ANÁLISE ESTRUTURAL DA MINA DE VAZANTE E ADJACÊNCIAS: GEOMETRIA, CINEMÁTICA E IMPLICAÇÕES PARA A HIDROGEOLOGIA

SIDNEI PIRES ROSTIROLLA¹, FERNANDO MANCINI¹, JOSÉ MANOEL DOS REIS NETO¹, ERNESTO GOLDFARB FIGUEIRA¹ & ÉBER CASADO DE ARAÚJO²

ABSTRACT *STRUCTURAL ANALYSIS OF THE VAZANTE MINE AND SURROUNDINGS: GEOMETRY, KINEMATICS AND IMPLICATIONS TO HYDROGEOLOGY* The paper discusses the structural evolution of the Vazante Formation, near to the Vazante Zinc Mine, northwestern of the Minas Gerais State, Brazil. The structural data were obtained from descriptive and kinematics analysis and detailed cartography. Five deformation phases were characterized: the first two are compressional (D_1 e D_2), the third (D_3) is left-lateral strike-slip, the fourth (D_4) is listric distensional, and the fifth is represented by a penetrative and dense system of joints and small faults (D_5). The final geometry is represented by a general trend of metamorphic beds and shear zones striking along N40-50E with medium to high dips to NW, which are cutted by minor faults distributed between NW and EW, dipping to S-SW. The observed relationships indicate a first compressional progressive event (phases D_1 and D_2), evolving to strike-slip deformation related to escape tectonics (D_3) and distensional listric associated to orogenic collapse (D_4). The D_5 structures comprise a set of penetrative fractures, ranging from NW to EW, probably related to the mesozoic deformation of the South-American Plate. The structural analysis lead to the characterization of the aquifer framework, in wich the potential migration pathways of the groundwater were defined. The main brittle structures and lithologic features that control the karst aquifer dynamics are the D_3 fractures and carbonatic-pelitic interfaces, tilted by thrusts and folds of D_1 and D_2 phases.

Keywords: Brasília Belt, karst terrains, structural geology, zinc deposits.

RESUMO Este trabalho discute a evolução estrutural da Formação Vazante, próximo à Mina de Zinco de Vazante, no noroeste do Estado de Minas Gerais. Os resultados foram obtidos a partir de análise estrutural descritiva e cinemática, levantamento de feições litológicas e cartografia em escala de detalhe. Foram caracterizadas 5 fases deformacionais: D_1 e D_2 compressionais, D_3 transcorrente sinistral, D_4 distensional e D_5 representada por um sistema denso de falhas normais de pequeno rejeito. A geometria final é representada por camadas e zonas de cisalhamento na direção N40-50E, com ângulos de mergulho médios a altos para NW e rejeitos da ordem de dezenas a centenas de metros (fases D_1 a D_4), seccionadas por falhas de pequenos rejeitos e sistemas de juntas com direção predominante NW a EW e mergulhos variados, mas principalmente com alto ângulo para S e SW (fase D_5). As relações observadas indicam uma deformação compressiva inicial (fases D_1 e D_2) passando a transcorrente associada a escape tectônico (fase D_3) e posteriormente distensiva (fase D_4), esta última fase relacionada ao relaxamento de tensões pós-convergência. As estruturas aqui referidas como da fase D_5 correspondem a um fraturamento generalizado com direção preferencial NW a EW, provavelmente relacionado à deformação mesozóica registrada na plataforma Sul-Americana. A análise estrutural permitiu a caracterização do arcabouço estrutural da área, a partir da qual foram inferidas as direções potenciais do fluxo hidrológico e a compartimentação do aquífero cárstico. Foram mapeadas as principais estruturas rúpteis e feições litológicas controladoras da dissolução cárstica, que são representadas pelas falhas da fase D_3 e pelas camadas basculadas pelos empurrões e dobras das fases D_1 e D_2 .

Palavras-chave: Faixa Brasília, terrenos cársticos, geologia estrutural, depósitos de zinco.

INTRODUÇÃO Este trabalho examina em detalhe a evolução estrutural de uma faixa de direção NE, a noroeste da cidade de Vazante, MG (Fig.1), que engloba a seção metassedimentar pelito-carbonática da Formação Vazante (Dardenne 1979), de idade neoproterozóica. O trabalho objetivou a caracterização estrutural da área, tendo em vista a definição de compartimentos estruturais e sua influência na evolução de aquíferos cársticos e na circulação de água subterrânea. A área em estudo inclui a mineralização de Zn de Vazante, representada por Willemite e Calamina ao longo de uma zona de falha com direção predominante N40-50E e mergulhos entre 50° e 70° para NW. Segundo Rigobello *et al.* (1988), na região de Vazante, são definidas três faixas metassedimentares distintas (Fig.2a): (a) a Faixa Leste corresponde à seção pelítica da Formação Serra do Garrote, sendo constituída de filitos e ardósias, com ocorrência subordinada de lentes quartzíticas; (b) a Faixa Central representa a Formação Vazan-

te, Membros Morro do Pinheiro e Pamplona, sendo caracterizada por camadas contínuas de metadolomitos algálicos, metadolarenitos, biohermas e brechas intraformacionais, intercaladas com metassiltitos, filitos e quartzitos; (c) a Faixa Oeste, incluída na Formação Paracatu, é representada por filitos e quartzitos. Levantamentos de campo identificaram os principais conjuntos litológicos, constituídos de abundantes metadolomitos de origem algálica, filitos, ardósias e metassiltitos, das formações Serra do Garrote e Vazante (Fig.2b).

O trabalho foi realizado no contexto de um projeto de cooperação entre a Universidade Federal do Paraná (UFPR) e a Companhia Mineira de Metais (CMM), Grupo Votorantim, detentora dos direitos de lavra. As seguintes atividades foram desenvolvidas: (a) análise de imagens de satélite Landsat TM5, bandas 1 a 7 (Cena 220-072, 1999); (b) análises de fotos aéreas 1:60.000 (USAF 1960), 1:25.000 (CMM/Agrofoto 1956 e

1 Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico - Departamento de Geologia - Cx. Postal 19001 - 81531-990 - Curitiba - PR . E-mails: sidnei@geologia.ufpr.br, ferman@geologia.ufpr.br, jmreis@geologia.ufpr.br, ernesto@geologia.ufpr.br*

2 Companhia Mineira de Metais, Grupo Votorantim, Rodovia LMG 706, km 65 - 38.780-000 - Vazante - MG - E-mail: eber@vz.cmm.com.br**

1999), 1:10.000 (CMM/Agrofoto 1999); (c) cartografia geológica nas escalas 1:5.000 e 1:2.000 e (d) análise estrutural. Os levantamentos de campo englobaram, no sentido sudeste-noroeste, a Serra do Garrote, a zona aplainada até os filitos existentes na lapa da Zona de Falha de Vazante e dolomitos na capa, pertencentes respectivamente aos membros Morro do Pinheiro e Pamplona da Formação Vazante, conforme a classificação litoestratigráfica de Rigobello *et al.* (1988).

CONHECIMENTO PRÉVIO A região de Vazante tem sido alvo de estudos geológicos desde a descoberta das primeiras ocorrências de minério na década de 1950 (Amaral 1969). Desde então, diversos trabalhos de cunho estratigráfico, paleogeográficos e estruturais e específicos sobre a mineralização foram desenvolvidos na área de Mina de Vazante e arredores (*e.g.* Ladeira *et al.* 1963, Almeida 1967, Amaral 1969, Casse-dane 1969, Dardenne 1978, Madalosso 1980, Campos Neto 1984, Rigobello *et al.* 1988, Freitas-Silva & Dardenne 1992a, 1992b, Monteiro 1997).

Embora seja grande o número de trabalhos sobre a estratigrafia, ainda permanecem dúvidas sobre as denominações formais estratigráficas para a sequência sedimentar da região. Almeida (1967) denominou os filitos carbonosos da região como Formação Paracatu, enquanto a sequência pelito-carbonatada seria correlacionada à Formação Sete Lagoas do Grupo Bambuí (Freitas-Silva & Dardenne 1992a). Dardenne (1978) sugeriu que a correlação da sequência pelito-carbonatada com o Grupo Bambuí não era segura, propondo a desig-

nação de Formação Vazante para esta sequência.

Campos Neto (1988) elaborou um primeiro modelo de evolução paleogeográfica para a área de Vazante-Lagamar, envolvendo as Formações Paracatu, Vazante e o Grupo Canastra. Neste modelo a sequência sedimentar da região é dividida em três zonas paleogeográficas distintas, com desenvolvimento sincrônico de fácies (Campos Neto 1988): Paracatu, Vazante e das Ardósias, compondo o Grupo Paranoá.

Os dolomitos intercalados com filitos da Formação Vazante foram divididos por Rigobello *et al.* (1988) em quatro membros, da base para o topo: Morro do Pinheiro inferior, Morro do Pinheiro superior, Pamplona Inferior e Pamplona superior. Seguindo esta mesma linha, surgiram várias propostas de subdivisão para a sequência pelito-carbonatada da Formação Vazante como, por exemplo, a proposta de Freitas-Silva & Dardenne (1992a), sugerindo cinco fácies com contatos gradacionais e interdigitados, sendo elas: Fácies Serra do Garrote, Fácies Morro do Calcário, Fácies Serra do Velozinho, Fácies Serra da Lapa e Fácies Serra do Landim. Estas fácies, juntamente com as fácies relacionadas à Formação Paracatu compreenderiam segundo Freitas-Silva & Dardenne (1992a) uma unidade pré-Bambuí denominada Unidade Paracatu-Vazante.

O termo Grupo Vazante é empregado por Dardenne *et al.* (1998) para designar a associação de cinco unidades denominadas, da base para o topo, de: psamo-pelítica inferior de Coromandel; psamo-pelito-carbonatada de Lagamar; pelítico intermediária da Serra do Garrote; argilo-dolomítica de Vazante-Paracatu-Unai e superior da Serra da Lapa. Posteriormente, Dardenne (2000) sugere uma nova divisão para o Grupo Vazante, denominando sete formações, da base para o topo: Retiro, Rocinha, Lagamar, Serra do Garrote, Serra do Poço Verde, Morro do Calcário e Serra da Lapa. As formações Serra do Poço Verde e Morro do Calcário (Dardenne 2000) corresponderiam a antiga denominação da Formação Vazante, com os membros Pamplona e Morro do Pinheiro (Rigobello *et al.* 1988).

A estruturação tectônica principal da área, com a mineralização orientada segundo N40-50E, e a ocorrência de zonas de empurrão e/ou cavalgamentos mais antigos e fraturas NW mais recentes, e o próprio controle da geomorfologia pelas estruturas tectônicas formando as "bocainas", já haviam sido notados por Ladeira *et al.* (1963). Amaral (1969) também verificou a presença desta estruturação, sugerindo que as falhas relacionadas à mineralização e as NW deveriam ter idade mais recente que o Paleozóico Inferior, sendo as NW relacionadas aos eventos do Cretáceo. Estes trabalhos já mencionavam estruturas na forma de falhas normais e transcorrentes, com grande rejeito, responsáveis pela morfologia atual das várias pequenas serras presentes na região.

Estudo mais detalhado sobre a evolução tectônica da Falha de Vazante foi realizado por Pinho (1990), com implicações quanto à mineralização, reconhecendo quatro fases de deformação, da mais antiga para a mais recente: (a) fase de caráter extensivo reativando antigas zonas de fraqueza do embasamento, com movimentação diferencial dos blocos, gerando altos paleogeográficos; (b) fase compressiva tangencial gerando reativações com movimentação transcorrente; (c) fase de encurtamento tectônico marcado por falhamentos de empurrão e (d) fase de caráter extensivo, com alívio da compressão anterior e acomodação dos blocos.

Freitas-Silva & Dardenne (1992b), sugeriram uma evolução tectônica para a área da região de Paracatu e adjacências, a

Figura 1 – Mapa geológico simplificado das unidades proterozóicas da porção centro-sul do Cinturão Brasília (mod. Dardenne 2000). A seta indica a área de estudo.

partir de um único evento orogenético, caracterizado por seis fases, com superposição temporal e espacial. Estas fases seriam responsáveis pelas várias estruturas tectônicas presentes nas rochas da área estudada, sendo a fase F1 geradora de uma clivagem de fluxo S1, paralela ao acamamento sedimentar. A fase F2 seria a principal fase de deformação marcada pela clivagem de fluxo F2 que corresponde à foliação regional, gerada com uma foliação do tipo SC. A fase F3 está relacionada,

principalmente, a dobras em *chevron* e a falhas transcorrentes. As fases F4 e F5 são associadas, respectivamente, a kinks e ondulações suaves com incipiente clivagem espaçada. A fase F6 está representada por fraturas de cisalhamento e híbridas e falhamentos normais. Ainda segundo estes autores, eventos posteriores epigenéticos, designados de Eventos de Deformações Secundárias, teriam atuado na região do Paleozóico até o Quaternário. Dardenne & Freitas-Silva (1998, 2000) sugeriram

Figura 2 – Faixas metassedimentares existentes próximo à cidade de Vazante, MG. a) Faixa oeste: Formação Paracatu; faixa central: Formações Lapa e Vazante; faixa leste: Formação Serra do Garrote; mod. Rigobello et al. 1988; b) mapa em destaque abrangendo a área onde foram desenvolvidos os trabalhos de campo em escala de detalhe.

controle tectônico para a mineralização hidrotermal, relacionado ao preenchimento por fluidos conatos da estruturação maior identificada como falha normal lístrica.

ANÁLISE ESTRUTURAL Com base no reconhecimento de estilos estruturais e na análise cinemática, cinco fases deformacionais foram definidas. As fases D_1 e D_2 evidenciam deformação progressiva em regime dúctil, tendo sido respon-

sáveis pela formação do arcabouço regional, com a geração de dobramentos holomórficos em larga escala e superfícies de foliação penetrativas, associadas a uma tectônica convergente com formação de empurrões e dobramentos, que apresentam vergência para E-SE. A fase D_3 representa a principal fase de mineralização de Zinco da Mina de Vazante, gerando um sistema de falhas direcionais sinistrais com direção predominante NE, dobramentos homoclinais descontínuos e basculamentos,

Figura 3 - Seção esquemática representando a estruturação da área (A – Zona de Falha de Vazante; B – Zona de Falha da Serra do Garrote; 1 – metapelitos da Fm Serra do Garrote; 2 – filitos quartzosos, Fm Serra do Garrote; 3 – metadolomitos do Membro Morro do Pinheiro Inferior, Fm Vazante; 4 – filitos intermediários do Membro Morro do Pinheiro, Fm Vazante; 5 – metadolomitos do Membro Morro do Pinheiro Superior, Fm Vazante; 6 – metapelitos e metadolomitos do Membro Pamplona Inferior; 7 – Metadolomitos do Membro Pamplona, Médio a Superior; 8 – colúvios; 9 – alúvios).

Figura 4 – a) Diagrama de isolinhas do acamamento e foliação S_0/S_1 . (N=336, plano p tracejado, eixo $b_2=346/26$ e moda 317/29); os triângulos referem-se à lineação L_{11} (N=9). b) medidas de S_0/S_1 na área de lavra a céu aberto da Mina de Vazante (N=58, moda 312/28). c) Bloco diagrama esquemático da fase D_1 , exemplificando a vergência das dobras e zonas de cisalhamento para E-SE.

Figura 5 – a) Diagrama de isolinhas da clivagem S_2 (N=46, plano p pontilhado, eixo $b_3=334/42$, modas 294/35, 328/32); os triângulos referem-se à lineação L_{21} (N=10). b) Diagrama de isolinhas das falhas de empurrão (N=74, moda 309/46). c) Roseta de frequências das falhas de empurrão (máximo 10,8%). d) Bloco diagrama esquemático da fase D_2 .

em regime dúctil-rúptil. A fase D_4 é representada por um sistema distensional NE rúptil, durante o qual a mineralização de zinco foi parcialmente remobilizada. A fase D_5 gerou um reticulado de falhas distensionais EW e NW, que controlam, em grande parte, o fluxo hidrológico nos aquíferos cársticos formados em decorrência da dissolução da sequência carbonática.

As relações observadas indicam claramente uma evolução em dois ciclos tectônicos. O primeiro foi caracterizado pela deformação associada à tectônica de *nappes* da Faixa Brasília (Dardenne 1979, 2000), no Proterozóico, variando de convergente no início (fases D_1 e D_2), passando a direcional sinistral associado a uma tectônica de escape (fase D_3) e posteriormente distensional (fase D_4), esta última fase provavelmente relacionada ao relaxamento de tensões pós-convergência. As estruturas da fase D_5 referem-se ao registro parcial de um segundo ciclo, correspondendo ao fraturamento generalizado com direção preferencial NW a EW, transversal ao *trend* estrutural do primeiro ciclo (NE), provavelmente relacionado à deformação mesozóica registrada na plataforma Sul-Americana. A figura 3 mostra a compartimentação regional, gerada pela deformação tangencial do primeiro ciclo, que colocou a seção pelítico-carbonática da Formação Vazante sobre a seção pelítica da Formação Serra do Garrote, em contexto de empurrões e cavalgamentos regionais.

Fase D_1 A primeira fase (D_1) reflete a deformação em níveis crustais médios a superiores, com metamorfismo em fácies xisto-verde baixo, gerando uma clivagem ardosiária (S_1) paralela ao acamamento (S_0) e dobras fechadas tendendo a isoclinais, sendo comum observar o paralelismo ao acamamento. Em escala mesoscópica, há evidências de um mecanismo de cisalhamento oblíquo para as dobras da primeira fase, localmente com fluxo de material em direção à zona de charneira. A foliação S_1 é marcada por recristalização de sericita e, subordinadamente, clorita e quartzo, com moda 317/29 (Fig. 4a,b), sendo a dispersão provavelmente causada pelo dobramento da segunda fase. O acamamento é evidenciado por variações composicionais e texturais, menos preservado nos metapelitos e mais nos metadolomitos, onde é comum observar laminações algálicas e feições estromatolíticas. A deformação da primeira fase é claramente descontínua, com concentração do achatamento e transposição nos níveis pelíticos, sendo penetrativa nos carbonatos, em função da competência diferencial. Associada à foliação, localmente observa-se uma lineação de estiramento (L_1), marcada por orientação de minerais filossilicáticos (principalmente clorita e sericita, localmente quartzo) e restrita a planos localizados nos metapelitos (Fig. 4a). Em alguns planos, a relação angular entre a lineação de estiramento e a direção das camadas sugere uma movimentação reversa levemente oblíqua, com componente horizontal horário (ângulo variando de 90 a 60° entre a L_1 e a direção da S_1).

As zonas de cisalhamento são concentradas em planos preferenciais, com geração de foliação milonítica e da lineação de estiramento (L_1). Blocos tectônicos intermediários entre estas zonas de cisalhamento contêm a clivagem ardosiária gerada por achatamento, indicando uma deformação claramente descontínua associada a dobramentos isoclinais e monoclinos (Fig. 4c). Em escala regional, a deformação D_1 é associada à tectônica de *nappes* da Faixa Brasília (Dardenne 2000), refletindo a colocação de grandes blocos alóctones. Porém, em es-

cala local, a movimentação não foi suficiente para causar aloctonia significativa.

Fase D_2 A segunda fase (D_2) é marcada por uma clivagem espaçada (S_2), com recristalização local de sericita, comumente havendo a formação de planos penetrativos, os quais dispõem-se obliquamente à foliação S_1 , com modas 294/35 e 328/32 (Fig. 5a). A clivagem S_2 é regular em toda a área, porém ocorre a concentração desta estrutura próximo às grandes falhas de empurrão existentes (Fig. 5b,c). Esta situação é melhor observada próximo a Serra do Garrote, aqui interpretada como uma zona de empurrão com vergência para SE, e também junto à Zona de Falha de Vazante, mineralizada. As evidências para o empurrão são a transposição generalizada, a geração de um quartzo-milonito (que sustenta a crista na Serra do Garrote) e

Figura 6 – a) Diagrama de isolinhas das falhas transcorrentes sinistrais da fase D_3 ($N=45$, moda 311/88). b) Roseta de frequências das falhas transcorrentes sinistrais (máximo 13,5%). c) Bloco diagrama esquemático da fase D_3 , mostrando a movimentação ao longo da Falha de Vazante. d) Diagrama de isolinhas da clivagem de crenulação assimétrica S_3 (kink bands, $N=28$, moda 61/86). Os triângulos representam as lineações L_{31} ($N=12$) e os quadrados representam os eixos de Kink Bands ($N=11$).

o truncamento da superfície S_1/S_0 pela clivagem S_2 , situação observada tanto em campo como em foto aérea. A fase D_2 fica evidenciada também pela dispersão da superfície S_1/S_0 nos diagramas de isolinhas, ao longo de um eixo 346/26, com vergência para E-SE (Fig.4a).

Quanto ao caráter cinemático, as estruturas geradas durante as fases D_1 e D_2 são compatíveis com o mesmo campo de tensões e transporte tectônico para E-SE, mas registram cronologia (S_2 superposta a S_1) e regimes distintos (recristalização metamórfica de sericita, clorita e quartzo na clivagem ardosiana S_1 e, raramente, sericita na clivagem espaçada S_2). É provável, portanto, que ambas associem-se a um evento de deformação progressiva, com evolução de níveis crustais inferiores (fase D_1) para superiores (fase D_2 ; figs. 4c e 5d). Em muitos locais, quando a foliação ocorre isoladamente, é difícil determinar a qual fase de deformação a mesma se associa. Nestes casos, os critérios distintivos seriam apenas o tipo de foliação, se clivagem ardosiana (S_1), penetrativa, ou clivagem espaçada (S_2), não pervasiva, e sua relação espacial com o acamamento (S_0). No entanto, quando as duas foliações ocorrem na mesma rocha, situação bastante comum, observa-se as relações de obliquidade e superposição. Provavelmente a zona de cisalhamento da Serra do Garrote (Fig.3) corresponde a uma falha de empurrão D_2 que evoluiu a partir de uma zona de cavalgamento D_1 , como resultado de uma deformação progressiva, com transporte para SE da seção carbonática (Formação Vazante) sobre a seção pelítica (Formação Serra do Garrote). Convém salientar que na Serra do Garrote a aloctonia é muito menor do que aquela observada em outras zonas de cavalgamento correlatas na Faixa Brasília.

A recristalização localizada de sericita, ao longo da clivagem espaçada S_2 sugere que esta foi formada por dissolução por pressão (*pressure solution cleavage*), em condições de menor temperatura do que a clivagem S_1 . Isto corrobora o alçamento de blocos de condições dúcteis (D_1) para dúcteis-rúpteis (D_2). O dobramento associado à fase D_2 foi descontínuo e sistematicamente confinado a blocos entre zonas de empurrão, situação observada principalmente na seção pelito-carbonática do Membro Pamplona, Fácies Inferior (vide figuras 2 e 3). Em virtude do paralelismo entre as foliações S_1 e S_2 e da vergência semelhante, a lineação de interseção L_{21} é observada apenas localmente, tendendo a apresentar mergulhos baixos e disposição espacial próxima ao *strike* dos planos da foliação S_1 .

Fase D_3 A terceira fase (D_3) gerou a Zona de Falha de Vazante, mineralizada a willemita, representada por um sistema transcorrente sinistral. A maioria das falhas transcorrentes deste sistema ocorrem como lineamentos, marcados por rupturas de relevo, ou como faixas concentradas de fraturas, ao longo das quais ocorrem freqüentes indicadores de cisalhamento. A análise específica da Zona de Falha de Vazante permite identificar relações geométricas características de deformação direcional, com indicadores cinemáticos representados por estrias, *steps* e dobramentos localizados, que indicam a movimentação sinistral ao longo da principal moda (313/88; Fig. 6a,b,c). Formas sigmóides também são freqüentes, associadas a zonas hidrotermalizadas, que mostram enriquecimento em clorita, willemita, anquerita e siderita. A paragênese reconhecida e as feições de fluxo cataclástico indicam fragmentação mecânica em regime rúptil-dúctil, com entrada considerável de fluido. As relações entre fraturas escalonadas tipo “*riedel*/anti-

riedel” e a direção principal “Y” também indicam a mesma cinemática anti-horária nas falhas NE. A existência de brechas de falha e cataclasitos não coesivos em estruturas secundárias indicam que estas falhas associam-se ao sistema transcorrente anti-horário, principal controle estrutural da mineralização de willemita.

A presença de *kink bands* em escala milimétrica a centimétrica, classificados como clivagem de crenulação assimétrica S_3 (Fig.6d), assim como a dispersão dos valores de S_1 e S_2 em torno de eixos 346/26 (sobre S_0/S_1 , Fig.4a) e 334/42 (sobre S_2 , Fig.5a), evidencia uma fase de dobramento associada ao sistema transcorrente sinistral. Os planos de *kink* e a direção de transcorrência principal dispõem-se segundo um par conjugado com tensão principal máxima variando de NS a N10E. A ocorrência dos planos de *kinks* subparalelos a planos de fratura demonstram a cogeneticidade entre a clivagem S_3 , fortemente assimétrica, e fraturas na mesma direção. A rotação horária ao longo dos planos de *kink* (S_3), indicam que as mesmas correspondem as fraturas antitéticas à transcorrência principal.

Os *kink bands* ocorrem sempre nos metapelitos, como reflexo da fase D_3 em rochas menos competentes, gerando assim microdobras, ao invés de zonas de cisalhamento localizadas. A dispersão destes planos pode estar associada à refração da de-

Figura 7 – Diagrama de isolinhas das falhas distensionais da fase D_4 ($N=93$, moda 316/56 – grande círculo contínuo, planos de compensação 151/58 – grande círculo tracejado). b) Roseta de freqüências das falhas distensionais (máximo 10%). c) Bloco diagrama esquemático da fase D_4 ; notar a reativação distensional da Falha de Vazante com abatimento de blocos para NW.

formação, à diferença de competência entre os níveis de filitos e dolomitos e também ao caráter multiacamadado dos metapelitos. A lineação L_{31} ocorre como uma lineação de crenulação não pervasiva, subparalela aos eixos de microdobras tipo *kink*. O caráter descontínuo da deformação durante a fase D_3 é evidenciado pela concentração dos *kink bands* e da lineação L_{31} nos níveis metapelíticos, onde houve o melhor desenvolvimento de minerais filossilicáticos nas fases anteriores.

Fase D_4 A quarta fase (D_4) é responsável pela geração de falhas normais com direção NE, com cataclase e formação de fraturas abertas com preenchimento de calcita, ao longo da direção principal (moda 316/56) ou sintética (moda 151/58, Fig. 7a,b). Fraturas irregulares, bastante descontínuas, algumas classificadas como “*tension gashes*”, além de zonas de substituição e preenchimento sugerem um padrão de fraturamento hidráulico bastante importante na fase D_4 , com bloco baixo a NW. Em pontos específicos, puderam ser observadas reativações das falhas D_3 , que apresentam movimento *down-dip*, posterior à deformação transcorrente. Associadas a essas falhas ocorrem falhas normais da fase D_4 .

As estruturas D_4 são predominantemente rúpteis, com geração de falhas normais dispostas em leque (*splays*), tanto em mapa como em seção (Fig. 7c). A deformação gerou movimento mergulho abaixo para NW, cortando obliquamente a foliação S_0/S_1 e tangenciando a zona de Falha de Vazante. O sistema distensional está concentrado na capa da Falha de Vazante, onde ocorre intensa brechação, que provavelmente controla a migração de fluidos que deu aos dolomitos a cor róseo-clara característica no bloco NW da falha. É clara a relação entre a deformação distensional D_4 e a faixa de dolomitos róseos, onde é comum observar anastomosamento, *podis* distensionais e cataclasitos com feições SC distensionais.

A deformação distensional está impressa como um conjunto de falhas imbricadas e escalonadas para NW, tal como sugerido por Dardenne & Freitas-Silva (1998), configurando *splays* da Zona de Falha de Vazante. O principal movimento nas falhas subsidiárias foi mergulho abaixo, porém com componente oblíquo anti-horário, indicando uma progressão da fase D_3 , com abertura de espaços e deformação mais intensa na capa da Zona de Falha, associada à entrada de fluidos e brechação. Nesta fase foram formados tectonitos não coesivos que denotam intensa venulação de quartzo e calcita, restritas a uma faixa de aproximadamente 5 a 10 metros ao longo da zona de falha, sempre em seu bloco noroeste. Boa parte do corpo mineralizado mostra sinais de brechação da fase D_4 superimposta às faixas cominuídas da fase D_3 .

Fase D_5 A deformação associada à fase D_5 , de característica essencialmente rúptil, gerou dois sistemas principais de juntas N40-60W (figs. 8a,b e 9a,b) e EW. Algumas dessas juntas provavelmente associam-se às fases D_3 e D_4 , mas a maior parte tem sua gênese relacionada à deformação essencialmente rúptil da fase D_5 . As falhas EW são menos frequentes, porém ocorrem como falhas maiores na área (Fig. 8c,d).

No mapa geológico (Fig. 2b) fica clara a compartimentação gerada pelas falhas transcorrentes dextrais, com direção predominante EW, dividindo a área em blocos estruturais (Fig. 8e). O desenvolvimento das falhas transcorrentes dextrais foi concomitante à das fraturas NW, ambas geradas por uma compressão N40-50W. Nesse contexto, as falhas EW corresponderiam à direção de cisalhamento, enquanto as fraturas NW

estariam dispostas paralelamente à tensão principal máxima σ_1 . Seriam portanto fraturas “T”, abertas e densas, com alto potencial para dissolução (Fig. 9c,d). Algumas falhas NW denotam um caráter de fraturas híbridas, com movimento centimétricos e mergulho abaixo para SW.

O fraturamento N40-60W é penetrativo em toda a área mapeada, com excelentes afloramentos na mina a céu aberto, onde se observam feixes de falhas tipo *horst* e *graben* (Fig. 8e), contínuas em extensão, porém com rejeito da ordem de decímetros a poucos metros. Em afloramentos, as diversas famílias de fraturas ocorrem em sistemas conjugados, como juntas irregulares ou como superfícies lisas sem aparente feição no plano de ruptura.

Figura 8 – a) Diagrama de isolinhas de juntas em toda a área ($N=1252$, moda 45/88). b) Roseta de freqüências de juntas (máximo=7,5%). c) Diagrama de isolinhas das falhas transcorrentes dextrais ($N=32$, modas 39/81 e 194/86). d) Roseta de freqüências das falhas transcorrentes dextrais (máximo=14%). e) Bloco diagrama esquemático da fase D_5 , representando a compartimentação gerada pelas falhas EW e a deformação distensional condicionada pelas falhas NW.

IMPLICAÇÕES DO ARCABOUÇO ESTRUTURAL PARA A HIDROGEOLOGIA

O levantamento detalhado do padrão de fraturamento, em termos de distribuição, gênese, cronologia e tipologia (fraturas abertas ou fechadas, dissolvidas, etc), em conjunto com a distribuição espacial das camadas, permitiu caracterizar as feições planares e lineares com poten-

cial para controlar a percolação e comunicação entre aquíferos na região. O arcabouço estrutural da área, que é o reflexo das fases deformacionais D_1 a D_5 , mostra que há dois conjuntos de planos potenciais para percolação de fluidos. O primeiro conjunto corresponde às zonas de contato entre camadas impermeáveis (filitos, metapelitos) e camadas com maior propensão à dissolução (metadolomitos), como por exemplo os filitos que ocorrem na lapa da Falha de Vazante, bem como as zonas silicificadas dentro da própria zona de falha mineralizada. O segundo conjunto compreende as zonas fraturadas com tendência à dissolução, como por exemplo a faixa cataclasada adjacente à zona mineralizada (falhas distensionais da fase D_4) e as falhas e juntas de direção EW e NW (fase D_5), que ocorrem em grande quantidade como fraturas abertas. Não obstante a concentração da dissolução ao longo dessas estruturas, todas as feições planares, em conjunto, compõem um reticulado de planos potenciais para percolação de fluidos (Tabela 1 e Fig. 10a). Da mesma forma, as interseções entre estes planos formam estruturas lineares com vários graus de dissolução (Fig. 10b). Do

Figura 9 – a) Diagrama de isolinhas das fraturas (falhas + juntas) em toda a área, não individualizadas por evento (N=1583) b) Roseta de frequências das fraturas (máximo 7,1%). c) Diagrama de isolinhas das fraturas com dissolução (N=38, moda 40/89). d) Roseta de frequências das fraturas com dissolução (máximo 16%).

Tabela 1 – Resumo das principais atitudes de planos preferenciais para controlar a percolação, obtidos a partir da análise dos diagramas estruturais das estruturas das fases D_1 a D_5 (medidas “Clar”).

D_1	Clivagem S_0/S_1	317/29
	Clivagem S_0/S_1 , Cava+M.Usina	312/28
D_2	Clivagem S_2	294/35, 328/32
	Empurrões	309/46
D_3	Clivagem S_3	61/86
	Transcorrências Sinistras	311/88
D_4	Falhas Extensionais	316/56, 151/58
	Transcorrências Dextrais	39/81, 194/86
D_5	Juntas e falhas NW	45/88
	Fraturas com Dissolução	40/89

Figura 10 – a) Representação ciclográfica das feições planares que controlam a percolação de água subterrânea (N = 13, conforme tabela 1). b) Diagrama de isolinhas das feições lineares, obtidas a partir das interseções das feições planares (N = 91). c) Bloco diagrama representando a disposição das feições planares (falhas e camadas) e lineares (interseções) controladoras do fluxo. Para comparação ver bloco diagrama representativo da fase D_5 . A camada em destaque corresponde aos filitos do Membro Morro do Pinheiro, transposto pelas diversas famílias de falhas existentes na região.

ponto de vista litológico, as feições de dissolução são mais desenvolvidas na seção carbonática da base do Membro Morro do Pinheiro, representadas por dolarenitos, doloruditos e laminitos algálicos, depositados em ambiente mais profundo que os carbonatos do Membro Pamplona.

A situação final é representada por um sistema integrado de galerias subterrâneas e cavernas, condicionadas pelas feições planares e lineares (Fig. 10c). Quando a dissolução ocorre nas seções com contribuição de pelitos, predomina a formação de pequenas galerias. Isto pode ser observado na porção subterrânea da Mina de Vazante, que atravessa as seções com dolomitos intercalados a filitos, onde as cavidades normalmente não excedem dezenas de centímetros, chegando no máximo a alguns poucos metros. Já nos casos de dissolução das seções predominantemente dolomíticas maciças, ocorre a formação de cavernas. A camada de filitos da lapa, por separar a seção com predominância de dolomitos maciços de uma seção com contribuição de pelitos, embora também dolomítica, configura um divisor importante para o aquífero (Fig. 10c).

CONCLUSÕES As fases D₁ e D₂ evidenciam deformação progressiva em regime dúctil, com a geração de dobramentos holomórficos em larga escala e superfícies de foliação penetrativas, associados a uma tectônica convergente com formação de empurrões e dobramentos. A fase D₃, em regime dúctil-rúptil, gerou um sistema de falhas direcionais sinistrais, com direção predominante NE, dobramentos homoclinais descontínuos e basculamentos. As fases D₄ e D₅, rúpteis, registram transporte tectônico pouco significativo, porém compreendem deformações que controlaram a geometria dos blocos falhados na área da mina de Vazante. A fase D₄, representada por um sistema distensional NE, modificou e remobilizou parte da mineralização de zinco da Mina de Vazante. A fase D₅ ge-

rou um reticulado de falhas distensionais EW e NW, que controlam, em grande parte, o fluxo hidrológico nos aquíferos cársticos da região.

A dinâmica hidrológica é fortemente condicionada pela compartimentação estrutural, com a percolação sendo concentrada ao longo de planos de camadas e fraturas em várias direções, porém com controle maior das fraturas N40-60W (fase D₃). As falhas N80E a N80W (também da fase D₃) e as camadas (NE, com mergulho para NW) funcionam como barreiras, compartimentando o aquífero. As interseções de feições planares sugerem a existência de condutos lineares com azimutes variando de 220 a 330. Além da compartimentação gerada pelas falhas, as camadas de filitos intercaladas aos metadolomitos funcionam como barreiras que compartimentam o aquífero em profundidade, condicionando a existência de cunhas com confinamento hidráulico diferenciado.

A posição espacial das falhas e de suas interseções condiciona um desvio do fluxo hidrológico com controle geomórfico, em função do rebaixamento artificial do freático. Nesse contexto, o gradiente de fluxo natural é parcialmente desviado, em subsuperfície, ao longo da direção principal dos condutos lineares e do sistema de fraturas da fase D₃, seguindo também o mergulho geral das camadas.

Agradecimentos Sidnei Pires Rostirolla agradece a concessão de bolsa de pesquisa do CNPq. Os autores agradecem à Companhia Mineira de Metais pelo financiamento para a execução do trabalho e pela liberação de dados para publicação. Agradecem também a Ligia Maria Ribeiro pelo auxílio na preparação dos dados estruturais, a Marcelo Kulevich Bartoszeck pela digitalização de mapas, e aos revisores da RBG pelas sugestões ao original.

Referências

- Almeida F.F.M. 1967. Observações sobre o Pré-Cambriano da região central de Goiás. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 21, Curitiba, Programa, resumo das comunicações, roteiro das excursões, 19-22.
- Amaral G. 1969. Contribuição ao conhecimento dos depósitos de Zn-Pb-Cu-Ag da Serra do Poço Verde, Vazante, Estado de Minas Gerais. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 22, Belo Horizonte, *Anais*, 13-31.
- Campos Neto M. C. 1984. Litoestratigrafia, relações estratigráficas e evolução paleogeográfica dos Grupos Canastra e Paranoá (Região de Vazante-Lagamar, MG). *Rev. Bras. Geoc.*, 14:81-91.
- Cassedane J. 1969. Nota sobre o ambiente de sedimentação das rochas encaixando a mineralização de Vazante (MG). In: SBG, Congr. Bras. Geol., 22, Belo Horizonte, *Anais*, 33-40.
- Dardenne M.A. 1978. Zonação tectônica na borda ocidental do Craton do São Francisco. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 30, Recife, *Anais*, 1:299-308.
- Dardenne, M.A. 1979. *Les mineralisations de Plomb, Zinc, Fluor du Proterozoïque Supérieur dans le Brésil Central*. Tese de Doutorado. Univ. Paris VI. 251 pp.
- Dardenne M.A. 2000. The Brasília Fold Belt. In: U. G. Cordani, E. J. Milani, A. Thomaz Filho, D. A. Campos (eds.). *Tectonic Evolution of South America*. Edição Especial 31st Interbational Geological Congress. SBG/Rio de Janeiro, p. 231-263.
- Dardenne M.A., Freitas-Silva F.H. 2000. Pb-Zn ore deposits of Bambuí and Vazante groups, in São Francisco Craton and Brasília Fold Belt, Brazil. In: A. Misi & M. G. Silva (eds.). *Base Metal Deposits of Brazil*, 76-83.
- Dardenne M.A. & Freitas-Silva F.H. 1998. Depósitos Pb-Zn-F-Ba do Supergrupo São Francisco. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 40, Belo Horizonte, *Resumos Expandidos*, 133.
- Dardenne M.A., Freitas-Silva F.H., Souza J.C.F., Campos J.E.G. 1998. Evolução tectono-sedimentar do Grupo Vazante no contexto da Faixa de Dobramentos Brasília. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 40, Belo Horizonte, *Resumos Expandidos*, p. 26.
- Freitas-Silva F.H., Dardenne M.A. 1992a. Quadro estratigráfico das formações Vazante e Paracatu na região de Paracatu - MG. *REM*, 45:91-93.
- Freitas-Silva F.H. & Dardenne M.A. 1992b. Evolução estrutural das formações Paracatu e Vazante na região de Paracatu - MG. *REM*, 45:57-59.
- Ladeira E.A., Tarcia R.F., Cabral J.A.L. 1963. Contribuição à geologia de Vazante. *REM*, 23:29-33.
- Madalosso A. 1980. Considerações sobre a paleogeografia do Grupo Bambuí na região de Paracatu - Morro Agudo (MG). In: SBG, Congr. Bras. Geol., 31, Recife, *Anais*, vol. 2, pp. 622-634.

- Monteiro L.V.S. 1997. *Contribuição à gênese das mineralizações de Zn da Mina de Vazante, MG*. Inst. Geociências, Universidade de São Paulo, Dissertação de mestrado, 159p.
- Pinho J.M.M. 1990. *Evolução tectônica da mineralização de zinco de Vazante*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. 115p.
- Rigobello A.E., Branquinho J.A., Dantas M.G.S., Oliveira T.F., Neves Filho W. 1988. Mina de Zinco de Vazante. In: C. Schobbenhaus e C. E. S. Coelho (eds): *Principais Depósitos Minerais do Brasil*. DNPM, Brasília, 3:101-110.

Manuscrito A-1209

Recebido em 31 de janeiro de 2001

Revisão dos autores em 31 de janeiro de 2002

Revisão aceita em 15 de fevereiro de 2002