

Caracterização morfológica e petrográfica do derrame Salto Segredo – Província Magmática do Paraná, estado do Paraná

Morphological and petrographic characterization of Salto Segredo flow – Paraná Magmatic province, Paraná state, Brazil

CRISTIANE RUBINI DUTRA*, CARLOS HENRIQUE NALIN FERREIRA*, MARIA JOSÉ MALUF DE MESQUITA*,
MÁRCIA ELISA BOSCATO GOMES**

*Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico - Jardim das Américas
Caixa Postal 19001 - CEP 81531-990 - Curitiba - PR; email: crisdutra@gmail.com

**Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Campus do Vale – Av. Bento Gonçalves 9500, Caixa Postal
15001 – CEP 91501-970 – Porto Alegre – RS

Resumo

O derrame Salto Segredo foi definido na localidade homônima, entre os municípios de Mangueirinha e Reserva do Iguçu – PR, nos arredores da Usina Hidrelétrica Salto Segredo (Gov. Ney Braga). O escopo do trabalho é caracterizar a porção aflorante do derrame Salto Segredo na área de estudo, com base nas estruturas internas, texturas e distribuição da assembléia mineral primária e secundária. O derrame possui aproximadamente 40 m de espessura e é composto majoritariamente por labradorita, augita, óxidos de Fe e Ti e material intersticial microcristalino (mesóstase). De acordo com sua estruturação interna foi dividido em três níveis: (1) nível vesicular de base, caracterizado pela textura ofítica e padrão irregular de fraturas; (2) nível maciço central, o mais espesso do derrame, subdividido em porção mediana-inferior, caracterizado por fraturas irregulares e descontínuas subverticais; e porção mediana-superior, com fraturas regulares e contínuas subverticais com traçados retilíneos ou sigmoidais; (3) nível vesicular de topo, com abundante presença de vesículas, amígdalas e geodos e ausência de fraturas marcantes. A presença de cilindros de vesículas, zonas vesiculares horizontais e lençóis de vesículas no nível central é indicativa da participação de processos de segregação magmática e inflamento na formação destas rochas.

Palavras-chave: derrame basáltico; morfologia de derrames; inflamento; Província Magmática do Paraná; estado do Paraná

Abstract

The Salto Segredo Flow was defined in the homonymous locality, between Mangueirinha and Reserva do Iguçu towns, Paraná State, Brazil, nearby Salto Segredo (Gov. Ney Braga) Hydropower Plant. The research goal is to characterize the outcropped portion of the Salto Segredo flow in the studied area, according to internal structures, textures as well as primary and secondary mineral assemblages. The flow is approximately 40 m thick and is composed mostly of labradorite, augite, Fe and Ti oxides and an interstitial microcrystalline material (mesostasis). According to its internal organization the flow could be divided into three levels: (1) base vesicular level, characterized by the ophitic texture and an irregular fracture pattern; (2) central massive level, the thicker in the flow, divided into lower-median portion, with sub vertical, irregular and discontinuous fractures; and upper-median portion, with sub vertical, continuous and regular fractures, with rectilinear or sigmoid traces; (3) top vesicular level, abundant in vesicles, amygdules and geodes without distinguished fractures. The presence of vesicle cylinders, horizontal vesicular zones, and vesicle sheets in the central massive level is indicative of the involvement of segregation and inflation process in the formation of these rocks.

Key-words: basalt flow; flow morphology; inflation process; Parana-Etendeka Magmatic Province; Parana State, Brazil

1. Introdução

O derrame Salto Segredo localiza-se no sudoeste do Estado do Paraná, na localidade homônima, entre os municípios de Mangueirinha e Reserva do Iguçu. A área onde o derrame foi estudado é delimitada pelas

coordenadas geográficas 52°5' e 52°8' W e 25°45' e 25°48' S (Figura 1). Como ponto de referência tem-se a Usina Hidrelétrica (UHE) Salto Segredo, recentemente redenominada de UHE Gov. Ney Amintas de Barros Braga.

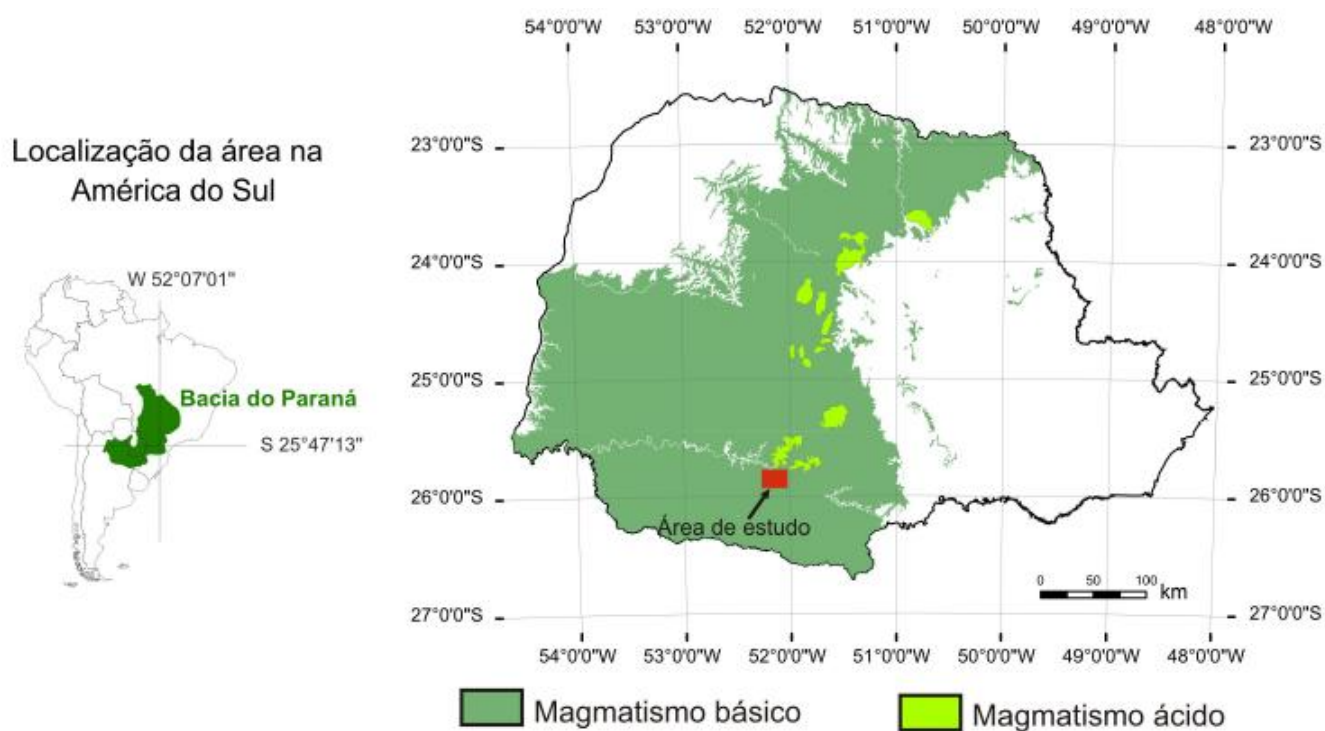


Figura 1 – Esboço da Província Magmática do Paraná, no estado do Paraná com a localização da área de estudo. (Fonte: Adaptado de CPRM, 2008).

A maioria dos trabalhos desenvolvidos na Província Magmática do Paraná (PMP) enfoca essencialmente aspectos petrológicos, geoquímicos e isotópicos. Estudos baseados nos critérios da arquitetura de fácies, como morfologia e estruturação interna dos fluxos e a descrição de feições indicativas de processos como inflamento e segregação são ainda restritos.

O trabalho propõe a identificação das feições internas de parte do derrame Salto Segredo, com base no padrão de fraturas, resultante das sucessivas etapas de resfriamento e contração termal da rocha, e nas variações estruturais, texturais e mineralógicas. Entre os autores que já publicaram estudos abordando este tema na PMP citam-se Arioli (2008), Gomes *et al.* (2008), Waichel (2006) e Gomes (1996).

O estudo objetiva, ainda, o reconhecimento de feições indicativas dos processos de inflamento e segregação magmática, frequentemente observadas em outras províncias continentais, as chamadas Grandes Províncias Ígneas (*Large Igneous Provinces* - LIP) como na Província do Deccan, na Índia (Bondre *et al.* 2004, Walker 1969), na Província Columbia River, no Colorado, Estados Unidos (Self *et al.* 1996, Goff 1995), e nos derrames do Haváí (Self 1998, Keszthelyi *et al.* 1995).

O estudo da morfologia e estruturação interna de parte do derrame Salto Segredo pode dar indícios do modo como as lavas que formam a PMP naquela região se colocaram sobre a superfície e como evoluíram. O estudo comparativo dos resultados deste trabalho com estudos já desenvolvidos para o restante da PMP auxilia na compreensão sistêmica dos processos atuantes nos derrames a partir do extravasamento da lava.

2. Materiais e métodos

As etapas de campo se destinaram ao reconhecimento geológico da região de Salto Segredo e delimitação da parte aflorante do derrame homônimo, bem como identificar sua posição estratigráfica na área.

O derrame Salto Segredo foi posicionado espacial e estratigraficamente por meio da associação das coordenadas geográficas e de um perfil geológico levantado com a técnica de visadas a partir de uma bússola Brunton com clinômetro associado, ao longo de aproximadamente 3 km da Rodovia Dois Pinheiros-Mangueirinha, PR-459. Com este método, foram conhecidos os limites superior e inferior do derrame. Os métodos de individualização do derrame bem como a classificação de estruturas e texturas segue os propostos por Gomes (1996).

As rochas selecionadas para análise petrográfica tiveram como critério a posição no derrame, variações representativas na textura e estrutura e presença de minerais secundários preenchendo interstícios ou cavidades. As lâminas delgadas foram confeccionadas no Laboratório de Laminação Petrográfica (LAMIN) e analisadas e fotografadas no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR), ambos do Departamento de Geologia, da Universidade Federal do Paraná (UPFR).

A partir do perfil levantado e das descrições morfológicas, estruturais e texturais foi confeccionada uma seção esquemática do derrame Salto Segredo, com a finalidade de reunir as informações graficamente e apresentá-las de forma rápida e concisa.

3. Morfologia e petrografia do derrame Salto Segredo

O derrame Salto Segredo aflora entre as cotas de 530 e 620 m. Possui, na área de estudo, aproximadamente 40 m de espessura e foi individualizado com base no padrão de fraturas e características estruturais e texturais. Internamente, podem ser observados três níveis distintos: nível vesicular de base, nível maciço central e nível vesicular de topo. Os litotipos em contato inferior e superior com o derrame foram mapeados apenas para fins de reconhecimento e posicionamento estratigráfico.

O perfil esquemático exibido na Figura 2 apresenta as informações descritas nas próximas seções de forma gráfica e sucinta, e serve de guia para o acompanhamento das descrições.

3.1. Nível vesicular de base

É o menor nível do derrame Salto Segredo, não ultrapassando 1 m de espessura. São observadas fraturas subverticais, de resfriamento, irregulares e descontínuas, com espaçamento em média de 30 cm, que formam prismas de até três lados com faces curvas, conforme a Figura 2C.

Horizontes de vesículas inclinados tipo *pipe* ocorrem na porção inferior do nível. As vesículas são alongadas verticalmente, por vezes inclinadas, e têm dimensões entre 0,5 e 2,0 cm. Estes níveis de vesículas prolongam-se por no máximo 15 cm em direção à parte interna do derrame.

O nível de base é composto por basalto cinza escuro variolítico com textura microporfirítica subofítica. A granulação da matriz é muito fina, e varia entre 0,08 e 0,8 mm e dos microfenocristais varia entre 0,4 e 1,0mm. A rocha é formada por 45% de labradorita, 35% de augita, 5% de óxidos de Fe e Ti, 10% de mesóstase (nome refere-se ao resíduo criptocristalino intersticial), e 5% de microvesículas. A labradorita ocorre na matriz e como microfenocristais. Na matriz, tem hábito ripiforme subédrico, com limites difusos. Como microfenocristais, são prismático-tabulares euédricos a subédricos, com dimensões entre 0,5 e 1,0 mm. A augita ocorre igualmente na matriz e como microfenocristal. Ambas têm hábito prismático tabular subédrico a anédrico, contudo os microfenocristais tem dimensões entre 0,4 e 0,8 mm. Os limites dos microfenocristais de augita e labradorita são irregulares, marcados pela reentrância da matriz no interior do grão.

As características dos minerais e suas relações não variam entre os diferentes níveis vesiculares de base, maciço central e vesicular de topo, por isso não serão repetidamente descritas, somente as características distintas.

Nesta porção do derrame são observadas vesículas e amígdalas com até 2 cm de diâmetro com formas alongadas ou arredondadas. São parcial ou totalmente preenchidas por quartzo, esmectita, carbonatos, celadonita, mesóstase ou por uma associação de celadonita e zeolita. O preenchimento pode ser simples ou composto. Em direção ao topo do nível há uma diminuição no tamanho das

amígdalas, que passam de até 3 mm de diâmetro na base a 0,3 mm em média no topo.

O limite inferior do nível de base está em contato com uma associação de brechas, denominadas de basáltico-siltosas e basáltico-arenosas, e de peperitos (Fig. 2 A e B).

3.2. Nível maciço central

O nível central é dito maciço, pois nesta porção não ocorrem vesículas. Tem aproximadamente 30 m de espessura aflorante. Pode ser dividido com base no padrão de fraturas em: porção mediana-inferior e mediana-superior (Fig. 2).

3.2.1. PORÇÃO MEDIANA-INFERIOR

Na porção mediana-inferior predominam fraturas mais regulares (que o nível vesicular de base) e descontínuas que se prolongam por mais de 2 m verticalmente, com espaçamento máximo de 50 cm (Fig. 3 e Fig. 2D). Geram prismas com até 50 cm de faces curvas onde se observam de 3 a 4 lados. Estas fraturas são por vezes abertas, porém não são preenchidas. São observadas marcas de bisel (marcas de isoterma) sub-horizontais descontínuas, com espessura entre 1-2 mm e espaçamento de até 3 mm.

O basalto desta porção é cinza escuro maciço, com textura microporfirítica ofítica a subofítica. A granulação da matriz é de muito fina a fina, variando de 0,09 a 0,15 mm e os microfenocristais medem até 1,2mm. Compõe a rocha 34% de labradorita, 48 % de augita, 10 % de óxidos de Fe e Ti e 8% de mesóstase. De forma localizada, ocorre nesta porção brecha basáltico-calcítica (descrita posteriormente).

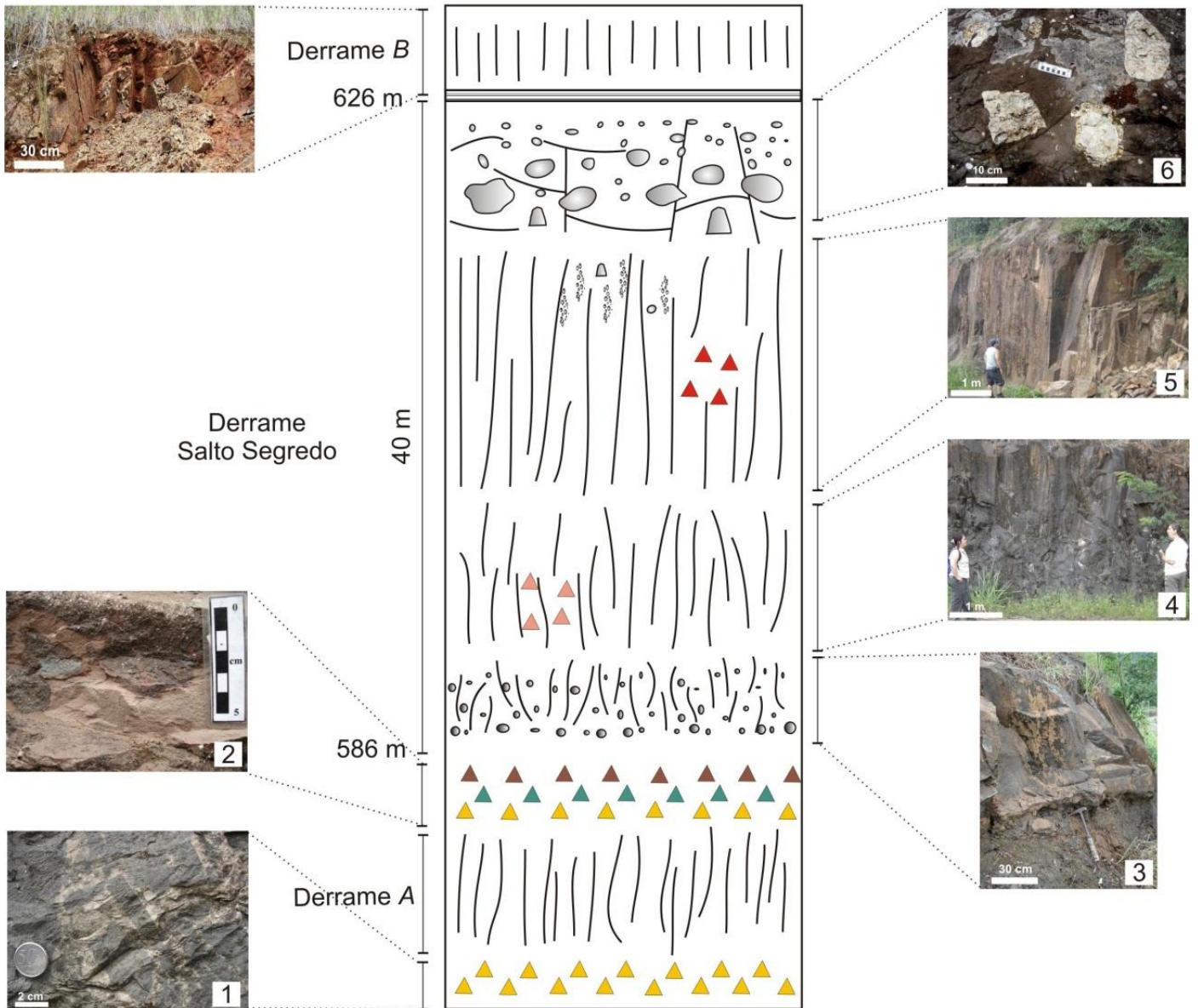
3.2.2. PORÇÃO MEDIANA-SUPERIOR

Na porção mediana-superior predominam fraturas retilíneas subverticais, regulares e contínuas, prolongando-se por até 10 m aflorantes. Estas fraturas delimitam prismas grandes com até 2 m de largura, de faces planas ou ligeiramente curvas, geralmente com três ou quatro lados visíveis (Fig. 4 e Fig. 2E).

A rocha desta porção é um basalto cinza escuro, estrutura maciça com granulação muito fina a fina na matriz (0,07 a 0,13 mm) e com microfenocristais medindo de 0,9 a 1,6mm. A textura predominante é porfirítica intergranular. Compõe a rocha 50% de labradorita, 38% de augita, 7% de óxidos de Fe e Ti e 5% de mesóstase. Os fenocristais de labradorita medem de 1 a 1,6 mm e os de augita entre 0,9 e 1,3 mm.

Nesta porção são observadas, de forma localizada, estruturas do tipo cilindros de vesículas (*vesicle cylinders*). Em perfil, os cilindros de vesículas são subverticais a oblíquos e medem até 1,2 m aflorante. Os limites são difusos e irregulares e têm continuidade de difícil reconhecimento em relação ao basalto encaixante. Em planta, os cilindros têm seção aproximadamente circular com diâmetro em torno de 20 cm.

Os cilindros são preenchidos por vesículas e amígdalas com diâmetro médio de 1-2 mm, podendo atingir até 1,5 cm. Na borda dos cilindros, predominam vesículas e



Legenda das fotografias

- 1 - Brecha basáltica-siltosa
- 2 - Peperitos
- 3 - Basalto da base do derrame Salto Segredo em contato com os peperitos e as brechas basáltica-siltosa e basáltica-arenosa
- 4 - Basalto da porção mediana-inferior do nível maciço central do derrame Salto Segredo
- 5 - Basalto da porção mediana-superior do nível maciço central do derrame Salto Segredo
- 6 - Geodos do nível vesicular de topo do derrame Salto Segredo
- 7 - Derrame B

Legenda do perfil

- Fraturas de resfriamento
- Cilindros de vesículas
- Vesículas e arígidas
- Geodos
- Siltito
- Brecha basáltica-quartzosa
- Brecha basáltica-calcítica
- Brecha basáltica-arenosa
- Brecha basáltica-siltosa
- Peperitos

Figura 2 – Perfil esquemático do derrame Salto Segredo com os litotipos associados (modificado de Ferreira et al. 2008).

amígdalas alongadas a muito alongadas, com distribuição helicoidal, circundando o limite circular (Fig. 5). No centro predominam vesículas e amígdalas arredondadas ou ligeiramente alongadas. Ocorre diminuição no tamanho e quantidade de amígdalas do centro para a borda. As amígdalas podem ser mono ou poliminerálicas e o preenchimento inclui celadonita, calcedônia, esmectita e

quartzo. As combinações entre os minerais que preenchem as cavidades poliminerálicas são variadas.

3.3. *Nível vesicular de topo*

O nível vesicular de topo tem aproximadamente 7 m de rocha aflorante (Fig. 2). É distinto dos demais níveis do derrame por apresentar várias gerações de vesículas e

amígdalas, portar grandes geodos e não apresentar fraturas verticais e prismas (Fig. 6 e Fig. 2F). Fraturas subhorizontais descontínuas e abertas ocorrem de forma localizada e podem prolongar-se por até 3,5 m lateralmente em afloramento.



Figura 3 – Basaltos do derrame Salto Segredo, Província Magmática do Paraná. Observam-se fraturas irregulares e descontínuas subverticais da porção mediana-inferior do nível maciço central.



Figura 4 – Basaltos do derrame Salto Segredo, Província Magmática do Paraná. Observa-se fraturas regulares e contínuas subverticais, delimitando prismas com até 4 lados (seta vermelha), da porção mediana-superior do nível maciço central.

O nível vesicular de topo é caracterizado por basalto extremamente variolítico com textura equigranular ofítica. A matriz exibe granulação muito fina (0,06 a 0,7 mm). A rocha é composta por 30% de labradorita, 40% de augita, 5% de óxidos de Fe e Ti, 15% de mesóstase, e 10% de microvesículas.

As abundantes vesículas presentes foram divididas em populações com base na dimensão, formato e preenchimento, para melhor compreender sua distribuição este nível. As populações foram descritas e classificadas da base do nível, denominadas população A, para o topo, denominadas de população E.

A população A situa-se na base deste nível e é representada por geodos com formato de capela (Fig. 7). São geodos grandes, medem até 50 cm de altura por 30 cm de largura. São preenchidos predominantemente por quartzo, e o preenchimento é parcial. Os cristais de quartzo são incolores ou branco leitosos, prismáticos bipiramidados, euédricos, e medem entre 1 e 3 cm. Em meio a estes geodos ocorrem poucas vesículas e amígdalas menores, descritas na população C.



Figura 5 – Basaltos do derrame Salto Segredo, Província Magmática do Paraná. Vista em planta de seção aproximadamente circular de um cilindro de vesículas. As vesículas e amígdalas são alongadas com disposição helicoidal, subparalelas à borda do cilindro. São preenchidas por celadonita (verde mais ao centro), esmectita (preta) e calcedônia (branca, na borda).

Logo acima do nível de geodos em capela ocorrem os geodos da população B. Possuem formatos arredondados a levemente alongados (Fig.6). Alguns são angulosos, lembrando prismas. São geodos igualmente grandes com diâmetros entre 20 e 40 cm. As cavidades são inteiramente preenchidas, com preenchimento composto, zonado e concêntrico. Na borda mais externa, ocorre uma fina banda de argilominerais pretos (esmectita), seguido por uma banda de calcedônia com até 0,5 cm de espessura, e no centro quartzo ou calcita preenchendo a maior parte da cavidade. Os geodos maiores apresentam uma fina banda descontínua de opala entre a calcedônia e o quartzo/calcita que preenche o centro (Fig. 8). Em alguns geodos é possível



Figura 6 – Basaltos do derrame Salto Segredo, Província Magmática do Paraná. Vista geral do nível vesicular de topo mostrando as várias populações de amígdalas e grandes geodos da população B (setas azuis). Notar fratura subhorizontal (seta vermelha).

observar reentrâncias de quartzo na banda de calcedônia. Pelos limites curvos e regulares, esta feição pode indicar que a banda de calcedônia não estava totalmente cristalizada quando da formação da banda de quartzo. De forma localizada ocorre geodo com formato suavemente alongado na vertical, contornos curvos e com reentrâncias. São preenchidos por cristais de quartzo e calcedônia. Os limites entre o quartzo e a calcedônia são bem definidos e retilíneos (Fig. 9).

Preenchimento zonado concêntrico é também observado em algumas destas amígdalas, que apresentam uma banda submilimétrica de esmectita na borda mais externa, seguida por banda milimétrica a centimétrica de calcedônia e quartzo no centro.



Figura 7 – Nível vesicular de topo do derrame Salto Segredo, Província Magmática do Paraná. Geodos com formato de capela da população A. São preenchidos parcialmente por quartzo branco com hábito prismático piramidal.

Em meio aos geodos das populações A e B distribuem-se as vesículas e amígdalas da população C e D. Na C, o formato predominante é arredondado, por vezes oblato, com diâmetros de 2 a 10 cm (Fig. 10). As amígdalas são parcial ou totalmente preenchidas. O preenchimento é monominerálico e pode ser de quartzo, calcedônia, calcita, celadonita e raramente heulandita, estilbita ou apofilita.

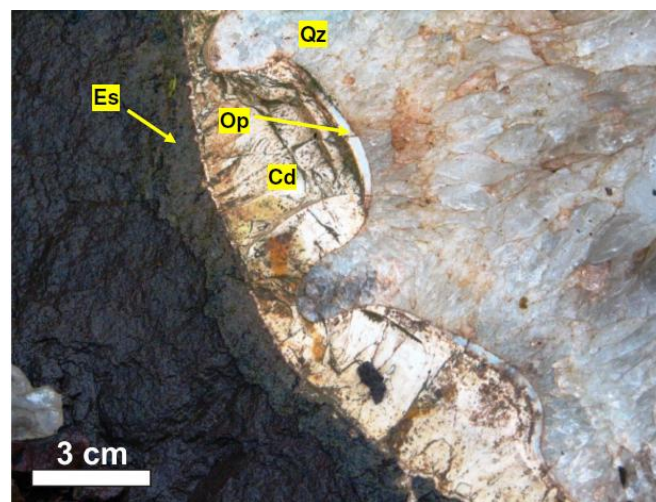


Figura 8 – Nível vesicular de topo do derrame Salto Segredo, Província Magmática do Paraná. Detalhe de um geodo da população B com preenchimento zonado concêntrico da borda para o centro: esmectita (Es), calcedônia (Cd), opala (Op) e quartzo (Qz). Reentrâncias do quartzo da parte central afeta os níveis de calcedônia e opala dos níveis mais periféricos.

A população D é caracterizada por vesículas e amígdalas pequenas, com diâmetros milimétricos de até 2 cm e formato arredondado a achatado (Fig. 10). As amígdalas são monominerálicas, parcial ou totalmente preenchidas por quartzo, calcita, calcedônia, celadonita e subordinadamente heulandita. Em algumas amígdalas é possível observar, a exemplo das populações B e C, uma banda submilimétrica de esmectita na borda externa.

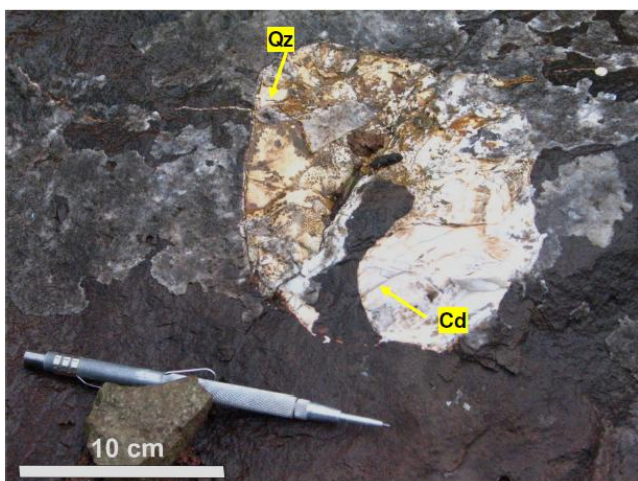


Figura 9 – Nível vesicular de topo do derrame Salto Segredo, Província Magmática do Paraná. Geodo da população B preenchido por calcedônia (Cd) e quartzo (Qz). Observar os contornos curvos e reentrantes do geodo.



Figura 12 – Brecha basáltico-arenosa no limite entre a base do derrame Salto Segredo e o topo do derrame inferior (A). Notar clastos de basalto vesicular e matriz de areia fina branca.

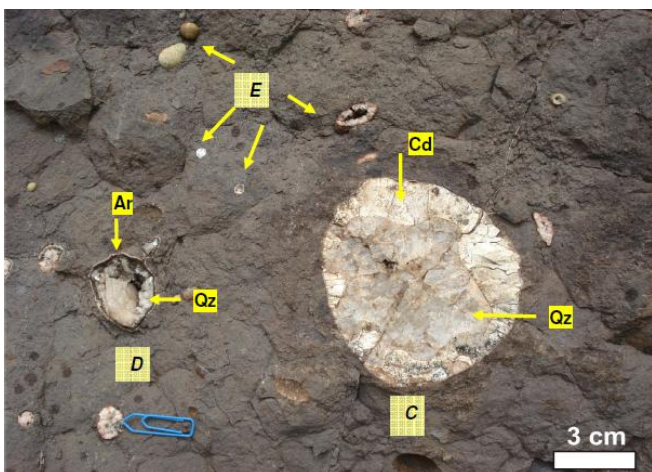


Figura 10 – Nível vesicular de topo do derrame Salto Segredo, Província Magmática do Paraná. Vesículas e amígdalas da população D, da população C e da população E. Observar banda de argilominerais (Ar) na borda de amígdala preenchida por quartzo (Qz) da população D e o preenchimento zonado concêntrico na amígdala da população C, com quartzo (Qz) ao centro e calcedônia (Cd) na borda. As amígdalas de D podem ser arredondadas a alongadas.



Figura 11 – Nível vesicular de topo do derrame Salto Segredo, Província Magmática do Paraná. Lençol de vesículas de calcedônia.

Possíveis lençóis de vesículas (*vesicle sheets*) ocorrem de forma localizada neste nível (Fig. 11). Os lençóis são feições alongadas horizontalmente, com espessura em torno de 3 cm, que não se prolongam por mais de 15 cm. São compostos por amígdalas com formatos arredondados a alongados na horizontal, acompanhando as bordas do lençol. A dimensão das amígdalas varia de milimétrica até 1,5 cm. São preenchidas por calcedônia. Ao redor dos lençóis de vesículas não são observadas vesículas ou amígdalas, que se esperaria encontrar no topo vesicular de um derrame típico. O formato das vesículas e falta de vesículas em volta sugere que os lençóis tenham se formado pela coalescência de vesículas durante a fase de vesiculação.

O nível vesicular de topo pode conter possíveis zonas vesiculares horizontais (*horizontal vesicular zones*), uma vez que são observados contatos gradacionais entre as vesículas e amígdalas. Na base do nível predominam os grandes geodos, logo acima os geodos de tamanho intermediário, e em direção ao topo as vesículas e amígdalas vão tomando dimensões cada vez menores (milimétricas).

A delimitação do derrame Salto Segredo foi possível pelos contatos superiores e inferiores. O contato inferior do nível vesicular de base está limitado pelo derrame A (Fig. 2C), formado por basalto maciço cinza claro. Em contato com parte do nível vesicular de topo do derrame Salto Segredo, ocorre uma camada de siltito, descontínua e irregular, com aproximadamente 40 cm de espessura. Onde este horizonte de siltito está ausente, o nível vesicular de topo está em contato direto com a base do derrame B (Fig. 2G).

LITOTIPOS INTER E INTRA-DERRAME Associados ao derrame Salto Segredo ocorrem brechas e peperitos (Fig. 2 para localização). As brechas podem ser interderrame (basáltico-siltosa e basáltico-arenosa) e intra-derrame (basáltico-quartzosa e basáltico-calcítica).

A brecha basáltico-siltosa ocorre entre a base do derrame Salto Segredo e o derrame inferior, denominado A (Fig. 2A). É composta por clastos de basalto maciço e basalto vesicular, angulosos a subangulosos. Os clastos maiores, medindo entre 3 e 5 cm, são predominantemente angulosos. Os clastos menores, com até 3 cm, são subangulosos, por vezes subarredondados. A matriz é composta por siltito e arenito muito fino a fino, ambos de cor creme avermelhada. A rocha é ora sustentada por clasto, ora pela matriz.

Nas proximidades da brecha basáltico-siltosa são observados diques clásticos com em média 1,5 cm de espessura. São preenchidos por siltito creme avermelhado. Zonas de esmectita com aproximadamente 2 mm ocorrem nas bordas do dique. O dique contém fragmentos subangulosos de basalto cinza maciço nas suas extremidades. Estes fragmentos ocorrem isolados e não apresentam contatos uns com os outros.

A brecha basáltico-arenosa é inter-derrame, restrita ao limite entre a base do derrame Salto Segredo e o topo do derrame inferior (A), junto à brecha basálticosiltosa e aos peperitos. É formada por clastos de basalto vesicular subarredondados a arredondados (Fig. 11). O tamanho dos clastos varia entre 0,5 e 10 cm. A matriz é formada por areia fina branca.

A brecha basáltico-quartzosa é intra-derrame e ocorre na porção medianasuperior do nível maciço central. Possui geometria irregular e dimensões variadas, no máximo 4 m de largura por 6 m de altura (Fig. 13). É composta por clastos de basalto maciço, angulosos a subangulosos, de até 15 cm. Nos interstícios entre os clastos observa-se cimento

de quartzo cristalino (Fig. 13A e B). São observadas cavidades com tamanhos variados, desde milimétricas até 70 cm. A maioria não está preenchida. Quando preenchidas, as cavidades contêm cristais de quartzo (Fig. 13C), calcita e zeolita. Cristais de natrolita podem atingir até 7 cm em seu eixo maior.

A brecha basáltico-calcítica, intra-derrame, ocorre na porção mediana-inferior do nível maciço central do derrame Salto Segredo. É formada por clastos de basalto vesicular, angulosos a subarredondados, de tamanhos entre 0,5 a 7 cm. Nos interstícios dos clastos observa-se cimento composto por calcita. Não há vestígios de matriz ou sedimentos associados. A brecha está associada a um sistema de vênulas preenchidas igualmente por calcita (Fig. 14). As vênulas são irregulares e descontínuas e têm espessura milimétrica e extensão variada (de centímetros a 1 m). Frequentemente as vênulas entrecruzam-se. Na maioria dos casos, se desenvolvem a partir do corpo de brecha, e preenchem não só fraturas como cavidades irregulares.

Os peperitos são formados por matriz de siltito creme avermelhado ou, de forma localizada, por arenito muito fino branco (Fig. 2B). Neste último, frequentemente são observadas laminação plano-paralela e cruzada tabular. Os clastos são de basalto vesicular, sub-arredondados a subangulosos e medem até 15 cm. Os clastos geram bordas de reação no siltito com até 0,3 cm de espessura. Estas bordas são avermelhadas, apresentam até 15% de mica branca fina e tamanho de grão maior que fora das bordas. Muitas vesículas do basalto são preenchidas pelo mesmo siltito da matriz.

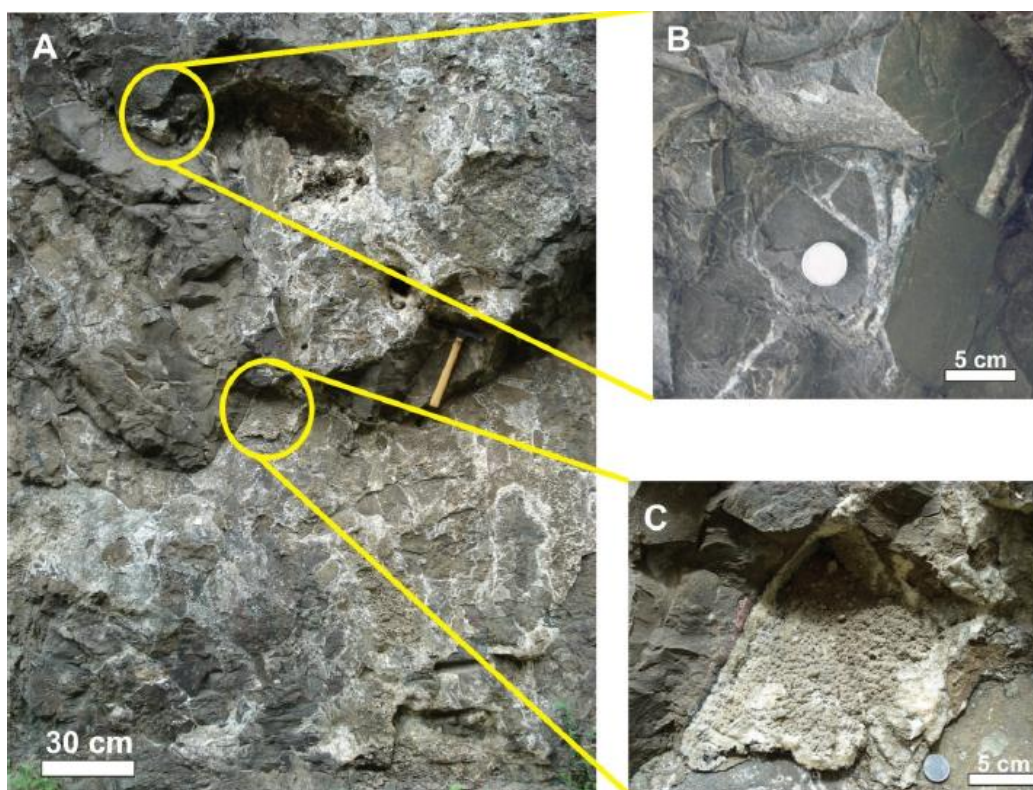


Figura 13 – A) Brecha basáltico-quartzosa intra-derrame Salto Segredo; B) detalhe da brecha basáltico-quartzosa exibindo clastos angulosos de basalto; C) cavidade parcialmente preenchida por quartzo.

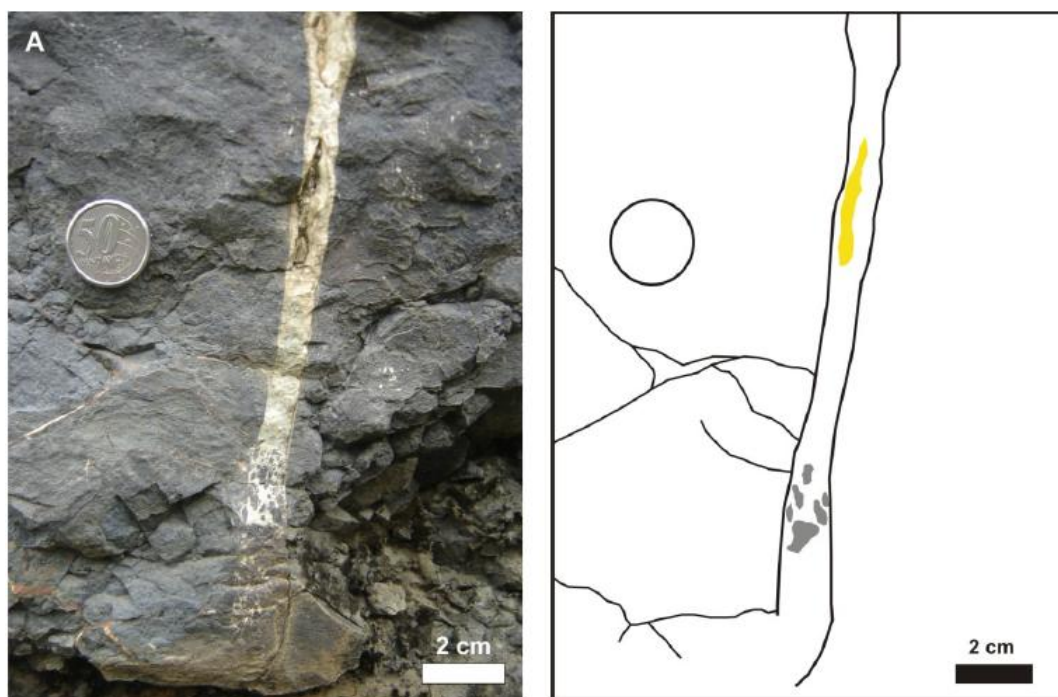


Figura 14 – A) veio preenchido por calcita em basalto do derrame Salto Segredo. Notar brecha basáltico-calcítica na base do veio; b) representação esquemática do veio. Clastos de basalto em cinza e cavidades em amarelo.

4. Discussões

A morfologia tabular do derrame Salto Segredo indica sucessivos pulsos de extravasamento de lava, resultado de atividade efusiva intensa (Bondre et al. 2004 e Arioli, 2008). Segundo Self et al. (1996, 1998), derrames do tipo pahoehoe, como o Salto Segredo, atingem consideráveis espessuras devido ao processo de inflamento. De acordo com este autor, o inflamento (ou crescimento endógeno) consiste na injeção de novos pulsos de lava no interior do material já extravasado, de forma lenta e gradual, durante uma ou mais décadas (Hipótese Swell).

Os indícios de inflamento no derrame Salto Segredo são representados pela presença de zonas vesiculares horizontais (horizontal vesicular zones) no topo e base, amígdalas e geodos achatados no topo, cilindros de vesículas (vesicle cylinders) na zona central e lençóis de vesículas (vesicle sheets).

As zonas vesiculares horizontais são representadas pelas primeiras vesículas formadas logo após o extravasamento da lava, ou a cada novo pulso injetado, que se acumulam no topo vesicular do nível superior (Self et al., 1996). Novos pulsos de lava podem ainda comprimir as bolhas contra a crosta rígida do derrame, na parte superior. Isso faz com que algumas mudem seu formato original, achatando-se.

Os cilindros de vesículas não são formados durante o processo de inflamento em si, mas podem ser consequência da movimentação de voláteis introduzidos pelos novos pulsos injetados. Segundo Goff (1996), estes voláteis e o líquido diferenciado migram para zonas de baixa pressão, onde crescem em diâmetro e ascendem à superfície, dando origem aos cilindros de vesículas.

Cilindros de vesículas são preservados nas porções internas de inúmeros derrames e descritos por diversos autores, como Green (1989); Goff (1996); Thordarson e Self (1998). A explicação mais comum para a formação dos cilindros de vesículas é a de filtragem de gás por pressão, defendida por Anderson et al. (1984); Greenough e Dostal (1992); Rogan et al. (1996); Sisson e Bacon (1999), Stephenson et al. (2000), também chamada de diferenciação de vapor por Goff (1996). Este processo é descrito por Anderson et al. (1984), como o processo no qual o líquido residual migra através do meio rígido, mas permeável formado pela rede de cristais, em resposta ao gradiente de pressão. Este processo explica a posição e a distribuição dos cilindros de vesículas no nível maciço central do derrame estudado.

De acordo com Self et al. (1996, 1998), os lençóis de vesículas, ou veios de segregação conforme Bondre et al. (2004), são formados pelo acúmulo de elementos incompatíveis, incluindo voláteis que ascendem na forma de diápiros. Estes são formados após a estagnação do fluxo, quando o processo de inflação não é mais atuante, porém indicam que este esteve presente. Os mecanismos de formação dos lençóis de vesículas são controversos, sendo considerados como resultado de contração térmica (Greenough e Dostal, 1992), compactação (Philpotts et al., 1996) ou convecção composicional (Helz, 1987; Helz et al., 1989). A localização destas estruturas na porção mediana-superior do nível maciço central do derrame Salto Segredo, em um nível superior aos cilindros de vesículas, pode significar que o posicionamento deste conjunto de feições vesiculares é controlado pela existência de um limite impenetrável representado pelo “front” superior de

solidificação abaixo do qual a lava é líquida e acima é mais viscosa devido ao maior grau de cristalização.

As altas taxas de efusão associadas a repetidas injeções de lava por meio do inflamento, concomitante ao resfriamento, permitiram ao derrame Salto Segredo atingir a espessura total de 40 m. Embora o derrame seja o produto do empilhamento de sucessivos pulsos de lava, sua textura e estruturação interna sugerem que o resfriamento do corpo se processou como uma unidade única.

O resfriamento ocorre das bordas em direção ao interior do corpo de lava. Essa dinâmica, juntamente com o processo de inflamento, produz diferentes taxas de resfriamento para cada um dos níveis do derrame. O que se reflete em mudanças no padrão de fraturas, e variações mineralógicas e texturais nas rochas, observadas no Salto Segredo.

Analisando os dados dos diferentes níveis (tabela 1), observa-se que os níveis vesiculares de topo e base do derrame Salto Segredo apresentam fraturas muito irregulares e descontínuas, espaçadas em até 30 cm. Nestes níveis há também uma maior quantidade de mesóstase, granulação muito fina e predomínio de texturas ofíticas a subofíticas.

Já no núcleo do derrame a perda de calor é mais lenta, uma vez que este é protegido do contato com a superfície pelos níveis vesiculares. No caso do derrame Salto Segredo, o nível maciço central registra dois padrões distintos de resfriamento. A porção mediana-inferior tem fraturas sub-verticais irregulares, porém contínuas, espaçadas em até 50 cm. A matriz tem granulação muito fina a fina e até 8% de mesóstase. Características ainda semelhantes as dos níveis vesiculares.

Já na porção mediana-superior, o espaçamento entre as fraturas regulares e contínuas chega a 2 m, apresenta maior grau de cristalização, com predomínio de textura intergranular. A matriz tem a maior granulação e apenas 5% mesóstase. O padrão de distribuição das fraturas ao longo do derrame é semelhante ao descrito por Gomes (1996) em derrames espessos da Província Magmática do Paraná no norte do Rio Grande do Sul, Thordarson e Self (1998) em lavas do Columbia River e por Anderson et al. (1999) em lavas Havaianas, considerados por estes autores como típicos de lobos inflados de lavas do tipo pahoehoe.

Em contato com o ar notadamente mais frio da superfície, formam-se crostas rígidas nas bordas do derrame. Estas crostas servem de anteparo ao escape dos voláteis produzidos na fase de vesiculação que ascendem dos níveis inferiores em direção à superfície. Segundo Gomes (1996), pouco abaixo desta superfície rígida, onde a perda de calor é menor que a imediatamente em contato com a crosta endurecida, os voláteis tendem a coalescer. Esse processo pode ter sido o responsável pela formação dos grandes geodos observados no nível vesicular de topo do derrame Salto Segredo.

Da parte inferior à superior do nível vesicular de topo observa-se um aumento na quantidade de cavidades, porém há uma nítida diminuição no tamanho destas. As mudanças de tamanho e formato das vesículas ao longo do nível são acompanhadas pela variação no preenchimento. A distribuição das vesículas ao longo dos níveis vesiculares da base e do topo segue o padrão descrito por diversos autores, como Manga e Stone (1994), Gomes (1996) e Cashman e Kauahikaua (1997).

Tabela 1 – Principais características dos diferentes níveis do Derrame Salto Segredo da PMP: estruturas; tipos de texturas; granulação da matriz – mz e dos fenocristais - fc, assembléia mineral labradorita - lab, augita - aug, óxidos de Fe e Ti – ox, microvesículas – mv), quantidade de mesóstase e características das fraturas de resfriamento / faces dos prismas formados.

Níveis/ Carat	NVB	NMC - PMI	NMC - PMS	NVT
estrutura	variolítica	maciço	maciço	variolítica
texturas	microporfirítica subofítica	microporfirítica ofítica a subofítica	porfirítica intergranular	equigranular ofítica
Granulação (mm)	mz 0,08 a 0,8 fc 0,4 e 1,0	mz 0,09 a 0,15 fc até 1,2	mz 0,07 a 0,13 fc 0,9 a 1,6	mz 0,06 a 0,7
Minerais %	lab 45, aug 35, ox 5, mv 5	lab 34, aug 48, ox 10	lab 50, aug 38, ox 7	lab 30, aug 40, ox 5, mv 10
Mesóstase	10	8	5	15
Fraturas/ prismas	Muito irregulares e descontínuas espaçadas de 30cm/ 3 lados	irregulares e contínuas espaçadas de 50cm/ 3 a 4 lados	retilíneas regulares e contínuas, espaçadas de 2m/4 lados	sub-horizontais irregulares e descontínuas

As diversas populações de vesículas do nível vesicular de topo foram percoladas por fluidos pós-magmáticos com diferentes composições em diferentes períodos de tempo. A presença de amígdalas preenchidas por mesóstase no nível vesicular de base sugere preenchimento por material magmático residual.

Em alguns geodos da população B e C, ocorrem reentrâncias do quartzo que preenche o centro, nas bandas de calcedônia e opala que revestem as bordas. Esse arranjo sugere que nem a opala ou a calcedônia estavam completamente cristalizadas quando da formação do quartzo.

O formato reentrante e curvo da base de geodo preenchido por calcedônia também é observado. Essa feição pode indicar que a bolha se comportou de forma plástica, absorvendo a deformação imposta pelo basalto sem se romper. Apesar da progressiva diminuição da temperatura e aprisionamento das bolhas, esta feição sugere que mesmo depois de aprisionadas, as bolhas ainda têm considerável plasticidade, porém mantendo a tensão superficial. Neste estágio, o basalto possui

um alto grau de cristalização, porém ainda apresenta certa fluidez que permite sua movimentação em direção ao interior da bolha.

As brechas com matriz sedimentar e os peperitos indicam que no período de tempo entre a colocação de dois derrames, processos sedimentares se desenvolveram, o que sugere um longo período sem atividades eruptivas na região. A associação destes litotipos com o basalto indica relação genética contemporânea.

5. Discussões

O derrame Salto Segredo é produto de sucessivos extravasamentos de lava, formado durante intensa atividade efusiva. Sua espessura é resultado de repetidas injeções de novos pulsos de lava, de forma lenta e gradual, no material já extravasado.

A porção do derrame aflorante na área estudada corresponde aos lobos inflados de lavas tipo pahoehoe, com estruturação interna composta por crosta superior, núcleo e crosta inferior, de acordo com Macdonald (1953). Segundo definição de Walker (1971), adaptada por Self et al. (1998), o derrame pode ser caracterizado como pahoehoe do tipo composto. Para o último autor, todo derrame simples na verdade é composto, uma vez que os

lobos podem se justapor lateralmente. O derrame pode ser associado aos derrames Tipo II descritos por Gomes (1996), que exibem núcleos maciços diferenciados pelo padrão de fraturas. De acordo com a classificação de Bondre et. al. (2004), o derrame Salto Segredo é do tipo tabular (ou simples), embora o reconhecimento de sucessivos processos de inflamento torne controverso o termo "simples", uma vez que a inflação permite a injeção de novos pulsos de lava em momentos distintos. A classificação de Bondre et. al. (op. cit.) deve ser entendida, portanto, com uma conotação essencialmente morfológica.

O padrão de fraturas e as variações estruturais e texturais indicam que o derrame se resfriou como uma unidade única de lava, das bordas para o interior do corpo. Essa dinâmica é evidenciada pela estruturação interna do derrame, dividida em nível vesicular de base, nível maciço central e nível vesicular de topo.

A presença de zonas vesiculares horizontais (horizontal vesicular zones), amígdalas e geodos achatados, cilindros de vesículas (vesicle cylinders) e lençóis de vesículas (vesicle sheets) sugerem a atuação de processos de inflamento durante a formação do derrame Salto Segredo.

O preenchimento das diferentes populações de amígdalas do nível vesicular de topo pode ocorrer em episódios distintos pós-magmáticos e hidrotermais. O nível vesicular de base conta também com preenchimento por líquido magmático residual.

Reentrâncias de material basáltico em geodos sugerem que mesmo depois de aprisionadas pelo líquido em solidificação, as bolhas mantêm considerável plasticidade, absorvendo a deformação imposta pelo líquido sem se romper.

A ocorrência de brechas com matriz sedimentar e peperitos indica que houve contemporaneidade entre vulcanismo e sedimentação.

Agradecimentos: Os autores agradecem ao CNPq (484323/2006-7) pelo financiamento do projeto de pesquisa, ao Programa de Pós-graduação do Departamento de Geologia da UFPR, à MINEROPAR – Minerais do Paraná S.A. pelo auxílio financeiro e logístico em campo, e à Copel – Companhia Paranaense de Energia pela permissão para trabalhar nas imediações da UHE Salto Segredo.

Referências bibliográficas

ANDERSON A.T., SWIHART G.H., ARTIOLI G., GEIGER C.A. 1984. Segregation vesicles, gas filter pressing, and igneous differentiation. *Journal of Geology* 92 (1): 55–72.

ANDERSON S.W., STOFAN E.R., SMREKAR S.E., GUEST J.E., WOOD B. 1999. Pulsed inflation of pahoehoe lava flows: implications for flood basalt emplacement. *Earth Planet Sci Lett* 168:7–18.

ARIOLI, E.E. 2008. Arquitetura faciológica da seqüência vulcânica e o significado exploratório das anomalias geoquímicas de elementos do grupo da platina (EGP) e metais associados no Sistema Magmático Serra Geral, Estado do Paraná, Brasil. Tese

(Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geologia, Curitiba, PR.

BONDRE N.R., DURAISWAMI R.A., DOLE, G. 2004. Morphology and emplacement of flows from the Deccan Volcanic Province, India. *Bull. Volcanol*, 66:29–45.

CASHMAN K.V., KAUAHIKUA J.P. 1997. Re-evaluation of vesicle distributions in basaltic lava flows. *Geology*, 25:419–422.

FERREIRA C.H.N., RUBINI C., MESQUITA M.J., GOMES M.E.B., BONGIOLO E.M., ARIOLI E.E. 2008. Características estruturais

- de um derrame e estratigrafia da região de Salto Segredo, PR. Bol. IV Simp. Vulc. Amb. Assoc. Foz do Iguaçu, PR.
- GOFF, F. 1996. Vesicle cylinders in vapor-differentiated basalt flows. *Jour. Volcan. Geother. Res.*, 71:167-185.
- GOMES, M.E.B. 1996. Mecanismos de resfriamento, estruturação e processos pós-magmáticos em basaltos da Bacia do Paraná - região de Frederico Westphalen (RS - Brasil). Tese (Doutorado) - CPGeo - Universidade Federal do Paraná, Porto Alegre e Univ. Poitiers, França.
- GOMES M.E.B., FRANK H.T., FORMOSO M.L.L. 2008. Physical volcanology applied to the Amethyst Mining District of Alto Uruguai (Rio Grande do Sul, Brazil). Bol. IV Simp. Vulc. Amb. Assoc. Foz do Iguaçu, PR.
- GREEN J.C., 1989. Physical volcanology of Mid-Proterozoic plateau lavas; the Keweenawan North Shore Volcanic Group, Minnesota. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 486-500.
- GREENOUGH J.D., DOSTAL J., 1992. Cooling history and differentiation of a thick North Mountain basalt flow. *Bulletin of Volcanology*, 55: 63-73.
- HELZ R.T. 1987. Differentiation behavior of Kilauea Iki lava lake, Kilauea Volcano, Hawaii: an overview of past and current work. *Geochemical Society Special Publication 1*: 241-258.
- HELZ R.T., KIRSCHENBAUM H., MARINENKO J.W. 1989. Diapiric transfer of melt in Kilauea Iki lava lake, Hawaii: a quick, efficient process of igneous differentiation. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 578-594.
- KESZTHELYI L., THORDARSON TH., SELF S. 1995. Arguments against the turbulent emplacement of flood basalt lava flows (abstract). IUGG XXI General Assembly Abstracts, A443.
- MACDONALD G.A. 1953. Pahoehoe, a'a' and block lava. *Amer. Journ. Sci.*, 251: 169-191.
- MANGA M., STONE H.A. 1994. Interactions between bubbles in magmas and lavas: effects of bubble deformation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 63: 267-279.
- PHILPOTTS A., CARROL M. 1996. Physical properties of partly melted tholeiitic basalt. *Geology*, 24 (11): 1029-1032.
- ROGAN W., BLAKE S., SMITH I., 1996. In situ chemical fractionation in thin basaltic lava flows: examples from the Auckland volcanic field, New Zealand, and a general physical model. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 74:89-99.
- SELF S., THORDARSON T., KESZTHELYI L., WALKER G.P.L., HON K., MURPHY M.T., LONG P., FINNEMORE S. 1996. A new model for the emplacement of Columbia River basalts as large, inflated pahoehoe lava flow fields. *Geophys. Res. Lett.*, 23: 2689-2692.
- SELF S., KESZTHELYI L., THORDARSON Th. 1998. The importance of pahoehoe. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 26:81-110.
- SISSON T.W., BACON C.R., 1999. Gas-driven filter pressing in magmas. *Geology*, 27 (7): 613-616.
- STEPHENSON P.J., ZHANG M., SPRY M. 2000. Fractionation modelling of segregations in the Toomba Basalt, north Queensland. *Australian Journal of Earth Sciences*, 47 (6): 291-300.
- THORDARSON T., SELF S. 1998. The Roza Member, Columbia River Basalt Group: A gigantic pahoehoe lava flow field formed by endogenous processes. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 103 (B11): 27411-27445.
- WAICHEL B.L. 2006. Estruturação de derrames e interações lava-sedimento na porção central da Província Basáltica Continental do Paraná. CPGeo - UFRGS, Tese de Doutorado, Porto Alegre.
- WALKER G.P.L. 1969. Some observations and interpretations on the Deccan Traps. In: SUBBARAO, K.V. (ed.). *Deccan Volcanic Province: Mem. Geol. India*, 43 (1):367-395.

Manuscrito ID 15205
 Submetido em agosto de 2009
 Aceito em março de 2011