

POROSIDADE TEXTURAL DE REGOLITOS DO COMPLEXO BAÇÃO, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MINAS GERAIS, BRASIL

FIGUEIREDO, M. do A.^{1a};

¹Curso de Geografia e Análise Ambiental, Centro Universitário de Belo Horizonte, Uni-BH, Campus Estoril,
Av. Prof. Mário Werneck, 1685, 30455-610, Belo Horizonte, MG.
+55 31 3378 4946 ^am67f@yahoo.com.br

VARAJÃO, A. F. D. C.^{2b};

²Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Morro do
Cruzeiro, 35400-000, Ouro Preto, MG.
+55 31 3559 1601 ^bangelica@degeo.ufop.br

FABRIS, J. D.^{3c}

³Departamento de Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Campus Pampulha, 31270-901, Belo
Horizonte, MG. +55 31 3499 5742 ^cjdfabris@ufmg.br

LOUTFI, I. S.^{4d}

²Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Morro do
Cruzeiro, 35400-000, Ouro Preto, MG. +55 31 3559 1601 ^divanloutfi@hotmail.com

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo a utilização de medidas de porosidade textural como contribuição ao estudo da evolução dos regolitos, ocorrentes no sul do Complexo Bação, Quadrilátero Ferrífero, estado de Minas Gerais. A porosidade de sólidos medida em escalas microscópicas pelas técnicas de sorção de nitrogênio a 77 K, aqui denominada de N₂ BET, e de intrusão de mercúrio, têm se mostrado como importantes ferramentas na caracterização e diagnóstico de diversos materiais. A utilização das referidas técnicas na análise de perfis de intemperismo (regolitos) apresenta-se como uma importante ferramenta para o estudo da dinâmica dos seus materiais constituintes. Todavia, faz-se necessário a distinção de conceitos relativos à porosidade de geomateriais regolíticos que ajudarão no estabelecimento das relações entre as estruturas existentes e o substrato rochoso. A análise da porosidade desses materiais estabelece-se freqüentemente sobre a hipótese da distinção de dois compartimentos porais de diferentes origens: a porosidade *estrutural*, que resulta da ação de agentes externos (fatores climáticos, organismos vivos, utilização agrícola) e a porosidade de origem *textural*, que resulta da fábrica (organização) das partículas elementares (argila, silte, areia). Assim, a porosidade textural varia essencialmente em função da natureza das partículas elementares (granulometria e mineralogia) e do seu estado hídrico. Nesse sentido, a análise da porosidade textural é a que proporciona informações mais adequadas ao estudo da evolução dos regolitos e de sua camada superior, o solo, pois corresponde aos menores poros existentes, por onde o intemperismo inicia seu desenvolvimento. Prévios estudos dos mesmos autores mostraram diferenciações na evolução intempérica ao longo das vertentes locais. As variações na porosidade dos regolitos em diferentes estágios de intemperismo são investigadas nos agregados *in natura* coletados em três diferentes toposequências, nos segmentos de alta, meia e baixa vertente, às profundidades entre 40 e 170 cm. Os materiais selecionados foram analisados porosimetricamente pelas técnicas N₂ BET (equipamento Quantachrome NOVA 1000) e intrusão de mercúrio (porosímetro Micromeritics PoreSizer 9320). Os resultados mostram que as amostras oriundas dos horizontes de alteração mais desenvolvidos (latossólicos) cujos constituintes materiais são de natureza alóctone, além de deterem uma maior área de superfície, apresentam tendência para maiores volumes adsorvidos e de intrusão, refletindo uma maior porosidade, e, uma ampla distribuição de classes porais na faixa de microporos, mesoporos e macroporos. As amostras de horizontes de alteração menos desenvolvidos (câmbicos) mostram uma menor área poral, onde predominam os mesoporos.

Palavras-chave: N₂ BET; intrusão de mercúrio, intemperismo, Complexo Bação

INTRODUÇÃO

O presente trabalho trata da caracterização das medidas da porosidade textural de perfis regolíticos ocorrentes no sul do Complexo Bação, Quadrilátero Ferrífero, estado de Minas Gerais, Brasil. No que se refere à caracterização mineralógica visando a relação entre natureza pedológico-regolítica e gênese de voçorocas, o trabalho pioneiro foi o de Parzanese (1991) que definiu diferenciações dos perfis de solos ao longo das vertentes. Estudos mais recentes, baseados em análises macromorfológicas, micromorfológicas e mineralógicas (Figueiredo et al, 2002; Figueiredo et al, 2004 e Figueiredo et al., 2006) efetuadas em três vertentes da área, permitiram definir a evolução pedogenética nestas vertentes com diagnósticos indicativos de aloctonia e autoctonia dos materiais parentais. Neste trabalho, tendo em vista esses prévios diagnósticos, técnicas de análise porosimétrica são utilizadas para determinar a natureza dos tipos de poros e a distribuição dos mesmos de modo a correlacioná-los com a evolução dos perfis regolíticos investigados.

A porosidade e a superfície específica de sólidos medida em escalas microscópicas pelas técnicas de sorção de nitrogênio a 77 K, aqui denominada de N₂ BET, e de intrusão de mercúrio, têm se mostrado como importantes ferramentas na caracterização e diagnóstico de diversos materiais porosos (Sills et al., 1973, 1974; Cousin et al., 1994; Bruand & Cousin, 1995; Bruand & Tessier, 2000; Balbino et al., 2001; Balbino et al., 2002; Pena, 2002). Pode-se considerar um sólido como poroso quando este apresenta cavidades e canais mais profundos do que largos (Pena, 2002). Tal característica evidencia uma diferenciação entre rugosidade e porosidade. A área de uma superfície rugosa é considerada como área superficial externa, enquanto que a área relativa às paredes dos poros abertos, aqueles que se conectam com a superfície do sólido, é considerada como área superficial interna. Desta forma, a área total, somadas estas duas áreas, terá uma contribuição significativa dos poros do material (Pena, 2002).

A análise da porosidade do solo estabelece-se freqüentemente sobre a hipótese da distinção de dois compartimentos porais de diferentes origens: a porosidade *estrutural*, que resulta da ação de agentes externos (fatores climáticos, organismos vivos, utilização agrícola) e a porosidade de origem *textural*, que resulta da fábrica (organização) das partículas elementares (argila, silte, areia) (Stengel, 1979; Cousin et al, 1994). Considera-se então, que geralmente a porosidade textural varia essencialmente em função da natureza das partículas elementares (granulometria e mineralogia) e do seu estado hídrico. Nesse sentido, a análise da porosidade textural é a que proporciona informações mais adequadas ao estudo da evolução dos perfis de intemperismo e de sua camada superior, o solo.

O presente trabalho objetiva caracterizar o arranjo poral de materiais regolíticos, através das técnicas de sorção de nitrogênio (N₂ BET) e de intrusão de mercúrio.

ÁREA DE ESTUDO

A área objeto de estudo situa-se entre os paralelos 20° 20' 00" e 20° 23' 16" S e os meridianos 43° 38' 32" e 43° 42' 16" W, cobrindo aproximadamente 38 km². O Complexo Bação está inserido no sul do Quadrilátero Ferrífero (QF), estado de Minas Gerais, sudeste do Brasil (Figura 1). O embasamento cristalino granito-gnaissico-migmatítico, base de todas as unidades geológicas do QF, aflora na área de investigação. Localmente, essa unidade litológica tem como características básicas um maior bandamento, migmatização e riqueza em biotita (Salaroli, 1999). As bases geomorfológicas gerais da área investigada podem ser descritas como colinas policonvexas de baixa declividade. Os regolitos são espessos, principalmente a zona saprolítica, demonstrando intensa atuação de intemperismo químico. A rede de drenagem desenvolve-se sob controle estrutural, com planícies de agradação sedimentar recentes (Bacellar, 2000). Todos os vales fluviais têm fundo plano - devido à grande acumulação de sedimentos - e o contato entre a planície fluvial e os segmentos de baixa vertente dá-se de forma abrupta, em ruptura de declive.

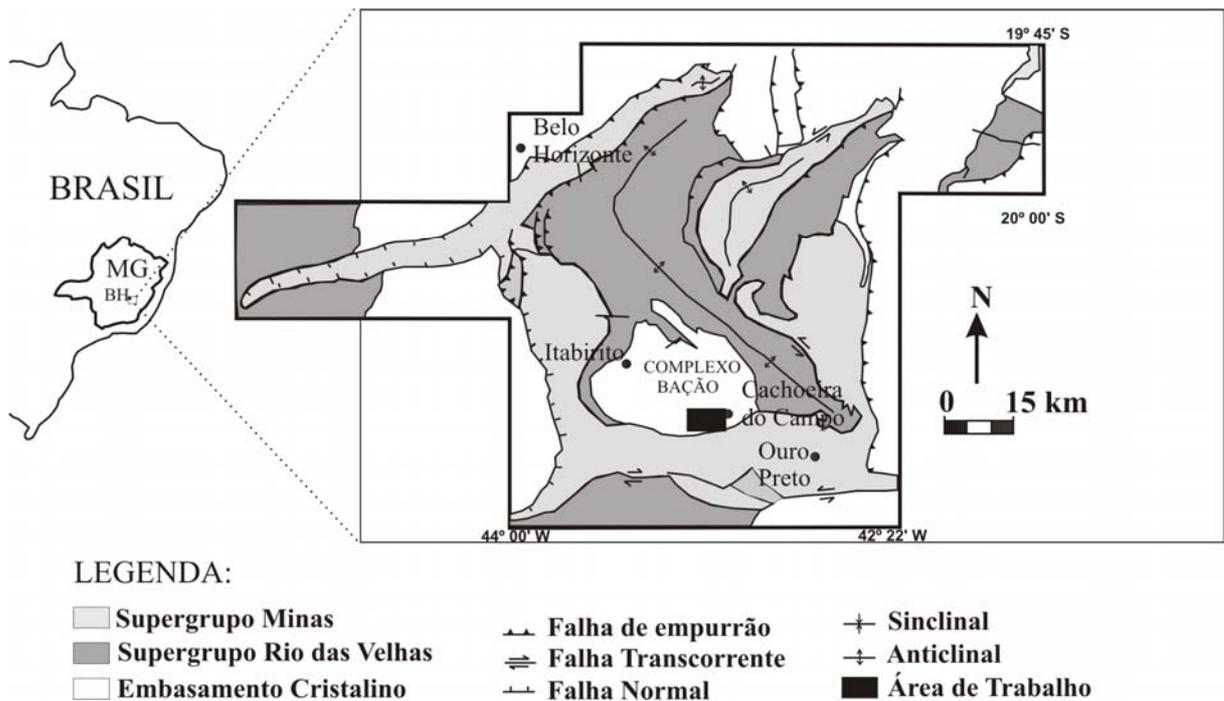


Figura 1: Esboço da geologia do Quadrilátero Ferrífero com o Complexo Bação e área de trabalho assinalada.

METODOLOGIA

Procedeu-se a amostragem de material pedológico e saprolítico, para análises laboratoriais, de perfis de intemperismo desenvolvidos sobre gnaisse da referida área. As amostras foram coletadas em trincheiras com 1,9 m de profundidade média, nos segmentos a alta, meia e baixa vertente em três distintas topossequências (VDB, VH e VOVH), entre 40 e 170 cm de profundidade.

As análises de laboratório para a investigação das características de porosidade das amostras foram realizadas utilizando-se as técnicas de N₂ BET e intrusão de mercúrio. O material utilizado nas análises consistiu em agregados de cerca de 5 mm de diâmetro. Os agregados foram secos em estufa a 100°C por 24 horas, para depois serem submetidos aos procedimentos analíticos.

A técnica N₂ BET, é explicada através da tendência que todas as superfícies sólidas têm para atrair moléculas de gás circunvizinhas, dando origem a um processo chamado sorção de gás. Monitorando o processo de sorção de gás, pode-se conceber uma grande quantidade de informações úteis sobre as características físicas de sólidos. Antes de executar a técnica de sorção de gás, as superfícies sólidas devem estar livres de contaminantes como água e óleos. A limpeza da superfície (degaseamento) é conseguida colocando-se uma amostra do sólido em um recipiente próprio e aquecendo-o sob vácuo. Uma vez limpa, a amostra é submetida a uma temperatura constante por meio de um banho externo de N₂ líquido. Então, quantias pequenas de um gás (o adsorvato) são administradas passo a passo numa câmara com a amostra no vácuo (Teixeira et al., 2001; Pena, 2002).

Moléculas do adsorvato encontram rapidamente seus nichos junto à superfície dos poros no sólido (o adsorvente). Estas moléculas ou podem saltar para fora dos nichos ou podem aderir à superfície. A ocorrência de histerese, ou seja, a distância entre as curvas dos ramos de adsorção e dessorção que compõem a isoterma, é função da forma e tamanho do poro e do menisco do líquido (Gregg & Sing, 1982; Teixeira et al., 2001). Para as amostras submetidas à técnica N₂ BET, utilizou-se um equipamento Quantachrome NOVA 1000.

Quanto à técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio, a mesma constitui uma ferramenta de análise tridimensional bastante reconhecida para a caracterização de meios porosos. A porosimetria por injeção de mercúrio tem sido extensivamente utilizada como uma técnica experimental para se caracterizar vários aspectos dos materiais porosos e dos pós. A técnica se baseia no fato de que o mercúrio se comporta como um fluido não-

molhante em relação à maior parte das substâncias. Por conseqüência, não penetra espontaneamente em pequenos furos ou fissuras destes materiais a menos que se aplique uma pressão sobre ele. Se uma amostra de um sólido poroso é encerrada num recipiente dotado de um capilar, sendo feito o vácuo sobre a mesma e sendo preenchido o recipiente e o capilar com mercúrio, ao se aumentar a pressão sobre o líquido este penetrará nos poros da amostra reduzindo seu nível no capilar. Registrando-se a redução do nível de mercúrio no capilar juntamente com a pressão aplicada, uma curva porosimétrica é obtida informando que volume de poros do material foi penetrado pelo mercúrio a uma dada pressão.

Em equipamentos comerciais, como o porosímetro Micromeritics PoreSizer 9320, utilizado neste trabalho, poros de diâmetro à partir de 0,7 mm podem ser investigados, a uma pressão de aproximadamente 0.0017 MPa (0,17 atm) até poros de 0,000001 mm (0,001 μm) ou 10 Å de diâmetro, intrudidos a uma pressão de cerca de 212 MPa (2000 atm).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Porosimetria por sorção de N₂ a 77 K

Diferenciações são muito bem definidas com relação ao volume de N₂ adsorvido (Figura 2 VDB) que mostra valor menor (20 cm³/g) no segmento de alta vertente que é caracterizado como um perfil pouco evoluído. O baixo teor de argila (29%) também pode explicar o valor supra-citado e correlacionado com a evolução intempérica incipiente. Valores mais elevados (37,5 cm³/g) relacionam-se aos perfis mais evoluídos. Especificamente para o segmento de meia vertente superior (MVs), uma maior histerese é desenvolvida, à partir de 0,78 P/P₀, cujo volume de N₂ adsorvido alcança 37,5 cm³/g. Esta maior adsorção evidencia maior porosidade nos horizontes alóctones diferenciando-os dos horizontes autóctones. Para o segmento de baixa vertente (BV), o valor mais elevado de N₂ adsorvido pode ser diretamente relacionado a maiores percentuais de argila presente no horizonte amostrado (Tabela 1).

Para a topossequência VH resultados análogos aos da topossequência VDB são obtidos, apresentando as isotermas de adsorção/dessorção (Figura 2 VH) um padrão de distribuição homogêneo com maior concentração de poros na faixa de mesoporos com

poros variando entre 16 e 265 Å (Gregg & Sing, 1982). Entretanto, deve-se novamente ressaltar um maior volume poral (micro e mesoporos) do segmento MV.

Na toposequência VOVH as isotermas de adsorção - dessorção (Figura 2 VOVH) mostram maior histerese para os segmentos AV e MVs, à partir de 0,43 P/P₀, cujos volumes de N₂ adsorvido alcança 27 cm³/g para MVs e 33 cm³/g para o segmento AV (Figura 4), que são caracterizados como horizontes bem desenvolvidos e alóctones.

Desta forma, sugere-se que as isotermas de adsorção e dessorção obtidas nos diferentes segmentos das toposequências com evolução intempérica diferenciada retratam as variações dos respectivos perfis de intemperismo (Figura 2). Assim, os maiores valores de volume adsorvido são relacionados aos perfis de intemperismo mais desenvolvidos, ao passo que os menores volumes se referem aos perfis menos desenvolvidos, independente da sua posição na vertente. Pode-se observar que para as toposequências VDB e VH, onde os perfis dos segmentos de alta vertente são intempéricamente pouco evoluídos, a distribuição das curvas de adsorção/dessorção é análoga. Já para a toposequência VOVH, cujo perfil de alta vertente é intempéricamente bem evoluído (Figueiredo et al, 2004), as curvas têm um posicionamento discrepante em relação às dos primeiros.

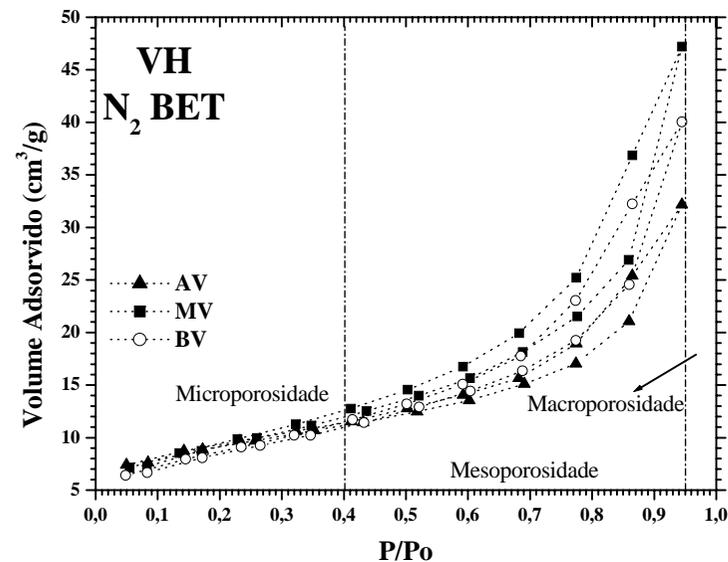
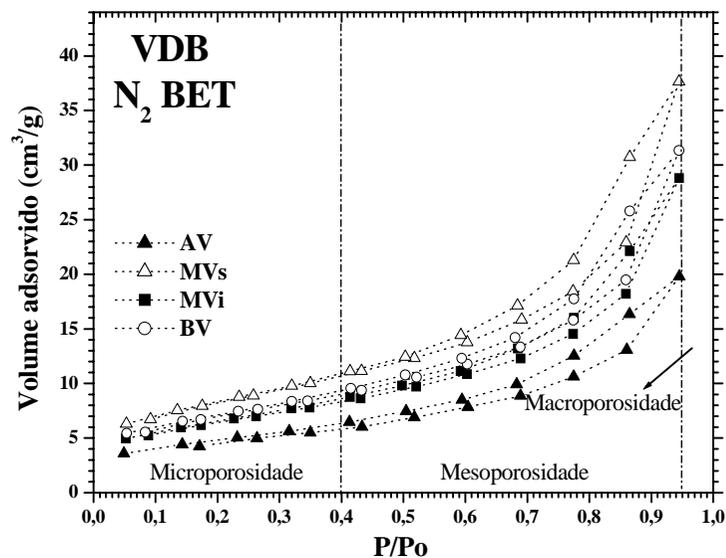


Figura 2 - toposequências VDB, VH e VOVH: curvas de adsorção e dessorção de nitrogênio a 77 K (N_2 BET) para as três toposequências. AV = alta vertente; MVs = meia vertente superior; MVi = meia vertente inferior; BV = baixa vertente. Observar o limite de adsorção na altura de 0,95 P/Po. Limites de classes porais conforme Gregg & Sing (1982).

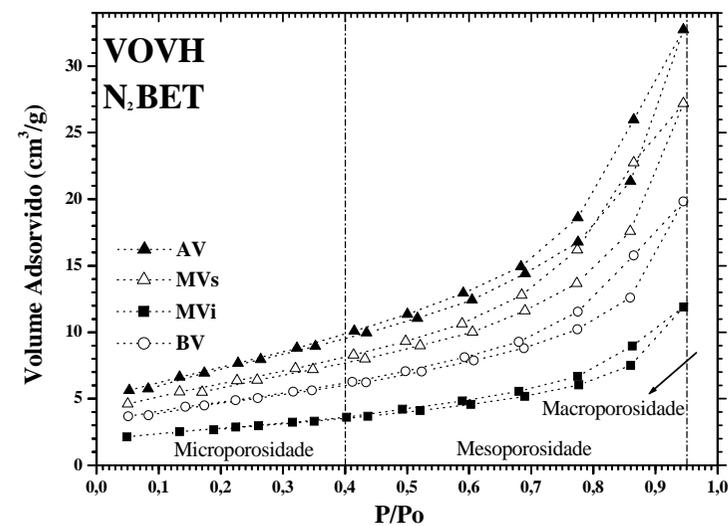


Tabela 1: Características texturais das amostras analisadas nas três topossequências VDB, VH e VOVH. AV = alta vertente, MVs = meia vertente superior, MVi = meia vertente inferior, BV = baixa vertente. *Horizonte alóctone coluvial (Figueiredo et al, 2004).

Segmento da Vertente	Amostras	Profundidade (cm)	Distribuição Granulométrica			Área de superfície m ² /g
			Argila	Silte	Areia	
			%			
AV	VDB4C	170	29,13	49,58	21,28	12,96
MVs	VDB1B	130	48,92	26,96	24,11	28,83
MVi	VDB2B	130	48,92	26,96	24,11	22,52
BV	VDB3C	160	54,42	15,40	30,18	24,45
AV	VH2B	115	40,96	26,20	32,83	30,23
MV	VH3B	145	63,16	12,28	24,56	32,37
BV	VH4B	130	48,70	20,93	30,37	29,84
AV	VOVH1B	140	54,47	17,06	28,46	25,83
MVs	VOVH2B	150	38,70	27,62	33,66	20,83
Mvi	VOVH3C	160	18,85	52,29	28,85	09,34
BV	VOVH4C	290	42,82	23,11	34,06	16,26

Porosimetria por intrusão de mercúrio (Hg)

Os resultados quantitativos obtidos nas três topossequências (Tabela 2), mostram uma tendência relativa a maiores áreas totais porais nos horizontes B, sugeridos em estudo de suas características macro e micromorfológicas como coluviais (Figueiredo et al., 2004).

Tabela 2: Resultados obtidos através da porosimetria por intrusão de mercúrio para as toposequências VDB, VH e VOVH. AV = alta vertente, MVs = meia vertente superior, MVi = meia vertente inferior, BV = baixa vertente. *Horizonte alóctone coluvial (Figueiredo et al, 2004).

Segmento de Vertente	Volume Total de Intrusão ml/g	Área Total dos Poros m ² /g	Diâmetro médio dos Poros µm	Densidade g/ml	Porosidade %
MVs	0,2949	27,609	0,0489	1,4668	43,26
Mvi	0,3239	23,424	0,0592	1,4328	46,42
BV	0,2413	25,366	0,0366	1,6070	38,77
AV	0,2956	22,733	0,0610	1,4677	43,39
MV	0,3110	34,005	0,0333	1,4211	44,20
BV	0,2887	25,198	0,0526	1,5015	43,35
AV	0,2802	26,256	0,0482	1,5160	42,82
MVs	0,3065	22,604	0,0614	1,4644	44,88
Mvi	0,2733	9,078	0,3019	1,5471	42,28
BV	0,2560	13,595	0,1482	1,5948	40,83

Paralelamente, as curvas de intrusão cumulativas de Hg (Figuras 3 VDB, VH e VOVH) mostram volumes de intrusão mais elevados nos horizontes B coluviais, ocorrendo duas distribuições principais de vazios, a de mesoporos, mais abundante, mesmo tendo uma faixa de variação de diâmetros menor, e que ocorre no intervalo de décimos a centésimos de micrômetros. A segunda distribuição, de macroporos, é menos abundante.

Tal arranjo mantém-se em um equilíbrio bastante tênue, onde solos naturalmente pouco porosos ou submetidos a transformações estruturais por atividades antropogênicas, possam responder a processos erosivos. Dessa forma, quando o predomínio de porosidade textural está relacionado às características naturais de um pedoambiente imaturo, cuja porosidade possa estar relacionada à presença de poros intrapartículas e a uma baixa conectividade entre os mesmos, aumentando a possibilidade de ao percolar os espaços porais, o influxo hídrico poderia preenchê-los rapidamente, gerando um excedente hídrico em superfície que evoluiria para fluxo concentrado, dando início ao fenômeno erosivo.

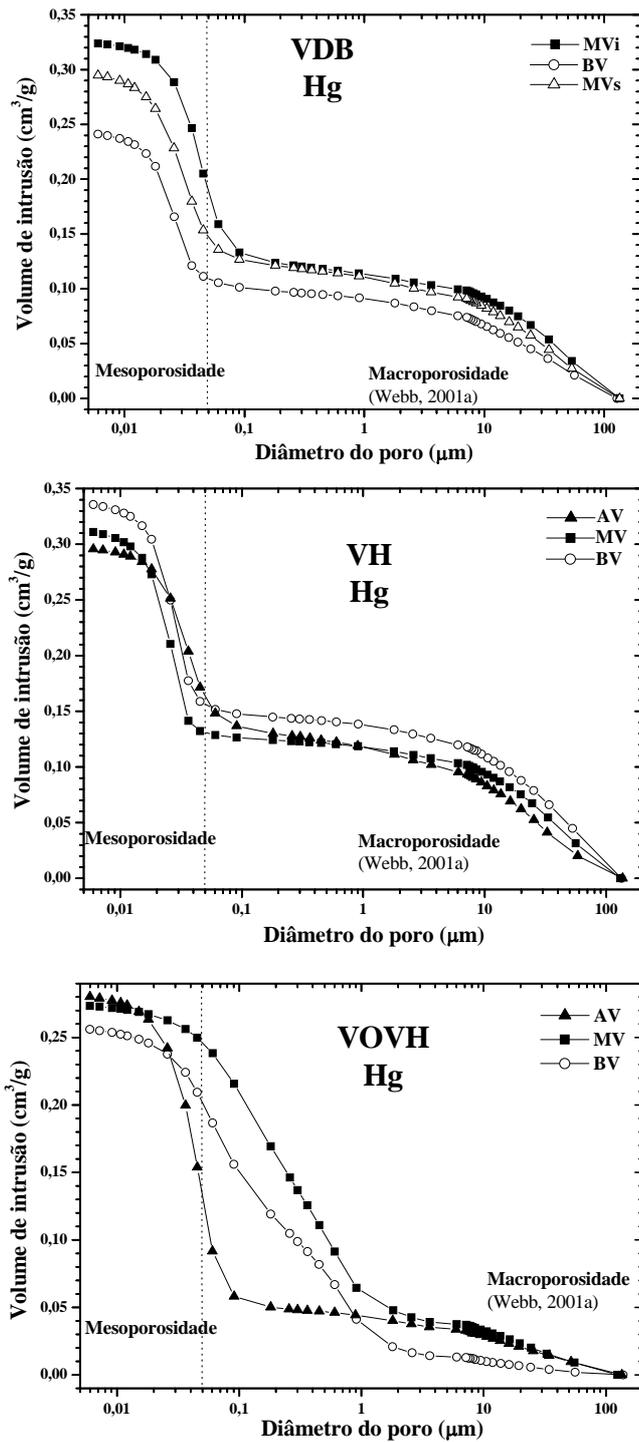


Figura 3 – toposseqüências VDB, VH e VOVH: curvas de intrusão cumulativa das três toposseqüências. Observar os maiores volumes nos materiais coluviais nos segmentos MVs e MVi em VDB. MVs = meia vertente superior, MVi = meia vertente inferior, BV = baixa vertente.

CONCLUSÕES

- A porosimetria mostrou-se uma excelente técnica para caracterização do sistema poral dos solos investigados. A conjunção das técnicas porosimétricas e de sorção de nitrogênio, intrusão de mercúrio são um excelente suporte no processo de caracterização do grau de evolução de perfis de intemperismo.
- Foi possível observar uma tendência relativa aos solos alóctones. Os mesmos parecem ser muito mais porosos quando analisados pelas duas técnicas porosimétricas.
- O tamanho dos poros texturais merece maior atenção quando se procura entender a dinâmica intempérica e seu grau de ligação atual com a rocha parental.

AGRADECIMENTOS

A Fapemig, CAPES e DeGeo-UFOP pelo suporte financeiro e logístico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BACELLAR, L. de A. P. (2000) Condicionantes geológicos, geomorfológicos e geotécnicos dos mecanismos de voçorocamento na bacia do Rio Maracujá, Ouro Preto, MG. Tese de Doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 226 p.

BALBINO, L. C.; BRUAND, A.; BROSSARD, M. & GUIMARÃES, M de F. (2001) Comportement de la phase argileuse lors de la dessiccation dans des ferralsols microagrégés du Brésil: rôle de la microstructure et de la matière organique. *Compte Rendus de la Académie des Sciences Paris, Sciences de la Terre et des Planètes*. 332: 673-680.

BALBINO, L. C.; BRUAND, A.; BROSSARD, M.; GRIMALDI, M.; HAJNOS, M. & GUIMARÃES, M. de F. (2002) Changes in porosity and microaggregation in clayey ferralsols of the brazilian Cerrado on clearing for pasture. *European Journal Soil Science*. 53: 219-230.

BRUAND, A.; COUSIN, I. (1995) Variation of textural porosity of a clay-loam soil during compaction. *European Journal of Soil Science*. 46: 377-385.

BRUAND, A. & TESSIER, D. (2000) Water retention properties of the clay in soils developed on clayey sediments: significance of parent material and soil history. *European Journal of Soil Science*. 51: 679-688.

- COUSIN, I.; LE LAY, C. & BRUAND, A. (1994) Évolution de la porosité et formation de pores structuraux reliques dans un sol argilo-limoneux soumis à un compactage. *Compte Rendus de la Académie des Sciences Paris, série II.* 319: 797-804.
- FIGUEIREDO, M. DO A.; VARAJÃO, A. F. D. C.; FABRIS, J. D. & LOUTFI, I. S. (2002) Aspectos pedogeomorfológicos e mineralógicos de uma topossequência de solos gnáissicos no Complexo Bação - Quadrilátero Ferrífero - MG. *Pesquisas em Geociências.* 29(1): 81-90.
- FIGUEIREDO, M. DO A.; VARAJÃO, A. F. D. C.; FABRIS, J. D.; LOUTFI, I. S. & CARVALHO, A. P. (2004) Alteração superficial e pedogeomorfologia no sul do Complexo Bação - Quadrilátero Ferrífero (MG). *Revista Brasileira de Ciência do Solo.* 28(4): [713-729](#).
- FIGUEIREDO, M. DO A., FABRIS, J. D.; VARAJÃO, A. F. D. C.; COUCEIRO, P. R. DA C.; LOUTFI, I. S.; AZEVEDO, I. DE S. & GARG, V. K. (2006) Óxidos de ferro de solos formados sobre gnaiss do Complexo Bação, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira.* 41(2): 313-321.
- GREGG, S. J. & SING, K. S. W. (1982) Adsorption, surface area and porosity. Academic Press, 303p.
- PARZANESE, G. A. C. (1991) Gênese e desenvolvimento de voçorocas em solos originados de rochas granitóides na região de Cachoeira do Campo, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 117 p.
- PENA, E. P. (2002) Caracterização dos parâmetros intrínsecos de porosidade e de superfície específica de *pellet feed* de minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero empregando o método de absorção de nitrogênio. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Materiais, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 78 p.
- SALAROLI, I. S. (1999) Mapeamento litoestrutural da região de Santo Antônio do Leite - Ouro Preto. Relatório do Trabalho Geológico de Graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 68 p.
- SILLS, I. D.; AYLMOORE, L. A. G. & QUIRK, J. P. (1973) A comparison between mercury injection and nitrogen sorption as methods of determining pore size distributions. *Soil Science Society of America Proceedings.* 37(4): 535-537.

- SILLS, I. D.; AYLMORE, L. A. G. & QUIRK, J. P. (1974) Relationships between pore size distributions and physical properties of clay soils. *Australian Journal of Soil Research*. 12: 107-117.
- STENGEL, P. (1979) Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol *in situ*. *Annales de agronomie*. 30: 27-49.
- TEIXEIRA, V. G.; COUTINHO, F. M. B. & GOMES, A. S. (2001) Principais métodos de caracterização da porosidade de resinas à base de divinilbenzeno. *Química Nova*. 24(6): 808-818.