

DESCRIÇÃO DAS OCORRÊNCIAS II. ASPECTOS GEOLÓGICOS E PETROGRAFIA DA ASSOCIAÇÃO ALCALINA-CARBONATÍTICA DE PIEDADE (APS), SÃO PAULO

E. Ruberti, C. B. Gomes, R. G. Azzone,
V. Aps e J. S. Bettencourt

Resumo

Uma nova ocorrência de carbonatito foi registrada na região de Piedade, no Vale do Ribeira, estado de São Paulo. A descoberta foi resultado de um programa de prospecção geofísica e sondagens por perfuração realizado pela empresa APS Mineração Indústria e Comércio Ltda. numa área conhecida pela ocorrência de shonkinitos (melassienitos) intrusivos ricos em fosfato. Os testemunhos de sondagem até a profundidade de 551 m mostraram que, associados a esses melassienitos, estão presentes importantes corpos carbonatíticos, compondo uma estrutura formada por um conjunto de venulações e diques de espessura variada que intercalam entre si e com fenitos encaixantes em proporções diversas. Os melassienitos são rochas de textura inequigranular, seriada a porfirítica, não raramente traquíticas, com macrocristais de apatita, clinopiroxênio e biotita em matriz dominada por feldspato alcalino, com presença subordinada de nefelina, magnetita, anfibólio e titanita. Os carbonatitos são mineralogicamente constituídos por calcita e mais raramente por dolomita ou siderita. Calcita carbonatitos compõem-se em geral de mais de 95% de calcita e, subordinadamente, de flogopita, magnetita e apatita. Dolomita carbonatitos contêm dolomita, abundante quantidade de barita e magnetita, bem como biotita cloritizada. Calcita-siderita carbonatitos possuem coloração escura, com manchas ferruginosas e textura equigranular média a fina, sendo formados essencialmente de siderita e de calcita em menor quantidade. De modo subordinado, ocorre um agregado de opacos e minerais tardios como clorita e enigmatita. As manifestações tardias acham-se representadas por veios milimétricos de minerais como quartzo, fluorapatita e barita, além de anfibólio, clorita e raros fluorocarbonatos de terras raras e fluorita, percolando as rochas carbonatíticas e os fenitos encaixantes.

4.1. Introdução

Informações sobre a existência de rochas alcalinas na região de Piedade, no Vale do Ribeira, remontam ao trabalho preliminar de Knecht (1960), que descreveu, pela primeira vez, a presença de variedade de sienito melanocrático classificado como shonkinito (rocha porfirítica com macrocristais de biotita, egirina-augita, apatita e raro ortoclásio em massa fundamental reunindo os mesmos minerais, além de nefelina) em diques aflorando às margens do rio Sarapuí, no km 113 da estrada que liga Piedade a Juquiá, nas proximidades do bairro dos Soares. Poucos anos depois, um concentrado de biotita de amostra dessa rocha foi objeto de datação geocronológica pelo método K-Ar por Amaral *et al.* (1967), com resultado que indicou para a ocorrência alcalina uma idade do Cretáceo Inferior de 121,8 Ma, depois recalculada para $124,7 \pm 3,5$ Ma por Sonoki e Garda (1988).

Piedade dista aproximadamente 98 km da cidade de São Paulo, sendo mais facilmente acessível pela rodovia Raposo Tavares (SP-270) até Vargem Grande Paulista, seguindo-se daí pela rodovia Bunjiro Nakao (SP-250) que conduz a Ibiúna e, depois, a Piedade (Figura 4.1). Ainda que a ocorrência fosse, como, aliás, continua sendo, pouco conhecida do ponto de vista geológico, Felicíssimo Jr. (1968), em trabalho de revisão sobre os carbonatitos do estado de São Paulo, procurou chamar a atenção para a possível presença dessa litologia na área. Entretanto, a confirmação somente viria muito tempo depois por meio de programa de sondagem, uma vez que as condições de intemperismo são muito intensas em toda a região, impossibilitando a amostragem de rochas frescas.

A descoberta de um corpo carbonatito fosfático de grande potencial nas imediações de Piedade, numa propriedade conhecida como Recanto do Sabiá, foi noticiada por Aps (2010), ainda que na ocasião o autor não dispusesse de dados comprobatórios de suas reais dimensões e importância metalogenética. No ano seguinte, a empresa APS Mineração Indústria e Comércio Ltda. deu início a um programa sistemático de pesquisa na área para minérios de fosfato, barita e calcita, envolvendo sondagens a trados mecanizados e sondagens rotativas profundas. Além disso, promoveu a reinterpretação de dados aerogeofísicos magnetométricos e gamaespectrométricos pertencentes ao acervo da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) referente ao Levantamento Aerogeofísico São Paulo-Rio de Janeiro de 1979 e à execução de levantamentos por gravimetria e gamaespectrometria terrestres.

O conjunto desses resultados foi de imensa valia, com o acesso às amostras provenientes dos testemunhos de sondagem permitindo o estudo mineralógico, petrográfico e geoquímico da ocorrência e os dados geofísicos contribuindo para a definição dos corpos magmáticos presentes. Quando reunidas, essas informações levaram à caracterização inequívoca de uma nova ocorrência carbonatítica no estado de São Paulo, associada geologicamente aos melassienitos acima referidos, e cuja descrição mais pormenorizada é aqui fornecida pela primeira vez.

A presença de rochas alcalinas, com ou sem carbonatitos associados, na região do Vale do Ribeira, de controle tectônico pelo Arco de Ponta Grossa, tem merecido a atenção de pesquisadores há longo tempo, com a literatura trazendo um grande número de contribuições sobre as muitas ocorrências conhecidas e sobre os seus mais variados aspectos, como indicado nos trabalhos recentes de revisão de Ruberti *et al.* (2005) e Gomes *et al.* (2011a). Jacupiranga, Juquiá e Ipanema são as intrusões mais bem investigadas e integram o conjunto das ocorrências do Cretáceo Inferior (idade de referência 130 Ma), no qual Piedade muito possivelmente está incluída.

Como o termo Piedade já se encontra há muito incorporado à literatura geológica (Knecht, 1960; Amaral *et al.*, 1967; Felicíssimo Jr., 1968; Woolley, 1987; Gomes *et al.*, 1990, 2011a, 2018a; Ruberti *et al.*, 2005; Gomes e Comin-Chiaramonti, 2017), é aqui proposta a adição do nome APS à ocorrência, como uma justa e merecida homenagem ao engenheiro de minas

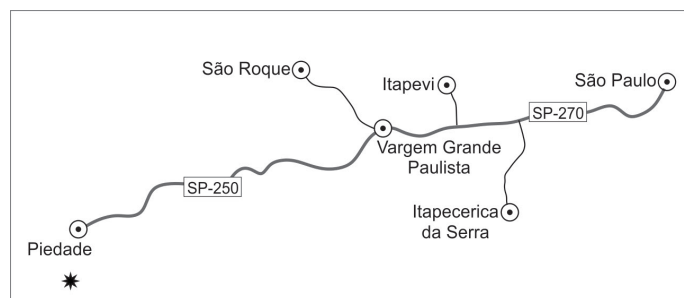


Figura 4.1. Localização e vias de acesso ao complexo alcalino-carbonatítico de Piedade a partir de São Paulo. *UTM E 250989 e UTN 7365515, coordenadas próximas à região central do corpo carbonatítico.

Vladimir Aps e seu filho engenheiro Thomas H. Aps, responsáveis pelos trabalhos pioneiros que conduziram à descoberta desse novo complexo carbonatítico em território paulista.

4.2. Geologia

4.2.1. *Encaixantes Regionais*

A área de ocorrência dos corpos intrusivos de carbonatito e variedades sieníticas associadas é formada por rochas granitoides pertencentes ao maciço granítico de Piedade. Estudado em detalhes por Leite (1997) e Leite *et al.* (2006, 2007), é um corpo batolítico subcircular (~100 km²), com seu eixo maior levemente orientado na direção N45E. Destaca-se pelo zonamento concêntrico, evidenciado por importante variação faciológica e grande diversidade mineralógica, textural e geoquímica. O maciço reúne duas associações petrográficas distintas: 1) peraluminosa (portadora de muscovita e monazita), composta por granodioritos e monzogranitos porfiríticos foliados distribuídos ao longo das faixas de borda da intrusão e 2) metaluminosa (contendo titanita e allanita), representada por biotita monzogranitos a sienogranitos inequigranulares presentes nas suas zonas intermediárias e centrais. Enclaves microgranulares máficos a intermediários são frequentes, sugerindo interações entre distintos magmas contemporâneos. Segundo Janasi *et al.* (2001), o maciço é o mais primitivo dos plútons tardi-orogênicos da região, com idades de cristalização U/Pb no intervalo 600-605 Ma.

No contexto geotectônico, a região de Piedade acha-se inserida no terreno Apiaí-Guaxupé, agrupando terrenos de arco magmático desenvolvidos às margens do cráton Paranapanema (Leite *et al.*, 2007).

4.2.2. *Intrusivas Alcalina e Carbonatítica*

O complexo alcalino-carbonatítico de Piedade consiste em um sistema de pequenos corpos intrusivos na forma de diques e veios de dimensões variadas, constituídos por carbonatitos e melassienitos, além de um possível corpo elíptico aparentemente maior de biotita melassienito (shonkinito), descrito por Knecht (1960). Em toda sua extensão acha-se circundado por rochas graníticas fenitizadas do maciço de Piedade. No contexto regional, o complexo, ao lado das ocorrências alcalino-carbonatíticas de Ipanema, Tatuí e Itanhaém, se dispõe segundo um alinhamento NW, denominado de alinhamento Piedade por Riccomini *et al.* (2005), e interpretado como uma feição tectônica de orientação geral NW-SE, paralela ao lineamento Guapiara do Arco de Ponta Grossa.

As novas informações geológicas sobre a ocorrência de Piedade têm por base os dados virtuais de levantamento geofísico por gravimetria e magnetometria ali efetuado e, sobretudo, os estudos dos testemunhos de sondagem.

Esporadicamente, blocos dispersos são encontrados numa colina localmente conhecida como Morro do Ferro (ou Morro da Coroa), na margem direita do rio Sarapuí, associados a crostas limoníticas acamadadas com graus variáveis de silicificação (Leite, 1997). As rochas originais desses blocos, amostradas e investigadas por Knecht (1960), correspondem a biotita shonkinitos (melassienitos), de composição mineralógica e petrográfica similar às variedades mencionadas por Leinz (1940) no complexo carbonatítico vizinho de Ipanema. Knecht (1960) descreveu esses blocos como formados a partir de pequenos diques, enquanto Felicíssimo Jr. (1968) considerou-os como associados a uma pequena intrusão de forma elíptica (eixos 850 vs. 300 m), orientada segundo EW, tendo o Morro da Coroa como ponto culminante (1070 m de altitude). Essa interpretação é compartilhada por Leite (1997), que estimou para esse corpo uma área de

~1,2 km². Sedimentos aluvionares recentes são também comuns ao longo das drenagens da região. Por outro lado, as informações de campo e perfis de sondagem indicam a presença de solos lateríticos avermelhados, em alguns locais mosqueados com tons claros, e silicosos.

Os trabalhos geofísicos conduzidos por Aps (2010), divulgados em capítulo do livro *Projeto Fosfato Brasil – Parte I* (Andrade e Ferrari, 2011), possibilitaram o reconhecimento de uma anomalia na região de Piedade como sendo de carbonatito (Figuras 4.2A e 4.2B). A figura 4.2A mostra o mapa de levantamento aerogeofísico com respostas magnetométricas e gamaespectrométricas, distinguindo-se quatro anomalias: A2, correspondente ao carbonatito (confirmado na ocasião a partir de trabalhos de perfuração), e A1, A3 e A4. Estas últimas apresentam características magnéticas que são interpretadas como comparáveis às de rochas alcalinas similares àquelas da anomalia anterior.

Dessas três destaca-se principalmente a A4, alongada, sugerindo a existência de corpos lenticulares encaixados em zonas de falhas, de orientação NE-SW e extensão regional. A dimensão dessa anomalia indica um corpo de, no mínimo, 3,5 km de comprimento e 600 m de largura, incluindo parte aflorante a subaflorante. Contudo, pesquisas futuras ainda se fazem necessárias para uma melhor definição do significado dessas anomalias.

A figura 4.2B mostra um mapa de anomalia gravimétrica Bouguer completa, evidenciando uma anomalia gravimétrica negativa muito forte (~87,2 mGal), com forma aproximadamente circular, que cobre a área de ocorrência do carbonatito (anomalia A2).

No presente trabalho foram investigados cerca de 1350 m de testemunhos de sondagem procedentes de quatro perfurações contendo rochas frescas, dentre as treze executadas pela APS Mineração Indústria e Comércio Ltda., além de outras centenas de metros de antigas perfurações efetuadas pela Serrana S/A, porém excluídas em função do estado de alteração.

As evidências observadas nos testemunhos de sondagem, em níveis abaixo do manto laterítico, mostram uma estruturação composta por uma rede de diques e filões centimétricos a métricos e massas de volume maior formando corpos irregulares, tanto de carbonatitos como de melassienitos, intercalados entre si em proporções variadas e em contato com granitos encaixantes modificados

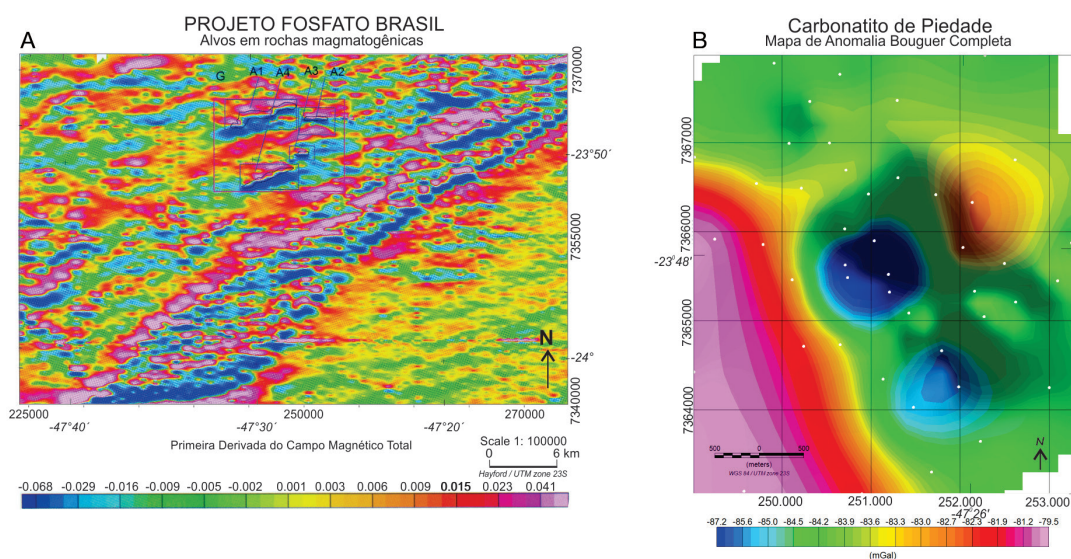


Figura 4.2. A) Mapa de anomalias geofísicas por magnetometria com assinatura de corpos alcalino-carbonatíticos na região de Piedade. Destacam-se as anomalias A1, A2, A3 e A4 registradas, sendo a A2 correspondente ao corpo carbonatítico (Andrade e Ferrari, 2011). B) Mapa de anomalia gravimétrica Bouguer completa da região de ocorrência do carbonatito principal A2, com posição das estações de medida (R. Cordani e R.P.Z. Santos, em preparação).

por processos de fenitização de diferente intensidade. Veios tardi-magmáticos e/ou hidrotermais portadores de minerais como quartzo, apatita e barita, por exemplo, percolam os carbonatitos e os fenitos encaixantes. Os fenitos e as rochas fenitizadas estão presentes em todos os furos e são reconhecidos desde os níveis mais rasos aos mais profundos, chegando a atingir até 500 m.

As figuras 4.3A e 4.3B mostram as variações petrográficas ao longo de dois perfis geológicos (A-A' e B-B') traçados a partir de oito furos de sondagem efetuados no corpo carbonatítico principal (A2), também referido como Aps. Os dados apontam para a existência de um manto de alteração profundo, com espessura que pode ocasionalmente atingir até 200 m, composto em sua totalidade por solo laterítico e em menor extensão silicoso, além da presença de horizontes contínuos ou intercalações de rochas alcalinas (biotita melassienitos e fenitos). No furo APS-08 do perfil A-A', a espessura aparente do horizonte de biotita melassienitos é superior a 100 m. Entretanto, essa espessura pode não expressar a real possança do corpo, considerando a impossibilidade de controle da forma e inclinação da estrutura em relação ao furo de sondagem. Já os carbonatitos ocorrem mais comumente como corpos venulares pouco espessos ou, por vezes, na forma de apófise com algumas dezenas de metros de extensão.

O mapa geológico que instruiu o pedido de pesquisa aos órgãos competentes (Figura 4.4), baseado em dados geofísicos (Figuras 4.2A e 4.2B) e de sondagem, além de informações a partir de furos de trados, sugere a existência de uma intrusão alcalina principal de contorno subcircular, que se eleva acima de 1040 m, bem como de um corpo carbonatítico, alongado para NW, ocupando predominantemente o seu quadrante sudoeste. Na figura, o carbonatito aparece circundado por biotita melassienitos e fenitos, enquanto a intrusão alcalina se apresenta inteiramente encaixada em rochas graníticas. A integração de dados de sondagem e geofísicos (gravimetria e gamaespectrografia) levou à caracterização de três domínios geológicos na intrusão (Figura 4.2A), em que a feição marcante, como resultado da interpretação gravimétrica, reside na ampliação da área presumivelmente ocupada pelo corpo carbonatítico.

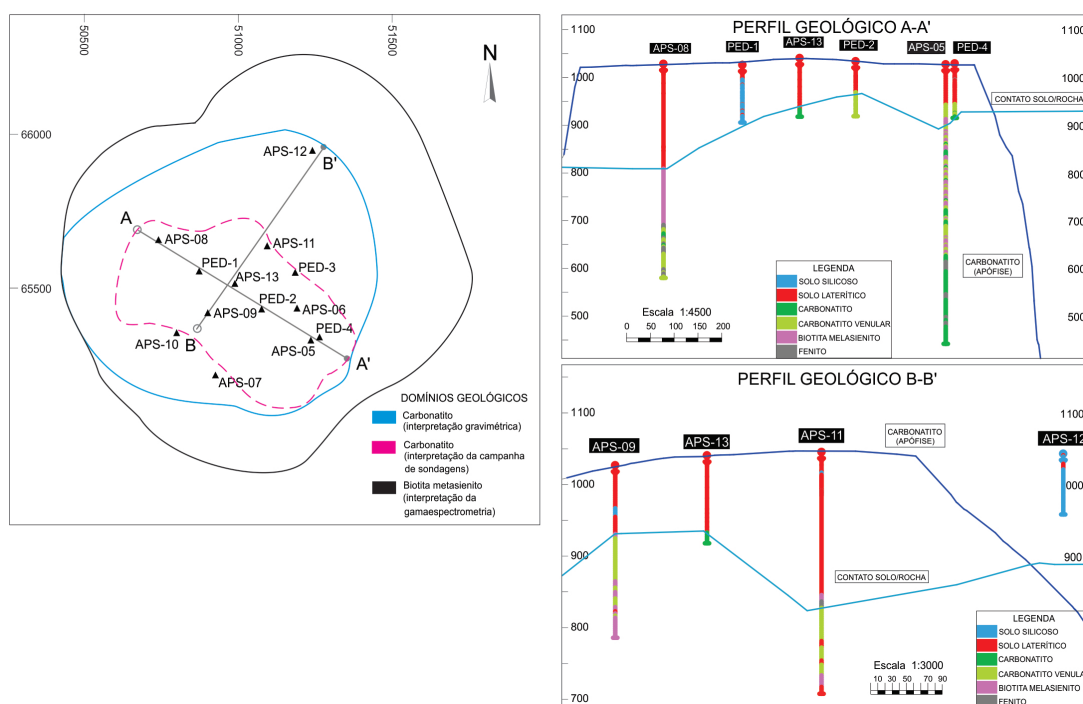


Figura 4.3. A) Perfis A-A' e B-B' no corpo carbonatítico principal com a localização dos furos de sondagem. B) Perfis geológicos A-A' e B-B' no corpo carbonatítico principal reunindo informações litológicas para diferentes furos de sondagem (Aps, 2010).

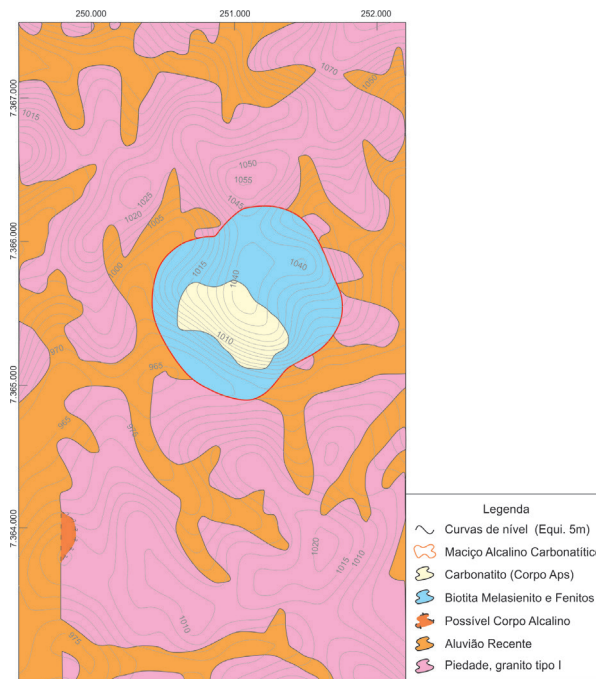


Figura 4.4. Esboço geológico da área de ocorrência do carbonatito principal A2 (simplificada de Aps, 2010).

4.3. Petrografia

A partir de um conjunto de lâminas delgadas de amostras de rochas da associação alcalina-carbonatítica de Piedade e das encaixantes graníticas, foi feita uma análise petrográfica minuciosa das variações texturais e das fases mineralógicas principais, visando estabelecer a sequência petrológica e os processos que atuaram na evolução do complexo.

O complexo de Piedade é composto por uma associação litológica representada por rochas silicáticas de natureza sienítica e carbonatitos. A existência de processos de fenitização junto às encaixantes, tanto as rochas graníticas do maciço de Piedade que envolvem o complexo como um todo como também as rochas alcalinas silicáticas associadas aos carbonatitos, se constitui em uma de suas feições mais expressivas.

A nomenclatura usada para a classificação petrográfica das rochas seguiu as recomendações propostas pela União Internacional de Ciências Geológicas (IUGS, na sigla em inglês) publicadas por Le Maitre (2002). O termo carbonatito, como definido por Streckeisen (1978, 1979), foi aplicado somente para rochas contendo mais de 50% de minerais carbonatos modais. Para os carbonatitos calcíticos, optou-se pela utilização dos termos calcita carbonatitos, enquanto para os dolomíticos e para aqueles formados por carbonatos ricos em ferro empregaram-se, respectivamente, os termos dolomita carbonatitos e siderita carbonatitos. Para os carbonatitos tardios, não considerados no sistema de classificação da IUGS, recorreu-se à nomenclatura sugerida por Kapustin (1980). Para as rochas que apresentam transformações metassomáticas alcalinas, foram usados os termos gerais fenito e rocha fenitizada, em conformidade com o significado estabelecido respectivamente, por Brøgger (1921), Von Eckermann (1948) e contemplados na revisão de Elliot *et al.* (2018).

O estudo microscópico das amostras permitiu confirmar que o complexo de Piedade consiste em sua quase totalidade de melassienitos e carbonatitos de granulação grossa a fina, sendo os últimos representados essencialmente por variedades calcíticas; os tipos dolomíticos e sideríticos são aparentemente de menor expressão. Feição digna de destaque é a intensidade

da atividade tardi a pós-magmática responsável por denso sistema de venulação que percola principalmente os carbonatitos, provocando importantes modificações texturais e mineralógicas na rocha, como o aparecimento de apatita, barita e quartzo.

Adicionalmente às litologias acima estão também associadas rochas fenitizadas, como resultado da interação de fluidos metassomáticos geneticamente relacionados a manifestações magmáticas de caráter alcalino e/ou carbonatítico com protolitos principalmente associados às encaixantes.

Os dados mineralógicos obtidos decorreram de estudos conduzidos em amostras frescas de testemunhos de sondagem até a profundidade de 531,38 m. Foram examinadas ao microscópio cerca de quarenta lâminas delgadas de carbonatitos e de rochas silicáticas associadas (biotita melassienitos e fenitos). Além disso, algumas amostras foram pulverizadas e analisadas por difração de raios X (Figura 4.5). As amostras frescas mais superficiais foram coletadas a uma profundidade superior a 100 m.

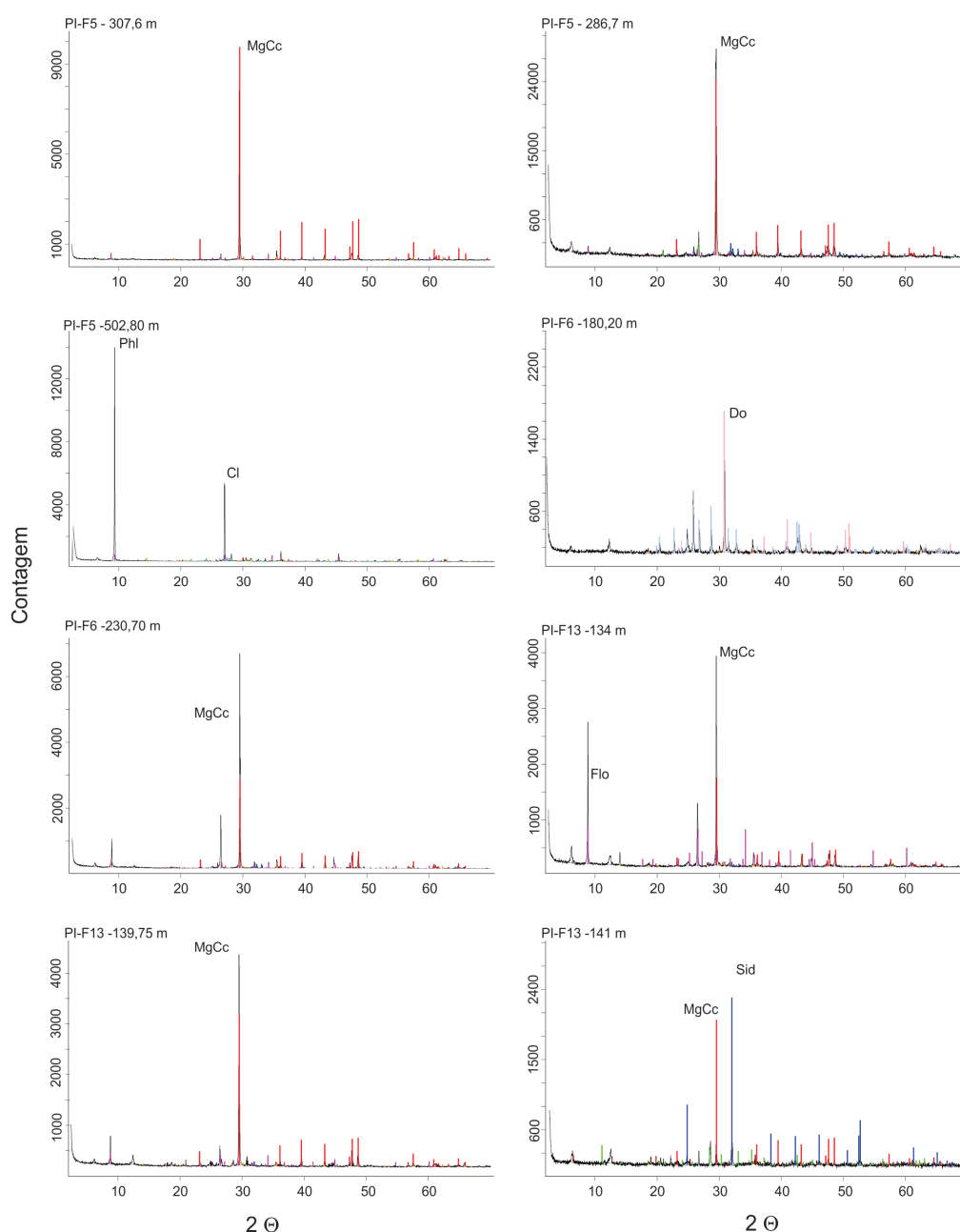


Figura 4.5. Espectros de difração de raios X de amostras de carbonatitos e biotita melassienitos de Piedade. Abreviações: MgCc, calcita com magnésio; Cl, clorita; Do, dolomita; Flo, flogopita; Sid, siderita.

4.3.1. Carbonatitos

Em geral, os carbonatitos são de coloração cinza-esbranquiçada a branca, trazendo frequentemente manchas cinza-escuras em virtude de concentrações variáveis, às vezes elevadas, de flogopita e minerais opacos. Exibem comumente granulação média, com variedades média-fina a fina, intercalando-se por vezes ou gradando para as primeiras. Compõem-se na quase totalidade de carbonatos (70% a >95% modal) e de quantidades variáveis, em especial de flogopita, magnetita e apatita. Os dados de difração de raios X (Figura 4.5) indicam que os carbonatos são representados majoritariamente por calcita com magnésio e, de modo subordinado, por dolomita ou siderita. Entre as diversas variedades texturais, os calcita carbonatitos constituem o litotipo mais abundante. Predominam largamente em todos os furos investigados, e ainda competem com ampla superioridade com os dolomita carbonatitos reconhecidos no furo 6 (profundidade de 180,20 m), aparentemente na forma de uma venução entre melassienitos e calcita carbonatitos, assim como com os calcita-siderita carbonatitos no furo 13, representando um nível abaixo dos calcita carbonatitos, porém na porção final alcançada pela perfuração, a uma profundidade de 141 m, portanto com possibilidades de se estender para profundidades maiores.

4.3.1.1. Calcita carbonatitos

Ao microscópio, os calcita carbonatitos exibem textura granular média a grossa, caracterizada por cristais equidimensionais ou alongados de carbonato, com dimensões que variam de submilimétricas a milimétricas. Apresentam ampla granularidade, desde equigranular até inequigranular seriada, xenomórfica a hipidiomórfica, às vezes maciça em arranjo de mosaico ou, ainda, orientada segundo o eixo de grãos alongados justapostos entre si.

São rochas bastante homogêneas e com frequência praticamente unimineralicas, consistindo em mais de 95% de carbonatos, representados por calcita com magnésio. Subordinadamente, ocorrem flogopita, magnetita e apatita, além das fases tardi-magmáticas apatita, barita, quartzo e egirina, presentes em interstícios dos minerais e nos veios. Em alguns casos, verifica-se a existência de quantidade expressiva de flogopita e/ou magnetita (>10% vol.), caracterizando os tipos petrográficos flogopita-magnetita-calcita carbonatitos e magnetita-calcita carbonatitos.

Calcita com magnésio forma cristais irregulares, límpidos ou turvos, em razão de alterações incipientes, sem geminação e tampouco estruturas de exsolução. As dimensões dos cristais variam ao redor de 1,5 mm nas rochas equigranulares e de 0,05 a 2 mm nas inequigranulares. Os grãos mais desenvolvidos exibem com frequência evidências de deformações reticulares e até mesmo de recristalização, com o desenvolvimento de bandas nas bordas dos cristais de granulação mais fina. Por vezes, nota-se num mesmo grão descontinuidade cristalina, com extinção setorial.

Flogopita é o principal mineral máfico dessas rochas, com variações modais de 3% a 15%. Ocorre como cristais idiomórficos a subidiomórficos, de coloração marrom-avermelhada e pleocroísmo forte e frequentemente invertido (Figura 4.6A; F5-307,60 m), com X vermelho-sangue, e Y e Z marrom-amarelado ($X > Y \sim Z$). O mineral é abundante em algumas amostras, ocupando, sobretudo, os espaços intersticiais, bolsões ou bandas onde predominam a textura orientada. Ali, os cristais são alongados, com 0,3 a 4 mm de comprimento, e associados a venulações tardias ou pós-magmáticas.

Minerais opacos acham-se presentes em quantidades apreciáveis na maioria das amostras investigadas, com variações modais de 3% até 15%. Os espectros de difração de raios X (Figura 4.5) indicam tratar-se de magnetita. Ocorrem junto aos carbonatos, inclusos ou intersticiais,

como grãos subidiomórficos a xenomórficos, às vezes idiomórficos, com dimensões compreendidas entre <1 e 5 mm. Em algumas amostras mostram-se alterados e substituídos, nas bordas dos cristais, por um agregado criptocristalino de coloração amarelo-alaranjada, provavelmente contendo hematita, goethita etc.

Apatita ocorre em quantidade variável, sendo frequentemente representada por fluorapatita. Em geral, está presente em quantidades menores quando alojada nos interstícios dos grãos, tornando-se, porém, mais abundante quando associada com o quartzo oriundo de cristalização tardia ou pós-magmática. No primeiro caso, aparece como cristais subidiomórficos, incolores, às vezes apresentando as bordas substituídas por carbonatos. No segundo, a fluorapatita exibe cristais idiomórficos a xenomórficos, límpidos, incolores a levemente escurecidos em sua parte central em razão de numerosas inclusões orientadas segundo o alongamento do cristal. O mineral forma prismas curtos de até 0,2 mm nas seções basais e 2 mm nas prismáticas.

4.3.1.2. Dolomita carbonatitos

São representados por uma variedade de coloração clara, branca a acinzentada, e granulação variável de média a fina. Os dolomita carbonatitos apresentam estrutura orientada a levemente bandada em função da variação modal e da granulação dos minerais, particularmente dos acessórios. Ao microscópio, mostram variações texturais e mineralógicas expressivas, com gradação de banda mais grossa para média até fina, que se faz acompanhar, nessa ordem, pelo empobrecimento das fases acessórios. Compõem-se essencialmente de dolomita, tendo como acessórios abundantes quantidades de barita e magnetita, além da presença menor de biotita cloritizada.

Dolomita é o único carbonato presente revelado nos difratogramas, correspondendo a cerca de 70% a 80% das fases constituintes. Cristaliza-se como grãos xenomórficos a subidiomórficos de granulometria variável, de <0,1 a 1 mm, com as porções mais finas exibindo textura do tipo sacaroide. Nas bandas mais grossas, os cristais apresentam geralmente deformações reticulares e recristalização, com o desenvolvimento nas bordas de textura granular bem fina. Nota-se num mesmo grão descontinuidade cristalina, com extinção irregularmente definida, dando aspecto de agregado fino de minerais justapostos a um núcleo maior remanescente.

Barita acha-se presente em quantidades significativas nos dolomita carbonatitos, chegando a alcançar até 23% em volume. O mineral é muito abundante e bem desenvolvido nas bandas mais grossas; já nas porções mais finas ele é pouco frequente. É de ocorrência disseminada nos carbonatos, ocupando os seus interstícios e frequentemente envolvendo-os como enormes cristais lamelares subidiomórficos a xenomórficos. Esses possuem dimensões variáveis, de <1,2 mm nas áreas finas e até 4 mm nas mais grossas, e se comportam como um mineral de textura poiquilítica.

Magnetita ocorre em quantidades apreciáveis, atingindo até cerca de 4% em volume. Aparece como grãos subidiomórficos a xenomórficos, às vezes idiomórficos, com dimensões compreendidas entre <0,4 nas bandas finas e até 1,1 mm nas mais grossas, disseminados nos carbonatos como inclusões ou de formação intersticial.

Biotita é um componente restrito, presente na forma de grãos xenomórficos, com pleocroísmo na cor marrom, claro ou escuro, estando quase sempre parcial ou inteiramente cloritizado.

4.3.1.3. Calcita-siderita carbonatitos

Esse tipo petrográfico foi encontrado no furo de sondagem PI13, na profundidade de 141 m. Nos testemunhos de sondagem, representa o final do furo e encontra-se pouco abaixo

de um corpo de flogopita-calcita carbonatitos, recortado por densa venulação tardia e descrito no nível 139,75 m. Os calcita-siderita carbonatitos possuem coloração cinza-escura com manchas ferruginosas devidas principalmente à concentração de óxido de ferro. Ao microscópio, exibem textura granular hipidiomórfica, média a fina, caracterizada pela presença de cristais equidimensionais ou alongados de carbonatos, com dimensões submilimétricas a milimétricas. Em adição aos carbonatos, contêm subordinadamente um agregado reunindo opacos e minerais tardi a pós-magmáticos, como clorita e enigmatita, por exemplo.

Os carbonatos constituem a parte essencial da rocha, sendo representados por concentrações modais de cerca de 42% de siderita e 38% de calcita com magnésio. Esses minerais cristalizam-se como grãos xenomórficos a subidiomórficos, com dimensões entre <0,4 e 1,5 mm. Em geral, são bastante turvos em virtude de alterações pós-magmáticas.

A fase opaca está presente em quantidade menor, sendo representada por magnetita (~2% modal). Ocorre como grãos subidiomórficos a xenomórficos disseminados nos interstícios dos carbonatos. Em muitos casos, mostra-se fortemente alterada e substituída parcial ou totalmente por um agregado criptocristalino de óxidos de ferro vermelho-sangue a amarelo-alaranjado contendo hematita, goethita, limonita etc.

Clorita ocorre em proporções expressivas, disseminada na forma de denso e extenso agregado criptocristalino que se concentra nos interstícios das fases carbonáticas e se espalha pela rocha originando uma textura com aspecto de rede. Esse agregado exibe coloração que varia de esverdeada a amarelo-alaranjada, provavelmente correspondendo a uma associação mineralógica que contém outras fases, entre as quais estão incluídas hematita, goethita, além de outras derivadas da alteração da magnetita.

Enigmatita foi identificada por microscopia óptica e confirmada por difração de raios X como uma fase de ocorrência expressiva nesse tipo de rocha. O mineral aparece na forma de um agregado fino sempre associado à magnetita, às vezes substituindo-a quase inteiramente, e contendo pequenos relictos em meio ao mineral pós-magmático. O mineral é isótropo e exibe coloração extremamente escura, com variações de vermelho muito escuro a quase preto (Figura 4.6B; F13-141 m), às vezes pouco se distinguindo dos opacos.

4.3.1.4. Carbonatitos com venulações tardias

A mineralogia original dos carbonatitos gerados no evento magmático de Piedade se mostra, pelo menos em parte, modificada por processos de atividade tardi a pós-magmática. Nos testemunhos de sondagem, os carbonatitos estão frequentemente infiltrados por pequenos veios com espessuras submilimétricas a milimétricas, que se concentram ao longo de fraturas ou entre os grãos minerais segundo direções diversas. A composição dessas vênulas é variável, podendo ser mais ou menos enriquecida em quartzo, apatita ou vários outros minerais.

Ao microscópio, essas rochas são heterogêneas e apresentam variações mineralógicas e texturais acentuadas, caracterizando duas áreas petrograficamente distintas. A primeira corresponde ao carbonatito hospedeiro parcialmente reequilibrado, com passagem gradativa de bandas mais grossas para mais finas decorrentes de processos de recristalização de minerais carbonatos originais, principalmente nas vizinhanças dos veios. Em geral, os carbonatos são xenomórficos e límpidos, em particular os de granulação fina, evidenciando o caráter essencialmente calcítico de sua composição original. A segunda área refere-se às venulações, com minerais de granulação variável desde média a muito fina, às vezes exibindo textura tipicamente poiquilítica. Compõe-se de quantidades muito variáveis de quartzo, apatita, barita e

magnetita, além de clorita, egirina e outras fases pouco expressivas. Ressalte-se que, entre um veio e outro ou uma amostra e outra, observam-se grandes variações nas proporções modais desses minerais.

Quartzo é o mineral mais comum e aparece na forma de uma massa opticamente contínua de agregado mais fino pavimentoso ou mesmo de grãos com hábito fibroso. A sua concentração é muito variável, ora como um componente quase unimineralico do veio, ora se mostra ausente. Nas amostras investigadas, o mineral tem pequena importância.

Apatita ocorre nesses veios em quantidades apreciáveis, podendo variar em proporções modais desde praticamente ausente a cerca de 90%. Os cristais são incolores e límpidos, porém, apresentam-se por vezes turvos devido à presença de inclusões fluidas. São idiomórficos a subidiomórficos, com dimensões geralmente submilimétricas, quando muito milimétrica. Em alguns casos, eles desenvolvem formas de trapézio isósceles justapondo-se num arranjo em leque. Os dados de difração de raios X (Figura 4.5) revelaram uma composição de fluorapatita.

Barita representa outra fase tardia expressiva. Foi reconhecida em poucas amostras, mas pode estar presente em quantidades apreciáveis. Nos dolomita carbonatitos, os espectros de difração de raios X acusaram teores modais de 23% em volume. O mineral ocorre como cristais incolores idiomórficos a subidiomórficos, hábito lamelar e dimensões de até 4 mm no alongamento; aparece também como agregado granular intersticial.

Óxidos de ferro são disseminados nos veios e nos interstícios minerais, aparecendo na forma de um agregado criptocristalino derivado da alteração de opacos, sobretudo da magnetita. São de coloração amarelo-alaranjada, vermelho-sangue e marrom, e correspondem a um conjunto de fases entre as quais se incluem provavelmente hematita e goethita.

De presença restrita a alguns calcita carbonatitos, egirina aparece com maior destaque no furo F13 junto aos magnetita-flogopita-calcita carbonatitos (profundidade 134 m) e flogopita-calcita carbonatitos (profundidade 139,75 m). É um mineral tipicamente tardio, intersticial, que se apresenta na forma de pequenos cristais prismáticos (<0,15 mm), às vezes reunidos em agregados, com pleocroísmo fraco nas cores verde-pálido a incolor.

Fluorocarbonatos com elementos terras raras (bastnäsita) são constituintes mais escassos, tendo sido a sua presença registrada por difração de raios X apenas nos flogopita-calcita carbonatitos do furo F13, na profundidade citada acima.

Fluorita é também um mineral ocasional e reconhecido apenas numa única amostra de calcita carbonatito.

4.3.2. *Melassienitos*

As rochas melassieníticas associadas aos carbonatitos têm ampla distribuição espacial, sendo identificadas em testemunhos de sondagem de todas as perfurações mais profundas que cortam as encaixantes graníticas. Foram descritas amostras presentes em vários níveis de profundidade nos furos F5 (intervalo entre 346 e 512 m) e F6 (entre 225 e 256 m). Macroscopicamente, exibem típica coloração cinza-escura, granulação variável de grossa a média-fina e, respectivamente, maior riqueza em minerais máficos e félsicos. Essas rochas foram inicialmente classificadas como shonkinitos por Leinz (1940) e Knecht (1960), contudo, se empregada a classificação petrográfica da IUGS (Le Maitre, 2002), elas seriam mais apropriadamente definidas como melassienitos.

Ao microscópio, os melassienitos são rochas meso a melanocráticas ($M' > 35\%$), subidiomórficas até idiomórficas, com textura variável de inequigranular seriada (Figura 4.6C; F5-

502,80 m) a tipicamente porfirítica, não raramente traquítica. Compõem-se de megacristais euedrais e subeudrais de clinopiroxênio, biotita, anfibólio e apatita imersos em matriz fina consistindo essencialmente em feldspato alcalino, com nefelina subordinada, que se mostra em geral substituída por zeólitas, magnetita, anfibólio, titanita e outros.

Clinopiroxênio está invariavelmente presente em todas as amostras examinadas e, em geral, em concentrações expressivas. Usualmente, forma megacristais euedrais com dimensões de até 1,80 mm na secção basal e até 2,20 mm ao longo da prismática. Corresponde a uma hedenbergita, incolor a fracamente pleocroica, com as tonalidades passando de amareladas a levemente esverdeadas. Estruturas zonadas são comuns, com as bordas dos cristais exibindo cor verde-escura e composição egirínica. Adicionalmente, ocorre também uma fase tardia com características de egirina, representada por cristais aciculares incolores a verdes.

Anfibólio é um constituinte de presença limitada, aparecendo em algumas amostras na forma de agregados radiais de pequenos prismas intersticiais à matriz e, na maioria das vezes, substituindo parcialmente os cristais de clinopiroxênio junto às bordas e ao longo de fraturas e clivagens. É uma variedade de birrefringência baixa e coloração variável de cinza-escura a levemente lilás ou esverdeada.

Biotita é um mineral essencial e presente principalmente como megacristais idiomórficos, com dimensões de até 2,8 mm de comprimento. Representa uma variedade com pleocroísmo geralmente normal em tonalidades de X castanho-clara a alaranjada e Z~Y amarronzada a marrom-escura. Estruturas zonadas são comuns, com as porções centrais dos cristais mostrando manchas mais claras.

Fluorapatita é um componente expressivo na paragênese dos megacristais, apresentando-se, via de regra, como cristais idiomórficos a subidiomórficos ou irregulares, com dimensões que variam de 0,3 até 2 mm de comprimento. Às vezes, forma agregado de cristais menores com diâmetro médio de 0,5 mm, ocupando área de até 3 mm. O mineral é também de ocorrência intersticial numa relação de contato com o feldspato alcalino da matriz indicando contemporaneidade de formação entre as duas fases minerais na sequência de cristalização.

Magnetita é pouco presente, aparecendo mais comumente na região de contato entre a biotita e o clinopiroxênio.

Titanita é um acessório pouco frequente, ocorrendo em algumas amostras na forma de cristais losangulares intersticiais que envolvem poiquiliticamente o feldspato alcalino da matriz.

Feldspato alcalino é o félsico mais importante e abundante dessas rochas. Geralmente, se apresenta como cristais hipidiomórficos de dimensões variáveis, com a granulação passando de fina na matriz das variedades porfiríticas até média nos litotipos inequigranulares seriados. Os cristais são bastante límpidos, desprovidos de exsolução, e exibem com frequência geminação Carlsbad. Dados de difração de raios X obtidos em amostra de sondagem (F5-502,80 m) indicam que o feldspato alcalino tem estrutura cristalina de ortoclásio.

Além dos minerais acima, reconhece-se também em algumas amostras de melassienito (p. ex., F5-502,80 m) sodalita e pseudomorfos de um mineral substituído por agregado de zeólitas ou carbonatos. Essas estruturas aparecem na forma de prismas curtos ou seções hexagonais e são interpretadas como resultantes de cristais de nefelina reequilibrada.

4.3.3. Fenitos e Rochas Fenitizadas

Na ocorrência de Piedade, os efeitos da ação metassomática por processos de fenitização ligados ao magmatismo carbonatítico são bem evidentes tanto nas encaixantes regionais

representadas pelo granito Piedade quanto nas rochas alcalinas silicáticas (melassienitos) associadas aos carbonatitos. Em todas as lâminas examinadas de testemunhos de sondagem (doze do furo F8, profundidades de 331,10 m a 551,38 m; uma do furo F13 e uma do furo F5, em profundidades, respectivamente, de 124,31 m e 263,55 m) foram observadas modificações físicas e químicas em graus distintos, desde incipiente até mais intenso. Contudo, é importante frisar que essas transformações mineralógicas e texturais são muito irregulares e variam espacialmente de local em frações de centímetros, podendo alterar as feições da rocha original quase integralmente. Elas devem-se provavelmente ao estilo de intrusão, representado por um sistema ramificado de venulação de espessura muito variável, desde pequenos filões até diques espessos, ao longo do qual os carbonatitos se alojam. Portanto, a ocorrência de Piedade está longe de ser uma massa contínua e de grande porte, ao menos até onde foi sondado.

4.3.3.1. Granitos fenitizados

As transformações havidas nas rochas graníticas encaixantes são evidenciadas pela deformação e intenso fraturamento dos minerais e pela ação metassomática de caráter sódico/potássico que os afetou, esta traduzida na feldspatização generalizada, na cristalização de minerais máficos sódicos (clinopiroxênio e anfibólio) e na formação de flogopita (Figura 4.6D; F13-124,31 m).

Nota-se em algumas amostras que os granitos originais acham-se deformados em intensidade variada, refletindo esforços dúcteis pelas perturbações reticulares dos minerais ou esforços rúpteis indicados pelo microfraturamento de quartzo, feldspato alcalino e plagioclásio e ou, até mesmo, pela presença de texturas cataclásticas. Disso resulta uma densa rede de veios milimétricos de clinopiroxênio e anfibólio que se infiltram ao longo de fraturas e ao redor dos minerais (Figura 4.6E; F13-124,31 m).

Em geral, os feldspatos originais encontram-se alterados e recrystalizados em graus diversos. Foram reconhecidos relictos de feldspato alcalino de cristalização primária de aparência turva e escuros, em razão de nuvens de inclusões de minerais de formação secundária. A geminação e as estruturas pertíticas presentes tornaram-se pouco nítidas ou desapareceram por completo. Essas porções remanescentes estão envolvidas por uma auréola de feldspato alcalino neoformado, que se desenvolve em continuidade cristalina com o mineral hospedeiro ou como um agregado fino formado de cristais submilimétricos subidiomórficos ocupando as suas bordas corroídas. Ressalte-se que o feldspato neoformado é geralmente límpido, com alguns grãos exibindo geminação em grade ou segundo a lei da albita (Figura 4.6F; F8-377,40 m). Os cristais de plagioclásio também se apresentam com as bordas fortemente substituídas por feldspato alcalino límpido, de origem metassomática. São observados relictos de cristais do plagioclásio primário, irregulares e intensamente sericitizados, circundados por feldspato alcalino neoformado. Geralmente são turvos e praticamente desprovidos de geminação. Quartzo é abundante nos granitos pouco fenitizados e praticamente ausente nas rochas mais afetadas pelo processo, nas quais pode ser parcial ou inteiramente transformado em agregado de clinopiroxênio alcalino (Figura 4.6G; F8-347,10 m). Esse mineral está presente em todas as amostras fenitizadas, aparecendo na maioria das vezes em concentrações apreciáveis. Mais comumente se apresenta de formas distintas, ora como agregado isorientado de cristais prismáticos preenchendo pequenos veios milimétricos que se infiltram segundo direções as mais variadas, ora como cristais fibrosos ou prismáticos com terminações agudas substituindo o quartzo nas suas bordas corroídas ou, ainda, como cristais idiomórficos a subidiomórficos intersticiais. Em geral, o clinopiroxênio é de natureza egrínica, com pleocroísmo fraco nas cores verde-pálida a amarelo-esverdeada.

Anfibólio é um constituinte menos frequente, estando presente em algumas amostras na forma de feixes de cristais fibrosos em arranjo paralelo ou radiado ou, então, substituindo parcialmente o clinopiroxênio egirínico (Figura 4.6H; F8-425,85 m). É uma variedade de cor cinza-acastanhada a esverdeada e birrefringência de cerca de 0,012, provavelmente do grupo cálcico-sódico. Além disso, distinguem-se também carbonatos que ocorrem como constituintes isolados ou associados aos demais minerais, preenchendo fraturas e espaços intergranulares. Por vezes, os carbonatos formam massas irregulares, provocando transformações mineralógicas por carbonatação de clinopiroxênio, biotita e feldspato.

Das amostras investigadas, destaca-se a do furo F5, na profundidade de 389,70 m, que corresponde ao estágio mais avançado de fenitização, com o granito encaixante quase inteiramente transformado em um sienito alcalino mesocrático contendo relictos da rocha original em meio aos minerais neoformados. Trata-se de uma rocha inequigranular muito heterogênea, com variações mineralógicas e texturais acentuadas, caracterizando áreas petrograficamente distintas.

Na sua maior parte, a rocha exibe textura inequigranular seriada de granulação média, xenomórfica a hipidiomórfica, e um arranjo de minerais em cristais imbricados ou justapostos em contato tipicamente serrilhado. Compõe-se essencialmente de feldspato alcalino límpido, alongado, às vezes com geminação Carlsbad, clinopiroxênio egirínico intersticial, de hábito prismático bem desenvolvido a acicular, e abundante apatita formando desde enormes cristais irregulares entre os grãos de feldspato alcalino até agregado de cristais menores, idiomórficos a subidiomórficos. Adicionalmente, ocorrem ainda anfibólio e biotita, resultantes da transformação parcial dos cristais maiores de clinopiroxênio.

Já as áreas de granulação mais fina consistem em um agregado que inclui principalmente clinopiroxênio egirínico prismático e apatita, disseminados entre grãos de feldspato alcalino. Este último é tipicamente granular, formando um arranjo pavimentoso, às vezes justaposto por faces com 120° em decorrência da recristalização do feldspato alcalino e plagioclásio originais; em geral, ele apresenta mudança gradativa para uma granulação microcristalina junto à estrutura reliquiar. Notam-se também espalhados pela lâmina vários bolsões praticamente monominerálicos de clinopiroxênio egirínico com alta concentração de cristais prismáticos entrelaçados entre si. Ora eles são bastante pequenos, ora idiomórficos e bem desenvolvidos. Nestes últimos, ocorrem com frequência carbonatos ao lado de anfibólio e, sobretudo, flogopita substituindo parcialmente o clinopiroxênio. Um bolsão composto de agregado de flogopita foi também reconhecido.

4.3.3.2. *Melassienitos*

Os efeitos da ação metassomática da fenitização foram também reconhecidos em algumas amostras de melassienito, em particular as do furo F6, nas profundidades de 225,70 m, 255,40 m e 257,53 m. As seções delgadas dessas amostras mostram abundantes veios milimétricos de carbonatos que se infiltram aproximadamente paralelos à estrutura da rocha. Ao longo desses veios se processaram modificações mineralógicas e texturais, causadas provavelmente pela ação de uma fase fluida reativa que resultou em trocas de componentes químicos da rocha original, levando à alteração de seus minerais e, dessa forma, gerando intensa biotitização/flogopitização. Essas mudanças são evidenciadas por um processo progressivo de transformação parcial ou total do clinopiroxênio, que se inicia pelo surgimento de anfibólio e se intensifica com o da biotita/flogopita, envolvendo a substituição pseudomórfica dos dois minerais precedentes, além da formação de pequenos cristais individuais que se reúnem em densos agregados microcristalinos espalhados por toda a rocha (Figura 4.6I; F6-255,40 m).

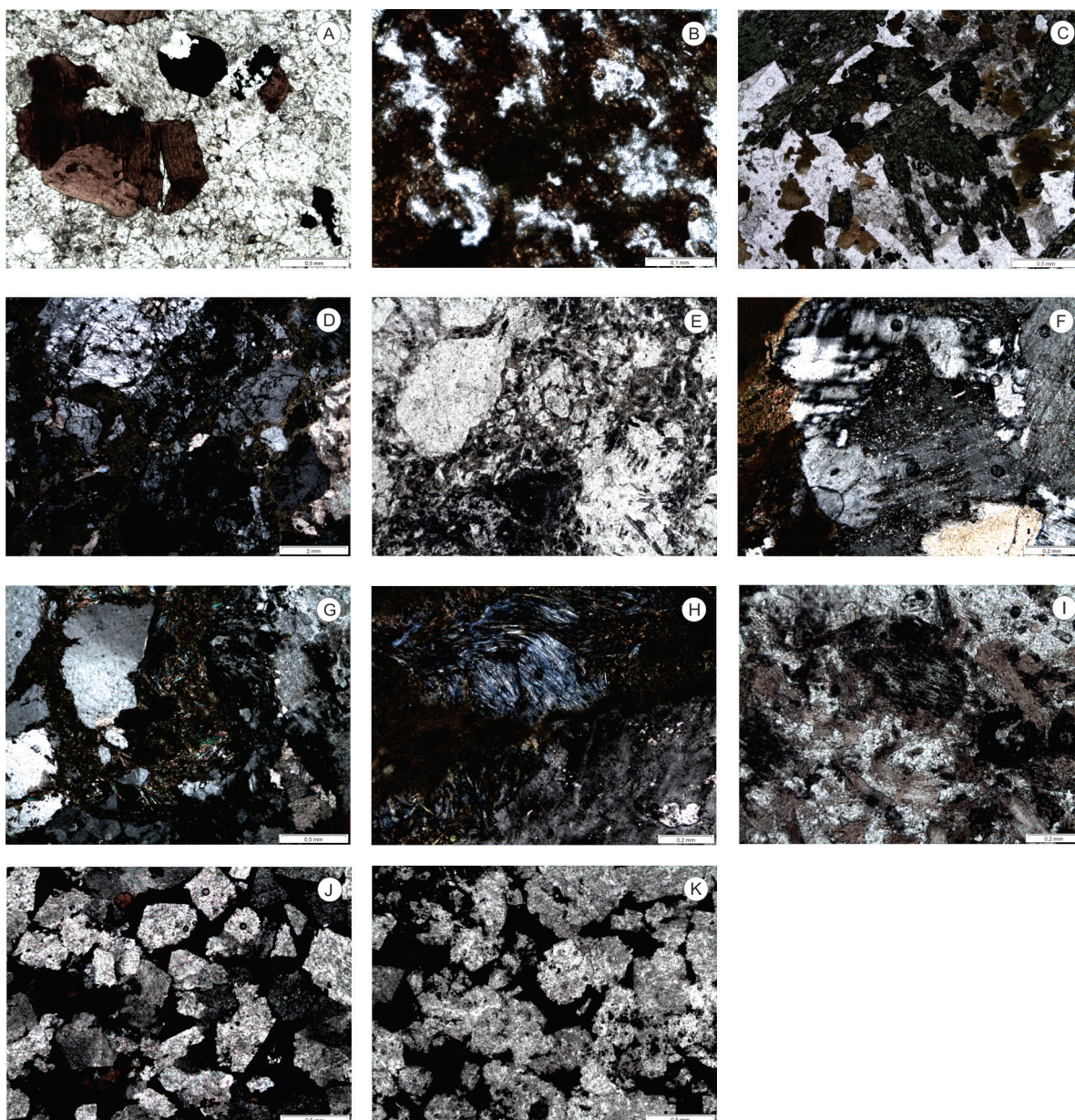


Figura 4.6. A) Flogopita-calcita carbonatito (am. F5-307,60 m). Aspecto textural de variedade de carbonatito com abundante flogopita. Notar cristais de flogopita com pleocroísmo invertido (clivagem ~ 900 relativo ao polarizador inferior com máxima absorção) e opacos intersticiais. Polarizadores paralelos. B) Calcita-siderita carbonatito (am. F13-141 m). Agregado fino de enigmatita vermelho escuro associado com magnetita. Polarizadores paralelos. C) Melassienito (am. F5-502,80 m). Textura inequigranular seriada com megacristais idiomórficos a subidiomórficos de clinopiroxênio, biotita e apatita. D) Rocha granítica fenitizada (am. F13-124,31 m). Fenitização incipiente com deformação rúptil de feldspato alcalino e intenso microfraturamento, além de infiltração de veios nas fraturas envolvendo os minerais de origem granítica. Observar venulações de agregado fino de clinopiroxênio cortando o megacristal de feldspato alcalino granítico e contornando os cristais vizinhos. Polarizadores cruzados. E) Fenito I.s. (am. F13-124,31 m). Clinopiroxênio alcalino prismático e anfibólio idiomórfico em vênulas e entre cristais de feldspato alcalino neoformado. Polarizadores paralelos. F) Fenito I.s. (am. F8-377,40 m). Relictos de feldspato alcalino turvo e sericitizado envolvidos parcialmente por feldspato alcalino límpido neoformado com geminação em grade. G) Fenito I.s. (am. F8-347,10 m). Clinopiroxênio alcalino prismático substituindo cristais de quartzo. Observar o denso agregado de clinopiroxênio preenchendo a venulação. Polarizadores cruzados. H) Fenito I.s. (am. F8-425,85 m). Feixes de cristais fibrosos paralelos de anfibólio (cor de interferência anômala) ao lado de agregado de clinopiroxênio prismático. Observar que o anfibólio está substituindo cristais de clinopiroxênio alcalino. Polarizadores cruzados. I) Melassienito flogopitizado (am. F6-255,40 m). Estágio avançado de transformação metassomática, com concentração elevada de flogopita neoformada, em parte por substituição ou formando agregado microcristalino disseminado pela rocha. Observar megacristal de clinopiroxênio original parcialmente substituído por flogopita. Polarizadores cruzados. J) Flogopita magnetita-calcita carbonatito (am. F13-139,75 m). Textura equigranular média, levemente orientada, com destaque para os cristais de magnetita e flogopita intersticiais entre os grãos de carbonatos imbricados ou justapostos em contato serrilhado, formando uma rede que se expande pela rocha. Polarizadores cruzados. K) Calcita-siderita calcita carbonatito (am. F13-141 m). Textura equigranular média, levemente orientada, e mineralogia de alteração tardi a pós-magmática que substituiu minerais intersticiais formando denso agregado criptocristalino de clorita, hematita e goethita entre os grãos de carbonatos. Polarizadores cruzados.

4.4. Considerações Geológicas e Petrológicas

O magmatismo alcalino dominante no território brasileiro é de idade mesozoica, com a maioria das ocorrências concentrando-se na porção meridional do país, ao longo de um arco em torno dos limites leste e nordeste da Bacia do Paraná e da faixa litorânea dos estados de São Paulo e Rio de Janeiro. Os carbonatitos estão geralmente associados aos complexos alcalinos potássicos do tipo centrado do Cretáceo Inferior ao Superior, nos quais ocorrem como intrusões elípticas centrais ou como veios com espessuras diversas retalhando internamente as rochas silicáticas alcalinas encaixantes. Vários são os trabalhos que se ocuparam dessas ocorrências, resumindo suas principais feições geológicas, caracterizando as possíveis associações litológicas, agrupando-as em províncias alcalinas definidas segundo conceituações diversas e, ainda, elaborando interpretações petrogenéticas.

Informações sumarizadas sobre as manifestações de rochas alcalinas com carbonatitos são encontradas em Ulbrich e Gomes (1981), Almeida (1983, 1986), Berbert (1984), Rodrigues e Lima (1984), Woolley (1987), Gomes *et al.* (1990), Morbidelli *et al.* (1995a), Comin-Chiaramonti e Gomes (2005), Gomes e Comin-Chiaramonti (2017) e, por último, Gomes *et al.* (2018a).

4.4.1. Condicionamento Tectônico

Em um contexto geológico regional, a associação alcalina-carbonatítica de Piedade encontra-se situada a norte de uma área de influência de atividade magmática alcalina, que reúne inúmeros centros intrusivos dispostos segundo alinhamentos preferenciais, no interior do Arco de Ponta Grossa (Figura 4.7).

O Arco de Ponta Grossa (Almeida, 1983) é uma grande estrutura regional que foi soerguida tectonicamente durante o Paleozoico e o Triássico-Jurássico, com posterior reativação no Jurássico Superior-Cretáceo. O arco tem o seu eixo orientado para NW, adentrando a Bacia do Paraná entre os estados de São Paulo e Santa Catarina. Nessa estrutura são reconhecidos grandes alinhamentos subparalelos ao eixo do arco (Figura 4.7): Guapiara (Algarte, 1972), São Jerônimo-Curiúva e Rio Alonzo (Vieira, 1973), e Rio Piqueri (Ferreira, 1982). O alinhamento Guapiara, com cerca de 600 km de extensão e largura entre 20 e 40 km, assinala o limite norte dessa feição tectônica. Já a região central está definida pelos alinhamentos de São Jerônimo-Curiúva e Rio Alonzo, enquanto o do Rio Piqueri delimita a porção sudoeste. Nesse arcabouço

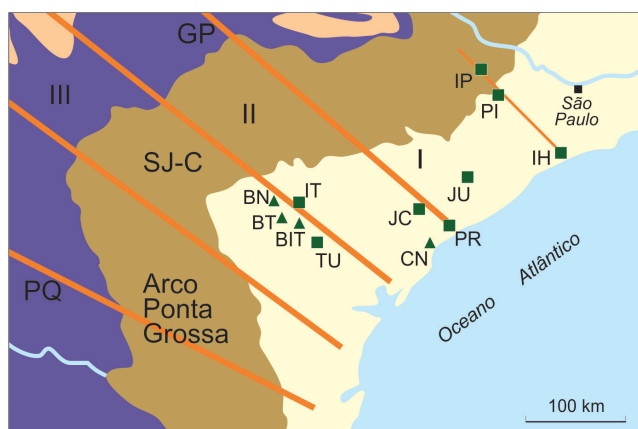


Figura 4.7. Condicionamento tectônico do magmatismo alcalino mesozoico no Arco de Ponta Grossa. Abreviações: BIT, Barra do Itapirapuã; BN, Banhadão; BT, Barra do Teixeira; CN, Cananeia; IH, Itanhaém; IP, Ipanema; IT, Itapirapuã; JC, Jacupiranga; JU, Juquiá; PI, Piedade; PR, Pariquera-Açu e TU, Tunas. I, embasamento; II, sedimentos da Bacia do Paraná; III, lavas basálticas da formação Serra Geral. Lineamentos: GP, Guapiara; SJ-C, São Jerônimo-Curiúva; PQ, Rio Piqueri (simplificada de Riccomini *et al.*, 2005).

estrutural desenvolveu-se expressiva atividade alcalina, manifestada por meio de dezenas de corpos intrusivos, alguns de porte maior, por exemplo, Jacupiranga e Juquiá na porção norte da estrutura, e Itapirapuã, Barra de Itapirapuã, Banhadão e Tunas na sua parte central. Com base nas correlações tectônicas dessas intrusões e nas suas relações petrográficas, essas ocorrências foram agrupadas na denominada Província Alcalina do Arco de Ponta Grossa.

Nesse contexto tectono-estrutural, Almeida (1971) e Algarte (1972) incluíram também nessa província as ocorrências de Ipanema, Piedade, Tatuí e Itanhaém por se situarem segundo um lineamento NW, ainda que de menor expressão, ao norte do alinhamento Guapiara. Entretanto, Almeida (1983), a partir de novos dados, reconsiderou opinião anterior no sentido de que essas ocorrências não deveriam estar relacionadas com o Arco de Ponta Grossa. Esse autor baseou-se nos estudos gravimétricos de Davino (1975), que demonstraram que o complexo de Ipanema possui forma alongada na direção NE-SW, a mesma das estruturas pré-cambrianas regionais. Assim, Almeida (1983) concluiu que a geometria desse corpo se constituía em evidência de que o magmatismo na região teria se manifestado e sido controlado pela reativação, durante o Cretáceo Inferior, de falhas pré-silurianas situadas nas bordas da Bacia do Paraná, portanto, nada tendo a ver com o desenvolvimento do Arco de Ponta Grossa. Concluiu, ainda, que o posicionamento da intrusão de Ipanema poderia ter sido controlado por fraturas NW, num alinhamento que inclui as ocorrências de Tatuí, Piedade e possivelmente Itanhaém. Já Riccomini *et al.* (2005), discutindo as ocorrências alcalinas da região quanto à geocronologia, enquadraram na Província do Arco de Ponta Grossa somente aquelas do Cretáceo Inferior, ligadas cronologicamente aos derrames toleíticos da Bacia do Paraná, a saber, a maioria das intrusivas em torno do alinhamento Guapiara. Além disso, os autores estenderam os limites dessa província para NE, incluindo também as ocorrências de Ipanema, Piedade e Itanhaém, à vista de sua distribuição ao longo de uma estrutura orientada segundo NW-SE, paralela ao lineamento citado. Esses novos limites correspondem à extensão ao longo do Arco evoluído no Cretáceo Inferior.

Petrograficamente, as associações alcalinas situadas nos distintos domínios do Arco de Ponta Grossa têm composição variada. Na região central, predominam rochas félsicas insaturadas em sílica (p. ex., nefelina sienitos, fonolitos), com presença de carbonatitos em alguns deles; rochas gabroides e sienitos são de presença restrita. Na região do alinhamento Guapiara, as ocorrências têm como principais litologias tipos gabroides e ultramáficos, como peridotitos, piroxenitos, essexitos, ijolitos etc., alguns deles acompanhados de carbonatitos. Já na porção ao norte desse alinhamento, coincidência ou não, as ocorrências têm caráter petrográfico similar entre si, porém, nada comparável com as do interior do arco. Ipanema e Piedade têm em comum com Tatuí a ocorrência de shonkinitos (melassienitos), e com Itanhaém a de carbonatitos.

Esse quadro regional sugere que o condicionamento geotectônico desses corpos nos distintos domínios, bem como as respectivas características petrológicas de cada núcleo intrusivo, traduzem um processo de atividade magmática que se diferencia entre as manifestações alcalinas de cada domínio, disso resultando associações petrográficas diversificadas, caracterizadas pela ausência ou presença de carbonatitos, de variedades insaturadas e de tipos básicos. Esse fato justifica incluir as ocorrências de Piedade, Ipanema, Tatuí e Itanhaém junto à Província Alcalina do Arco de Ponta Grossa.

4.4.2. Diferenciação Mágmatíca

Com base nas informações geológicas e petrográficas levantadas para a associação alcalina carbonatítica de Piedade, são feitas aqui algumas considerações geológicas e petrológicas sobre o desenvolvimento magmático dessas rochas.

Na ocorrência alcalina examinada a ausência de afloramentos, bem como o modo de ocor-

rência e a heterogeneidade textural das rochas são fatores impeditivos à elaboração de mapa geológico de superfície, ainda que buscando apenas delinear as áreas de maior frequência das principais variedades petrográficas.

As evidências geofísicas reveladas em levantamento gravimétrico na região (Figura 4.2) indicam uma forte anomalia Bouguer que configura um campo aproximadamente circular circunscrito no interior do maciço granítico de Piedade. As observações registradas em testemunhos de sondagem de quatro perfurações (profundidade de até 551 m) dentro desse campo demonstram que essa anomalia reflete um conjunto de intrusões de carbonatito e de melassienito que se manifestam por meio de uma rede de filões centimétricos e de diques e venulações decimétricas a métricas, intercalando-se entre si em proporções variáveis. Como exemplo, cite-se o furo F8, onde se observa abaixo do perfil laterítico (~150 m) um intervalo de cerca de 100 m dominado exclusivamente por melassienitos e outro tanto mais profundo por intercalações de fenitos com carbonatitos venulares. Já no furo F5, tem-se abaixo do manto laterítico (~70 m) cerca de 300 m com densa intercalação de melassienitos com calcita carbonatitos e carbonatitos com venulações tardias, enquanto nos 200 m restantes do furo ocorrem intercalações de carbonatitos com fenitos. As relações intrusivas e algumas feições registradas em seções petrográficas, como a ação metassomática dos carbonatitos sobre os melassienitos, por exemplo, sugerem certa contemporaneidade entre essas duas litologias principais, com os melassienitos precedendo os carbonatitos.

O complexo de Piedade exhibe uma associação petrográfica similar à de Ipanema, porém muito distinta daquela de Jacupiranga e Juquiá. Ele contém rochas de natureza essencialmente carbonatítica e melassienítica, além de variedades silicáticas alcalinas geradas do protolito granitoide, transformado como resultado da interação de fluidos metassomáticos geneticamente associados à atividade carbonatítica.

As rochas fenitizadas e os fenitos encaixantes ocuparam possivelmente uma parte expressiva da região superficial da estrutura intrusiva, aparecendo nos testemunhos de sondagem inalterados desde os níveis abaixo do manto de alteração e nos diversos níveis de profundidade até pelo menos 500 m. São protolitos graníticos com modificações físico-químicas caracterizadas seja por deformação reticular dos cristais e fraturamento das rochas, seja pela ação metassomática sódico/potássica sobre os minerais, causando feldspatização intensa e cristalização de clinopiroxênio e anfibólio sódicos. Além disso, os efeitos da fenitização podem também ser observados nos melassienitos, provocando reação nos minerais máficos e intensa flogopitização da rocha.

As transformações mineralógicas e texturais registradas nessas rochas são de intensidade muito irregular, com variação em frações milimétricas, ora desprezível, mantidas as feições do protolito, ora muito intensa, eliminando-as quase integralmente. Essas evidências apontam claramente para a ação externa de soluções alcalinas fenitizantes enriquecidas em metais, que se desprenderam do magma carbonatítico, desde a fase que precedeu a intrusão até os seus estágios tardios.

Os melassienitos de Piedade mostram feições texturais e mineralógicas similares às das rochas (shonkinitos) associadas ao complexo carbonatítico de Ipanema (Knecht, 1960; Guarino *et al.*, 2012). São rochas meso- a melanocráticas tipicamente inequigranulares, seriadas a porfiríticas, não raramente traquíticas. Os megacristais são representados principalmente por apatita, clinopiroxênio e biotita, em matriz fina contendo feldspato alcalino e presença subordinada de nefelina, magnetita, anfibólio, titanita etc. Essas feições sugerem cristalização em regime de fluxo magmático por injeção de fusões com nucleação em formação e frações de cristais com diferente grau de desenvolvimento, em condições crescentes de resfriamento.

Os carbonatitos de Piedade correspondem mineralologicamente a calcita carbonatitos, dolo-

mita carbonatitos e calcita-siderita carbonatitos. Os primeiros são dominantes nos testemunhos de sondagem e representam a fase intrusiva principal, que gerou uma assembleia mineral representada por calcita com magnésio e quantidade variável de flogopita, opacos e apatita.

Os dolomita carbonatitos foram reconhecidos somente na perfuração F6 (180,20 m) na forma de um pequeno veio cortando os calcita carbonatitos. Representam um estágio mais tardio na sequência intrusiva, que cristalizou dolomita, magnetita e abundante barita, além de biotita, geralmente fortemente cloritizada.

Os calcita-siderita carbonatitos encontram-se em nível logo abaixo de um flogopita-calcita carbonatito fresco (F13-139,75 m), descrito na profundidade de 141 m. Esses dois litotipos apresentam feições petrográficas comparáveis, caracterizadas por uma mineralogia subordinada tipicamente intersticial que se concentra entre os grãos de carbonatos, formando uma extensa rede que se expande pela rocha. Esses minerais são representados principalmente por opacos e flogopita nos flogopita-calcita carbonatitos (Figura 4.6J; F13-139,75 m) e por denso agregado criptocristalino de clorita, hematita e goethita nos calcita-siderita carbonatitos (Figura 4.6K; F13-141 m). Essas feições sugerem que essa última fase carbonatítica representa uma variedade de calcita carbonatito gerada por alterações nos estágios tardios ou pós-magmáticos, descartando, assim, a possibilidade de corresponder a uma fase de caráter intrusivo final.

As manifestações tardias relativas ao complexo alcalino-carbonatítico estão associadas a uma densa rede de veios milimétricos preenchidos por quantidades variáveis, abundante a ausente, de quartzo, fluorapatita e barita, além de opacos, anfíbio, clorita e raros fluorocarbonatos de terras raras e fluorita, que percolam as rochas carbonatíticas como também os fenitos encaixantes. Essas feições sugerem que as fases minerais precipitadas representam frações residuais de uma atividade magmática carbonatítica enriquecida em voláteis, principalmente F, S, CO₂ e H₂O. Os produtos de alteração mais frequentes são hematita, óxidos hidratados de ferro e argilomineerais, que podem representar transformações nos estágios hidrotermais ou intempéricos.

Os dados obtidos até o momento ainda não permitem definir um modelo petrológico que vincule as rochas alcalinas silicáticas e as carbonatíticas da intrusão. Por ora, os principais modelos e processos associados aos complexos alcalino-carbonatíticos brasileiros (sumarizados à frente no capítulo 9) encontram validade nas relações obtidas. Neste sentido, a associação alcalina-carbonatítica de Piedade pode ter sua origem relacionada a magmas primários (silicáticos e carbonatíticos) independentes gerados em condições distintas no manto subcontinental heterogêneo ou a partir de um magma silicático alcalino carbonatado, que, tendo formado inicialmente rochas magmáticas silicáticas alcalinas de caráter potássico (melassienitos), evoluiu para um magma carbonatítico cristalizando nos estágios principais calcita carbonatitos e, posteriormente, dolomita carbonatitos. Nesse sentido, estudos geoquímicos e isotópicos serão necessários para explicar a origem dessas rochas. A arquitetura do complexo consiste em venulações centimétricas a métricas e de diques de espessura até decimétrica nos níveis mais profundos, podendo indicar a coexistência de uma massa maior concentrada num corpo único de rochas alcalinas e carbonatíticas diversificado, situado em níveis inferiores dos alcançados pelas sondagens. As rochas estudadas representam provavelmente os estágios evolutivos intermediários a tardios desenvolvidos nos níveis crustais mais rasos.