

POTENCIAL MINERAL DE ROCHAS METAMÁFICAS E METAULTRAMÁFICAS DA FAIXA ITAPIRA-AMPARO PARA USO EM PROCESSO DE CARBONATAÇÃO MINERAL NO SEQUESTRO DE CO₂

Wilhelm Malheiros SAUERBRONN¹, Maria Rita CAETANO-CHANG¹, Hung Kiang CHANG¹, Didier GASTMANS¹

(1) LEBAC-DGA/IGCE/UNESP, Rio Claro, SP, Brasil

Introdução
Carbonatação mineral
Localização e caracterização da área
Geologia regional
Geologia local
Materiais e métodos
Discussão dos resultados
 Petrografia dos litotipos de interesse
 Anfibolitos
 Actinolita Xistos
 Antofilita Xistos
 Rochas Metaultramáficas
 Litoquímica
 Potencial de carbonatação mineral
Conclusões
Agradecimentos
Referências bibliográficas

RESUMO - A redução das emissões de gases de efeito estufa representa um grande desafio tecnológico aos modelos industriais vigentes. Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) e sequestro de CO₂ fundamentam grande parte dos planos de crescimento sustentáveis, com vistas à obtenção de níveis mais seguros de CO₂. Pesquisas promissoras consideram a técnica de sequestro de CO₂, por meio da carbonatação mineral, em que silicatos ricos em magnésio, cálcio, ferro e manganês são transformados em carbonatos. Este trabalho teve por objetivo caracterizar, em caráter preliminar e exploratório, as rochas metamáficas e metaultramáficas dos Complexos Amparo e Itapira, com vistas à avaliação de seu potencial mineral para uso em processos de carbonatação mineral no sequestro de CO₂; essas rochas constituem terrenos metamórficos de grau médio a alto, localizadas na região de Itapira, Amparo, Serra Negra e Lindóia (SP). As rochas metamáficas reúnem anfibolitos, actinolita xistos e hornblenditos, e encontram-se na forma de lentes ou camadas estiradas em intercalação com rochas supracrustais. As rochas metaultramáficas ocorrem em corpos pequenos e descontínuos, com composição mineralógica em geral rica em olivina, piroxênio e anfibólio. As rochas avaliadas no presente estudo apresentam potencial para carbonatação mineral, em particular aquelas com teores elevados de magnésio. Dessa forma, podem representar importante prospecto de avaliação de jazidas para utilização em processos de carbonatação mineral.

Palavras-chaves: Carbonatação mineral, Sequestro de CO₂, Rochas Metamáficas e Metaultramáficas.

ABSTRACT - Reduction of greenhouse gas emission has posed great technological challenges to the industrial models standing. Furthermore, the clean development mechanism (CDM) and CO₂ sequestration are fundamental on sustainable development, in order to reach safer levels of CO₂. A promising mechanism for CO₂ capture is by mineral carbonation, where silicates rich in Mg, Ca and Fe, are transformed into carbonates. The main purpose of this work is to evaluate the potential for CO₂ sequestration, in an exploratory way, for high grade metamafic and metaultramafic rocks of Amparo-Itapira Complex in the vicinity of Itapira, Amparo, Serra Negra and Lindóia (SP). The metamorphic rocks occur in lenticular layers and consist of amphibolites, intercalated with quartz-feldspathic rocks. The ultramafic rocks occur as

discontinuous massive bodies that are rich in olivine, pyroxene and amphibole. Carbon sequestration potential of these metamorphic rocks, based on petrographic and lithochemical analyses are higher for rocks with high magnesium levels. These rocks can represent an important prospect for the evaluation of ore deposits to be used in processes of mineral carbonation.

Keywords: Mineral carbonation, CO₂ sequestration, Metamafic and Ultramafic rocks.

INTRODUÇÃO

O aumento acelerado da emissão de gases causadores de efeito estufa é de grande relevância em estudos ambientais, dado que lhe são atribuídas, em grande medida, as causas das mudanças climáticas. Nesse particular, o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera, associado principalmente às emissões oriundas da queima de combustíveis fósseis, é o principal fator de preocupação. Segundo a Agência do Departamento de Administração de Informações sobre Energia dos EUA, com base no relatório da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) de junho de 2007, a demanda mundial de petróleo alcançará os 118 milhões de barris diários em 2030, muito acima dos 87,4 milhões de barris esperados para o ano de 2008 (IEA, 2007), o que, somado aos aumentos de 50% a 250% nas emissões de gases do efeito estufa até o ano de 2050, previstos por Houghton (1997), significará um aumento expressivo da concentração de CO₂ na atmosfera, que hoje é de cerca de 380 ppm. Por esse motivo, diversos países, em esforço conjunto, buscam estabelecer metas para redução dessas emissões, particularmente por meio de tecnologias de armazenamento de carbono.

Em 2006, o International Panel of Climate Change (IPCC) apresentou importantes informações, cenários e diretrizes, visando orientar políticas de mitigação do efeito estufa. Como forma de se combater os efeitos do aumento de concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, foram apresentadas propostas de técnicas a serem empregadas no sequestro de carbono, dentre elas o armazenamento geológico de CO₂, por meio da injeção desse gás em campos de petróleo, aquíferos salinos ou em camadas de carvão, além de técnicas de estocagem de carbono via carbonatação mineral, por meio da reação com silicatos ricos em cálcio e magnésio.

O sequestro de CO₂ via carbonatação mineral é uma técnica que garante a fixação permanente do dióxido de carbono, dada a estabilidade química dos carbonatos gerados a partir da combinação do CO₂ com o magnésio e o cálcio presentes em Mg/Ca-silicatos (Lackner et al., 1995). Essas reações de transformação de silicatos em carbonatos (*e.g.* calcita [CaCO₃], magnesita [MgCO₃], siderita [FeCO₃]) ocorrem na natureza em processos de intemperismo químico e podem ser eficazes na solução do problema de neutralização do CO₂ (Hanchen et al., 2006). Contudo, a cinética destas reações é baixa sob condições normais de pressão e temperatura, sendo um desafio tecnológico sua transformação em processo industrial (Park & Fan, 2004).

Dentre os materiais rochosos ricos em cálcio, magnésio e ferro, com potencial para uso em processo de carbonatação mineral, destacam-se as rochas ultramáficas, comumente portadoras de minerais tais como olivina, piroxênio, anfibólio, serpentina e talco, ricos nesses elementos (IPCC, 2005).

A avaliação de jazidas de rochas ultramáficas, localizadas próximo a grandes centros industriais produtores de CO₂, tem sido considerada como importante possibilidade para o sequestro de CO₂ via carbonatação mineral, inclusive para futuras oportunidades de negócios. Dessa maneira, o presente trabalho avalia, em caráter preliminar, o potencial das rochas metamáficas e metaultramáficas da Faixa Itapira-Amparo, em área localizada na região de Itapira, Amparo, Serra Negra e Lindóia (SP), por meio da caracterização e estimativa do percentual dos minerais ricos em Mg e Ca (olivina, serpentina, anfibólio e talco) presentes nos diferentes tipos rochosos, pela determinação dos teores de óxidos de interesse – MgO, CaO, FeO e MnO – nesses litotipos, e avaliação das proporções de CO₂ que podem ser consumidas pela carbonatação mineral.

CARBONATAÇÃO MINERAL

A carbonatação mineral consiste na conversão de CO₂ em carbonatos sólidos inorgânicos estáveis, por meio da captura e do armazenamento do carbono gerado a partir de fontes estacionárias industriais. Avalia-se, ainda, que as reservas minerais com potencial para o sequestro de CO₂ são muitas vezes maiores que o emitido pela queima de todas as reservas conhecidas de hidrocarbonetos no mundo. Por esse motivo admite-se que o sequestro de carbono, via carbonatação mineral, possa contribuir de modo significativo na redução da concentração de CO₂ na atmosfera (IPCC, 2006).

A relativa abundância de cálcio e magnésio em minerais constituintes de determinados tipos rochosos favorece o processo de sequestro de CO₂ por carbonatação mineral, com a vantagem de ser esta uma reação exotérmica, que ocorre na natureza durante o processo de alteração de alguns desses minerais. Dentre os principais fatores que limitam os processos de carbonatação mineral destaca-se a baixa cinética química da reação, ou seja, a carbonatação de silicatos se desenvolve muito lentamente na escala de tempo geológico, em condições de temperatura e pressão ambientes (25° C e 1 atm). Neste caso, as reações químicas são controladas pela composição química, textura e fábrica dos minerais, pH da solução, presença de água, pressão de CO₂, temperatura e, em alguns casos, ação biológica (IPCC, 2006).

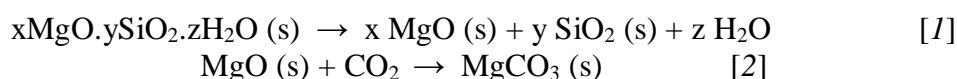
Estudos recentes consideram experiências de carbonatação mineral a partir de certas espécies minerais, tais como forsterita (Mg₂SiO₄), brucita (Mg(OH)₂), serpentina (Mg₃Si₂O₉H₄), wollastonita (CaSiO₃) e outras que têm

demonstrado capacidade de reação com o dióxido de carbono em solução ou no estado supercrítico (Huijgen et al., 2004).

A fixação permanente do CO₂ na estrutura cristalina dos carbonatos gerados por reação de carbonatação constitui um processo de armazenagem de CO₂ *ex-situ*, requerendo o pré-tratamento dos minerais. Para execução dessa atividade em larga escala, são necessários a mineração, o processamento e o beneficiamento dos materiais carbonatáveis, além de estudos locais para a disposição e reuso dos materiais resultantes da carbonatação.

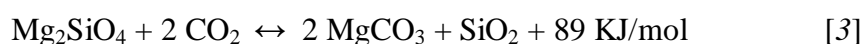
Estudos envolvendo o sequestro de CO₂ por carbonatação mineral foram inicialmente propostos por Seifritz (1990) e atualmente são desenvolvidos por um número limitado de grupos de pesquisa fortemente especializados, voltados especialmente para as questões relacionadas ao aumento da eficiência do processo (IEA, 2007). O custo da carbonatação mineral é bastante elevado, entretanto, espera-se que seja reduzido com a evolução dos conhecimentos dos processos termodinâmicos e das reações em meio aquoso.

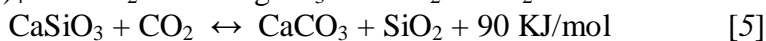
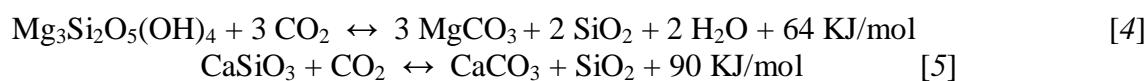
Hanchen et al. (2006) apontam que a reação de carbonatação mineral, a partir da dissolução da forsterita (olivina), ocorre em três etapas principais, que a controlam cineticamente: dissolução da olivina, dissolução do CO₂ e precipitação de MgCO₃. Essa reação é a que apresenta maiores vantagens em relação à carbonatação mineral, quando se consideram os pesos moleculares e o balanço energético envolvidos. A reação geral de carbonatação a partir de silicatos de magnésio (olivinas ou serpentinias), formando magnesita, é apresentada nas equações [1] e [2]:



De modo semelhante, podem ser consideradas as reações de carbonatação a

partir da olivina [3], serpentina [4] e wollastonita [5]:





Essas reações químicas [3, 4, 5] são exotérmicas e possuem entalpia de formação (ΔH°) de MgCO_3 de +89 KJ/mol para forsterita, de +64 KJ/mol para serpentina e de +90 KJ/mol para wollastonita.

Em função das propriedades físico-químicas e rendimento obtido nas reações de carbonatação, infere-se que o sequestro de CO_2 em escala industrial necessita de grande quantidade de material carbonatável (olivina, serpentina e outros silicatos ricos em Mg, Ca ou Fe). Neste caso, considerando os pesos moleculares do magnésio ($P.M._{\text{Mg}} = 24$.gramas) e do dióxido de carbono ($P.M._{\text{CO}_2} = 44$.gramas), numa reação com rendimento máximo, o sequestro de uma tonelada de CO_2 dependerá de cerca de 0,5 tonelada de magnésio, ou aproximadamente 1,6 toneladas de forsterita.

Em relação às principais reações de carbonatação envolvendo silicatos de magnésio, a cinética da reação depende da pressão parcial de CO_2 , sendo realizados experimentos em condições variadas de temperatura e pressão. Em seus estudos, Hanchen et al. (2006) conduziram experimentos para dissolução de olivina e serpentina, variando as condições de

temperatura desde 25° C até 400° C, e pressões entre 1 bar e 500 bar, em autoclave de titânio, com medidas da concentração dos elementos dissolvidos utilizando espectrômetro de absorção atômica (AAS), cromatógrafo de íons (IC) e métodos espectrométricos (MB). Os resultados indicaram que o processo pode ser facilitado pela elevação da pressão e valores da constante de equilíbrio maiores que 1. Contudo, nada se pode afirmar quanto à cinética química das reações.

Huijgen et al. (2004) afirmam que a carbonatação mineral pode ocorrer em processo direto, por meio de reações gás-sólido, reações em meio aquoso ou por processo de fusão, em que a reação ocorre após a adição de ácido clorídrico e o processo envolve elevado insumo energético. De maneira alternativa à carbonatação direta, o cálcio e o magnésio podem ser extraídos da estrutura cristalina dos silicatos por meio da adição de diversos agentes, como ácido clorídrico, soda cáustica, ácido sulfúrico ou vapor. Essa extração prévia, segundo Lackner et al. (1995), pode fornecer melhores taxas de reação e aumentar a eficiência do processo de carbonatação.

LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

A área de estudo está situada a nordeste da capital do estado de São Paulo, abrangendo parte dos municípios de Itapira, Amparo, Serra Negra e Lindóia, e possui aproximadamente 415 km² (Figura 1). Insere-se no contexto geológico da Faixa Itapira-Amparo, com a presença de rochas metamórficas de grau médio

a alto, em que predominam rochas ortognáissico-migmatíticas e gnaisses mais antigos atribuídos ao Complexo Amparo, em associação com sequências metavulcanossedimentares do Complexo Itapira.

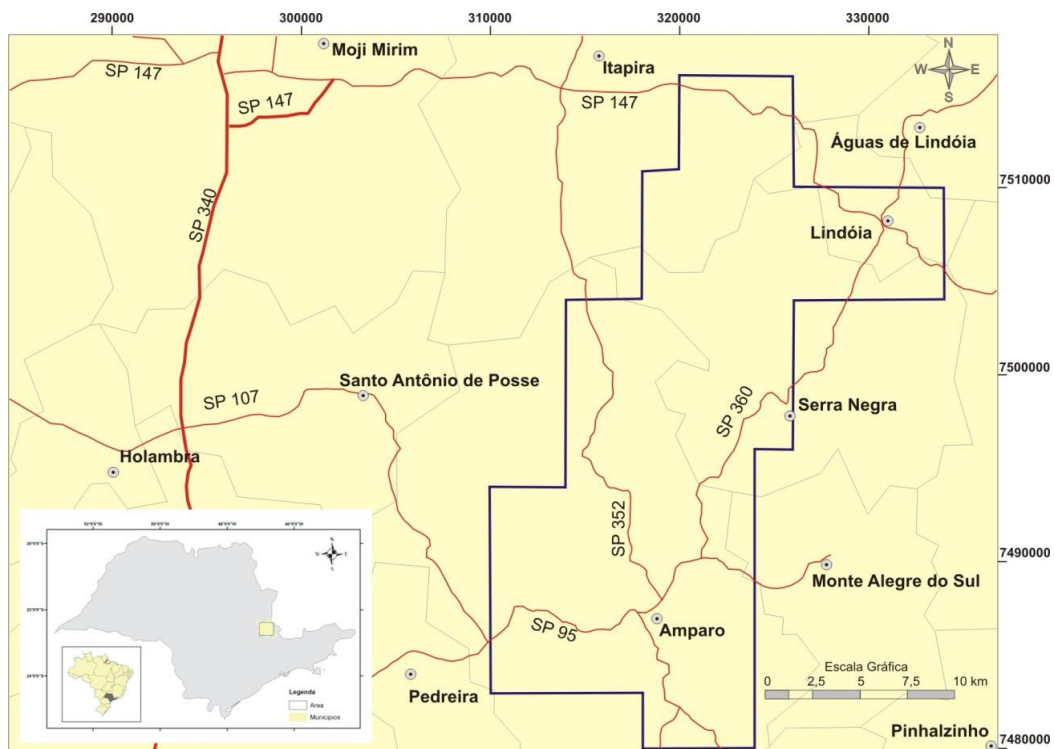


Figura 1. Mapa de localização da área.

GEOLOGIA REGIONAL

A área de estudo está inserida na região central da Província Mantiqueira (Almeida, et al., 1981), que constitui parte dos sistemas orogênicos situados a sul do Cráton do São Francisco (Figura 2), cuja história geológica está associada à evolução policíclica iniciada no Arqueano, e que se estendeu até a aglutinação

do Gondwana Ocidental, durante a Orogênese Brasileira. O contexto geológico regional admite ainda sucessivas colagens e interações de placas tectônicas que formaram complexas faixas móveis acrecionárias, colisionais ou transpressionais, reativadas sucessivamente (Almeida et al., 1981).

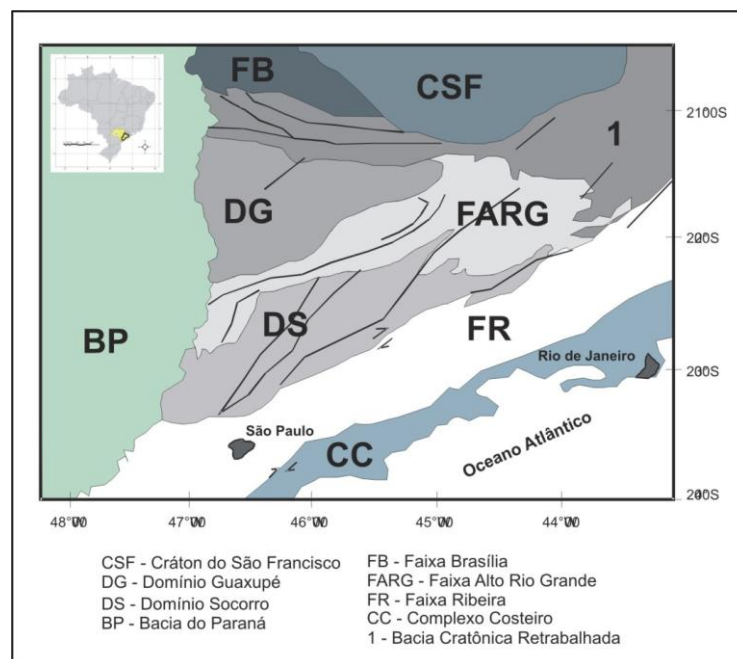


Figura 2. Domínios geotectônicos da Província Mantiqueira Central (Modificado de Hackspacher et al., 2003).

O sistema orogênico que constitui a Província Mantiqueira foi subdividido em domínios ou unidades geotectônicas por diversos autores (Cavalcante et al., 1979; Campos Neto et al., 1990; Ebert et al., 1997), enquanto a porção central dessa província foi subdividida por Moraes et al. (1999) nos domínios Faixa Alto Rio Grande, Socorro, São Roque e Embu, os dois últimos associados à Faixa Ribeira. Ao longo da porção central da Província Mantiqueira, a distribuição de corpos graníticos neoproterozoicos é extensa e geneticamente complexa, ocorrendo desde o Complexo Costeiro até os domínios Socorro e Guaxupé.

A Faixa Alto Rio Grande (FARG) (Hasui & Oliveira, 1984; Campos Neto et al., 1990) está situada a sul do Cráton São Francisco (CSF), limitada a norte pelo Domínio Guaxupé e, a sul, pelo Domínio Socorro (Figura 2), sendo caracterizada por ampla faixa de dobramentos marginal ao CSF, com estruturas formando faixas ou lentes alongadas na direção NE. É composta principalmente por metamorfitos de grau médio a alto, conforme descritos por Ebert (1968), Wernick (1978), Artur (1980), Campos Neto & Basei (1983), que observaram a ocorrência de rochas com foliação de baixo ângulo e indicadores cinemáticos com vergência para NW, em resposta ao regime convergente do Neoproterozoico, transposto por tectônica direcional. O regime compressivo (tangencial e direcional) é responsável pela instalação das zonas de cisalhamento de direção NE e pelas falhas de Campinas, Valinhos e Socorro, resultantes de movimentos relativos entre os diferentes blocos crustais.

Na FARG são descritas zonas de cisalhamento dúcteis e dúcteis-rúpteis de natureza transpressiva, propulsoras do alongamento das unidades basais. Essas estruturas motivaram dobramentos e cataclases que de algum modo promoveram o alojamento de granitoides, afetando tanto a infraestrutura como as unidades supracrustais (Zanardo, 1987; Artur, 1988 e Lazarini, 2000). Pellogia (1990) reconheceu, nos domínios da FARG, na região de Amparo, rochas ortognáissicas e migmatíticas do Complexo Amparo, com intercalações de anfíbolito da associação máfica-ultramáfica de Arcadas.

A Faixa Itapira-Amparo, onde se localiza a área de estudo, foi inicialmente designada por Ebert (1968) e descrita como uma faixa alongada que, em sua porção meridional, apresenta direção NNE/SSW, infletindo-se para ENE/WSW na porção setentrional. É delimitada a nordeste pelo Complexo Guaxupé, através do sistema de falhas ou cisalhamento Jacutinga/Espírito Santo do Dourado/Ribeirão de Pirapetinga, e a sudeste pelo Complexo Socorro, através do sistema de falhas Socorro/Monte Sião ou Inconfidentes.

O arcabouço geológico no domínio da Faixa Itapira-Amparo é constituído por rochas migmatíticas e ortognaisses (Complexo Amparo) e metassedimentos em intercalações com gnaisses quartzo-feldspáticos e migmatitos, além de rochas ultramáficas (Complexo Itapira). As sequências máfico-ultramáficas dessa região apresentam dimensões modestas (métricas a decamétricas), formas lenticulares concordantes com as rochas encaixantes e, de modo geral, contatos abruptos, difusos por assimilação e/ou transicionais (Lazarini, 2000).

As rochas do Complexo Itapira são intensamente recortadas por falhas transcorrentes que limitam e justapõem, em amplas faixas de dobramentos, rochas do Arqueano (Migmatitos Amparo e Ortognaisses Serra Negra) e do Proterozoico Inferior (migmatitos e gnaisses graníticos), por vezes envolvendo magmatismo híbrido em granitos e gnaisses diversos.

Segundo Zanardo (1987), que reconheceu ciclos termo-tectônicos de idade arqueana (Complexo Amparo), transamazônica (Complexo Itapira e granitoides sintectônicos) e brasiliense (Formação Eleutério e cataclasitos), as sequências ultramáficas existentes na região podem corresponder a fragmentos de sequências ofiolíticas. Segundo Pellogia (1990), podem representar restos de *greenstone belts* ou complexos estratiformes intrusivos, dilacerados.

Nesta mesma região, Oliveira et al. (2004) realizaram estudos petrográficos e litogeoquímicos das associações ortoderivadas do embasamento cristalino (Complexo Amparo) e das sequências metavulcânicas máficas e metassedimentos mais jovens do

Complexo Itapira; reconheceram quatro litotipos representativos de rochas metabásicas, metaultrabásicas e anfibolitos: hornblenda xistos, anfibolitos, rochas metaultramáficas e ortopiroxênio anfibolitos, a partir de conjunto de amostras coletadas próximo às cidades de Socorro, Amparo, Monte Sião e Itapira. Os teores de MgO permitiram a subdivisão em dois

grupos: de baixos teores de MgO, entre 6,30% e 8,41% (anfíbólito e ortopiroxênio anfíbólito), e de altos teores de MgO, entre 12,31% e 28,81% (hornblenda xisto e rochas metaultramáficas). A amostra com 28,81% de MgO é de rocha metaultramáfica, interpretada como cumulado, e apresenta altos teores de cromo e níquel (Oliveira et al., 2004).

GEOLOGIA LOCAL

No contexto geológico da Faixa Itapira-Amparo, a ocorrência de rochas metamáficas e metaultramáficas está distribuída segundo a direção NE-SW, muitas vezes na forma de lentes orientadas e pouco espessas. Essas rochas estão associadas à expressiva ocorrência de ortognaisses e migmatitos de composição granodiorítica a tonalítica, na porção leste da área de pesquisa, o que indica o predomínio de rochas do Complexo Amparo, sobretudo nas proximidades das cidades de Amparo, Lindóia e Serra Negra. Essas rochas ocorrem em associação com anfibolitos, gnaisses, anfibólito xistos, quartzo xistos e rochas metaultramáficas (Figura 3).

A distinção entre as unidades que representam os Complexos Amparo e Itapira, baseando-se apenas em critérios petrográficos e estruturais, é bastante difícil, tendo em vista a dificuldade em encontrar padrões de determinação numa sucessão de sinclinais e anticlinais especialmente afetados pela colagem neoproterozoica. Dentre os litotipos descritos por Wernick (1978), destacam-se rochas ortognáissico-migmatíticas, metabásicas (anfíbólitos de filiação subalcalina a toleítica, actinolita xistos e antofilita xistos), metaultramáficas (talco xistos e antofilita-talco xistos), e litotipos anfibolíticos de composição

aluminosa (e.g. granada anfibolitos). Estes últimos ocorrem principalmente nas áreas adjacentes aos municípios de Itapira e Amparo.

Os tipos litológicos predominantes na Faixa Itapira-Amparo são ortognaisses e migmatitos constituídos por quartzo, microclínio, plagioclásio (oligoclásio-andesina), anfibólito, biotita, além de clorita como mineral secundário; como minerais acessórios são encontrados carbonatos, sericita, epidoto, zircão, apatita, titanita, allanita e opacos. Na escala de afloramento são reconhecidas estruturas do tipo flebítica, estromática e *schlieren*; a associação mineralógica é indicativa de grau metamórfico na fácies anfíbólito alto.

As rochas metabásicas são principalmente representadas por sequências metavulcânicas da Faixa Itapira-Amparo, com maior abundância de anfibolitos (ortoderivados), actinolita xistos e anfibólito xistos, quase sempre sob a forma de lentes ou camadas estiradas, em intercalação com rochas quartzo-feldspáticas alongadas na direção NNE. As rochas anfibolíticas apresentam marcante foliação e texturas nematoblástica e granoblástica, sendo representadas principalmente por anfibólito xistos, hornblenda xistos, granada-anfibólito xistos.

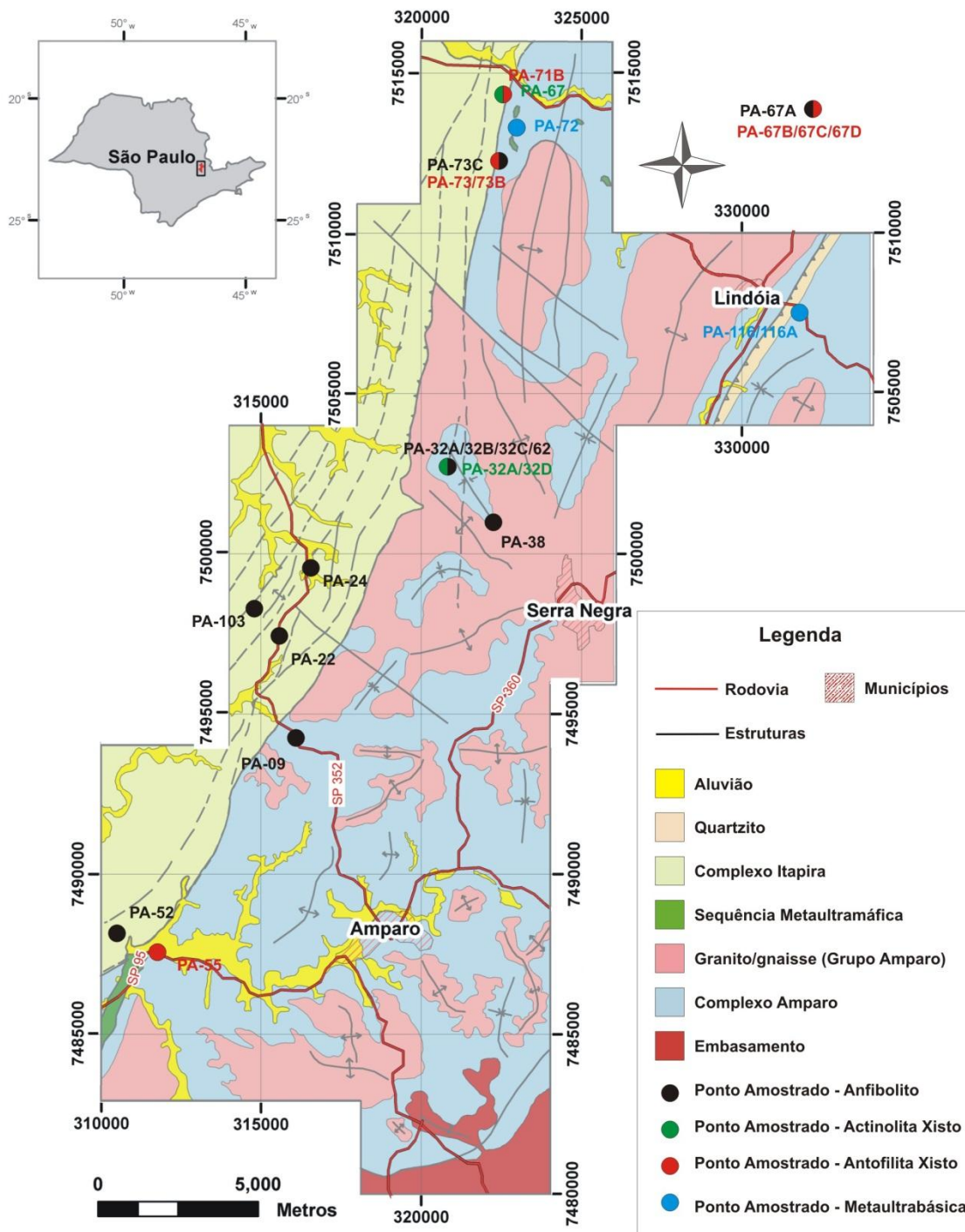


Figura 3. Mapa geológico simplificado da área, mostrando os pontos de coletas das amostras.

As rochas metaultramáficas ocorrem principalmente nas proximidades da cidade de Lindóia, na porção nordeste da área de pesquisa, e na região descrita por Pellogia (1990) como “Associação Máfico-Ultramáfica de Arcadas”, em estreita associação com quartzitos e anfibolitos supracrustais e parcialmente encaixada em ortognaisses migmatíticos. Localmente, corpos lenticulares

de rochas metaultramáficas também ocorrem na Fazenda Boa Esperança (antiga mina de talco e amianto de Itapira) e nas proximidades da cidade de Serra Negra. Em geral, constituem corpos pequenos e descontínuos, muitas vezes apresentando estrutura maciça, representados por metaharzburgitos e metapiroxenitos, com estruturação quase isótropa, e granulação variada. Algumas vezes exibem texturas

nematoblástica e granonematoblástica, com visível formação de agregados de serpentina. A composição mineralógica é dada essencialmente por olivina, bronzita e anfibólio,

espínélio como mineral acessório, e serpentina, clorita, talco e outros minerais ricos em magnésio como secundários.

MATERIAIS E MÉTODOS

A partir de dados obtidos de levantamento bibliográfico e de reconhecimento regional de campo, foram definidas as ocorrências de rochas metamáficas e metaultramáficas na área de estudo. Durante os trabalhos de campo, foram descritos cerca de 200 afloramentos dessas rochas nas proximidades das cidades de Lindóia, Itapira e Amparo, com ênfase especial para as rochas antofilíticas e anfibolíticas que ocorrem nas proximidades de Cristália, e de rochas metaultramáficas que ocorrem próximo a Amparo.

Para estudo das características petrográficas e do modo de ocorrência dos minerais de

interesse, foram coletadas 60 amostras de rochas metamáficas e metaultramáficas (Figura 3) e confeccionadas 53 lâminas delgadas, para análise ao microscópio petrográfico. Após avaliação petrográfica preliminar, foram selecionadas 26 amostras de rochas metamáficas e metaultramáficas, tendo em vista seu potencial para concentração dos óxidos de interesse (CaO, MgO, FeO e MnO). Essas amostras foram submetidas a análises por fluorescência de raios-X, nos laboratórios do IGCE-UNESP (LABOGEO), Rio Claro, utilizando um espectrômetro sequencial Philips PW2400.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A seguir são apresentadas as descrições petrográfica e geoquímica das rochas estudadas, com vistas à definição dos litotipos propícios para o processo de carbonatação mineral.

Petrografia dos litotipos de interesse

Foram reconhecidos na área de estudo quatro litotipos principais de interesse, cujas composições mineralógicas e químicas apresentam condições mais favoráveis ao processo de carbonatação mineral. Suas principais características petrográficas são descritas a seguir.

Anfibolitos

Os anfibolitos constituem o litotipo predominante entre as amostras estudadas, exibindo variações texturais e composicionais nos afloramentos visitados. Geralmente apresentam textura granoblástica a nematoblástica e presença abundante de hornblenda anedral a subedral, fortemente pleocroica (amarelada a verde-escuro), em alguns casos com pleocroísmo incipiente, provavelmente pela composição mais rica em magnésio. A estrutura xistosa, que marca a foliação metamórfica e a textura nematoblástica, é dada pelos cristais de

anfibólio (hornblenda e actinolita), orientados, que muitas vezes ocorrem em associação com granada e/ou biotita.

Esta rocha também apresenta estrutura isotrópica e brechoide (sem orientação mineral perceptível), e presença de fraturas em cristais de até 2,0 mm (Figura 4A). A granulação média é de cerca de 1,0 mm, contudo os prismas maiores atingem 4,0 mm de comprimento. Localmente, desenvolve textura granolepidoblástica e/ou granonematoblástica, quase sempre em estrutura bandada (gnáissica), com granulação média superior a 1,0 mm e inferior a 2,5 mm.

A associação mineral e as texturas observadas sugerem para protólito uma rocha básica (diabásio, gabro ou basalto).

Actinolita xistos

Os actinolita xistos apresentam estrutura foliada como resultado de deformação, por vezes gerando crenulações e textura granonematoblástica, com granulação média variando entre 1,0 mm e 1,5 mm, formando agregados minerais de clinoanfibólio (actinolita-tremolita, Figura 4B) e talco, e exibem frequentes manchas de oxidação.

A actinolita ocorre em cristais subedrais,

com contatos retos a irregulares; apresenta coloração esverdeada e pleocroísmo fraco. Em algumas amostras é evidente o processo de talcificação (alteração do anfibólio para talco em forma de pequenas placas), formando cristais alongados com crescimento aleatório e tamanho maior que 2,0 mm, alta birrefringência e aspecto quebradiço; macroscopicamente, quando a actinolita está preservada, o hábito asbestiforme é evidente, justificando o caráter fibroso apresentado pelas amostras.

A associação mineral encontrada indica tratar-se de protólito de composição máfica a ultramáfica, provavelmente em ambiente com disponibilidade em MgO, afetado por fluidos hidrotermais em condições de pressão e temperatura de fácies xisto-verde.

Antofilita xistos

Nos antofilita xistos as texturas nematoblástica e lepidoblástica são dominantes, sendo observadas estruturas foliadas, lineares e de crenulação. Agregados de talco e anfibólio asbestiforme (antofilita) apresentam texturas ora lepidoblásticas, ora lineares (Figura 4C), com porções fibrorradiadas em arranjo típico das antofilitas. Apresentam estrutura foliada xistosa pouco desenvolvida, com granulação média de 1,5 mm.

Na maior parte das amostras deste tipo

rochoso, a antofilita é o mineral mais abundante e ocorre em distribuição aleatória, formando agregados com talco e anfibólio. A actinolita aparece sob a forma de pequenos cristais em meio ao talco e à antofilita, em prismas pouco corroídos de aproximadamente 1,0 mm. O talco ocorre sob a forma de cristais relativamente grandes, chegando a atingir mais de 1,0 mm de comprimento, ou formando massa de granulação mais fina, que envolve restos de anfibólio e flogopita.

O protólito é provavelmente ortopiroxenito.

Rochas Metaultramáficas

Essas rochas mostram estruturação quase isotrópica e composição ultramáfica, evidenciada pela presença de cristais de olivina em agregados de pequenos cristais anedrais fraturados, com serpentinização ao longo de descontinuidades. Ocorrem ainda piroxênio (bronzita) e anfibólio (tremolita), em cristais subédricos de dimensões médias, bem inferiores às dos piroxênios. De modo geral, a granulação é variável entre 3,0 mm e 0,05 mm; a textura é granonematoblástica, com visível serpentinização intersticial e bordejando cristais de piroxênio e anfibólio (Figura 4D).

O protólito aparenta natureza ígnea, possivelmente próxima ao harzburgito.

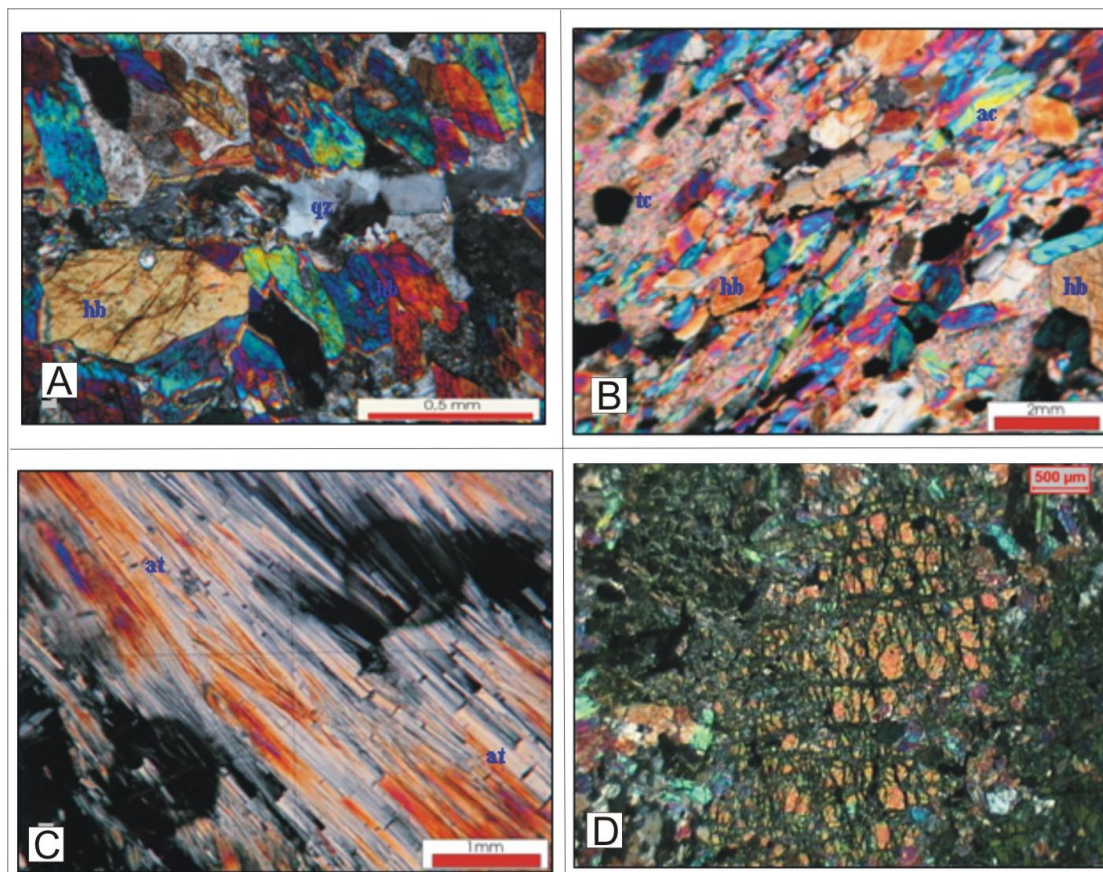


Figura 4. Fotomicrografias dos litotipos principais (nicóis cruzados). (A) Anfibolito com fratura preenchida por quartzo, evidenciando deformação rúptil. (B) Actinolita-xisto mostrando foliação marcada por actinolita e cristais subedrais de hornblenda em meio a massa de clinoanfíbólios. (C) Antofilita-xisto com cristais de antofilita aciculares. A textura lepidoblástica ocorre em arranjo típico da antofilita. (D) Rocha metaultrabásica mostrando pequenos cristais anedrais fraturados, com serpentinização resultante de alteração em condições metamórficas de baixo grau.

Litoquímica

Por meio da fluorescência de raios-X, foram analisados os elementos maiores contidos em 26 amostras selecionadas, com vistas à obtenção de suas concentrações. Os resultados das análises são apresentados na tabela 1. Com base nos resultados obtidos, foi construído um diagrama ternário envolvendo os termos ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO}$), CaO e MgO , e outro envolvendo os termos SiO_2 , Al_2O_3 e ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{CaO}$). A classificação composicional, segundo os percentuais apresentados na tabela 1, indica duas classes distintas quanto ao teor de MgO :

os litotipos anfibolitos e actinolita xistos apresentam menores teores de magnésio e maiores concentrações de ferro e manganês, enquanto os antofilita xistos e as rochas metaultramáficas são mais ricas em magnésio, como anteriormente reconhecido por Oliveira et al. (2004) (Figura 5A). As rochas metaultramáficas e antofilita xistos apresentam menores concentrações de cálcio. Os diagramas confirmaram valores próximos de sílica para todos os litotipos, além de concentrações de alumínio pouco elevadas (Figura 5B).

Tabela 1. Resultados analíticos de Fluorescência de Raios-X (em porcentagem)

Amostra	Litotipo	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI	Soma
PA09	Anfibolito	47.73	1.26	14.97	14.17	0.10	8.08	9.49	2.86	0.46	0.14	0.75	100.01
PA-22		53.26	1.02	14.67	9.91	0.15	6.26	8.45	3.16	1.06	0.26	1.79	99.99
PA-24		50.16	0.57	11.25	10.19	0.17	10.37	9.83	1.71	1.11	0.06	4.57	99.99
PA32-B		50.17	0.61	4.62	14.17	0.16	17.75	9.50	0.37	0.04	0.07	2.55	100.00
PA32-C		51.06	0.62	4.78	12.95	0.19	16.23	11.79	0.94	0.04	0.05	1.35	99.99

PA38		51.78	0.47	7.02	11.98	0.23	13.55	11.40	1.13	1.12	0.01	1.34	100.00
PA52		59.20	1.55	13.32	11.48	0.10	2.36	4.81	2.64	3.61	0.31	0.64	100.02
PA62		48.14	1.28	9.83	15.89	0.18	9.66	10.54	1.93	0.37	0.14	2.05	100.01
PA67-A		53.33	0.70	7.12	12.82	0.22	12.32	9.98	0.91	0.86	0.07	1.66	99.99
PA73-C		55.71	0.17	3.53	9.61	0.20	16.63	11.36	0.62	0.39	0.16	1.61	100.00
PA103		53.93	0.67	14.75	10.61	0.20	6.47	9.08	2.51	0.34	0.12	1.34	100.01
PA32-A	Actinolita-Xisto	50.43	1.29	10.56	14.53	0.20	8.60	9.98	2.75	0.38	0.14	1.14	99.99
PA32-D		55.42	0.86	8.24	11.57	0.18	8.84	12.23	1.04	0.55	0.08	1.00	100.01
PA67		51.53	0.80	8.35	13.61	0.21	11.99	9.70	1.02	0.97	0.13	1.69	100.00
PA55	Antofilita-Xisto	51.38	0.28	6.30	9.60	0.11	23.29	6.77	0.32	0.04	0.02	1.99	100.10
PA55-A		51.62	0.24	5.52	9.35	0.10	24.32	6.81	0.42	0.02	0.02	1.58	100.01
PA67-B		59.20	0.00	0.47	8.18	0.12	29.04	0.33	0.01	0.00	0.01	2.65	100.00
PA67-C		57.85	0.02	1.17	9.53	0.17	27.66	0.41	0.01	0.01	0.01	3.17	99.99
PA67-D		57.23	0.02	1.15	9.24	0.16	28.22	0.42	0.02	0.06	0.01	3.48	99.99
PA71		56.55	0.03	1.63	9.67	0.10	25.30	0.31	0.08	0.24	0.01	6.08	100.00
PA71-B		56.78	0.03	1.76	9.76	0.08	24.65	0.27	0.08	0.19	0.01	6.38	99.99
PA73		57.81	0.05	0.92	8.97	0.11	27.41	0.58	0.09	0.01	0.00	4.07	100.02
PA73-B		60.17	0.00	0.26	6.84	0.06	28.58	0.20	0.11	0.01	0.01	3.75	99.99
PA72	Metaultrabásica	57.72	0.02	1.08	8.81	0.10	26.74	0.17	0.09	0.05	0.01	5.20	99.99
PA116		48.57	0.13	3.99	8.29	0.10	29.16	4.60	0.21	0.03	0.01	4.91	100.01
PA116-A		46.78	0.09	4.10	8.10	0.10	30.03	3.90	0.14	0.03	0.01	6.73	100.01

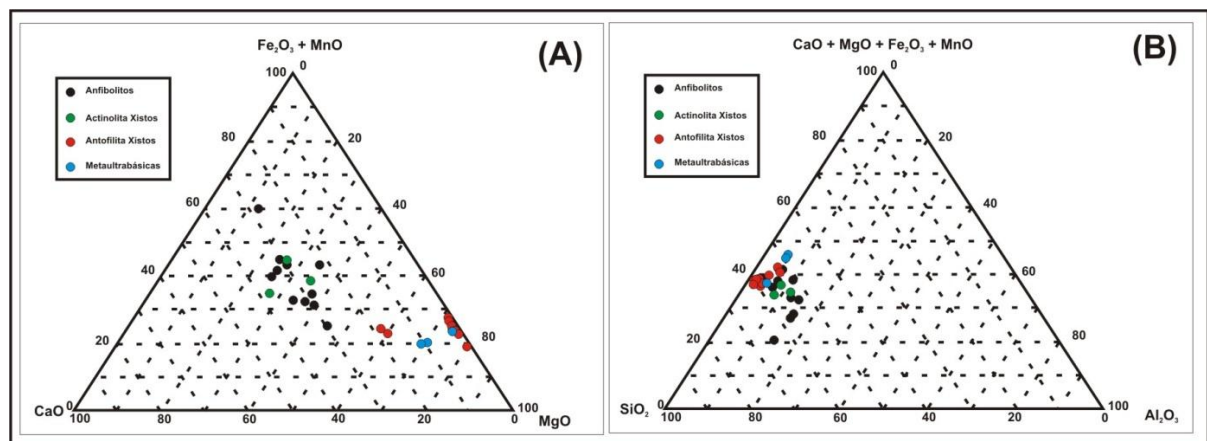


Figura 5. (A) Diagrama ternário ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO}$, MgO e CaO) mostrando clara distinção das concentrações de magnésio para os litotipos presentes na área. **(B)** Diagrama ternário ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO} + \text{MgO} + \text{CaO}$, SiO_2 e Al_2O_3) mostrando a característica hipo-aluminosa dos litotipos.

A avaliação das composições químicas dos litotipos presentes na área, por meio dos diagramas ternários, confirma a presença de dois grandes grupos litológicos dentro do contexto das rochas metabásicas e metaultramáficas da Faixa Itapira-Amparo: um constituído por anfibolitos e actinolita xistos

(Grupo 1) e outro por antofilita xistos e rochas metaultramáficas (Grupo 2).

A comparação das percentagens médias dos elementos de interesse para a carbonatação mineral (cálcio, magnésio, manganês e ferro – Tabela 2) nestes litotipos mostra que, enquanto nas rochas do grupo 1 ocorrem elevadas concentrações de ferro e cálcio, nos litotipos do

grupo 2 ocorrem maiores concentrações de magnésio.

Tabela 2. Composição química média dos litotipos estudados (em porcentagem)

Litotipo	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
Anfibolito	52.22	0.81	9.62	12.16	0.17	10.88	9.66	1.71	0.85	0.13
Actinolita-Xisto	52.46	0.98	9.05	13.24	0.20	9.81	10.63	1.60	0.63	0.12
Antofilita-Xisto	56.51	0.08	2.13	9.01	0.11	26.50	1.79	0.13	0.06	0.01
Metaultramáfica	51.02	0.08	3.06	8.40	0.10	28.65	2.89	0.15	0.04	0.01

Potencial de carbonatação mineral

O processo de carbonatação mineral envolve a transformação de silicatos de magnésio e cálcio em carbonatos, fixando o CO₂ de maneira permanente. Além desses minerais, os elementos ferro, em sua forma reduzida (Fe²⁺), e manganês podem formar carbonatos, como siderita (FeCO₃) e rodocrosita (MnCO₃).

No início desta pesquisa foi dada atenção especial à possibilidade de carbonatação mineral por meio das reações de produção de carbonatos envolvendo apenas os metais alcalino-terrosos mais comuns, cálcio e magnésio, e sob essa ótica foram realizadas as análises de fluorescência de raios X, com vistas à determinação das composições químicas dos litotipos de interesse.

A presença de teores expressivos de Fe₂O₃, que indica altas concentrações de ferro nas rochas analisadas, ressalta a importância desse elemento nas reações de carbonatação mineral. No entanto, como não foi contemplada a estimativa de Fe²⁺ em separado, esse método de análise não é o mais apropriado para tal fim.

Assim, para se avaliar a quantidade de CO₂ sequestrável a partir do Fe²⁺ existente na rocha, ainda que em caráter preliminar e exploratório, as razões Fe³⁺/Fe²⁺ foram estimadas por duas maneiras distintas: (1) a partir da avaliação das relações estequiométricas presentes nos principais minerais que contêm o íon ferro em sua composição; e (2) a partir da relação existente entre a razão Fe³⁺/Fe²⁺ e as

proporções de álcalis e sílica [(Na₂O + K₂O) vs. SiO₂] para tipos rochosos de origem vulcânica (Middlemost, 1989; Le Bas et al., 1986).

Os dois métodos empregados nessa avaliação apresentam limitações; no primeiro, as incertezas estão associadas à variabilidade da razão Fe³⁺/Fe²⁺ presente nos minerais, especialmente na hornblenda, enquanto no segundo método as limitações estão no desconhecimento dos processos de oxidação do ferro que podem ocorrer em razão do metamorfismo pelo qual passaram as rochas. Entretanto, como o objetivo do trabalho é o de se avaliar o potencial de carbonatação das rochas metabásicas e metaultramáficas da área de estudo, torna-se importante a estimativa do potencial de fixação do carbono via formação de carbonatos de ferro.

Na primeira aproximação, para os anfibolitos assumiu-se que todo o ferro existente na rocha está associado à hornblenda; para os actinolita xistos, o ferro encontra-se na actinolita; para os antofilita xistos, o ferro encontra-se na antofilita; e para as rochas metaultramáficas, o ferro está concentrado na actinolita, nos ortopiroxênios e nos restos de olivina.

As relações modais estimadas para cada litotipo, bem como a relação Fe³⁺/Fe²⁺ para cada espécie mineral, assumindo-se as relações médias descritas na literatura, são apresentadas na tabela 3.

Tabela 3. Proporção modal dos minerais contendo ferro e a sua relação Fe³⁺/Fe²⁺

Linotipo	Minerais	%	Relação Fe ³⁺ /Fe ²⁺	Fonte
Anfibolito	Hornblenda	100%	0,66	P. 275 – Vol. 2B, Deer <i>et al.</i> (1997)

	$[(Ca,Na,K,Mn)_{2-3}(Mg,Fe,Al)_{3-5}Si_8O_{22}(OH)_2]$			
Actinolita-Xisto	Actinolita $[(Ca,Na)_2(Mg,Fe)_5(Si,Al)_8O_{22}(OH)_2]$	80%	0,10	Média dos valores observados na Tab. 6 (p.142-145, Vol. 2B – Deer <i>et al.</i> , 1997)
	Magnetita $[Fe_3O_4]$	20%	2,33	
Antofilita-Xisto	Antofilita $[(Mg, Fe^{+2})_7[Si_8O_{22}](OH,F)_2]$	93%	0,05	Média dos valores observados nas Tab. 1 e 2 (p.30-33, Vol. 2B – Deer <i>et al.</i> , 1997)
	Magnetita $[Fe_3O_4]$	7%	2,33	
Meta-ultramáfica	Actinolita $[(Ca,Na)_2(Mg,Fe)_5(Si,Al)_8O_{22}(OH)_2]$	50%	0,10	Média dos valores observados na Tab. 6 (p.142-145, Vol. 2B – Deer <i>et al.</i> , 1997)
	Ortopiroxênio (Bronzita) $[(Mg,Fe)_2Si_2O_6]$	50%	0,11	Média dos valores observados nas Tab. 4 e 5 (p.41-49, Vol. 2B – Deer <i>et al.</i> , 1997)

Middelmost (1989) apresenta a distribuição das razões Fe^{+3}/Fe^{2+} estabelecidas para as rochas vulcânicas de composição básica, segundo a classificação proposta por Le Bas et al. (1986), que tem como base o diagrama TAS (*Total Alkalis x Silica*). Nesse estudo, o autor, avalia como a variação das razões Fe^{+3}/Fe^{2+} altera a composição normativa calculada para essas rochas e, portanto, sua classificação. Esse diagrama foi

utilizado para a estimativa das razões Fe^{+3}/Fe^{2+} nas rochas amostradas.

As quantidades de ferro foram recalculadas para cada litotipo, utilizando-se das relações apresentadas na tabela 3, diferenciando-se as quantidades de Fe^{2+} e Fe^{3+} . A tabela 4 mostra os resultados obtidos e as concentrações de Fe^{2+} presentes em cada litotipo, segundo as duas aproximações utilizadas.

Tabela 4. Cálculo estimativo da quantidade de Fe^{2+} disponível em cada litotipo para a carbonatação mineral

Litotipo	Fe_2O_3 (%)	Fe (g/100g)	Minerais	Fe (g/100g)	Relação Fe^{3+}/Fe^{2+}	Fe^{2+} (g/100g)	Fe^{3+} (g/100g)	Fe^{2+} Total (g/100g)
Anfibolito	12,16	8,51	Hornblenda (100%)	8,51	0,66	5,13	3,38	5,13
Actinolita-	13,24	9,26	Actinolita	7,41	0,10	6,73	0,67	7,29

Xisto			(80%)					
			Magnetita (20%)	1,85	2,33	0,56	1,30	
Antofilita- Xisto	9,01	6,31	Antofilita (93%)	5,85	0,05	5,58	0,28	5,71
			Magnetita (7%)	0,44	2,33	0,13	0,31	
Metaultram- áfica	8,40	5,87	Actinolita (50%)	2,94	0,10	2,67	0,27	5,32
			Bronzita (50%)	2,94	0,11	2,65	0,29	

O cálculo do volume máximo de CO₂ consumido na carbonatação foi estabelecido a partir da composição química média de cada litotipo, considerando-se a variação das concentrações de Fe²⁺; para o balanço de massa considerou-se, em todas as reações químicas, um rendimento de 100% (Tabela 5).

Tabela 5. Concentração média dos elementos e potencial de sequestro de CO₂ (gramas/100 g de amostra) por litotipo

Litotipos	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Fe ²⁺	Mn ²⁺	Total
	(g/100g)	(g/100g)	(g/100g)	(g/100g)	
Anfibolito	6,56	6,90	5,13	0,13	18,72
CO ₂ máximo consumido	12,08	7,59	4,03	0,11	23,81
Actinolita-xisto	5,92	7,60	7,29	0,15	20,96
CO ₂ máximo consumido	10,82	8,37	5,72	0,12	25,03
Antofilita-xisto	15,98	1,28	5,85	0,09	23,20
CO ₂ máximo consumido	30,05	1,41	4,60	0,07	36,13
Metaultramáfica	17,27	2,06	5,32	0,08	24,73
CO ₂ máximo consumido	31,59	2,27	4,18	0,06	38,10

Os resultados apontam uma maior capacidade de retenção de CO₂ das rochas do grupo 2, de antofilita xistos e rochas

metaultramáficas, em razão dos altos conteúdos em magnésio.

CONCLUSÕES

A caracterização petrográfica de amostras de rochas metabásicas e/ou ultramáficas do Complexo Amparo-Itapira, na área de estudo, identificou anfibolitos ricos em hornblenda e Mg-hornblenda e xistos antofilíticos no município de Itapira, além de actinolita xistos e rochas metaultramáficas nas proximidades da cidade de Amparo. As rochas de natureza ultramáfica, com talco e serpentina, ocorrem em áreas de afloramentos restritos, geralmente em associação com corpos anfibolíticos e/ou xistos máficos. As análises litogeoquímicas mostraram que as rochas metabásicas e metaultramáficas apresentam, de modo geral, teores elevados de Fe, Mn, Mg e Ca, com relativa abundância de ferro (Fe_2O_3) e manganês (MnO) nas amostras de anfibolito e actinolita xistos, e de cálcio (CaO) e magnésio

(MgO) nas amostras de antofilita xistos e de rochas metaultramáficas.

Esses resultados indicam capacidade de fixação de CO_2 variável para cada tipo litológico. As rochas que apresentam menor capacidade para a carbonatação mineral são os anfibolitos, seguidos pelos actinolita xistos. Rochas ricas em magnésio, como os antofilita xistos e as metaultramáficas, por sua vez, apresentam a maior capacidade de fixação de CO_2 via carbonatação mineral.

Esses resultados, ainda que preliminares, permitem a indicação de prospectos para melhor direcionar a avaliação de jazidas para utilização em processos de carbonatação mineral, considerando-se litotipos similares aos aqui estudados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à PETROBRAS pelo financiamento da pesquisa que possibilitou a realização deste trabalho, bem como à cuidadosa análise do revisor *ad hoc* deste artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R.A. Brazilian structural provinces: an introduction. **Earth Science Review**, v.17, 1-29p, 1981.
2. ARTUR, A.C. **Rochas metamórficas dos arredores de Itapira – SP**, 1980. 193p. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.
3. CAMPOS NETO, M.C.; BASEI, M.A.S. Evolução estrutural brasileira no nordeste de São Paulo: dobramentos superpostos e esboço estratigráfico e tectônico. *In: Simpósio Regional de Geologia, Atas...*, 4., São Paulo, SBG, 61-78p, 1983.
4. CAMPOS NETO, M.C.; BASEI, M.A.S.; ALVES, F.R.; VASCONCELOS, A.C.B. A nappe de cavalgamento de Socorro (SP-MG). *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 33, Rio de Janeiro, SBG, **Anais**, 4:1809-1822, 1984.
5. CAVALCANTE, J.C.; CUNHA, H.C.S.; CHIEREGATI, L.A.; KAEFER, L.Q.; ROCHA, J.M.; DAITX, E.C; COUTINHO, M.G.N.; YAMAMOTO, K.; DRUMOND, J.B.V.; ROSA, D.B.; RAMALHO, R. **Projeto Sapucaí: estados de São Paulo e Minas Gerais**. Brasília, DNPM/CPRM, 299p, 1999
6. DEER, W.A., HOWIE, R.A.; ZUSSMAN, J. **An introduction to the rock forming minerals, Londres**, The Geological Society, London. 4Vol. 1997.
7. EBERT, H. Ocorrência da fácies granulítica no sul de Minas Gerais e áreas adjacentes, em dependência da estrutura orogenética: hipótese sobre a sua origem. **An. Acad. Bras. Ciênc.**, v.40, p.215-229, 1968.
8. EBERT, H.D.; MALAGUTTI FILHO, W.; HASUY, Y.; HARALYI, N.E.; HACSPACHER, P.C.; MORALES, N.; SOUZA, C.A. Compartimentação crustal do Sul de Minas Gerais a partir de dados gravimétricos e lito-estruturais. *In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS*, 6, Pirenópolis (GO), 1997. *Anais*, p.31-35, 1997.
9. HANCHEN, M., PRIGIOBBE V., STORTI G., MAZZOTTI M. Mineral carbonation: Kinetic study of olivine

- dissolution and carbonate precipitation. *In: GHGT-8 8th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, Trondheim, Norway, **Proceedings...**2006, 6p.
10. HACKSPACHER, P.C., FETTER, A.H., EBERT, H.D., JANASI, V.A., DANTAS, E.L., OLIVEIRA, M.A.F., BRAGA, I.F., NEGRI, F.A.. Magmatismo HA CA. 660 - 640 Ma no Domínio Socorro: Registros de Convergência Pré-Colisional na Aglutinação do Gondwana Ocidental. **Revista do Instituto de Geociências – USP**. São Paulo, v.3, 85-96p, 2003.
 11. HASUI, Y., OLIVEIRA, M.A.F.. Província Mantiqueira – Setor Central. *In: Almeida, F.F.M. e Hasui, Y. (coords), O Pré-Cambriano no Brasil*, Edgard Bluncher, São Paulo. 1984.
 12. HOUGHTON, R.A.. Terrestrial carbon storage: global lessons for Amazonian research. **Ciência e Cultura - Journal of the Brazilian Association for the Advancement of Science** 49, 58-72, 1997.
 13. HUIJGEN, W.J.J., WITKAMP, G.J., COMANS, R.N.J. CO₂ sequestration by mineral carbonation. *In: 4^o Netherlands Process Technology Symposium*, Veldhoven, Netherlands, 2004.
 14. IEA International Energy Agency. World Energy Outlook. (2007). Disponível em: www.iea.org. Acesso em: junho, 2007.
 15. IPCC Carbon Dioxide Capture and Storage: Summary for Policymakers and Technical Summary. Metz, B., Davidson, O., Coninck, H., Loos, M., Meyer, L. (Eds). IPCC Special Report. 2005. Disponível em: <http://www.ipcc.ch>. Acesso em: junho, 2007.
 16. IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 1. 2006. Disponível em: <http://www.ipcc.ch> Acesso em: junho, 2007.
 17. LACKNER, K.S., WENDT, C.H., BUTT, D.P., JOYCE, E.L., SHARP, D.H. Carbon Dioxide Disposal in Carbonate Minerals. *Energy*, v.20(11): 1153-1170. 1995
 18. LAZARINI, A.P. **Petrologia de metabasitos/ultrabasitos da região de Águas de Lindóia**. 2000, 134p. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000.
 19. LE BAS, M.J.; LE MAITRE, R.W.; STRECKISEN, A.; ZANETTIN, B, A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. **Journal of Petrology**, v.27(3):745-750, 1976.
 20. MIDDLEMOST, E. A. K. Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks: **Chemical Geology**, v. 77, p.19-26, 1989.
 21. OLIVEIRA, M.A.F, ZANARDO, A., LAZARINI, A.P., SILVA, A.H.M & NARDI, A.J.R. Caracterização petrográfica e geoquímica de rochas anfíbolíticas e metamórficas associadas às faixas móveis metamórficas Amparo e Itapira, na região nordeste de São Paulo. **Geociências**, v.34, p.393-400, 2004.
 22. PARK, A.H.A., FAN, L.S. CO₂ mineral sequestration: physically activated dissolution of serpentine and pH swing process. **Chemical Engineering Science** v.59 p.5241-5247, 2004.
 23. PELLOGLIA, A.U.G. **A Faixa do Alto Rio Grande na Região de Amparo (SP)**. 1990, 124p. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.
 24. SEIFRITZ, W. CO₂ disposal by means of silicates; **Nature** 345:489, 1990.
 25. WERNICK, E. Contribuição a estratigrafia do Pré-cambriano do leste do estado de São Paulo e áreas vizinhas. **Revista Brasileira de Geociências** v.8: p.206-216, 1978.
 26. WERNICK E.; PENALVA F. As relações entre os grupos Amparo e Itapira (SP). *In: SBG, Congr. Bras. Geol.*, 27, Aracaju, **Boletim Especial**, 1:116-117, 1973.
 27. ZANARDO A. **Análise petrológica e microestrutural das rochas da folha Águas de Lindóia, São Paulo**. 1987, 270p. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, 1987.

*Manuscrito recebido em: 05 de setembro de 2011
Revisado e Aceito em: 23 de novembro de 2012*