abrangeu os membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa. A projeção estereográfica dos dados estruturais coletados em campo foi realizada mediante a projeção bidimensional da rede Schmidt. Foram gerados histogramas em função de intervalos de 10°, para visualização de direções preferencias de planos subverticais. Para estas tarefas, utilizou-se o software livre Openstereo, Grohmann e Campanha (2013).

2.4 Porosidade Terciária

Considera-se como porosidade terciária toda feição de alargamento por dissolução da rocha carbonática, gerando feições como fendas, canalículos, condutos e cavernas, (Ford e Williams, 2007).

A porosidade terciária da Formação Sete Lagoas foi analisada em termos de suas feições morfológicas em cortes de estrada, cavas de mineração, afloramentos naturais e cavernas. Foram igualmente observadas e descritas as morfologias planimétricas a partir de mapas de cavernas. Entre as feições de epicarste, destacam-se as fendas de dissolução e caneluras (*karren*). Entre as feições do endocarste, destacam-se condutos freáticos que, por via de regra, são condicionados por estruturas como acamamento e planos de fraturas. Os condutos

foram descritos quanto às dimensões e sua orientação espacial, ou seja, diâmetro médio, comprimento (quando possível) e direção preferencial do seu desenvolvimento.

Em afloramentos e dentro de cavidades, foi realizada uma descrição das feições de dissolução presentes e classificadas em função da sua morfologia e desenvolvimento; da sua relação ou não com o epicarste, e do vínculo com os membros da Formação Sete Lagoas.

Foi realizada, também, uma compilação das cavernas mapeadas na região. A nomenclatura adotada para os padrões planimétricos de cavernas segue as descritas por Palmer (1991). Os mapas impressos foram cedidos pelo Grupo Espeleológico Bambuí, sendo esses digitalizados e georreferenciados. A medição das direções de desenvolvimento de cavernas para o tratamento estatístico foi feita mediante o traçado em papel sobre os mapas das cavernas, para posterior tratamento no programa OpenStereo e produção de histogramas de comprimento acumulado em função da direção. Quanto aos condutos freáticos, foram analisadas as feições a partir de filmagens diretas de poços de produção. Estas imagens foram cedidas pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) da cidade de Sete Lagoas, as filmagens foram realizadas em 2013 no âmbito do projeto hidrogeológico da cidade de Sete Lagoas.

Com o objetivo de identificar a ocorrência de feições de dissolução abaixo do nível de cavernas e no ambiente freático atual, procurou-se identificar a presença de vazios ao longo das perfurações de poços para abastecimento de água na região de estudo. Foram avaliados os dados provenientes de 29 poços de produção, nos quais o SAAE (serviço autônomo de água e esgoto na cidade de Sete Lagoas) realizou perfilagens óticas no ano de 2012. Foram selecionados três poços representativos para análise morfológica de feições de dissolução (PT-105, PT-99 e PT-66).

2.5 Geoquímica dos membros da Formação Sete Lagoas

Com o objetivo de associar a incidência de feições cársticas com a solubilidade da rocha carbonática. Realizou-se a classificação química e mineralógica dos membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa seguindo a metodologia de Miche et al. (2013), mediante a análise por fluorescência de raios X.

O Laboratório de Fluorescência de Raios X do instituto de Geociências da Universidade de São Paulo conta com um espectrômetro de dispersão de comprimentos de onda de raios X, da marca Philips modelo PW2400, o equipamento emite raios X para excitar os elementos atômicos das amostras, que, em resposta, emitem radiações características mensuráveis pelo espectrômetro para a determinação qualitativa dos elementos; adicionalmente, mediante a intensidade da emissão, obtêm-se a concentração dos compostos.

O equipamento mede elementos de número atômico maior de 8, geralmente com o limite de detecção entre 1 a 10 ppm para elementos traço. O método de preparação das amostras coletadas em campo foi o de confecção de pastilhas vítreas de pó fundido, ou FGD (*fused glass discs*).

Com o objetivo de preparar pequenas quantidades de amostras homogêneas e representativas, as amostras passam por um processo de diminuição granulométrica e de quarteamento até se obter um pó fino menor ou igual a 200 Mesh. Foram seguidas as seguintes rotinas no Laboratório de Tratamento de Amostras, LTA – IGc-USP:

1. fragmentação com martelo e corte com serra diamantada para obter pedaços de rocha de até 5 cm de aresta;
2. fragmentação com prensa hidráulica e eliminação de porções com sinais de alteração;
3. quarteamento;
4. pulverização com moinho planetário de ágata;

Para a análise das amostras pulverizadas, deve ser confeccionada uma pastilha vítrea a partir do pó de amostra, em duplicata. A pastilha vítrea de pó fundido

preparada no laboratório FRX do IGc-USP segue a técnica descrita em Haukka & Thomas (1977) e Thomas & Haukka (1978), em Mori et al. (1999). A amostra e os padrões são inicialmente secos a 105 °C em cadinhos de porcelana durante 15 horas. A amostra então é pesada ($1,0000 \pm 0,0001$ g do pó de rocha) em um recipiente de vidro com tampa. Em seguida outro frasco é pesado contendo $10,0000 \pm 0,0003$ g de fundente de tetraborato de lítio: metaborato de lítio comercial (misturados na proporção eutética de 67:33). Homogeneizada a mistura de amostra e fundente, mediante vigorosa agitação, ela é transferida a um cadinho de platina que é depositado no equipamento Claisse® de fusão automática. Para impedir a carga eletrostática nas amostras e contornar uma eventual perda durante a fusão, é adicionada uma parcela de nitrato de amônio ao recipiente. Os cadinhos são aquecidos a 500 °C durante 10 minutos para atingirem, em seguida e de forma gradual, 1000 °C durante 15 minutos.

A transferência automática do material para moldes de platina produz, finalmente, discos de vidro de 40 mm de diâmetro e 4 mm de espessura. As abundâncias relativas de calcita e dolomita, a partir das porcentagens em peso de CaO e MgO, foram obtidas mediante a plotagem gráfica destas porcentagens no triângulo irregular de Martinet e Sougy (1961).

A fim de classificar litologicamente as amostras com maior precisão, os resultados da plotagem no triângulo irregular de Martinet e Sougy foram plotados em um triângulo equilátero, para o qual foi necessário um recálculo das proporções de CaO e MgO como proposto por Miche et al, (2013). Os recálculos na forma mineralógica de dolomita, calcita e resíduo foram finalmente tratados no software desenvolvido por Roland Simler para a universidade de Avignon.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de pesquisa está localizada a 70 quilômetros de Belo Horizonte (MG). A maior parte da área está dentro do município de Sete Lagoas, mas comparte espaço com os Municípios de Unhaúmas, a sudoeste e Caetanópolis e Paraopeba a Norte. Do ponto de vista fisiográfico, são diferenciados três Domínios Geomorfológicos na área: Planaltos Residuais do São Francisco, Superfícies Aplainadas e Zonas de Colinas (CPRM, 2003). Nos Planaltos Residuais do São Francisco estão as rochas da Formação Serra de Santa Helena que recobrem boa parte do norte do município de Sete Lagoas, Paraopeba, Funilândia e, parcialmente, os municípios de Prudente de Moraes e Matozinhos. Refere-se a relevo ondulado, colinoso e rebaixado, desenvolvido sobre rochas pelíticas de baixa permeabilidade. Os seus vales são abertos e a drenagem geralmente mostra um padrão dendrítico. As cotas variam de 750 a 1000 m.

As Superfícies Aplainadas correspondem às rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas, distribuídas de forma esparsa pela área do município de Sete Lagoas, diminuindo para norte; e rochas oriundas de depósitos aluvionares. As rochas carbonáticas desenvolvem um relevo cárstico caracterizado por elementos geomorfológicos do carste, como sumidouros, dolinas, vales cegos, relevo ruiforme, lapiás, galerias e grutas. Já as Zonas de Colinas se associam com as áreas de ocorrência do embasamento (ortognaisses, migmatitos e granitóides), geomorfologicamente arrasada, com morros ondulados. Piló (1998) realizou estudos na área de Lagoa Santa (a leste da área de estudo) em uma região que o autor denominou de “depressão poligonal Macacos-Baú”, ele destaca a influência da porosidade secundária (com orientação preferencial NW-SE e NE-SW) nas morfologias cársticas, em especial nas rotas de fluxo subterrâneo, no padrão planialtimétrico de cavernas e no alinhamento de paredões e dolinas. O mesmo autor cataloga e classifica um diverso conjunto morfológico com destaque às dolinas e às formas residuais calcárias. Propõe um modelo de evolução do carste na região, uma fase freática longa singenética de formação da porosidade de cavernas e, posteriormente, ciclos de erosão-sedimentação paragenética tardia, desta forma a

evolução do relevo na região responde a um sistema interativo endocarste-epicarste-exocarste.

Em relação à geologia, a área de pesquisa insere-se no Cráton do São Francisco, (Almeida, 1977), composto por rochas cristalinas de idade paleoproterozóica, formadas a partir da aglutinação de vários blocos cratônicos de idade arqueana. Eventos extensionais ocorridos entre 900 e 600 Ma. (Condie, 2002 apud Sanches et al., 2007) formam bacias e, neste espaço, se depositam sedimentos silicato-carbonáticos de idade neoproterozoica, os quais compõem essencialmente o Grupo Bambuí, na Bacia do São Francisco. Regionalmente, esse grupo possui uma área aproximada de 300.000 km² (Almeida, 1977), abrangendo parcialmente os estados de Minas Gerais, Goiás e Bahia. A sua espessura é variável e provavelmente controlada por um sistema de falhas do embasamento (Misi et al. 2007). Levantamentos sísmicos da Petrobras indicaram que a área central da bacia pode atingir até 1.000 m de espessura, enquanto que na região objeto deste estudo a espessura foi estimada em 600 m (Pedrosa-Soares et. al., 1994), Galvão et al (2015) analisaram as perfilagens óticas, também incluídas neste trabalho, e interpretaram que as espessuras da formação podem variar entre 50 e 150m. As unidades estão distribuídas, da base para o topo, pelas seguintes formações: Carrancas (diamictitos, arenitos e ritmitos); Sete Lagoas (sequência carbonática); Serra de Santa Helena (siltitos, filitos, arcóseos e margas), Lagoa do Jacaré (calcários oolíticos); Serra da Saudade (siltitos, arcósios e arenitos); e por fim, Três Marias (arenitos plataformais fluviais). Na área da presente pesquisa o Grupo Bambuí é representado pelas Formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena.

Formação Sete lagoas: definida por Dardenne (1978) como parte imediatamente superior à formação mais basal da coluna estratigráfica do Grupo Bambuí, a Formação Sete Lagoas possui idade Pb/Pb de 740±22 Ma (Babinski & Kaufman, 2003). Esta formação é dividida e caracterizada em dois membros (Ribeiro et al., 2003): Membro Pedro Leopoldo (MPL), na base, e Membro Lagoa Santa (MLS), no topo. O contato inferior da Formação Sete Lagoas com a Formação Carrancas é brusco, irregular e discordante, enquanto que o contato superior com a Formação Serra de Santa Helena geralmente é encoberto, visível apenas localmente, em contato brusco e discordante. Ribeiro et al. (1991) cartografaram a Formação Sete

Lagoas na região homônima e adjacências, quando então dividiram e caracterizaram os membros Pedro Leopoldo, na base, constituído de calcários finos, dolomitos, margas e pelitos, e Lagoa Santa, imediatamente superior, com calcários médios a grossos, pretos, carbonosos e laminados.

Tuller et al. (2009), descrevem que, localmente, o Membro Pedro Leopoldo é constituído por calcilutitos e calcissiltitos em camadas tabulares delgadas e espessas, laminadas, contínuas e/ou lenticulares, com a presença frequente de siltito esverdeado (em parte clorítico) e intercalado numa disposição rítmica. Essas camadas variam de centímetros a poucos metros de espessura, geralmente horizontalizadas e bem preservadas. Ocorre também calcarenito muito fino subordinado, calcário dolomítico, dolarenito, níveis de marga, intraclastos e esteiras microbianas. São também observadas camadas com pseudomorfos de aragonita, cuja melhor expressão está na pedreira Samba, visitada também para a coleta de dados desta dissertação. Estas rochas carbonáticas do MPL são, geralmente, de cor bege a róseo, às vezes cinza a cinza-claro. O Membro Lagoa Santa é constituído, principalmente, de calcarenito fino a médio, calcirrudito, calcilutito, calcissiltito fino a grosso. Tuller et al. (2009) indicam que também podem ser encontradas esteiras microbianas e construções estromatolíticas do tipo *gymnosolenides*. As rochas são, geralmente, calcíticas, bandadas, laminadas, com camadas tabulares com aspecto homogêneo. O acamamento é gradacional normal, e pode ser vista estratificação cruzada tabular e níveis de intraclastos (Pedreira Canaã, Sete Lagoas). As cores predominantes destas rochas são cinza médio, escuro a preto, são fétidos quando quebrados, e com muita matéria orgânica. As estruturas diagenéticas mais frequentes em ambos os membros, em escala macroscópica são, as de compactação, do tipo estilólitos.

Do ponto de vista hidrogeológico, poucos estudos foram realizados na área. O primeiro refere-se a Pessoa (1996), que define um modelo hidrogeológico no qual o aquífero em Sete Lagoas é constituído pelos calcários neoproterozóicos. Os calcários que compõem o aquífero são espessos no centro da cidade de Sete Lagoas e vão perdendo espessura até serem cobertos por rochas da Formação Serra de Santa Helena no rumo Nordeste. O autor considera que a água subterrânea está armazenada em condutos cársticos do aquífero de Sete Lagoas, e

oferece uma boa qualidade ao consumo. As águas são classificadas predominantemente como do tipo cálcicas-bicarbonatadas de acidez básica. O segundo trabalho de relevância foi realizado pelo serviço autônomo de água e de esgoto da cidade de Sete Lagoas (SAAE, 2013). O trabalho teve um viés focado na vulnerabilidade, na definição de alguns parâmetros hidráulicos e na previsibilidade hídrica do ponto de vista do abastecimento e da gestão de recursos hídricos; de forma subordinada também estabeleceu algumas considerações sobre os riscos geotécnicos vinculados à exploração intensa de água subterrânea na cidade. O trabalho acabou definindo o aquífero como sendo do tipo cárstico, sobre um domínio cristalino fraturado do embasamento. Outra contribuição do trabalho do SAAE foi a de propor uma recarga do aquífero cárstico, tanto direta, a partir de rochas carbonáticas aflorantes, quanto através do domínio poroso de sedimentos inconsolidados de cobertura, e até uma recarga indireta através do aquífero cristalino. Conclui também que não há dados para determinar se o aquífero cárstico contribui aos níveis de base das drenagens superficiais locais, e talvez este aporte ocorra em um âmbito regional, no contexto da bacia hidrográfica do rio São Francisco.

Galvão (2015) define um modelo hidrogeológico do aquífero do município de Sete Lagoas. Permanece a ideia de um aquífero cárstico, onde o autor demonstra que a porosidade primária deste aquífero é muito baixa e que a secundária (que define como microfraturas) é também reduzida devido ao preenchimento de calcita. Assim, os grandes volumes de água são transmitidos pela porosidade terciária cárstica, e que na região central urbana de Sete Lagoas, a mesma é caracterizada por dois intervalos de dissolução que se desenvolvem no acamamento e que se combinam com fraturas subverticais. Conclui também que a recarga deste aquífero é tanto diretamente pela superfície das rochas carbonáticas, como também, através da cobertura detrítica que recobre grande parte da área da Formação Sete Lagoas. O mesmo autor atualiza as informações estruturais da Formação Sete Lagoas ao concluir que esta mergulha para nordeste.

A Figura 4 apresenta o mapa geológico que mostra o perfil esquemático e a coluna estratigráfica simplificada da área de estudo.

Figura 4 – Mapa geológico e perfil geológico esquemático. Inclui as feições cársticas mais destacadas

4 ESTUDO DA POROSIDADE NA FORMAÇÃO SETE LAGOAS

Os locais de coleta de amostras para o estudo da porosidade primária da matriz, a localização dos afloramentos e das cavidades que serviram para a coleta de dados sobre a porosidade secundária e terciária, são apresentados na Figura 2 do item 2.1.

4.1 Porosidade Primária - (deposicional e diagenética)

A Figura 3, item 2.2, ilustra os tipos básicos de porosidade e os critérios de classificação. A escolha de amostras para a impregnação e laminação foi definida pela representatividade das amostras dos membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa e o seu grau de preservação. As principais características petrográficas relacionadas com a porosidade que foram identificadas foram organizadas na Tabela 1.

Tabela 1. Principais características da porosidade microscópica. (1) combina porcentagem estimada (1a), tipo básico de porosidade (1b) e termo modificador TM (1c) seguindo a classificação de Choquette & Pray (1970).

Amostra/ Membro	Porosidade (1)			Características relevantes
	% (1a)	Tipo (1b)	TM (1c)	
09/ MLS (Pedreira Sta. Helena)	<3%	Intercristalina (BC)	Mc	Laminação marcada pela presença de óxidos (até 30%) Fotografia 1. Os minerais carbonáticos recristalizados se desenvolvem melhor sem a presença de óxidos.
26/ MPL (Paraíso)	3-5%	Intercristalina (BC)	mc	Uniforme. Minerais carbonáticos e porosidade (0,03-0,1mm). Óxidos (<10%).
35/ MLS (Paraíso)	<3%	Intercristalina (BC) e intrapartí- cula (WP)	mc	Textura uniforme, a recristalização gerou minerais carbonáticos bem desenvolvidos (0,06- 1,0mm). A porosidade é incipiente (0,06mm), e preferencialmente entre minerais carbonáticos, mas também intra-cristalina
41a/ MLS (Rei do Mato)	<3%	Intercristalina (BC)	mc	Laminação e ritmicidade marcadas pelos óxidos. Minerais carbonáticos (0,03-0,06mm). 50-60% de carbonatos, abundante quartzo 50-60%, <5% de opacos e óxidos. A porosidade é incipiente pode estar associada óxidos, e ser estratificada.

Tabela 1 (continuação). (1) combina porcentagem estimada (1a), tipo básico de porosidade (1b) e termo modificador TM (1c) seguindo a classificação de Choquette & Pray (1970).

Amostra/ Membro	Porosidade (1)			Características relevantes
	% (1a)	Tipo (1b)	TM (1c)	
51/MLS (Taboa)	<3%	Intercristalina (BC) c/ meso-poro grande	mc	Textura uniforme, m. carbonáticos (0,05 – 0,13mm). Óxidos concentrados tb entre m. carbonáticos. Macroporo (2mm) em associação aos óxidos.
58b1/MPL58 b2/MPL	<3%	Intercristalina (BC) c/ meso-poro grande	mc	Textura uniforme, m. carbonáticos (<0,05mm), são o 80% da lamina . Óxidos de ferro (<0,03mm). Pseudomorfos de aragonita. Fotografia 2. Macroporo (1,5mm). Microestilólitos ou faixas pelíticas preferenciais à dissolução.
62, 63a, 64, 66/ MPL	-	-	-	Intensa deformação e recristalização
91/MPL	<3%	Intercristalina (BC)	mc	Textura uniforme, minerais carbonáticos (<0,03mm). Óxidos se aglomeram em glóbulos (0,2-0,3mm) e concentram, formam estratos concordantes com o acamamento Fotografia 3.
121/MLS	<3%	Intercristalina (BC)	mc	Textura uniforme, minerais carbonáticos (0,03-0,15mm). Associação porosidade-óxidos.

A dedução dos escassos espaços porosos foi mediante o contraste de relevo entre os poros e os minerais circundantes e a ausência de extinção de luz com os nicóis cruzados. Assim, a classificação limitou-se aos tipos básicos de porosidade: se de petrotrama seletiva ou não, e em relação aos termos modificadores relativos ao tamanho e abundância relativa e porcentagem (estimada).

Em ambos membros a porosidade que predomina é incipiente, correspondendo a menos de 3% da superfície das seções delgadas. A dimensão dos poros é geralmente menor que 0,03mm (Fotografias 4 e 5), com exceção dos raros mesoporo (até 2,0mm). Os microporos podem ou não se associar a minerais oxidados, e se desenvolve geralmente entre os minerais carbonáticos, mais raramente dentro dos minerais. Registrou-se a ocorrência esporádica de mesoporos (1,5mm – 2,0mm) que ocorrem indistintamente nas amostras dos dois membros da formação (Fotografias 6 e 7), porém a associação de mesoporo e minerais oxidados parece ser mais evidente para o caso das lâminas de amostras do Membro Lagoa Santa.

Os micro-estilólitos descritos na pedreira Paraíso tem uma concentração de óxidos (ou resíduo insolúvel) em uma proporção aproximada de 1:1 com os minerais carbonáticos. Faz-se menção a esta particularidade, já que de fato estas feições se associam às entranças de dissolução preferencial na escala de afloramento. A Fotografia 8 mostra uma composição em escalas diferentes do que foi relatado.

As seções delgadas usadas para avaliar e classificar a porosidade não ofereceram informação suficiente para uma completa classificação, conforme o proposto por Choquette & Pray (1970). A própria identificação da porosidade foi limitada pela impossibilidade de impregnação de amostras devido ao tamanho ($<0,03\text{mm}$), escassez ($<3\%$) e porque, em aparência, não há conectividade efetiva entre os poros. Considerando a classificação da porosidade de Choquette & Pray (1970), a porosidade microscópica é de petrotrama seletiva intercristalina secundária, sem que seja possível estabelecer com clareza seus termos modificadores de caráter genético, apenas o termo modificador de tamanho e abundância. As microporosidades observadas ocorrem tanto no MPL como no MLS.

Fotografia 1. Membro Lagoa Santa. 1,25 x. O bandamento horizontal é marcado pela concentração de óxidos versus minerais carbonáticos. Fotografia 2. Aglomerados fibrosos de terminação reta, interpretados como pseudomorfos de aragonita. 1,25 x. Fotografia 3. Óxidos aglomerados concordantes com o acamamento. 1,25 x. Fotografias 4 e 5. Micro-poros no aumento de 4 x.

Fotografia 6

Fotografia 7

Fotografia 8. Composição A, B e C

Fotografias 6 e 7. Nicóis descruzados e cruzados de meso-poro no Membro Lagoa Santa. Fotografia 8. Composição de imagens (A, B e C) em diferentes escalas de observação da dissolução preferencial em descontinuidades do Membro Pedro Leopoldo, na pedreira Paraíso.

4.2 Porosidade secundária.

Os sistemas de poros, do tipo condutos de dissolução, constituem o aquífero cárstico e as cavernas associadas, incluindo um grande conjunto de vazios, com dimensões milimétricas a deca métricas. O sistema de condutos é o resultado da transformação do aquífero fraturado em aquífero de condutos, onde certas discontinuidades, ou associações destas, sofrem alargamento por dissolução dos minerais carbonáticos (Palmer, 2007). Portanto, é fundamental ter conhecimento da distribuição espacial e a geometria das discontinuidades presentes na rocha solúvel, ou seja, planos (superfícies) de estratificação e fraturas. O estudo da porosidade secundária, então, consistiu no estudo das discontinuidades na rocha carbonática: estratificação, superfície dobrada, falhas e fraturas.

Na área de estudo, identificou-se um sistema de fraturas associado a uma superfície dobrada representada pela estratificação das rochas carbonáticas.

4.2.1 Estratificação e superfície dobrada da Formação Sete Lagoas

A estratificação do Membro Pedro Leopoldo

Formado predominantemente por calcissiltitos e calcilutitos, e calcarenito muito fino subordinado; distribuídos em camadas centimétricas a métricas com intercalações pelíticas de siltito de coloração esverdeada e espessura de até 1 cm. Estas rochas são, geralmente, beges a róseas, às vezes cinzas a cinza-claras. Podem ocorrer níveis de marga, Tuller et al., (2009). Quando intemperizada na sua superfície aparecem ressaltadas as camadas pelíticas relativamente aos extratos carbonáticos mais entalhados devido à dissolução, (Fotografia 9). As camadas são tabulares e contínuas, e a estratificação é bem marcada, com caráter rítmico, representando uma discontinuidade com grande extensão lateral (deca métricas a centenas de metros), inclusive exibindo o deslocamento através do processo de expansão, evidenciado pela circulação de água ao longo desta superfície (evidência de campo observada em algumas pedreiras e afloramentos, (Fotografia 10). São frequentes

estruturas diagenéticas de dissolução como estilólitos, e mais raros os pseudomorfos de aragonita como os que aparecem na pedreira Sambra, (Fotografias 11 e 12).

Fotografia 9

Fotografia 10

Fotografia 11

Fotografia 12

Fotografia 9, Membro Pedro Leopoldo, planos de estratificação ressaltados pela dissolução diferencial em função da composição pelítica ou carbonática dos estrados. Fotografia 10, planos de acamamento indicando percolação de água, marcada pelo crescimento de vegetação. Fotografia 11, estilólitos. Fotografia 12, pseudomorfos de aragonita da pedreira Sambra.

A estratificação do Membro Lagoa Santa

Na área de estudo a textura é de calcarenitos finos a médios e calcissiltitos finos a grossos. O acamamento é marcado por estratos milimétricos a centímetros, com laminação fina interna, presença de estruturas primárias, como marcas onduladas e estratificação cruzada. A cor predominante é cinza, a cinza escuro e muito escuro. A estratificação é rítmica marcada pelas diferenças de coloração. São geralmente bandadas, laminadas, com camadas tabulares com aspecto homogêneo. Quando muito escura, e se submetida à quebra mecânica, a rocha desprende característico odor de enxofre.

Estrutura da superfície de acamamento na FSL

A Formação Sete Lagoas (englobando os membros Lagoa Santa e Pedro Leopoldo) apresenta uma estrutura geral em dobras amplas e abertas, com flancos orientados em torno de N40W 10NE e N10E10NW, e eixos seguindo a direção geral N10-20W e mergulhos sub horizontais a mediantemente inclinados. O metamorfismo é incipiente, de grau muito baixo, evidenciado nos metapelitos da Formação Serra de Santa Helena, através da presença de clorita (CPRM, 2010). A Figura 5 mostra a representação em estereograma das medidas de direção e mergulho de acamamento obtidas em campo.

Figura 5. Representação estereográfica para a representação dos planos e polos dos planos das superfícies de acamamento (S0) medidas na Formação Sete Lagoas e seus respectivos membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa.

Este padrão de deformação corresponde a processos de dobramento do tipo flambagem (Hobbs et. al., 1976), o que envolve o deslizamento flexural ao longo de superfícies da estratificação (S0), o que torna estas superfícies favoráveis ao descolamento após o soerguimento regional e expansão dos maciços rochosos. Através deste processo, algumas superfícies de estratificação tornam-se permeáveis (porosidade através de capilares) permitindo a circulação de água subterrânea. Esta permeabilidade ao longo de S0 é evidenciada por frequente percolação de água nestes planos em cortes de rochas como cavas de pedreiras (Fotografia 10).

4.2.2 Falhas e falhamentos

Foram observadas falhas com deslocamentos centimétricos em pontos isolados da área de estudo: na pedreira Ilcom a SE da cidade de Sete Lagoas (ponto P-67 na Figura 2 no mapa de localização de pontos, Membro Pedro Leopoldo) na Pedreira desativada da empresa Canaã a SW da área urbana da cidade de Sete Lagoas (ponto P-129 na Figura 2 no mapa de localização de pontos, Membro Lagoa Santa), e na Gruta Taboa a W da Serra de Santa Helena (Gruta Taboa na Figura 2, Membro Lagoa Santa. Na Pedreira Ilcom, foram observadas falhas com componente inversa N-SE 55E e N30W 40NE, às vezes com zonas de cisalhamento e geração de milonitos foliados. Na caverna Taboa, fotografia 13, identificou-se a ocorrência isolada de falhas inversas com atitude N75E 60NW. Em ambos os casos não se notou o desenvolvimento de porosidade de dissolução associada a estas estruturas e nem percolação de água.

Fotografia 13. Estrutura de falha inversa, associada a fraturas preenchidas com calcita, caverna Taboa. (Imagem modificada para tons de cinza). Escala corresponde a 5 cm.

4.2.3 Sistema de fraturas

Conforme a Figura 6 que mostra o estereograma e o histograma do tratamento estatístico de medidas, identificou-se os seguintes conjuntos de fraturas predominantes:

- O Conjunto 1 (C1) orientado a N10-20E/ subvertical para NW e SE possui uma dispersão que alcança orientação N-S/20E;
- O Conjunto 2 (C2) orientado a N30-40E/ subvertical, chegando aos 70°, predominando mergulhos de até 70° para SE e com uma dispersão que chega até 50E, e
- O Conjunto 3 (C3), com concentração N80-W a E-W, e mergulhos altos, subvertical variando a 75° e mergulho NE e N.

Figura 6. A) Representação estereográfica dos planos e polos das fraturas centimétricas, métricas e decamétricas da Formação Sete Lagoas. B) Rosácea 180° que agrupa os principais sistemas de fraturas em intervalos angulares de 10°, os Conjuntos C1, C2 E C3.

Seguindo o modelo de Worthington (2005) para espeleogênese e desenvolvimento preferencial de condutos de dissolução ao longo de rotas de fluxo do aquífero fraturado, associa-se as atitudes predominantes da superfície do acamamento com os conjuntos dominantes de fraturas através da sua intersecção para obtenção das linhas preferenciais de rotas de condutos.

As linhas preferenciais de intersecção entre e S0 e os conjuntos dominantes de fraturas é apresentado no diagrama da Figura 7. A interpretação da mesma permitiu distinguir três direções (ou atitudes de linhas) preferenciais teóricas, que serão comparadas com as orientações preferenciais e de desenvolvimento de condutos dentro do item 4.3.1 que aborda a porosidade terciária: L1 N20E/6-10°, L2 N40E/6-10° e L3 N80W/6-10°. Ressalta-se que cada atitude preferencial destas possui uma dispersão, estimada em torno de 10° na direção e até 30° no mergulho, nas linhas L2.

Figura 7. Intersecção dos planos de acamamento (S0, representados pelas linhas contínuas) com os conjuntos principais de fraturas dominantes, linhas tracejadas. L1, L2 e L3 são os intervalos de direção das linhas de intersecção (S0/Fraturas dominantes).

4.2.4 Fotolineamentos

O resultado desta análise pode ser visto na Figura 8, que mostra quais lineamentos deduzidos e o histograma de comprimento acumulado em função da direção dos lineamentos.

No geral o histograma exhibe uma concentração maior de lineamentos no quadrante NE. Numa análise qualitativa nota-se uma dispersão de lineamentos que não superam os quatro quilômetros de extensão e que são frequentes em NE. Podem ser individualizados três máximos de lineamentos cuja somatória excede a dispersão, destacando-se os seguintes grupos de lineamentos G1: N20W-N-S, o G2: N10-20E, e o G3: N25-50E.

Ao comparar o histograma da Figura 8 com a rosácea de fraturas (Figura 6, item 4.2.3), nota-se certa coincidência do G1 do histograma com C1 de fraturas, considerando a componente de orientação geral N-S; cogita-se com uma provável influência de traços de acamamento no relevo suavemente ondulado. Porém, a mais notável coincidência das medições de fraturas em campo com o histograma de lineamentos regional é o G2 N10-20E com C1 (fraturas) também N10-20E; igualmente podem ser associados o G3 N30-50E com o C2 N30-40E, embora o G3 tenha uma dispersão de 25 graus na direção leste. Atribui-se a dispersão maior nas direções de lineamentos, quando comparado às direções de fraturas medidas, a que o acamamento pode condicionar parte dos lineamentos.

A coincidência das orientações estruturais, C2 e G2, sugere uma associação da expressão estrutural em escala de afloramento e a expressão estrutural na escala regional.

Figura 8. Imagem superior, mapa da localização dos lineamentos coincidentes com as rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas, em vermelho os segmentos considerados. Inferior: o histograma de comprimentos acumulados em intervalos de 10 graus: valores positivos correspondem ao quadrante N-NE e valores negativos ao quadrante N-NW.

4.3 Porosidade terciária: Estudo das feições de dissolução.

4.3.1 Condicionamento estrutural da porosidade de dissolução

Realizou-se o mapeamento de feições de dissolução, em afloramentos e cavernas, abrangendo os membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa. Foram investigadas feições do topo rochoso (epicarste) e subterrâneas, como cavernas e cavidades menores (Figura 2 do item 2.1), expostas em afloramentos naturais e cortes artificiais.

Porosidade do Epicarste

Foram observadas feições do tipo fendas de dissolução (*karren*), em variadas dimensões. Chama a atenção a diferença no padrão morfológico e na incidência das feições entre o epicarste dos membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa.

Nos afloramentos do Pedro Leopoldo, em morros residuais e cortes, ressaltam-se as fendas de dissolução com profundidade de até 20 m, preenchidas em parte com solo residual e que se afunilam em profundidade, terminando nos planos de fratura (Fotografias 14a, 14b e 15). A partir deste nível a rocha apresenta-se sem feições de dissolução nos locais observados. Estas feições de dissolução se desenvolvem ao longo de fraturas com orientação preferencial E-W, tem comprimento decamétrico, correspondendo ao Conjunto 3 e ao Conjunto 2 de fraturas identificado no item 4.2.3. No Membro Pedro Leopoldo, não se observa *karren* em planos de estratificação, ao contrário do Membro Lagoa Santa, onde são frequentes.

Fotografias 14a, 14b e 15, fendas de epicarste e pequenos condutos freáticos (setas). Preenchimento parcial com solo residual em profundidade

O epicarste do Membro Lagoa Santa exhibe morros residuais com rocha exposta formando relevo ruiforme, onde observa-se feições de dissolução, desde a escala centimétrica, com caneluras de dissolução na superfície rochosa, passando a escala métrica, com fendas em fraturas e planos de acamamento. Feições do tipo corredores cársticos, (Fotografias 16, 17, 18 e 19), seguindo direções de fraturas, são frequentes, isolando maciços rochosos do tipo torres cársticas. Os morros residuais predominam com rocha exposta e recortados por fendas de dissolução acompanhando o sistema de fraturas dos 3 conjuntos identificados no item 4.2 3. A alta incidência de caneluras e fendas de dissolução imprime um aspecto extremamente rugoso à superfície rochosa, o que contrasta com a superfície de rocha exposta do MPL, dominada por formas de *karren* mais arredondadas.

Fotografia 16

Fotografia 17

Fotografia 18

Fotografia 19

Fotografia 16. Dissolução formando corredores cársticos profundos sobre morros residuais do Membro Lagoa Santa na Fazenda Roxane. Fotografias 17 e 19. Dissolução nos planos de acamamento na fazenda Topazio e Roxane, respectivamente. Fotografia 18. Condutos de dissolução desenvolvidas na linha de intersecção entre acamamento e fratura e no plano de acamamento.

4.3.2 Porosidade associada a condutos

Tanto no Membro Pedro Leopoldo como no Membro Lagoa Santa, foram observadas cavidades em variadas dimensões, protocondutos, condutos, até cavernas (seguindo nomenclatura de Ford e Williams, 2007). As orientações preferenciais observadas em cavernas foram traçadas e medidas sobre mapas digitalizados, descritas abaixo. A localização dos locais visitados é indicado na Figura 2 do item 2.1.

Nota-se a ocorrência de numerosos condutos com diâmetros desde centimétricos a decimétricos em afloramentos do Membro Lagoa Santa. Destaca-se que os condutos se desenvolvem sobre planos de estratificação e seguindo linhas de interseção entre acamamento e fraturas, acompanhando os conjuntos de fraturas, descritos no item anterior. Ressaltam-se condutos de intercessão seguindo direções gerais N-S do Conjunto 1, Conjunto 2 (N30-40E) e Conjunto 3 (E-W). As Fotografias 20, 21, 22 e 23 são exemplos destas feições.

Feições de iniciação e do condicionamento estrutural de condutos também foram observadas nas cavernas investigadas.

Fotografia 20

Fotografia 21

Fotografia 22

Fotografia 23

Fotografias 20, 21, 22 e 23. Fotografia 20: conduto desenvolvido sobre a superfície de estratificação. Fotografia 21: condutos que se desenvolvem na interseção acamamento-fratura. Fotografia 22: protocondutos acompanhando S0. Fotografia 23: protoconduto isolado na interseção acamamento-fratura.

Os comentários a seguir descrevem os condicionamentos estruturais identificados para cada caverna com base na planimetria e observações de campo.

Caverna Rei do Mato

A caverna Rei do Mato apresenta padrão planimétrico irregular predominante e localmente padrão em rede acompanhando direções preferenciais nas direções N25-30E e N75-85E e N15-20W (Figura 9 B) .

A caverna Rei do Mato possui amplos salões de abatimento e trechos com morfologia original, onde denota seções transversais com largura maior em relação a altura, acompanhando planos de estratificação com mergulhos suaves (até 8°). Representa uma cavidade onde o controle estrutural é principalmente pela porosidade de dissolução sobre o acamamento, onde fraturas condicionam alargamentos verticais sobre os condutos subhorizontais.

As medições estruturais na caverna Rei do Mato revelaram traços decamétricos de fraturas no teto seguindo direções N40W, N50W e N5W, porém não há evidências claras de condutos acompanhando as interseções destas fraturas e o acamamento. O padrão irregular sugere que o condicionamento da iniciação freática foi mais controlado pelo acamamento e menos pelas interseções camadas/fraturas, hipótese confirmada pela observação na caverna de trechos de dissolução desenvolvidos no acamamento. No histograma de direções preferenciais da cavidade a direção N-S não ressaltava, indicando que o Conjunto de fraturas 1 (N-S, N10E) regional não exerceu influência sobre a iniciação da porosidade de dissolução. Por outro lado, a direção preferencial de eixos maiores de condutos e salões medidos na caverna, de N25-30E coincide com o Conjunto C2 de fraturas (N20E) e a linha L2 (Figura 7) com maior potencial de iniciação de condutos, indicando influencia no desenvolvimento de condutos nesta direção. Como a cavidade se desenvolve principalmente acompanhando planos de acamamento, interpreta-se que estas fraturas N20E tenham agido como descontinuidades alimentadoras de fluxo, alargando cavidades do acamamento nesta direção das fraturas.

Figura 9. 9A, histograma de comprimentos acumulados de segmentos de cavernas medidos a partir da projeção planimétrica versus sua direção. Valores negativos representam as orientações no quadrante N-NW e os positivos N-NE. 9B, projeção planimétrica simplificada da caverna Rei do Mato. 9C, rosácea, 180° das orientações de fraturas medidas da Formação Sete Lagoas, intervalos de 10° em 10° graus.

Caverna Cascata II

As observações geológicas e morfológicas relativas a esta cavidade foram obtidas na caverna Cascata I, a qual faz parte da mesma rota de fluxo do rio subterrâneo, mas não dispõe de mapa, representando o trecho associado ao sumidouro do Córrego da Cascata.

A Cascata II apresenta padrão planimétrico de conduto principal meandrante, com sinuosidade predominantemente curvilínea, com trechos onde a ramificação do conjunto principal assume padrão anastomosado (Figura 10 B).

A observação da orientação geral da planta da caverna revela duas direções principais de desenvolvimento, uma maior com orientação geral N20E e outra menor a N65-70W. Mas, considerando os segmentos de condutos medidos em planta (ver histograma da Figura 10 A), nota-se que a caverna exibe uma concentração maior de segmentos acumulados no quadrante NW com um total medido de 333 m, sendo menor o comprimento de segmentos acumulados no quadrante NE, com 219 m. Esta discordância em direção geral do conduto principal NE e os segmentos acumulados NW é atribuído ao caráter meandrante e sinuoso do conduto, onde este meandra com trechos mais longos a NW, numa envoltória geral NE.

O aspecto geral do histograma de segmentos da caverna em função de sua direção (Figura 10 B) exibe uma dispersão na orientação dos segmentos com a tendência de acumular maior desenvolvimento nas direções N15-25W, N65W, e N15-20E, respectivamente. As direções preferenciais identificadas no histograma, com exceção da direção N15-20E, não correspondem aos conjuntos preferenciais de fraturas mapeados na área de estudo (Figura 10 C). Esta não coincidência, a princípio, indica que o desenvolvimento desta rota de condutos não possui controle estrutural pelos conjuntos de fraturas deduzidos estatisticamente. Esta interpretação é suportada pelas observações de campo relativas a esta cavidade, onde o condicionamento da iniciação de condutos freáticos ocorre sobre planos de estratificação com a formação de canalículos anastomosados. Por outro lado, a orientação geral da caverna, definida através da envoltória do segmento principal da cavidade, segue a direção N20E, a qual corresponde a um dos principais alinhamentos de desenvolvimento de condutos, deduzido a partir da intersecção fratura/acumamento.

Figura 10. 10A, histograma de comprimentos acumulados de segmentos de cavernas medidos a partir da projeção planimétrica versus sua direção. Valores negativos representam as orientações no quadrante N-NW e os positivos N-NE. 10b, projeção planimétrica simplificada da Caverna Cascata II. 10C, rosácea, 180° das orientações de fraturas medidas da Formação Sete Lagoas, intervalos de 10° em 10° graus.

Caverna Taboa

O padrão morfológico em planta da caverna Taboa (Figura 11 B) representa um sistema de condutos convergente e localmente divergente com um conduto principal de orientação geral N50-55W, e ramos secundários orientados a N50-30E. No histograma dos comprimentos acumulados em função da direção, ressalta-se a direção acima citada, mas também nota-se comprimentos acumulados de maneira subordinada nas direções N25-30E e N25W. No setor sul do mapa, nota-se um trecho de condutos que sugerem padrão anastomosado, com junção de condutos meandantes de maneira convergente e divergente. Neste setor da caverna surgem de direções variadas de condutos, conforme expresso do histograma, sugerindo uma dispersão de direção tanto no quadrante NE, como no NW. Conforme observado na caverna. O conduto principal acompanha o plano de acamamento com padrão suavemente sinuoso, (Fotografia 27) o que permite concluir que o condicionamento estrutural deste trecho segue o plano de estratificação e, portanto, a direção principal de comprimentos acumulados não se corresponde com nenhum dos conjuntos dominantes de fraturas ou linhas preferenciais de instalação de condutos deduzidos anteriormente no item 4.2.3.

O condicionamento principal pelo acamamento é confirmado em campo através das medidas de S0 na caverna, que predominam com atitudes entre N30-60W, 10 a 15NE. A influência do fraturamento no desenvolvimento desta cavidade surge nas bifurcações e ramos laterais a N25-30E, N5W e N25W.

Uma feição notável e frequente ao longo do conduto principal são fendas ou cúpulas métricas verticais condicionadas por fraturas oblíquas ao conduto, com atitude em torno de E-W (N70-80W), que não são expressivas no mapa, somente em seção transversal. Em seção transversal, o conduto principal exhibe morfologia de conduto com iniciação freática no topo em entalhamento vadoso associado até a base, onde o piso é formado por crostas de espeleotemas ou sedimento clástico areno-siltoso, raramente expondo o leito rochoso. Predomina a morfologia original de dissolução sobre a modificada por descolamento de blocos.

Figura 11A, histograma de comprimentos acumulados de segmentos de cavernas medidos a partir da projeção planimétrica versus sua direção. Valores negativos representam as orientações no quadrante N-NW e os positivos N-NE. 11B, projeção planimétrica simplificada da Caverna Taboa. 11C, rosácea, 180° das orientações de fraturas medidas da Formação Sete Lagoas, intervalos de 10° em 10° graus.

Fotografia 24

Fotografia 25

Fotografia 26

Fotografia 27

Fotografia 24. Canalículos anastomosados no plano de camadas, caverna Cascata. Fotografia 25. Canalículos de anastomose na iniciação freática em acamamento. Fotografia 26. Conduto meandrante no acamamento, na Cascata I. Fotografia 27. Conduto principal acompanha o plano de acamamento com padrão suavemente sinuoso na caverna Taboa.

Caverna Lapa do Boi

A caverna Lapa do Boi apresenta morfologia planimétrica geral de conduto principal retilíneo, com ramificações menores, onde o padrão dominante é sinuoso, localmente anastomosado. O setor NE do conduto principal está alterado por morfologia de abatimento (Figura 12). O conduto principal, com morfologia original, corresponde em seção transversal a uma fenda do tipo *canyon* de entalhamento vadoso, com altura que varia entre 3 a 5 m (Fotografia 28). Sua orientação segue exatamente a direção preferencial das fraturas do conjunto C2 e suas linhas de interseção com a superfície de acamamento L2 (item 4.2.3). O ramo secundário, em relação ao comprimento acumulado, interpretado como uma rota de fluxo afluyente do principal, possui orientação preferencial N75-85E, tendendo a E-W que, por sua vez, coincide com o conjunto C3 de fraturas e linhas de interseção. Sugere, portanto, condicionamento estrutural da iniciação dos condutos pelas interseções dos conjuntos C3 e C2 de fraturas com plano dominante do acamamento observado na cavidade, com atitude de N50E/ 10NW.

Figura 12. 12A, histograma de comprimentos acumulados de segmentos de cavernas medidos a partir da projeção planimétrica versus sua direção. Valores negativos representam as orientações no quadrante N-NW e os positivos N-NE. 12B, projeção planimétrica simplificada da Caverna Lapa do Boi. 12C, rosácea, 180° das orientações de fraturas medidas da Formação Sete Lagoas, intervalos de 10° em 10° graus

Caverna Lapa do Ninho

A Lapa do Ninho encontra-se nas proximidades da Lapa do Boi. Apresenta-se aqui somente a sua análise geométrica, pois não foi visitada em campo. Em planta apresenta um padrão em rede com cavidades muito variáveis em largura, sem demonstrar claramente um conduto principal, Figura 13 B. O histograma concentra as medidas no quadrante NE, uma orientação geral preferencialmente no quadrante, Figura 13 A. Nota-se uma maior incidência de condutos entre N25-40E, seguida pelas direções N65-70E e E-W. A dispersão entre N25-40E associada ao padrão irregular dos condutos em planta é interpretada como sendo causada por um condicionamento mais expressivo de condutos pelos planos de acamamento e menos condicionado pelos conjuntos de fraturas. Outra possibilidade de interpretação desta dispersão seria um condicionamento estrutural de condutos pelos conjuntos de fraturas 1 e 2, Figura 13 C, em associação com a superfície de acamamento, onde as linhas de interseção entre acamamento e as fraturas dos conjuntos 1 e 2 teriam condicionado a iniciação de condutos. Já a posterior ampliação freática teria sido dirigida pela superfície do acamamento, causando um alargamento dos condutos ao longo destas superfícies.

Figura 13. 14A, Histograma de comprimentos acumulados de segmentos de cavernas medidos a partir da projeção planimétrica versus sua direção. Valores negativos representam as orientações no quadrante N-NW e os positivos N-NE. 13B, projeção planimétrica simplificada da Caverna Lapa do Ninho. 13C, rosácea, 180° das orientações de fraturas medidas da Formação Sete Lagoas, intervalos de 10° em 10° graus

Caverna Lapa do Capão

A caverna Lapa do Capão (Figura 14) apresenta padrão em rede e trechos com morfologia irregular a anastomosada exibindo orientação preferencial de condutos seguindo as direções N-S/N10E e N60E. A direção N-S/N10E segue a linha preferencial de interseção fratura/acamamento, L1 (item 4.3). A direção preferencial de condutos em N60E não corresponde a nenhum dos alinhamento predominantes de fraturas e intersecções fratura/acamamento determinadas para a área de estudo. Provavelmente, esta não concordância é devida ao fato desta cavidade possuir, em parte, controle estrutural pelos planos de acamamento, principalmente nos trechos de morfologia anastomosada, de maneira semelhante ao observado na caverna Rei do Mato.

Figura 14. 15A, histograma de comprimentos acumulados de segmentos de cavernas medidos a partir da projeção planimétrica versus sua direção. Valores negativos representam as orientações no quadrante N-NW e os positivos N-NE. 14B, projeção planimétrica simplificada da Caverna Lapa do Capão. 14C, rosácea, 180° das orientações de fraturas medidas da Formação Sete Lagoas, intervalos de 10° em 10° graus

Condutos no ambiente freático

No poço PT-105, localizado no sopé da Serra de Santa Helena, a oeste da cidade de Sete Lagoas (Figura 2, item 2.1) identificou-se condutos sobre a superfície de estratificação na profundidade de 45 m. A rocha aparenta similaridade textural e estrutural com o Membro Lagoa Santa. Pela sua localização em mapa encontra-se no domínio do MLS. O conduto é circular a elíptico, com aparente padrão meandrante sobre o acamamento. Não se nota a presença de fratura associada, sugerindo condicionamento estrutural pelo acamamento. A dimensão estimada deste poro é de cerca de 30 centímetros de diâmetro (Fotografia 29). Na ocasião do registro fotográfico do perfil deste poço, o conduto comentado estava acima do nível de água, o qual foi registrado a 60 m de profundidade. Ressalta-se que a posição deste nível da água está alterada devido ao intenso bombeamento para o abastecimento urbano, Galvão (2015). Na profundidade de 112 m, observou-se uma feição que sugere a presença de dissolução, também no plano de acamamento, com abertura centimétrica (entre 5 a 10 centímetros), neste caso no Membro Pedro Leopoldo.

No poço PT-99, localizado a oeste da Serra de Santa Helena (Figura 2, item 2.1), perfurado no Membro Pedro Leopoldo, observam-se feições que sugerem planos de estratificação com dissolução, cuja abertura é de até 2 centímetros na profundidade em 84 m (fotografia 30). O nível estático deste poço na ocasião estava a 6 m de profundidade.

No poço PT-66 (Figura 2, item 2.1) constatou-se uma cavidade de dissolução (30 centímetros de diâmetro) cujo eixo maior é vertical e corta a estratificação. O condicionamento estrutural se dá pela intercessão entre o S0 e fratura, na profundidade entre 80 e 85 m, o nível de água deste poço estava 27 m. Existe uma dúvida em relação a unidade estratigráfica deste poço, mas devido a coloração da rocha e profundidade, é provável que esteja no domínio do Membro Pedro Leopoldo. Galvão (2015), identificou 2 níveis de condutos no ambiente freático na região: um primeiro, mais raso, com dimensões de 1 a 8 m, e um segundo, 10 m mais abaixo do primeiro, com vazios variando entre 20 cm e 1 m de eixo maior.

Fotografia 28

Fotografia 31

Fotografia 29

Fotografia 30

Em sentido anti-horário: Fotografia 28. Seção transversal do conduto principal da Lapa do Boi, com morfologia de fenda do tipo canyon de entalhamento vadoso. Fotografia 29. Fotograma da filmagem do poço PT-105 na profundidade 45 m. verificou-se um conduto, com aparente padrão meandrante sobre o acamamento. Fotografia 30. Fotograma da filmagem do poço 99 a 84 m. de profundidade, mostra um plano de estratificação com dissolução de 2 cm. de espessura. Fotografia 31. Pedreira Sambra, Membro Pedro Leopoldo, exibindo feições de dissolução com morfologia freática.

4.3.3 Controle litológico da porosidade terciária

Distribuição espacial das feições de dissolução na FSL

A distribuição de feições de dissolução associadas ao epicarste e aos condutos e cavernas, do ponto de vista regional (Figura 4), o mapa de feições cársticas (Figura 15) e da distribuição de cavernas da área (Figura 16) evidenciam uma incidência maior de cavernas e de feições de dissolução sobre as rochas carbonáticas do Membro Lagoa Santa em relação ao Membro Pedro Leopoldo.

Considerando a área de estudo, foi realizada uma prospecção espeleológica de campo associada ao levantamento de ocorrência de cavernas junto aos grupos de espeleologia (GBPE), cadastro do CECAP e consultas a moradores da área. Todas as cavernas identificadas ocorrem no membro Lagoa Santa. Nenhuma caverna significativa foi associada ao Membro Pedro Leopoldo, ocorrendo somente cavidades no Membro Pedro Leopoldo associadas às fendas do epicarste, conforme descrito no item 4.3.1. O Membro Pedro Leopoldo exibe feições de dissolução com morfologia freática com menor incidência e dimensões também menores do que no Membro Lagoa Santa. (Fotografia 31). Constata-se, portanto, que o Membro Lagoa Santa, possui um grau de carstificação maior que o Membro Pedro Leopoldo.

Figura 15 - Mapa de feições cársticas. Associados à Formação Sete Lagoas (tons azul claro e achura de calcário): as cavernas estudadas, a ocorrência de cavidades e cavernas no cadastro CECav, as bacias fechadas e lineamentos deduzidos para este trabalho.

Figura 16 - Distribuição da planimetria de cavernas da área. Associa as cavernas estudadas, em termos de sua morfologia de desenvolvimento, com a Formação Sete Lagoas.

Classificação geoquímica e solubilidade na FSL

A Tabela 2 apresenta o resumo dos resultados químicos de 30 amostras coletadas em afloramentos representativos dos dois membros. A tabela completa com os resultados analíticos encontra-se no anexo II. As análises químicas dos principais óxidos das rochas coletadas (Tabela 2) permitiram classificar as rochas carbonáticas em função dos seus teores de CaO e MgO (Figura 17). Foram também a base para o cálculo da sua composição mineralógica para a classificação de rochas carbonáticas de acordo com Miche et al (2013). A aplicação da classificação de Martinet e Sougy (1961) permite distinguir calcários, correspondentes as rochas carbonáticas do Membro Lagoa Santa (MLS) dos calcários magnesianos e dolomíticos do Membro Pedro Leopoldo (MPL).

No conjunto de amostras analisadas, duas amostras revelaram composição discrepante em relação às demais. Tratam-se das amostras 129 e 55d, Figura 17. A amostra 129 foi coletada na pedreira Canaã, (ponto P-129, mapa de pontos Figura 2) e corresponde a uma zona de cisalhamento de falha inversa no MLS. Conforme o diagrama da Figura 17, esta amostra apresenta cerca de 58% de resíduo insolúvel (material silicoso). A amostra 55d (Figura 17) foi coletada na pedreira Paraíso (ponto P-55, mapa de pontos Figura 2), e é interpretada como um extremo em relação às demais amostras do Membro Pedro Leopoldo, onde certos estratos sofreram um enriquecimento em MgO, chegando a compor estratos de dolomito nos calcários magnesianos.

Rauch e White (1970) relacionaram estatisticamente alguns parâmetros litológicos que controlam o grau de formação de cavernas. Os mais importantes relacionados a este estudo são o Teor de Insolúveis, MgO, Al_2O_3 e SiO_2 , quanto menores esses valores são, maior será o potencial de formação da porosidade de dissolução. O diagrama da Figura 17 serviu para deduzir os teores de insolúveis das amostras dos MPL e do MLS. Observa-se que as amostras do MPL estão em um intervalo entre 7% e 24% de insolúveis, já as do MLS variam entre 1% e 10%. Interpreta-se que as rochas do MLS, calcários mais puros, possuem um potencial de formação de porosidade de cavernas maior que as do MPL. A solubilidade de rochas carbonáticas também é controlada pelo teor em MgO. O Membro Pedro Leopoldo

apresentou teor médio de 3,8% em peso de MgO, enquanto que o Membro Lagoa Santa revelou média de 0,4% em peso (Tabela 2). Estes valores foram comparados com os resultados de Rauch e White (1970), que propõem um limite 4% em peso de MgO a partir do qual diminui a solubilidade da rocha carbonática causando uma brusca diminuição no potencial de formação de porosidade de cavernas (chamada pelo autor de "volume de cavernas"). Utilizando este limite, o Membro Lagoa Santa está na faixa de baixos teores de MgO com alto potencial de geração de porosidade de condutos, variando entre 0,69% e 0,24% em peso. Já o Membro Pedro Leopoldo, com MgO entre 10,3 % e 0,4% em peso, pode ser classificado como com baixo potencial para a geração de condutos de dissolução.

A Tabela 3 compara os teores médios de MgO, Al₂O₃ e SiO₂ dos MPL e MLS com os intervalos que Rauch e White (1970) determinaram como fatores controladores para geração de porosidade terciária em rochas carbonáticas.

Tabela 2. Resumo dos teores em óxidos das rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas (30 amostras). Média (média simples), Max (valor máximo), Min (valor mínimo), DP (Desvio padrão) e CV (Coeficiente de variação).

Membro Lagoa Santa					
Óxidos	Média	Max	Min	DP	CV
CaO	54,13	55,73	50,66	1,35	0,03
MgO	0,44	0,69	0,24	0,13	0,30
Al ₂ O ₃	0,31	1,29	0,02	0,34	1,11
Fe ₂ O ₃	0,19	0,60	0,03	0,17	0,87
MnO	0,01	0,03	0,00	0,01	0,60
SiO ₂	1,58	5,90	0,08	1,56	0,99
Na ₂ O	0,04	0,12	0,01	0,04	0,87
K ₂ O	0,10	0,42	0,01	0,11	1,05
P ₂ O ₅	0,12	0,33	0,06	0,05	0,45
TiO ₂	0,02	0,07	0,00	0,02	1,10
Membro Pedro Leopoldo					
CaO	44,90	55,19	37,11	4,24	0,09
MgO	3,83	10,35	0,41	2,58	0,67
Al ₂ O ₃	1,62	2,72	0,09	0,57	0,35
Fe ₂ O ₃	0,82	2,17	0,08	0,46	0,56
MnO	0,03	0,07	0,01	0,01	0,41
SiO ₂	8,69	17,32	0,64	3,87	0,44
Na ₂ O	0,27	0,70	0,02	0,17	0,65
K ₂ O	0,34	0,61	0,03	0,18	0,54
P ₂ O ₅	0,07	0,12	0,04	0,02	0,24
TiO ₂	0,08	0,13	0,01	0,03	0,35

Tabela 3. Limites deduzidos por Rauch e White (1970) para alto potencial de formação de porosidade (PFP) de condutos (cavernas) comparados aos teores obtidos. Valores menores aumentam o potencial de formação de porosidade de dissolução. Teores em % em peso de CaCO₃, CaMg(CO₃)₂ e Resíduo Insolúvel (RI) calculados através do diagrama de Miche

Parâmetro	PFP (%)	MPL (%)	MLS (%)
Insolúveis	<9	7-24	1-10
MgO	<4	3,83	0,44
Al ₂ O ₃	<6	1,62	0,31
SiO ₂	<5	8,69	1,58
CaCO ₃	-	70,63	95,71
CaMg(CO ₃) ₂	-	17,43	1,96
RI (média)	-	11,95	2,33

Figura 17 - Classificação química das rochas carbonáticas da área de estudo, com base ao diagrama Martinet Sougy (1961). As cruzes azuis representam as amostras classificadas como calcários dolomíticos e magnesianos, as vermelhas são as amostras classificadas como calcários puros.

As análises dos óxidos permitiram aplicar o modelo de Miche et al. (2013) para calcular a mineralogia das rochas carbonáticas. Desta maneira, é possível classificar os tipos de rochas carbonáticas de acordo com a sua mineralogia de carbonatos (Figura 18). As rochas do MPL, podem ser classificadas litologicamente como dolomitos calcíticos silicosos e calcários dolomíticos silicosos até calcários silicosos (70,6% de CaCO_3 ; 17,4% de $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$; 11,9% de R.I.) mais ou menos magnesianos. As rochas do MLS são calcários mais ou menos magnesianos (95,7% de CaCO_3 ; 1,9% de $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$; 2,3 % de R.I.).

Estes resultados comprovam e explicam o padrão distinto da carstificação observada entre as duas unidades litoestratigráficas que compõe a Formação Sete Lagoas, ou seja, o controle principal do processo de dissolução e geração da porosidade terciária nestas rochas carbonáticas é litológico, pois encontram-se em condições climáticas iguais e apresentam requisitos estruturais e hidrológicos semelhantes.

Figura 18 - Classificação mineralógica das rochas carbonáticas da área de estudo com base no diagrama de Miche et al. (2013). No detalhe: LS (amostras do Membro Lagoa Santa em cor laranja), PL (amostras do Membro Pedro Leopoldo em cor azul).

5 ASPECTOS DO SISTEMA CÁRSTICO ASSOCIADO AOS MEMBROS PEDRO LEOPOLDO E LAGOA SANTA

O presente estudo permitiu diferenciar o grau de carstificação e características distintas entre os sistemas cársticos desenvolvidos nos membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa, principalmente em consequência da solubilidade maior das rochas carbonáticas do MLS em relação às do MPL, conforme demonstrado no item anterior.

O MPL apresenta superfície caracterizada por morros residuais que emergem de amplas planícies cobertas por material residual (solo avermelhado) e sedimentos aluvionares associados a uma rede de drenagem fluvial. O epicarste associado ao sistema cárstico do MPL é caracterizado por fendas de dissolução que se afunilam em profundidade, terminando nas juntas de fraturas subverticais (descritas no item 4.3.1). A superfície é menos rugosa, quando comparada à do MLS, não exibindo o intenso lapiezamento do MLS. Continuando em profundidade, conforme observado em pedreiras, a rocha carbonática apresenta isoladas feições de dissolução de origem freática. Quando ocorrem, são condutos com diâmetro centimétrico a decamétrico e associados à intersecção de fraturas com superfícies de estratificação (Fotografias 12 e 13). Na área investigada não ocorrem cavernas associadas às drenagens subterrâneas. As cavernas identificadas representam alargamentos na zona vadosa de fendas subverticais do epicarste.

Em relação ao ambiente freático atual, o MPL apresenta condutos freáticos em desenvolvimento, conforme observado nos poços de exploração de água, 105 e 99 (Figura 2, localização de pontos de amostragem, poços e de cavernas estudadas). São condutos com até 30 cm de diâmetro, sugerindo controle por superfícies de acamamento (descritos no item 4.3.1). A recarga do sistema cárstico do MPL é principalmente de natureza autogênica, mas a contribuição alogênica é provável que ocorra na zona de contato destas rochas com o embasamento granítico, porém não

se observam feições de absorção típicas de um carste bem desenvolvido, com sumidouros e vales cegos. Interpreta-se que a recarga de isolados condutos freáticos no MPL deve ocorrer através de um sistema fissurado, através de fraturas e fendas alargadas do epicarste, além do sistema poroso que caracteriza o espesso manto de material residual que cobre as planícies.

O carste do MLS apresenta um sistema de drenagem subterrânea bem desenvolvido, com cavernas e condutos de dissolução, com iniciação freática e atualmente na zona vadosa, em parte abrigando córregos subterrâneos (e.g. cavernas Cascata e Taboa, p. ex.). As cavernas apresentam condutos com padrão meandrante e trechos anastomosados formando sistemas de drenagem subterrânea principalmente convergentes. Em relação à recarga destes sistemas de drenagem subterrânea, identificou-se contribuições de origem alogênica, através de vales cegos com sumidouros na zona de contato entre os calcários do MLS e a cobertura siliciclástica da Formação Serra de Santa Helena (FSH), a exemplo da caverna Cascata (Figura 2). Um segundo padrão de condutos típico do MLS são sistemas com padrão em rede (caverna do Ninho, Lapa do Capão, Figura 2, localização de pontos de amostragem, poços e de cavernas estudadas), atualmente acima da zona freática, inseridos no contexto de morros residuais.

Interpreta-se também a presença de carste subjacente (interestratal) no MLS abaixo da cobertura da FSH devido à incidência de nascentes cársticas nas rochas carbonáticas na base da escarpa de contato com os metassedimentos da FSH (ponto 14, Figura 2). A recarga deste aquífero cárstico deve ocorrer através do sistema de fraturas identificado nos metassedimentos da FSH. A presença de um sistema cárstico abaixo da FSH também é sugerida pelos condutos freáticos bem desenvolvidos observados na profundidade de 45 m no poço 105 (Figura 2) perfurado no MLS e localizado na borda da escarpa da Serra de Santa Helena.

No contexto das cavernas nesta unidade, ressalta-se a caverna Rei do Mato, sem indicação de fluxo definido, ou ação de rio subterrâneo e não conectada a um ponto de injeção da recarga, como a maioria das cavernas da área. Representa uma cavidade isolada, com padrão planimétrico irregular, de dimensões muito variadas, com localização na base da escarpa e parte de seu desenvolvimento abaixo da cobertura dos metassedimentos da FSH. Estas características permitem interpretar uma provável espeleogênese com iniciação freática em ambiente interestratal com posterior ampliação em condições vadosas com a erosão remontante e recuo da escarpa da FSH.

O sistema cárstico do MLS também é caracterizado pela grande variedade de feições de dissolução no epicarste, conforme descrito anteriormente, com fendas (*karren*) em fraturas e planos de estratificação, além de proto condutos e condutos freáticos expostos atualmente no vadoso. Na superfície, dominam morros residuais, com rocha exposta e intenso lapiezamento, conferindo uma superfície extremamente rugosa.

6 CONCLUSÕES

O estudo dos aspectos litológicos, estruturais, geoquímicos e cársticos abordados neste trabalho permitiu estabelecer algumas diferenças fundamentais nas rochas da Formação Sete Lagoas que não tinham sido objeto de estudo em trabalhos anteriores, em especial a geoquímica dos minerais carbonáticos, a relação das estruturas rúpteis com a dissolução (evolução da porosidade a partir destes dois aspectos), e a visão sistêmica da paisagem cárstica na tentativa de propor um modelo simplificado do sistema hidrogeológico da área.

No que diz respeito à porosidade das rochas da Formação Sete Lagoas, conclui-se que:

- A porosidade primária na escala microscópica foi obliterada pelos fenômenos posteriores à diagênese. Existe uma porosidade incipiente, não primária. Não se observam diferenças significativas dessa porosidade entre os MPL e o MLS da formação. Considerando a classificação da porosidade de Choquette & Pray (1970), a porosidade pode ser classificada como sendo de petrotrama seletiva intercristalina secundária. A porosidade é representada por microporos em um volume menor que 3% nas seções delgadas que foram estudadas.
- A porosidade secundária é representada pelas discontinuidades de caráter rúptil em combinação com a superfície dobrada do acamamento e dobras. Identificou-se três sistemas principais de fraturas: C1) orientado a N10-20E/ subvertical para NW e SE, C2) orientado a N30-40E/ subvertical e C3), com concentração N80-W a E-W também sub vertical. Foram identificadas também três linhas de intersecção dominantes da combinação de fraturas principais e acamamento: L1 N20E/6-10°, L2 N40E/6-10° e L3 N80W/6-10°. Os conjuntos de fraturas (C) e as linhas de intersecção fraturas/estratificação (L) se relacionam com o desenvolvimento da porosidade terciária.
- Embora a morfologia planimétrica das cavernas estudadas tem padrões variados, a porosidade terciária da FSL, e concretamente, a porosidade do MPL, mostra relações de orientação com as direções preferenciais C1, C2 e

C3, assim como as direções L1 e L2 (que são as direções preferenciais de desenvolvimento de dissolução das cavidades).

Em relação aos condicionantes geoquímicos e litológicos para a formação de porosidade por dissolução:

- Existe uma diferença geoquímica e litológica entre os dois membros da FSL. As amostras do MPL são calcários dolomíticos e magnesianos, enquanto que as amostras do MLS são calcários; os teores em insolúveis do MPL (entre 7% e 24%) são também superiores aos teores do MPL (entre 1% e 10%). Considerando a relação direta de maiores teores de MgO e insolúveis com a diminuição do potencial de formação de porosidade, conclui-se que o MPL tem menor potencial para a dissolução e geração de porosidade terciária do que o MLS.
- Litologicamente as rochas do MPL são dolomitos calcíticos silicosos e calcários dolomíticos silicosos até calcários silicosos, mais ou menos magnesianos; as rochas do MLS são estritamente calcários mais ou menos magnesianos.

Do ponto de vista do sistema cárstico, o carste do MLS apresenta um sistema de drenagem subterrânea bem desenvolvido, com feições de iniciação freática atualmente na zona vadosa, cavernas com padrões planimétricos em rede, com trechos anastomosados, e controle estrutural por fraturas e planos de acamamento. Esta característica permite inferir a presença de sistemas de condutos atualmente em desenvolvimento no freático, comprovado pelos condutos observados em poços de exploração de água subterrânea. Interpretou-se, também, a presença de carste subjacente (interestratal) no MLS abaixo da cobertura metapelítica da FSH (a exemplo da caverna Rei do Mato) que hoje é provavelmente o protagonista do sistema freático e de deslocamento da água subterrânea na área de estudo.

Com as observações disponíveis nesta pesquisa afirma-se que o MLS possui um sistema cárstico bem desenvolvido e, em comparação, o MPL possui sistema cárstico pouco desenvolvido, considerando como referência o modelo conceitual de sistema cárstico de Ford e Williams (2007).

REFERÊNCIAS

- Almeida, F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7: 349-364.1977
- Ahr, W. M. (2008), A New Genetic Classification of Carbonate Porosity and Its Application to Reservoir Characterization. Posted October 24, 2008. Adapted from oral presentation at AAPG Annual Convention, San Antonio, TX, April 20-23, 2008
- Babinski, M.; Kaufman, A. J. 2003. First direct dating of a neoproterozoic post-glacial cap carbonate. In: South American Symposium on isotope Geology, 4, 2003, Salvador. Short Papers, p.321-323
- Choquette, P.W. e Pray, L.C. 1970. Geological nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 54, 207-50.
- CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos minerais. 2003. Relatório final: mapeamento geológico: região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia. Belo Horizonte: CPRM, 2003, CD-ROM.
- Dardenne, M.A. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30. Recife. Anais Recife: Sociedade Brasileira de Geologia, 1978. v.2, p.597-610.
- Ford, D.C.; Williams, P.W. (2007). *Karst geomorphology and hidrology*. United Kingdom: Wiley. 562 p.
- Galvão, P. (2015). Hydrogeological Conceptual Model of Sete Lagoas (MG) and Associated Implications of Urban Development in Karst Region. Tese de Doutorado. Programa de Recursos minerais e hidrogeologia, Universidade de São Paulo.
- Galvão, P. *et al* (2016). Geologic conceptual model of the municipality of Sete Lagoas (MG, Brazil) and the surroundings. *An. Acad. Bras. Ciênc.* 2016, vol.88, n.1, pp.35-53.

Grohmann, C.H., Campanha, G.A.C. e Soares Junior, A.V., (2011). OpenStereo: um programa Livre e multiplataforma para análise de dados estruturais. In: XIII Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos.

Halihan T., Mace R.E. and Sharp J.M. Jr. (2000). Flow in the San Antonio segment of the Edwards aquifer: matrix, fractures, or conduits? Em Wicks C.M. and Sasowsky I.D. (ed.) Groundwater Flow and Contaminant Transport in Carbonate Aquifers. AA Balkema, 129–146.

Hobbs, B. E., Means, W. D., Williams, P. F. (1976). An outline of structural geology. New York Wiley, 571 p.

Kilary, L. 1975. Rapport sur l'état actuel des connaissances dans le domain des caracteres physiques des roches karstiques, em Hydrogeology of Karstic Terrains (ads A. Burger and L. Dubertret), International Union of Geological Sciences, Series B, Vol. 3, pp. 53-67.

Lucia, F. J., 1983, Petrophysical parameters estimated from visual descriptions of carbonate rocks: a field classification of carbonate pore space: Journal of Petroleum Technology, v. 35, no. 3, p. 629-637.

Lucia, F. J. (1995). Rock-Fabric/Petrophysical Classification of Carbonate Pore Space for Reservoir Characterization. AAPG Bulletin, 79(9), 1275–1300.

Martinet B. and Sougy J., 1961. Utilization Pratique des classifications Chimiques des Roches Carbonatées,” C. R. Somm. Soc. Géol. Fr., 1957, p 367 (résumé), Annales de la Faculté des Sciences de Dakar, 1957[1961], pp. 81-92.

Miche H., Simler R., Pascal A., Mickala O., Boudzoumou F., Mbina M. 2013. New Computerized Method for the Geochemical Classification of Precambrian Carbonate Rocks: Case of a Set of African Cap Carbonates. International Journal of Geosciences, 4, 37-49.

Misi A., Kaufman A.J., Veizer J., Powis K., Azmy K., Boggiani P.C., Gaucher C., Teixeira J.B.G., Sanches A.L. & Iyer S.S.S. 2007. Chemostratigraphic Correlation of Neoproterozoic Successions in South America. Chem. Geol., 237:161-185

Mori, P.E.; Reeves, S.; Correia, C.T.; Haukka, M. 1999 Development of fused glass disc XRF facility and comparison with the pressed powder pellet technique at Instituto de Geociencias, São Paulo University. *Revista Brasileira de Geociencias*. V.29, 441-446.

Palmer, A.N. (1991). Origin and morphology of limestone caves. *Geological Society of America Bulletin*, 103, 1–21.

Palmer, AN (2007). *Cave Geology*. Cave Books, Dayton, OH; p. 288.

Pedrosa-Soares A.C., Dardenne M.A., Hasui Y. Castro F.D.C., Carvalhoh M.V.A. & Reis A.C. 1994. Mapa Geológico do estado de Minas Gerais e Nota Explicativa, Secretaria de Recursos Minerais, Hídricos e Energéticos, Companhia Mineradora de Minas Gerais (COMIG), mapas e texto, 97 p.

Pessoa, P. (1996). Caracterização hidrogeológica da região de Sete Lagoas - MG: Potencialidades e riscos. Dissertação de Mestrado. Departamento de geociências, Universidade São Paulo.

Piló, L. B. (1998). Morfologia cárstica e materiais constituintes dinâmica e evolução da depressão poligonal macacos-baú - carste de Lagoa Santa, MG. Tese de Doutorado. Departamento de geografia, Universidade São Paulo.

Rauch, H.W. and White, W.B. (1970). Lithologic controls on the development of solution porosity in carbonate aquifers. *Water Resources Research*, 6, 1175–92.

Scholle, P. A. & Ulmer- Scholle, D. S, 2003, *A Color Guide to the Petrography of Carbonate Rocks*: AAPG Memoir 77, 474 p.

Ribeiro J.H.; Tuller, M.P.; Danderfer Filho, A. (2003). Mapeamento geológico da região de Sete lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia, Minas Gerais (escala 1:50.000) – texto explicativo. In: Projeto Vida. Belo Horizonte: CPRM, 1991. (versão CD-ROM, 2003).

Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) do Município de Sete Lagoas (MG). Relatório Técnico, (2013).

Tonietto, S. N., (2010). Diagênese e hidrotermalismo em rochas carbonáticas proterozóicas: Grupos Bambuí e Vazante, Bacia do São Francisco. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 167p

Tucker, M.E. e Wright, P.V. (1990). Carbonate sedimentology. Oxford [England]; Boston: Blackwell Scientific Publications: Distributors, USA, Publishers Business Services, 482p. ISBN 0632014725.

Tuller, M. P.; Ribeiro, J. H.; Signorelli, N.; Féboli, W. L.; Pinho, J. M. M. (2009). Projeto Sete Lagoas - Abaeté, Estado de Minas Gerais (CPRM) Orgs.- Belo Horizonte: CPRM-BH, 160p. 06 mapas geológicos, escala 1:100.000 (Série Programa Geologia do Brasil) versão impressa e em meio digital, textos e mapas.

Worthington S.R.H., (2005). Hydraulic and geological factors influencing conduit flow depth. Caves and Karst Science. 31 (3), 123-34.

ANEXO I

	Litologia	Coordenadas (UTM)	Acamamento (S0)	Sn/outros	Fratura	Fratura: Tipo e tamanho
PONTO	MPL, MLS, FSH		STRIKE & DIP	STRIKE & DIP	STRIKE & DIP	
P-01	FSH	0576650;7849502	5/10NW	180/50E		TIPO DE FRATURA 1=Centimétrica 2=Métrica 3=Decamétrica S= Simples P=Preenchida D=Com ou Associado a Dissolução TF= Traço Fratura FP= Fratura preenchida c calcita FC= Fratura de cisalhamento CO= Conduto dentro de cavidade
P-02	FSH	0575463;7843322	315/20NE			
P-03	FSH	0576633;7849466	175/20SW	08/58SE		
P-04	FSH	0576822;7849451	130/20SW			
P-05	FSH	0576744;7849464	135/15SW	172/50NE	110/90	
P-06	FSH	0576783;7850431	220/15SE	25/65SE	290/90	
P-06b	FSH	0576783;7850431	255/25SE			
P-07	FSH	0577050;7851335	140/35NE		193/89NW	
P-07b	FSH	0577050;7851335			300/90	
P-08	FSH	0576804;7850884	180/20W	205/55SE		
P-08b	FSH	0576804;7850884				
P-09	MLS	0577678;7850936	165/18SW	170/55NE		
P-10	MLS	0577990;7851644				
P-11	FSH	0575446;7843798	345/60SW	330/45SW		
P-12	MLS	0574809;7843691	125/22NE			
P-13	FSH	0574309;7845604	175/25SW		280/90	
P-14	MLS	0575513;7843917	152/9NE			
REDEMIX	MLS	0575513;7843917	330/35NE			
P-15	FSH	0596490;7837716				
P-16	FSH	0596764;7837726				
P-17	FSH	0596936;7837660				
P-18	FSH	0597067;7837632				
P-19	FSH	0597084;7837778				
P-20	FSH	0597868;7837045				
P-21	FSH	0599413;7837414				
P-22	FSH	0603955;7843065				
P-23	FSH	0604182;7843595				
P-24	FSH	0575082;7849389				
P-25	FSH	0575219;7849652	17/6NE		105/90	
P-26	FSH	0567565;7847905	120/8SW		225/80NW	
P-26	FSH	0567565;7847905			90/90	
P-27a	MLS	0575086;7848500				

P-27	MLS	0575210;7844278	30/15SE		310/80SW	
P-27	MLS	0575210;7844278			345/90	
P-28	MLS	0575172;7844306			35/55NW	1
P-28	MLS	0575172;7844306			65/45SW	
P-29	MLS	0575162;7844318				
P-30	FSH	0575178;7844375				
P-31	FSH	0575150;7844472	340/12NE			
P-32	FSH	0575249;7844598	30/25SE			
P-33	MLS	0575249;7844598			300/90	1
P-33	MLS	0575249;7844598			10/45SE	1
P-33	MLS	0575249;7844598			355/80NE	1
P-33	MLS	0575249;7844598			255/90	2
P-34	MLS	0575249;7844598	165/18NE		335/60NE	
P-34	MLS	0575249;7844598			328/65NE	2
P-34	MLS	0575249;7844598			315/70NE	2
P-35	MLS	0575326;7844620	333/28SW		15/90	1
P-35	MLS				315/90	2
P-35	MLS				310/90	2
P-36	MLS	0575351;7844588			300/90	
P-37	MLS	0575351;7844588			308/65SW	3
P-37	MLS	0575351;7844588			315/80NE	
P-38	MLS	0575351;7844588			307/90	
P-38	MLS	0575351;7844588			352/90	
P-39	MLS	0575351;7844588				
P-40	MLS	0575351;7844588	10/24NW	340/25NE		
P-41	MLS	0570557;7846535	327/12NE			
P-42	MLS	0570467;7846491	125/12NE		325/25NE	2,3
P-43	MLS	0570494;7846485				
P-44	MLS	0570494;7846485				
P-45	MLS	0570494;7846485				
P-46	MLS	0570494;7846485				
P-47	MLS	0570494;7846485				
P-48	MLS	0570494;7846485			318/60SW	2S
P-48	MLS	0570494;7846485			345/58SW	2S

P-49	MLS	0570494;7846485				
P-50	MLS	0570494;7846485				
P-51	MLS	0570494;7846485				
P-52	MLS	0570494;7846485				
P-53	MLS	0570494;7846485				
P-54	MLS	0570058;7846973			30/90	
P-54	MLS	0570058;7846973			35/90	
P-55	MPL	0567602;7847863			282/90	
P-55	MPL	0567602;7847863			285/90	
P-55	MPL	0567602;7847863			48/70SE	2S
P-55	MPL	0567602;7847863			32/75SE	2P
P-55	MPL	0567602;7847863			34/80SE	2P
P-55	MPL	0567602;7847863			35/90	2P
P-55	MPL	0567602;7847863			42/80SE	1S
P-56	MPL	0567578;7847868			90/80NE	3S
P-56	MPL	0567578;7847868			107/90	2S
P-56	MPL	0567578;7847868			98/75NE	2P
P-56	MPL	0567578;7847868			105/90	2S
P-56	MPL	0567578;7847868			35/85SE	2S
P-56	MPL	0567578;7847868			94/90	2S
P-56	MPL	0567578;7847868			50/90	1S
P-56	MPL	0567578;7847868			108/90	2S
P-56	MPL	0567578;7847868			105/70NE	2P
P-56	MPL	0567578;7847868			95/80NE	3S
P-56	MPL	0567578;7847868			101/75NE	2S
P-56	MPL	0567578;7847868			95/72NE	2S
P-57	MPL	0567515;7847949	06/10NW		102/75N	3S
P-57	MPL	0567515;7847949	N-S/10W			
P-58	MPL	0567550;7847829			92/90	3D
P-58	MPL	0567550;7847829			N-S/40E	?D
P-58	MPL	0567550;7847829			94/SV	2S
P-58	MPL	0567550;7847829			275/SV	TF
P-58	MPL	0567550;7847829			275/SV	TF
P-58	MPL	0567550;7847829			285/SV	TF

P-58	MPL	0567550;7847829			235/SV	TF
P-58	MPL	0567550;7847829			235/75SE	TF
P-58	MPL	0567550;7847829			277/80NE	2S
P-58	MPL	0567550;7847829			35/SV	TF
P-58	MPL	0567550;7847829			92/80NE	2S
P-58	MPL	0567550;7847829			30/SV	2S
P-58	MPL	0567550;7847829			85/SV	2S
P-58	MPL	0567550;7847829			40/70SE	2S
P-58	MPL	0567550;7847829			35	3S
P-58	MPL	0567550;7847829			95/80NE	3S
P-58	MPL	0567550;7847829			37/80SE	2S
P-58	MPL	0567550;7847829			92/80NE	2S
P-58	MPL	0567550;7847829			50/70SE	2P
P-58	MPL	0567550;7847829			100/90	2S
P-58	MPL	0567550;7847829			47/75SE	2S
P-58	MPL	0567550;7847829			94/80NE	3D
P-58	MPL	0567550;7847829			100/SV	2S
P-58	MPL	0567550;7847829			55/65SE	2S
P-58	MPL	0567550;7847829			39/65SE	1S
P-58	MPL	0567550;7847829			45/70SE	1S
P-58	MPL	0567550;7847829			115/75NE	1S
P-58	MPL	0567550;7847829			35/77SE	1S
P-58	MPL	0567550;7847829	80/07SE		350/55NE	3S
P-58	MPL	0567550;7847829	80/06SE		87/90	2S
P-58	MPL	0567550;7847829			28/90	2S
P-58	MPL	0567550;7847829			353/43NE	3S
P-59	MPL	0567578;7847839			102/78NE	3D
P-59	MPL	0567578;7847839			37/75SE	3D
P-59	MPL	0567578;7847839			N-S/45E	3TF
P-59	MPL	0567578;7847839			345/55NE	3TF
P-59	MPL	0567578;7847839			95/60NE	3TF
P-59	MPL	0567578;7847839			100/90	3TF
P-59	MPL	0567578;7847839			105/90	3TF
P-59	MPL	0567578;7847839			35/75SE	3D

P-59	MPL	0567578;7847839			112/90	3D
P-59	MPL	0567578;7847839			55/90	3TF
P-59	MPL	0567578;7847839			38/70SE	3D
P-59	MPL	0567578;7847839			92/90	2S
P-59	MPL	0567578;7847839			110/90	2S
P-59	MPL	0567578;7847839			42/80SE	2D
P-59	MPL	0567578;7847839			110/90	2S
P-59	MPL	0567578;7847839			107/90	2S
P-59	MPL	0567578;7847839			108/90	TF
P-59	MPL	0567578;7847839			118/75NE	TF
P-60	MPL	0567578;7847839			103/90	2D
P-60	MPL	0567578;7847839			104/90	2D
P-60	MPL	0567578;7847839			44/65SE	TF
P-60	MPL	0567578;7847839			52/67SE	2S
P-60	MPL	0567578;7847839			50/75SE	2S
P-60	MPL	0567578;7847839			95/90	1S
P-60	MPL	0567578;7847839			104/75NE	3D
P-60	MPL	0567578;7847839			45/90	2S
P-60	MPL	0567578;7847839			45/90	2S
P-60	MPL	0567578;7847839			10/90	2S
P-60	MPL	0567578;7847839			115/90	2D
P-60	MPL	0567578;7847839			111/90	TF
P-60	MPL	0567578;7847839			40/75SE	3D
P-60	MPL	0567578;7847839			112/90	3D
P-61	MPL	0581670;7844063			40/65SE	2D
P-61	MPL	0581670;7844063	120/30NE			
P-62	MPL	0581674;7844089			30/65SE	2S
P-63	MPL	0581650;7844129				
P-64	MPL	0581687;7844183			100/47	-
P-64	MPL	0581687;7844183			N-S/55E	-
P-65	MPL	0581624;7844234				
P-66	MPL	0581671;7844212	30/38SE			
P-66	MPL	0581671;7844212			130/68NE	FP
P-66	MPL	0581671;7844212			120/40NE	FP

P-66	MPL	0581671;7844212			7/30SE	FC
P-66	MPL	0581671;7844212			N-S/35E	FC
P-66	MPL	0581671;7844212			10/38SE	FC
P-67	MPL	0581467;7844227			35/90	2D
P-67	MPL	0581467;7844227			55/90	2D
P-67	MPL	0581467;7844227			115/45NE	2D
P-68	MPL	0581505;7844146			23/90	2S
P-68	MPL	0581505;7844146	117/40NE			
P-69	MLS	-			120/40NE	FC
P-70	MLS	0575217;7846897	180/10W			
P-71	MLS	0575243;7846872	15/10NW		140/90	2S
P-71	MLS	0575243;7846872			140/90	2S
P-72	MLS	-			125	2S
P-72	MLS	-			N-S	2S
P-72	MLS	-			140/90	2D
P-72	MLS	-			130/90	2S
P-72	MLS	-			127/90	2S
P-72	MLS	-			150/90	1P
P-73	MLS	-			170/60SW	2D
P-73	MLS	-			150-155/77SW	
P-73	MLS	-			145-70/90	
P-74	MLS	-			195/90	2S
P-74	MLS	-			150	1S/2S
P-74	MLS	-			170-180	
P-75	MLS	-			130	2D
P-75	MLS	-			135	2D
P-75	MLS	-			190-185	1P
P-75	MLS	-			185/75NW	2P
P-75	MLS	-			167/75SW	2P
P-75	MLS	-			90/90	3S
P-75	MLS	-			10-12/70-80N	3P
P-75	MLS	-	95/05NE			
P-76	MLS	-			125-130	CO
P-77	MLS	-			135-130	

P-78	MLS	-			135	
P-78	MLS	-			130	3D
P-79	MLS	-			110	2D
P-80	MLS	-			128	
P-80	MLS				20	
P-80	MLS		60/15NW			
P-80	MLS				15	3D
P-80	MLS				120	2S
P-80	MLS				175	2S
P-80	MLS				135	2S
P-81	MLS	-			75	3D
P-81	MLS	-			135-140	1P
P-82	MLS	0565392;7851410				
P-83	MLS	0584132;7843495			65/85NW	
P-83	MLS	0584132;7843495	345/25SW	65/85NW		
P-84	MLS	0584183;7843428				
P-85	MLS	0584183;7843428			102	
P-85	MLS	0584183;7843428			320	
P-86	MLS	0584183;7843428			130	
P-86	MLS	0584183;7843428			33	
P-87	MLS	0584183;7843428			175/40NE	2P
P-87	MLS	0584183;7843428			270	2P
P-87	MLS	0584183;7843428			170/37NE	1P
P-87	MLS	0584183;7843428			200/50NW	
P-88	MLS	0584236;7843721			280/70NE	
P-88	MLS	0584236;7843721			95	
P-89	MLS	-	150/25NE			
P-89	MLS	-			110	
P-89	MLS	-			220	
P-89	MLS	-			290	
P-89	MLS	-			45	
P-89	MLS	-			145/70NE	
P-89	MLS	-			95/25NE	
P-90	MPL	0569285;7847471			275/90	2S

P-90	MPL	0569285;7847471			280/90	1S
P-90	MPL	0569285;7847471	20/03W			
P-91	MPL	0569306;7847446	110/10NE			
P-92	MPL	-			285/90	2P
P-93	MPL	-			25/80SE	2S
P-94	MPL		280/05NE			
P-95	MPL	0569336;7847418	265/10SE			
P-96	MPL	-				
P-97	MPL	-	270/09S			
P-97	MPL	-	260/05SE			
P-97	MPL	-	275/11SW			
P-98	MPL	0569347;7847484			270/90	2D
P-98	MPL	0569347;7847484			285/90	2D
P-98	MPL	0569347;7847484			280	2S
P-98	MPL	0569347;7847484			200	2S
P-98	MPL	0569347;7847484			270	2S
P-98	MPL	0569347;7847484			240	2S
P-98	MPL	0569347;7847484			280/90	3S
P-98	MPL	0569347;7847484			285/90	3S
P-98	MPL	0569347;7847484			185/90	2S
P-99	MLS	0575019;7846541	290/19NE			
P-99	MLS	0575019;7846541	285/10NE			
P-99	MLS	0575019;7846541			215/90	2S
P-99	MLS	0575019;7846541			310/90	2S
P-99	MLS	0575019;7846541			220/90	3D
P-99	MLS	0575019;7846541			350/65SW	3D
P-100	MLS	0575000;7846575		180/30E	100/90	3S
P-100	MLS	0575000;7846575		190/20SE		
P-101	MLS	0574980;7846601			140/90	
P-101	MLS	0574980;7846601		25/25SE		
P-102	MLS	0575018;7846578			350/25SW	1S
P-103	MLS	0575244;7846770	185/17NW			
P-104	MLS	0595668;7849193	130/10NE			
P-104	MLS	0595668;7849193			100/80NE	2S

P-104	MLS	0595668;7849193			195/60SE	2S
P-105	MLS	0595717;7849216	170/05NE			
P-106	MLS	0595608;7849203				
P-107	MLS	0595639;7849225			122	
P-107	MLS	0595639;7849225			100	
P-108	MLS	0595670;7849242			110	
P-108	MLS	0595670;7849242			60/70SE	2S
P-109	MLS	0595661;7849269				
P-110	MLS	-			80/50SE	2D
P-111	MLS	-			110	2D
P-111	MLS	-			20/50SE	2D
P-112	MLS	0595711;7849281			130	
P-113	MLS	0595788;7844379				
P-114	MLS	0595828;7849390			110	
P-115	MLS	0595871;7849335			280-290	
P-115	MLS	0595871;7849335	160/90NE			
P-116	MLS	0595866;7849293			275	
P-116	MLS	0595866;7849293			345	
P-117	MLS	0575742;7848119	250/20NW			
P-118	MLS	0575730;7848003			70/65SE	2D
P-118	MLS	0575730;7848003			255/85SE	2D
P-118	MLS	0575730;7848003			275/75SE	2D
P-118	MLS	0575730;7848003			210/85SE	3S
P-118	MLS	0575730;7848003			225/80SE	2D
P-118	MLS	0575730;7848003		30/25SE		
P-119	MLS	0575507;7847509			0/90	1S
P-119	MLS	0575507;7847509	235/20NW		235/20NW	1S
P-120	MLS	0575762;7848090	225/20SE			
P-120	MLS	0575762;7848090	270/20S			
P-120	MLS	0575762;7848090	225/20SE			
P-120	MLS	0575762;7848090			260/65SE	2D
P-120	MLS	0575762;7848090			240/60SE	2D
P-120	MLS	0575762;7848090			220/85SE	2D
P-120	MLS	0575762;7848090	240/35SE			

P-121	MLS	30/25NW				
P-121	MLS	265/05NW				
P-121	MLS	205/05NW				
P-121	MLS				260/80NW	3D
P-121	MLS				290/70NE	3D
P-122	MLS	0574739;7849283	180/15E			
P-122	MLS	0574739;7849283	230/23SE			
P-123	MLS	-	280/10SW			
P-123	MLS	-		265/40SE		
P-124	MLS	0574661;7849277				
P-125	MLS	0574630;7849270				
P-126	MLS	0574518;789179			40	
P-126	MLS	0574518;789179			270	
P-127	MLS	-			240/65SE	2D
P-128	MLS	0574363;7849162			110	
P-128	MLS	0574363;7849162			220	
P-128	MLS	0574363;7849162			110	
P-128	MLS	0574363;7849162	230/10NW			
P-128	MLS	0574363;7849162			180/20E	2P
P-129	MPL	0575308;7846706			240/85SE	2S
P-129	MPL	0575308;7846706			265/90	2S
P-129	MPL	0575308;7846706	190/20SE	190/20SE		
P-129	MPL	0575308;7846706			350/85SW	
P-130	MPL	0575288;7846736	75/10NW			
P-130	MPL	0575288;7846736			320/90	1S
P-130	MPL	0575288;7846736			250/21SE	1P
P-130	MPL	0575288;7846736	195/5SE			
P-131	MPL	0575271;7846751		190/20SE		
P-131	MPL	0575271;7846751		220/30SE		
P-131	MPL	0575271;7846751		240/10SE		
P-132	MPL	-			160/76SW	2S
P-132	MPL	-			245/90	3P
P-133	MPL	-	200/45E			
P-134	MPL	0575307;7846803				

P-135a	MLS	0575205;7846905				
P-135b	MLS	0575187;7846910				
P-135c	MLS	0575186;7846944				
P-136	MLS				145/88NE	2S
P-136	MLS				140/85NE	2S
P-136	MLS				135/85NE	3S
P-136	MLS					
P-137	MLS					
P-138	MLS					
P-139	MLS					
P-140	MPL	0565096;7852015				
P-141	MPL	-				
P-142	MPL	0564930;7852119				
P-143	MPL	0565075;7851781				

ANEXO II

DADOS ANALITICOS BRUTOS (%)													
Finals	41a	54	42	136	128	121	120	118	35	124	9		
	15/484	15/485	15/486	15/487	15/488a	15/488b	15/489	15/490	15/491	15/492	15/493b	15/494	
(%)													
SiO2	2.85	1.26	2.08	0.58	0.77	0.08	4.52	1.25		0.57	2.21	5.9	
TiO2	0.043	0.028	0.017	0.002	0.005		0.074	0.009	0	0.002	0.014	0.039	
Al2O3	0.74	0.42	0.22	0.14	0.15	0.04	1.29	0.14		0.14	0.24	0.79	
Fe2O3	0.49	0.4	0.14	0.25	0.13	0.11	0.6	0.23	0.11	0.09	0.17	0.44	
MnO	0.013	0.007	0.004	0.007	0.007	0.005	0.015	0.012	0.005	0.006	0.005	0.012	
MgO	0.39	0.39	0.55	0.37	0.69	0.27	0.44	0.47	0.26	0.36	0.55	0.67	
CaO	52.56	53.64	53.5	55.16	54.09	55.32	51.4	53.96	55.05	54.79	53.7	50.66	
Na2O	0.01	0.02	0.05	0.03	0.05	0.03	0.02	0.03	0.01	0.03	0.12	0.08	
K2O	0.22	0.14	0.06	0.05	0.1	0	0.42	0.05	0	0.05	0.07	0.27	
P2O5	0.109	0.133	0.11	0.121	0.117	0.101	0.326	0.089	0.101	0.121	0.115	0.124	
Loi	41.52	43.14	42.4	42.88	42.43	42.58	40.12	42.29	43.02	43.48	42.45	40.14	
Total (%)	98.95	99.58	99.13	99.59	98.54	98.54	99.23	98.53	98.56	99.64	99.64	99.13	
Finals	99	98	106	129	100	33	26	55a	55b	55d			
	15/495a	15/495b	15/496	15/497a	15/497b	15/498	15/499	15/500	15/501	15/502a	15/502b	15/504	
SiO2	0.65	0.59	0.64	0.14	0.13	44.72	1.02	0	13.96	6.2	6.29	8.76	
TiO2	0	0.001	0.007			0.534	0.004	0.001	0.09	0.073	0.073	0.069	
Al2O3	0.03	0.02	0.09	0	0	10.32	0.03		1.88	1.51	1.54	1.63	
Fe2O3	0.06	0.06	0.08	0.04	0.03	4.06	0.05	0.04	0.84	0.65	0.64	0.66	
MnO	0.011	0.011	0.005	0.006	0.005	0.052	0.009	0.028	0.039	0.035	0.036	0.037	
MgO	0.51	0.51	0.41	0.24	0.24	7.14	0.48	0.34	4.51	5.69	5.74	10.35	
CaO	54.48	54.43	55.19	55.53	55.7	13.26	55.09	55.73	40.35	44.17	44.49	37.11	
Na2O	0.01	0.01	0.03	0	0	0.65	0	0	0.26	0.35	0.36	0.24	
K2O	0.04	0.04	0.03	0.01	0.01	3.05	0.04	0	0.49	0.08	0.07	0.29	
P2O5	0.107	0.104	0.117	0.084	0.085	0.121	0.062	0.082	0.062	0.063	0.061	0.078	
Loi	42.75	42.75	42.77	43.1	43.1	16.54	42.67	42.97	36.27	39.8	39.8	39.79	
Total (%)	98.65	98.53	99.37	99.15	99.3	100.45	99.46	99.19	98.75	98.62	99.1	99.01	
58b	59	63b	63a	58	64	130	91	92					
	15/505	15/506	15/507a	15/507b	15/508	15/509	15/510	15/511	15/512	15/513	15/503a		
SiO2	6.4	8.82	6.96	6.98	7.82	14.3	9.32	17.32	11.33	8.22	5.69		
TiO2	0.073	0.104	0.06	0.062	0.095	0.097	0.125	0.125	0.097	0.073	0.056		
Al2O3	1.51	2.15	1.23	1.2	1.75	1.89	2.3	2.72	1.92	1.43	1.18		
Fe2O3	0.63	0.95	0.57	0.57	1.57	0.88	0.93	2.17	0.75	0.6	0.57		
MnO	0.032	0.029	0.021	0.02	0.026	0.039	0.021	0.068	0.031	0.031	0.043		
MgO	1.12	1.67	2.65	2.64	1.63	6.5	2.16	1.36	3.14	5.43	6.25		
CaO	49.41	46.86	47.33	47.31	48.43	38.85	45.89	42.08	44.08	42.68	44.15		
Na2O	0.32	0.32	0.24	0.24	0.05	0.16	0.09	0.7	0.43	0.48	0.02		
K2O	0.25	0.46	0.25	0.26	0.58	0.6	0.61	0.45	0.33	0.21	0.41		
P2O5	0.054	0.072	0.082	0.084	0.078	0.054	0.081	0.04	0.058	0.066	0.062		
Loi	39.53	37.61	39.48	39.48	38.39	36.59	37.49	33.39	37.08	39.53	40.55		
Total	99.33	99.05	98.87	98.85	100.42	99.96	99.02	100.42	99.25	98.75	98.98		