UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BIANCA DE ANDRADE COLLE

PETROGRAFIA E QUÍMICA MINERAL DE ROCHAS METAULTRAMÁFICAS DO ARQUIPÉLAGO DE SÃO PEDRO E SÃO PAULO, ZONA DA FALHA TRANSFORMANTE SÃO PAULO - CADEIA MESO-OCEÂNICA DO ATLÂNTICO NORTE EQUATORIAL

CURITIBA

2016

BIANCA DE ANDRADE COLLE

PETROGRAFIA E QUÍMICA MINERAL DE ROCHAS METAULTRAMÁFICAS DO ARQUIPÉLAGO DE SÃO PEDRO E SÃO PAULO, ZONA DA FALHA TRANSFORMANTE SÃO PAULO - CADEIA MESO-OCEÂNICA DO ATLÂNTICO NORTE EQUATORIAL

Monografia apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II (GC-132), do Curso de Geologia, sob a orientação do Prof. Dr. Carlos Eduardo de Mesquita Barros e do coorientador Prof. Dr. Leonardo Evangelista Lagoeiro, do Departamento de Geologia do Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná.

CURITIBA

2016

Dedico este trabalho aos meus pais, pela fé e pelo carinho depositados em minha jornada. E ao Rafael, por todo o amor, pela fé e motivação diários, me ensinando sempre a perseguir fielmente os meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e ao meu pai Sylvio pela oportunidade fantástica de estudar e viver o curso de Geologia.

Agradeço ao Rafael pela amizade, pelas risadas e por estar sempre ao meu lado me motivando a seguir em frente. Agradeço principalmente pelos momentos em que ouvia atentamente as minhas explicações a respeito da composição química do manto da Terra.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Eduardo de Mesquita Barros e ao meu coorientador Prof. Dr. Leonardo Evangelista Lagoeiro, pela rara oportunidade de conhecer um pouco sobre o manto terrestre, pelo conhecimento recebido, e pela paciência e amizade fundamentais ao longo desses últimos meses de trabalho.

Agradeço à Profª. Drª. Eleonora Maria Gouvea Vasconcellos pelo conhecimento recebido, pelas dicas e pela amizade durante a realização desse trabalho.

Agradeço também pelo suporte do Centro de Microscopia Eletrônica - CME da Universidade Federal do Paraná na realização das análises químicas utilizadas neste trabalho.

E também gostaria de agradecer às queridas Eliane, Liana, Marilda, à amiga Daianne e pela minha irmã Juliana, pelo apoio e por sempre apostarem em meu sucesso diante de todos os obstáculos. Meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Peridotitos são rochas provenientes do manto da Terra compostas predominantemente por minerais magnesianos. As principais rochas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP) são os peridotitos miloníticos fraturados e serpentinizados. Em razão das deformações, alterações e intemperismo, a paragênese primária dessas rochas ultramáficas foi alterada. O projeto de pesquisa visa caracterizar as fases minerais dos peridotitos através da petrografia e da química mineral de 15 seções delgadas do ASPSP. As composições dos porfiroclastos foram estimadas visualmente através do uso do microscópio óptico de transmissão enquanto os dados de química mineral foram obtidos pela técnica de EDS - espectroscopia de dispersão de energia de raios X - em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Nas seções petrográficas verificou-se a ocorrência de porfiroclastos anédricos e elípticos de olivina, enstatita, pigeonita e espinélio, bem como anédricos de kaersutita e provavelmente de pargasita, subordinadamente. Através da técnica de EDS/MEV foi identificada apenas a olivina (Fo_{92-89}) na matriz recristalizada, e sendo assim, sugere-se que a matriz seja composta pelos mesmos minerais dos porfiroclastos. Os óxidos determinados por EDS/MEV foram: SiO_2, MgO, FeO, Al_2O_3, CaO, Cr_2O_3, TiO_2, NiO, MnO, Na_2O e K_2O. As feições de deformação observadas na olivina sugerem que a milonitização ocorreu a temperaturas de no mínimo 430 °C - em profundidades de cerca de 15 km - e sob a influência da Zona da Falha Transformante São Paulo. As feições de deformação dúctil nos cristais indicam que a milonitização foi gerada por processos de plasticidade intracristalina associados à recristalização dinâmica. As microfraturas apresentadas no material estão parcialmente preenchidas por serpentina - gerada por processo de serpentinização a partir de aproximadamente 500 °C - e por minerais opacos e carbonato, subordinadamente. Com exceção da olivina identificada na matriz recristalizada, o restante das análises químicas não apresentou a acurácia necessária para o tratamento dos dados, possivelmente pela presença de: diminutas soluções sólidas; inclusões compostas por Fe, Ti, Cr e Al nos cristais; frequente presença de SO_3 e CO_2 nos resultados obtidos em óxidos; e/ou diminuto tamanho dos minerais em seção delgada, associado a baixa resolução do feixe de elétrons do MEV. Sendo assim, sugere-se que as análises por EDS/MEV sejam refeitas visando à calibração do equipamento através de uso de parâmetros pré-determinados para o trabalho com estes tipos de rochas.

Palavras-Chave: Peridotitos miloníticos; Petrografia; Arquipélago de São Pedro e São Paulo.

ABSTRACT

Peridotites are rocks from the Earth's mantle predominantly composed by magnesium minerals. The main rocks of the Saint Peter and Saint Paul Archipelago (SPSPA) are the fractured and serpentinized peridotite mylonites. Due to the deformations, alterations and weathering, the primary paragenesis of these ultramafic rocks was altered. The research project aims to characterize the mineral phases of peridotites through petrography and mineral chemistry of 15 thin sections from the SPSPA. The porphyroclasts' composition were estimated visually using a transmission optical microscope while the mineral chemistry data were obtained using the EDS technique – Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy - in the Scanning Electron Microscope (SEM). In the petrographic sections, the occurrence of anhedral and elliptical porphyroclasts of olivine, enstatite, piogenite, spinel and anhedral kaersutite with pargasite, subordinately, was verified. Only olivine (Fo_{92-89}) was identified in the recrystallized matrix, after analysis with the EDS/SEM, and thus, it is suggested that the matrix be composed of the same minerals of the porphyroclasts. The oxides determined with the EDS/SEM were: SiO_2, MgO, FeO, Al_2O_3, CaO, Cr_2O_3, TiO_2, NiO, MnO, Na_2O and K_2O. The deformation features observed in the olivine suggest that the mylonitization occurred at minimum temperature of 430°C - around 15 km depth - and under influence of Saint Paul Transform Fault Zone. The ductile deformation features in the crystals indicate that the mylonitization was a product of an intracrystalline plasticity related to dynamic recrystallization mechanisms. The micro-fractures presented in the material are partially filled with serpentine – product of a serpentinization process, from ca. 500 °C – and by opaque minerals and carbonate, subordinately. In the exception of olivine identified in the recrystallized matrix, the remainder of the chemical analysis did no present the required accuracy for the data treatment, possibly by the presence of: small solid solutions; inclusions composed by Fe, Ti, Cr and Al in the crystals; frequent presence of SO_3 and CO_2 in the results obtained in oxides; and/or the small size of the minerals in thin section, associated with low resolution of the electron beam of the SEM. Therefore, it is suggested that the analysis by EDS/SEM should be redone in order to calibrate the equipment by the use of pre-determined parameters to work with these types of rocks.

Key-words: Peridotite mylonites; Petrography; Saint Peter and Saint Paul Rocks.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Mapa de localização do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, posicionado na Zona de Fratura de São Paulo, e o ambiente tectônico em que se encontra. FONTE: SICHEL *et al.* (2009).....14

FIGURA 2: O Arquipélago de São Pedro e São Paulo visto em imagem de satélite. FONTE: Modificado de GOOGLE EARTH (2016).....14

FIGURA 3: Microscópio eletrônico de varredura (MEV) utilizado no CME, modelo TESCAN VEGA3 LMU. FONTE: www.cme.ufpr.br (2016). Acesso em 22/11/2016.....16

FIGURA 4: Geomorfologia submarina da Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo (banco de dados do TOPO, do Scripps Institute of Oceanography, University of California - San Diego. A resolução aparente é 1.85 km). FONTE: MOTOKI *et al.* (2010).....18

FIGURA 5: Mapa geológico da região emersa do ASPSP. FONTE: CAMPOS *et al*. (2009).....20

FIGURA 6: Localização da coleta das amostras distribuídas no mapa geológico proposto por Campos *et al.* (2009). O nome das amostras coletadas faz referência ao nome da ilha onde foi realizada a amostragem: IBE - Ilha Belmonte; INE – Ilha Nordeste ou São Pedro; ICH – Ilha Challenger ou São Paulo; ICO – Rocha Coutinho; IS – Ilha Sirius. FONTE: Modificado de CAMPOS *et al.* (2009).....21

FIGURA 7: Diagrama Ol – Opx – Cpx com a classificação das rochas do ASPSP indicadas pela legenda de cada amostra: IBE 45 (pontos vermelhos), IBE 23 (pontos verdes), IBE 30 (pontos roxos), ICO (pontos amarelos), IS5E (pontos azuis), INE (pontos cinzas) e ICH (pontos marrons). FONTE: Modificado de Streckeisen (1973).....23

FIGURA 8: Fotomicrografias da amostra de harzburgito ultramilonítico (IBE45a) com porfiroclastos finos de olivina e suas feições.....25

FIGURA 9: Fotomicrografias da amostra de dunito milonítico (IBE45b) com porfiroclastos finos de espinélio em meio a matriz afanítica e mostrando veios de serpentina preenchendo microfraturas....26

FIGURA 10: Fotomicrografia da amostra de dunito milonítico (IBE45b) apresentando veio estreito de olivina e enstatita, perpendicular à foliação milonítica da rocha e cortado por microfalha preenchida por serpentina.....27

FIGURA 11: Fotomicrografias da amostra de dunito ultramilonítico (IBE23Da) e suas feições.....28

FIGURA 12: Fotomicrografia da amostra de clinopiroxenito milonítico (IBE23Ba) mostrando um porfiroclasto de olivina com borda alterada para opacos em meio a matriz milonítica e com cristais muito finos de espinélio.....29

FIGURA 13: Fotomicrografia da amostra de olivina websterito milonítico (IBE23Bb) mostrando um porfiroclasto de olivina com cauda recristalizada em meio a matriz milonítica e com cristais muito finos de espinélio.....30

FIGURA 14: Fotomicrografias da amostra de olivina clinopiroxenito ultramilonítico (IBE30a) dos porfiroclastos finos de pigeonita em meio a matriz ultramilonítica mostrando opacos distribuídos na matriz.....31

FIGURA 15: Fotomicrografias da amostra de olivina websterito milonítico (IBE30b) mostrando um provável porfiroclasto fino de anfibólio pargasita em meio a matriz ultramilonítica com espinélio distribuído na matriz.....32

FIGURA 16: Fotomicrografias da amostra de olivina ortopiroxenito ultramilonítico (ICO1Ba) com porfiroclastos finos de enstatita em meio a matriz ultramilonítica.....34

FIGURA 17: Fotomicrografias da amostra de harzburgito ultramilonítico (IS5Ea) e dunito ultramilonítico (IS5Eb) exibindo veios de olivina e enstatita e suas feições características.....36

FIGURA 18: Fotomicrografia da amostra de dunito ultramilonítico (IS5Eb) exibindo um porfiroclasto de espinélio fraturado com novos grãos de olivina e enstatita preenchendo as fraturas.....37

FIGURA 19: Fotomicrografia da amostra de dunito ultramilonítico (INE72) mostrando um cristal de olivina em meio à matriz ultramilonítica cortada por veios de serpentina.....38

FIGURA 20: Fotomicrografias da amostra de dunito ultramilonítico (INE1Ca), microdobrado e microfalhado.....39

FIGURA 21: Fotomicrografias da amostra de lherzolito milonítico (ICH4Ba), mostrando a banda kaersutítica (à esquerda nas imagens) em contato com a banda peridotítica (à direita nas imagens), com clorita (?) no contato entre as duas bandas.....40

FIGURA 22: Fotomicrografias da amostra de dunito milonítico (ICH4b), mostrando porfiroclasto fino com cor castanho avermelhado de kaersutítica (imagem esquerda) com *kink bands*.....41

FIGURA 23: Fotomicrografia da amostra de dunito milonítico (ICH4b) mostrando opacos anédricos ocorrendo estirados nas porções anastomosadas da matriz.....42

FIGURA 24: Fotomicrografias exibindo os veios de serpentina e suas feições.....42

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Apresentação dos dados em porcentagens estimados visualmente dos porfiroclastos e da matriz das rochas do ASPSP com base no mapa geológico proposto por Campos *et al*. (2009) (primeira coluna); e as classificações de Streckeisen (1973) (terceira coluna) e de Sibson (1977) (última coluna) com base na composição dos materiais e da porcentagem de matriz, respectivamente.....22

TABELA 2: Resultados de química mineral de olivina (Fo_{92-89}) presente na matriz muito fina a afanítica das rochas do ASPSP. Número de íons com base em 4 oxigênios.....44

TABELA 3: Dados não acurados de química mineral dos porfiroclastos, da matriz recristalizada e da borda de porfiroclastos. Número de íons com base em 6 oxigênios para piroxênio e 23 para anfibólio em base anidra. (PC=centro de porfiroclasto; PB=borda de porfiroclasto; MR=matriz recristalizada).....45

TABELA 4: Dados das porcentagens de porfiroclastos estimados visualmente em petrografia, distribuídos nas lâminas de rocha do ASPSP. (P=banda peridotítica; K=banda kaersutítica).....47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....12

1.1 APRESENTAÇÃO.....12

1.2 JUSTIFICATIVA.....12

1.3 OBJETIVOS.....13

1.3.1 Objetivo geral.....13

1.3.2 Objetivos específicos.....13

1.4 LOCALIZAÇÃO.....13

2 MATERIAIS E MÉTODOS.....14

3 TRABALHOS ANTERIORES.....17

3.1 GEOLOGIA LOCAL**.....19**

4 RESULTADOS.....20

4.1 PETROGRAFIA.....20

4.1.1 MILONITOS PERIDOTÍTICOS.....24

4.1.2 MILONITOS PERIDOTÍTICOS SERPENTINIZADOS.....30

4.1.3 MILONITOS PERIDOTÍTICOS-KAERSUTÍTICOS 40

4.1.4 FASE HIDROTERMAL.....42

4.2 QUÍMICA MINERAL.....43

5 DISCUSSÕES.....46

5.1 PETROGRAFIA.....46

5.2 QUÍMICA MINERAL.....47

5.3 HISTÓRIA DE DEFORMAÇÃO E ESTIMATIVA GEOTERMOBAROMÉTRICA..49

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....51

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....52

8 ANEXOS.....53

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso consiste na análise petrográfica e de química mineral das rochas ultramáficas peridotíticas milonitizadas, serpentinizadas e fraturadas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP), situado próximo à Cadeia Meso-Oceânica da região do Atlântico Norte Equatorial.

O ASPSP abrange uma área de aproximadamente 17.000 m² composta por seis pequenas ilhas e alguns pontais rochosos, distribuídos ao longo da região de estudo e abrangendo a porção emersa de uma estrutura submarina, chamada por Motoki *et al.* (2010) de Cadeia Peridotítica São Pedro e São Paulo.

Campos *et al.* (2005) descrevem que a origem das rochas emersas encontradas no arquipélago, como os milonitos peridotíticos serpentinizados e os milonitos kaersutíticos, ainda não é bem definida.

Os porfiroclastos de olivina, piroxênio, anfibólio e espinélio presentes nessas rochas plutônicas estão muito fraturados e fragmentados, sendo indistinguíveis na matriz muito fina de mesma composição (CAMPOS *et al*., 2003).

1.2 JUSTIFICATIVA

As ilhas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP) são influenciadas por condições climáticas inóspitas e se encontram a uma distância de 1010 km do Cabo do Calcanhar – Rio Grande do Norte.

Secirm *et al.* (2009) descrevem que os estudos brasileiros no ASPSP somente tiveram início a partir de junho de 1998 e com a criação do Programa Arquipélago de São Pedro e São Paulo (PROARQUIPÉLAGO), sob a coordenação da Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (SECIRM).

Com o início do desenvolvimento do PROARQUIPÉLAGO e da facilitação do acesso ao local, diversas pesquisas petrológicas, estruturais e geofísicas foram

realizadas, contudo, a literatura geológica ainda carece de estudos mais detalhados dessas rochas.

Assim sendo, o projeto de pesquisa visa caracterizar as fases minerais desses materiais através da petrografia e da química mineral de seções delgadas dos peridotitos do ASPSP e melhorar o entendimento das condições de formação e evolução tectono-termal dessas rochas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O projeto visa caracterizar as fases minerais das rochas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estudar as reações minerais e as variações na composição da química mineral das rochas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo.

- Estimar valores de pressão e temperatura das fases minerais metamórficas das rochas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo.

1.4 LOCALIZAÇÃO

O ASPSP compreende as porções emersas da Cadeia Peridotítica São Pedro e São Paulo, localizada no bloco norte da Falha Transformante São Paulo. Essa falha corta a Cadeia Meso-Oceânica no Atlântico Equatorial na direção E-W (FIGURAS 1 e 2).

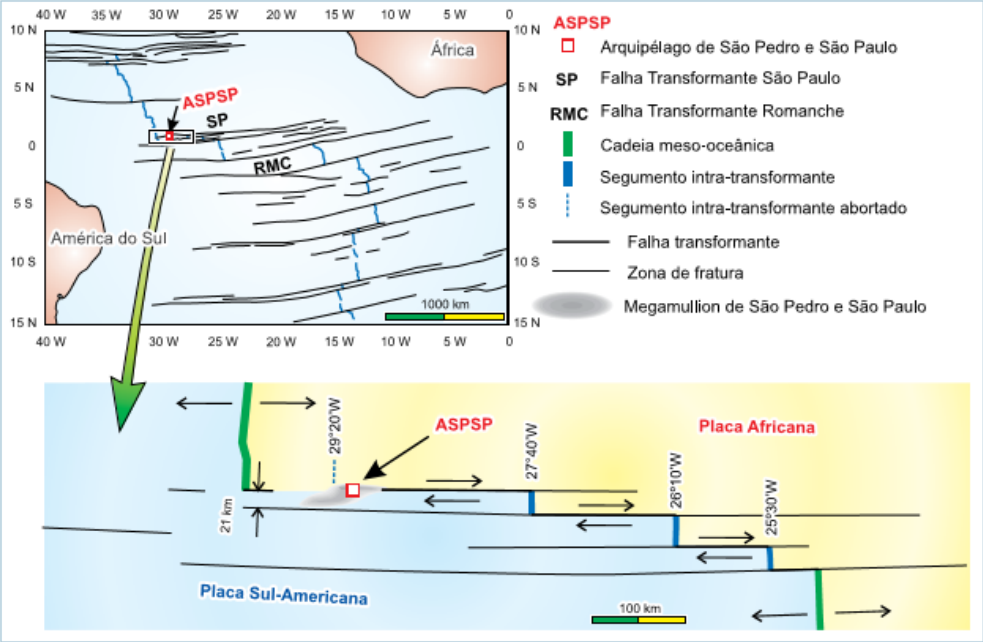


Figura 1 - Mapa de localização do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, posicionado na Zona de Fratura de São Paulo, e o ambiente tectônico em que se encontra. FONTE: SICHEL *et al.* (2009).

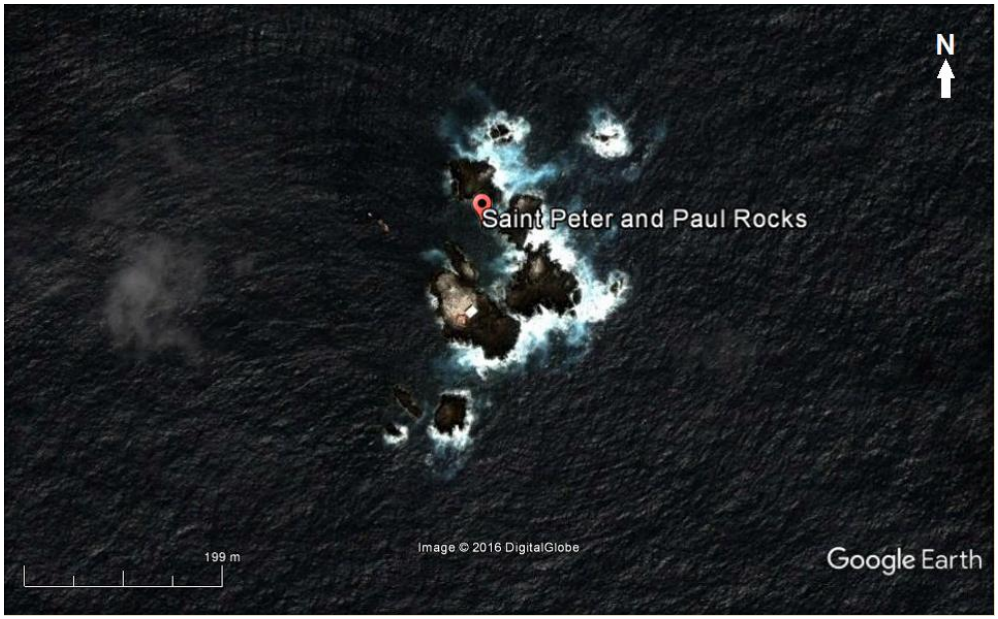


Figura 2 – O Arquipélago de São Pedro e São Paulo visto em imagem de satélite. FONTE: Modificado de GOOGLE EARTH (2016).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A realização da pesquisa consistiu nas seguintes etapas e métodos de trabalho:

1. Levantamento bibliográfico sobre a geologia das rochas peridotíticas do ASPSP; tipos e classificação de peridotitos e suas características; petrogênese de peridotitos; processos de deformação dúctil; processos de serpentinização; rochas mantélicas abissais; estudos geofísicos realizados na região.

2. Utilização de 15 lâminas petrográficas disponíveis das rochas do ASPSP, para o emprego nas microanálises. As seções delgadas previamente confeccionadas foram fornecidas pelo Prof. Leonardo Evangelista Lagoeiro. As amostras de rochas foram coletadas em 2010, pelo pesquisador Luiz Sérgio Amarantes Simões (UNESP – Rio Claro) no ASPSP.

3. Descrição microscópica, classificação petrográfica e captura de imagens de fotomicrografias em microscópio óptico de transmissão das seções de rochas peridotíticas. Para o desenvolvimento das análises petrográficas foram utilizados os microscópios petrográficos (modelo Olympus BX60) do Laboratório de Petrologia e Mineralogia - LAPEM do Departamento de Geologia da UFPR.

Em razão das deformações e alterações que modificaram a paragênese mineral primária dessas rochas ultramáficas, as composições e contagens dos minerais foram estimadas visualmente em microscópio óptico.

4. Análises microquímicas realizadas por meio da técnica de EDS (espectroscopia de dispersão de energia de raios X) utilizando-se o microscópio eletrônico de varredura (MEV) do Centro Microscopia Eletrônica (CME) da UFPR. As lâminas foram previamente metalizadas com carbono para as microanálises.

As análises em EDS/MEV foram obtidas em óxidos de metais, dado que as rochas do manto são compostas principalmente pelos elementos Si, Mg e Fe. Deve-se atentar, porém, que a falta de polimento das lâminas, ou a presença de rugosidade, podem gerar erros nos resultados obtidos pela análise, afetando consideravelmente a quantificação do espectro obtido. A calibração incorreta do conjunto EDS/MEV também pode gerar desvios nos resultados das análises.

O microscópio eletrônico de varredura utilizado no Centro de Microscopia Eletrônica da UFPR foi o modelo TESCAN VEGA3 LMU (FIGURA 3). Esse microscópio tem resolução de 3 nm e permite magnificações de até 300kX. As

imagens com pressão apresentam controle entre 3 a 500 Pa. O sistema de análise química do tipo EDS utilizado é o Oxford com *software* AZ Tech (Advanced) com detector tipo SDD de 80 mm². As condições de trabalho no EDS/MEV foram: a) distância de trabalho de 15 mm. b) intensidade da corrente de 16 A. c) diferença de potencial de 15 kv. d) tempo de análise de 60 segundos/ponto. e) condições de vácuo de 20 Pascal. f) oxigênios por estequiometria (número de íons) de 3.00.

Figura 3 - Microscópio eletrônico de varredura (MEV) utilizado no CME, modelo TESCAN VEGA3 LMU. FONTE: www.cme.ufpr.br (2016). Acesso em 22/11/2016.

As análises de química mineral foram realizadas em 5 dias distintos entre agosto e setembro de 2016 e com a geração de 389 pontos distribuídos entre as 15 lâminas estudadas.

5. Tratamento dos dados de química mineral através do cálculo das fórmulas estruturais referentes as análises obtidas em óxidos e utilização dos dados químicos resultantes para classificar as fases minerais. O erro tolerado dos dados obtidos em óxidos é igual à ±0,5.

6. Estimativa dos valores de pressão e temperatura das fases minerais metamórficas das rochas do ASPSP com base nos resultados de petrografia e de química mineral integrados aos estudos realizados por outros autores no que se refere a esses materiais.

7. Integração dos resultados e elaboração da monografia final do Trabalho de Conclusão de Curso com as discussões e as conclusões da pesquisa.

3 TRABALHOS ANTERIORES

Rochas ultramáficas e ultrabásicas fornecem informações singulares a respeito da composição do manto superior da Terra e da formação de magmas basálticos (GILL, 2010). Os peridotitos são rochas ultramáficas provenientes do manto da Terra compostos predominantemente por minerais magnesianos, como a olivina e o piroxênio.

Apesar da exposição relativamente restrita de rochas mantélicas, pressupõe-se que elas tenham origem nos seguintes ambientes: na superfície da crosta terrestre por extravasamento de lavas ultrabásicas; nas regiões de exumação de cumulatos precoces de câmaras magmáticas, resfriadas lentamente formando estratificações ígneas; e por exposição do manto peridotítico trazido à superfície por processos tectônicos ou vulcânicos (GILL, 2010).

Em 1832, embarcado no famoso *Beagle*, Charles Darwin chega ao Arquipélago de São Pedro e São Paulo e inicia seus estudos nesse pequeno conjunto de ilhas. Anteriormente, os rochedos irregulares do ASPSP foram palco de infelizes naufrágios de embarcações européias. Desde então, importantes pesquisas, como as do pioneiro Tilley (1947), e mais modernas, no que se refere às rochas mantélicas e abissais, como os geotérmicos de Melson *et al.* (1967) e os deformacionais de Jaroslow *et al*. (1996), foram realizadas.

Com o início do Programa Arquipélago de São Pedro e São Paulo a partir de 1998, e coordenado pela Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar – SECIRM, diversas pesquisas brasileiras mais aprofundadas da região do ASPSP começaram a ser desenvolvidas.

Chamada de Arquipélago de São Pedro e São Paulo, a área de estudo contempla as porções emersas de uma estrutura submarina rochosa situada próxima a Cadeia Meso-Oceânica do Atlântico Norte Equatorial.

A morfologia da estrutura submarina onde o Arquipélago ocorre apresenta 90 km de extensão, 20 km de largura e 3800 metros de altura, sendo chamada de Cadeia Peridotítica São Pedro e São Paulo (MOTOKI *et al.,* 2010) (FIGURA 4). Essa cadeia se apresenta encaixada na ativa Falha Transformante São Paulo e fica localizada entre as coordenadas de 0,5°N a 1,5°N e 28,5° W a 30,0° W.

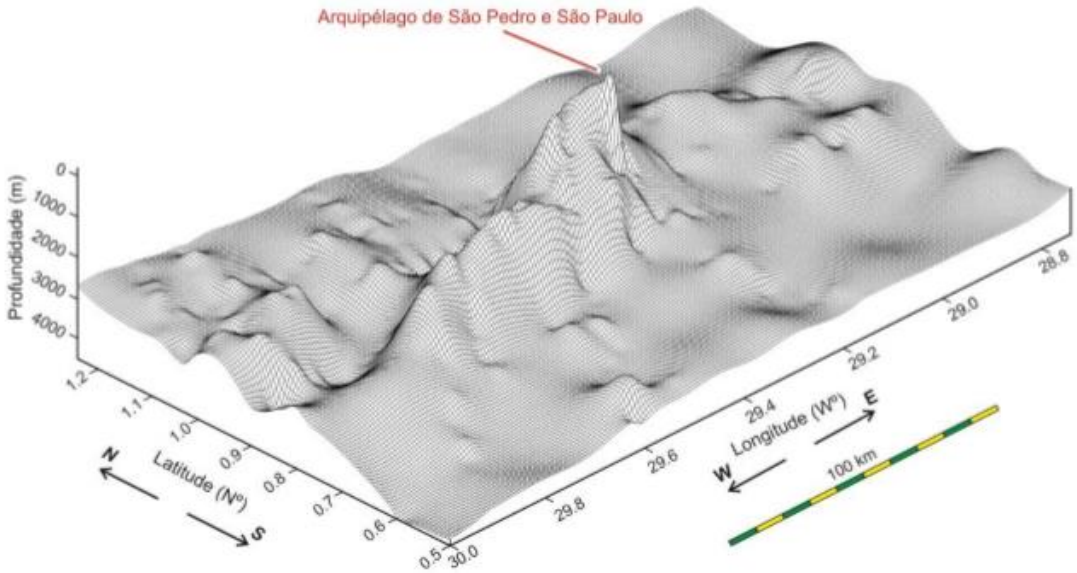


Figura 4 – Geomorfologia submarina da Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo (banco de dados do TOPO, do Scripps Institute of Oceanography, University of California - San Diego. A resolução aparente é 1.85 km). FONTE: MOTOKI *et al.* (2010).

A Zona da Falha Transformante de São Paulo na qual o ASPSP encontra-se geologicamente inserido apresenta direção E-W e movimento transcorrente dextral ao longo de 630 km (MOTOKI *et al.,* 2010).

Estudos de Campos *et al.* (2003) e Sichel *et al.* (2008) descrevem que as rochas da região do arquipélago são formadas por peridotitos serpentinizados derivados do manto abissal. Esse material rochoso compõe um pequeno conjunto de 10 ilhas com pontais irregulares que são cobertas por sedimentos marinhos rasos de idade neogênica (CAMPOS *et al*., 2005).

Campos *et al.* (2005) ainda reconhecem não existir fundamentos suficientes para a definição da origem e da idade do ASPSP. Esta poderia tratar-se do resultado do deslocamento do manto-oceânico, elevado pela ação da fratura transformante São Paulo, juntamente com o processo de milonitização-serpentinização. O ASPSP poderia ser ainda um remanescente do manto-litosférico com origem abaixo do

continente, relacionado à porção não expansiva do embasamento da região Dorsal Atlântico Equatorial.

Análises geoquímicas por fluorescência de raios X e petrográficas realizadas por Campos *et al*. (2003) indicam que a milonitização ocorrida nas rochas ultrabásicas, ou nos peridotitos lherzolíticos do ASPSP, não modificou expressivamente a sua composição química original. No entanto, aqueles autores afirmam que os processos tectônicos obliteraram quase toda paragênese mineral primária, não sendo possível estabelecer a sua composição modal original.

A deformação rúptil posterior à milonitização facilitou a entrada de fluidos marinhos gerando rochas heterogeneamente serpentinizadas distribuídas ao longo do ASPSP (CAMPOS *et al.,* 2005).

3.1 GEOLOGIA LOCAL

No mapa geológico apresentado por Campos *et al.* (2009), os autores classificaram as rochas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo em 5 tipos principais (FIGURA 5). São elas: o milonito peridotítico, o milonito peridotítico serpentinizado, o milonito kaersutítico, o milonito peridotítico-kaersutítico e a rocha sedimentar fossilífera.

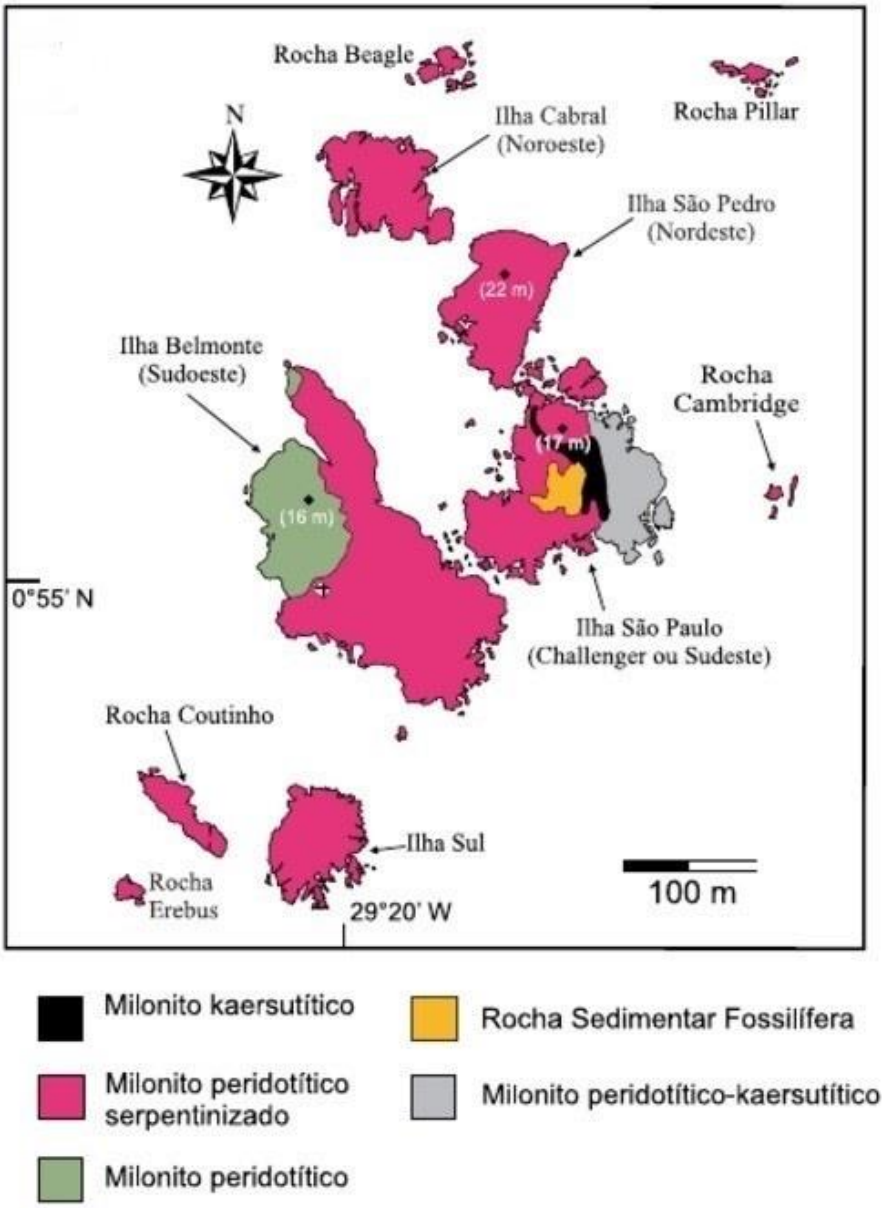


Figura 5 – Mapa geológico da região emersa do ASPSP. FONTE: CAMPOS *et al*. (2009).

4 RESULTADOS

4.1 PETROGRAFIA

A petrografia das seções delgadas das rochas do ASPSP foi realizada através do uso do microscópio óptico de transmissão. Devido as deformações e alterações impostas à paragênese primária dessas rochas, a composição modal original não

pôde ser determinada. Assim sendo, as composições dos porfiroclastos foram estimadas visualmente.

As 15 seções petrográficas foram divididas em 3 grupos de rochas com base na localização de coleta dessas amostras em relação a classificação das rochas do ASPSP proposta por Campos *et al.* (2009), tais como: o milonito peridotítico, o milonito peridotítico serpentinizado e o milonito peridotítico-kaersutítico de Campos *et al*. (2009) (FIGURA 6).

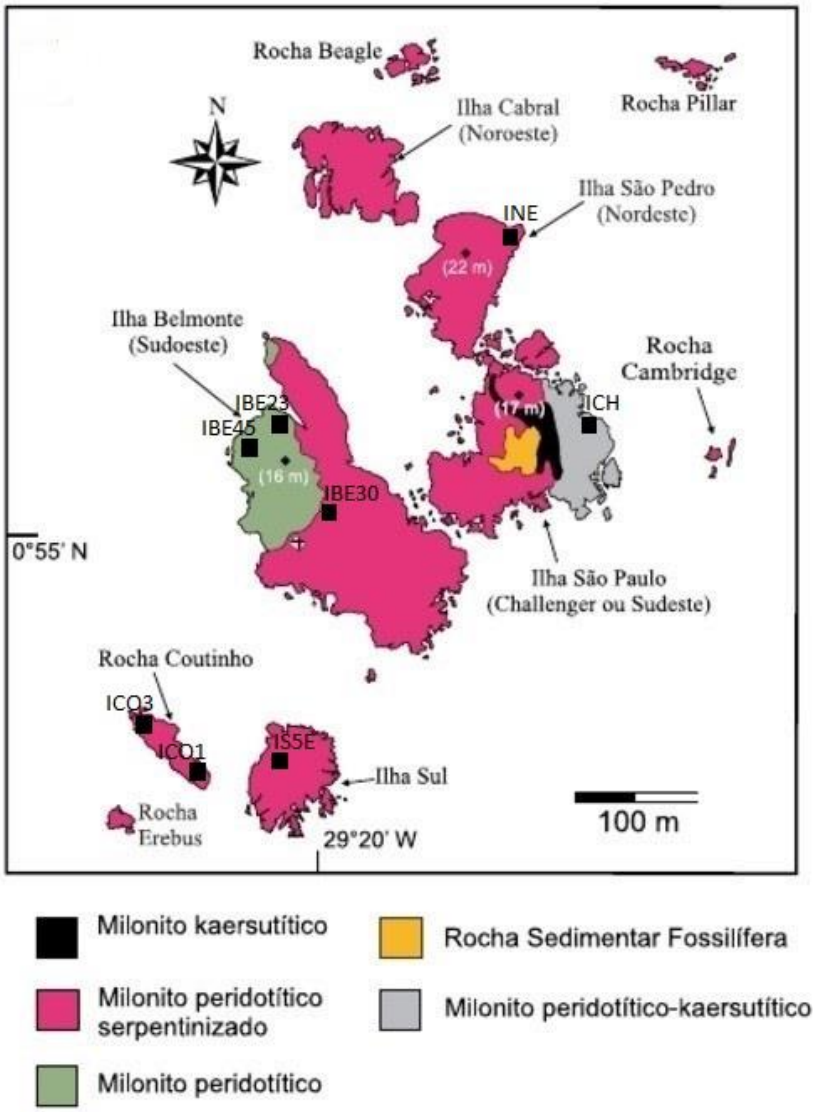


Figura 6 – Localização da coleta das amostras (quadrados pretos) distribuídas no mapa geológico proposto por Campos *et al.* (2009). O nome das amostras coletadas faz referência ao nome da ilha onde foi realizada a amostragem: IBE - Ilha Belmonte; INE – Ilha Nordeste ou São Pedro; ICH – Ilha Challenger ou São Paulo; ICO – Rocha Coutinho; IS – Ilha Sirius. FONTE: Modificado de CAMPOS *et al.* (2009).

Na análise petrográfica foi verificada a ocorrência de porfiroclastos de granulação fina (0,1mm a 1mm), com hábito anédrico e elíptico de olivina, enstatita,

pigeonita e espinélio, e anédricos de kaersutita e pargasita subordinada. As deformações e alterações impostas a essas rochas dificultaram a identificação de clivagens em finos cristais de piroxênio e anfibólio, impedindo a determinação exata dos mesmos. Em geral, a orientação dos porfiroclastos em relação à direção da foliação milonítica varia na maior parte das rochas.

A classificação das rochas ultramáficas do ASPSP foi feita com base na classificação de Streckeisen (1973) de acordo com as porcentagens dos minerais estimadas visualmente. Essa classificação baseia-se nas proporções de olivina, ortopiroxênio e clinopiroxênio presentes nessas rochas (TABELA 1). A classificação de rochas geradas em zonas de cizalhamento foi feita com base na classificação de tectonitos de Sibson (1977). Essa classificação representa os níveis estruturais da crosta onde a temperatura, a pressão confinante e a presença de fluidos tendem a se diferenciar produzindo distintos tipos de tramas nos materiais geológicos, que passam a ser chamados de tectonitos.

Tabela 1 – Apresentação dos dados em porcentagens estimados visualmente dos porfiroclastos e da matriz das rochas do ASPSP com base no mapa geológico proposto por Campos *et al.* (2009) (primeira coluna); e as classificações de Streckeisen (1973) (terceira coluna) e de Sibson (1977) (última coluna) com base na composição dos materiais e da porcentagem de matriz, respectivamente.

Localização de coleta das amostras segundo a classificação de Campos *et al.* (2009)	Amostra	Classificação de rochas ultramáficas, segundo Streckeisen (1973)		Porfiroclastos (%)							Matriz (%)	Classificação de rochas de falha, segundo Sibson (1977)
				Olivina	Enstatita	Pigeonita	Espinélio	Kaersutita	Pargasita	Opacos		
Milonito peridotítico	IBE45a	Peridotito	harzburgito	85	10	—	5	—	—	tr	90	ultramilonito
	IBE45b	Dunito	dunito	90	5	—	5	—	—	tr	85	milonito
	IBE23Da	Dunito	dunito	95	5	—	tr	—	—	tr	90	ultramilonito
	IBE23Ba	Piroxenito	clinopiroxenito	3	tr	95	2	—	—	tr	85	milonito
	IBE23Bb	Piroxenito	olivina websterito	5	5	85	5	—	—	tr	85	milonito
Milonito peridotítico serpentinizado	IBE30a	Piroxenito	olivina clinopiroxenito	10	5	85	tr	—	—	tr	90	ultramilonito
	IBE30b	Piroxenito	olivina websterito	30	5	60	5	—	tr	tr	85	milonito
	ICO3a	Piroxenito	olivina websterito	20	70	5	5	—	—	tr	80	milonito
	ICO1Ba	Piroxenito	olivina ortopiroxenito	25	70	—	5	—	—	tr	90	ultramilonito
	IS5Ea	Peridotito	harzburgito	50	45	—	5	—	—	tr	90	ultramilonito
	IS5Eb	Dunito	dunito	95	tr	—	5	—	—	tr	90	ultramilonito
	INE72	Dunito	dunito	90	5	—	5	—	—	tr	95	ultramilonito
	INE1Ca	Dunito	dunito	95	5	—	tr	—	—	tr	96	ultramilonito
Milonito peridotítico-kaersutítico	ICH4Ba (P)	Peridotito	lherzolito	65	5	—	5	25	—	tr	85	milonito
	ICH4Ba (K)	—	—	—	—	—	—	95	—	5	80	milonito
	ICH4Bb	Dunito	dunito	80	5	—	tr	10	—	5	85	milonito

De acordo com a classificação de Streckeisen (1973), as rochas do ASPSP foram classificadas em dunitos, peridotitos (harzburgito e lherzolito) e piroxenitos (olivina ortopiroxenito, olivina websterito, olivina clinopiroxenito e clinopiroxenito) (FIGURA 7). De acordo com a classificação de Sibson (1977), dois tipos de tectonitos são encontrados nos materiais analisados: os milonitos e os ultramilonitos. Os milonitos do ASPSP compreendem os materiais que apresentam variação de 80

a 90% de matriz e os ultramilonitos os materiais que apresentam variação de 90 a 96% de matriz.

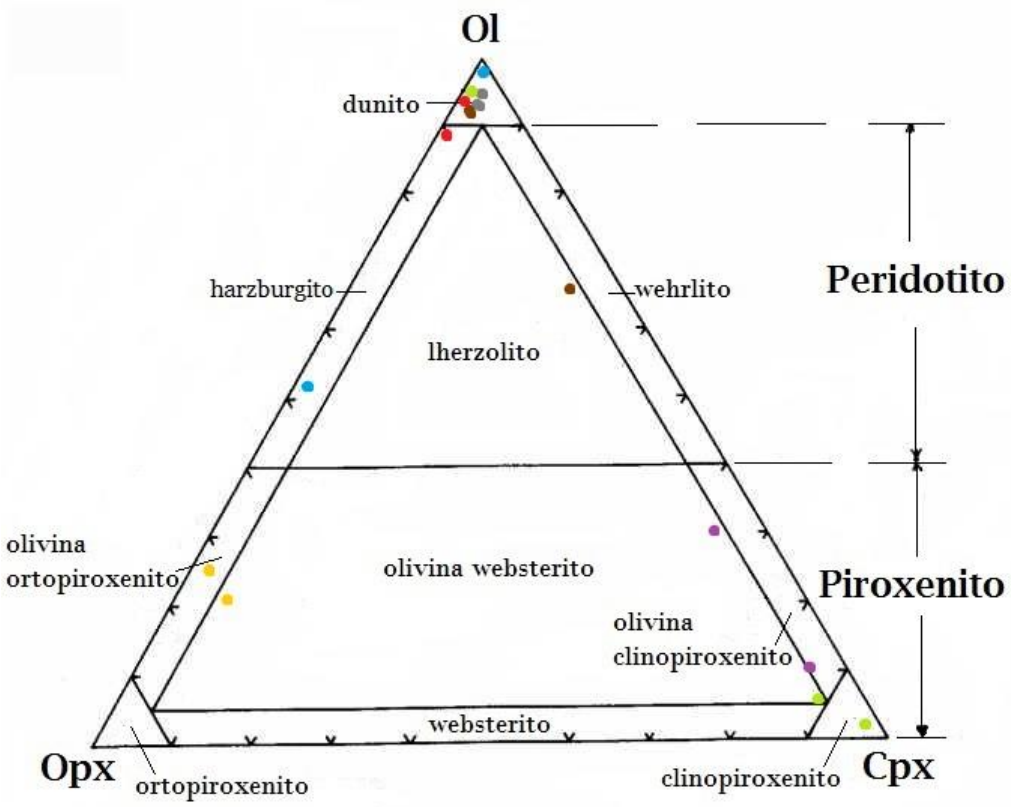


Figura 7 – Diagrama Ol – Opx – Cpx com a classificação das rochas do ASPSP indicadas pela legenda de cada amostra: IBE 45 (pontos vermelhos), IBE 23 (pontos verdes), IBE 30 (pontos roxos), ICO (pontos amarelos), IS5E (pontos azuis), INE (pontos cinzas) e ICH (pontos marrons). FONTE: Modificado de Streckeisen (1973).

Na petrografia, os porfiroclastos de olivina observados em seção delgada são incolores, com relevo alto, fratura, hábito anédrico, forma elíptica predominante e cor de interferência verde de 2ª ordem.

Os porfiroclastos de enstatita observados em seção delgada são incolores, com relevo médio, hábito anédrico, forma elíptica frequente e cor de interferência amarelo de 1ª ordem.

Os porfiroclastos de pigeonita identificados apresentam cor verde pálido, relevo médio e pleocroísmo fraco à médio para verde acastanhado pálido variando para cor-de-rosa acastanhado. A cor de interferência é verde de 2ª ordem à rosa de início de 3ª ordem e o ângulo de extinção, quando presente, é de 39° em média.

Os porfiroclastos de espinélio apresentam cor marrom, relevo médio a alto, com hábito anédrico e forma elíptica rara. Podem apresentar fraturas e orientação preferencial em direção a foliação da matriz. Ocorrem frequentemente com granulação muito fina quando compõem a matriz e orientados preferencialmente na direção da foliação milonítica. Nos porfiroclastos de olivina, enstatita, pigeonita e kaersutita ocorrem como inclusões.

Os porfiroclastos de kaersutita apresentam cor castanho avermelhado, com relevo médio, hábito anédrico e cor de interferência verde de 3ª ordem.

A composição da matriz foi inferida com base na cor, relevo e cor de interferência dos materiais recristalizados. Raros cristais de anfibólio foram identificados na matriz muito fina apenas quando houve a presença de seção basal característica desses minerais, tal como a pargasita. A pargasita apresenta cor castanho claro, relevo médio e pleocroísmo fraco para amarelo esverdeado. Quando identificada, apresenta orientação preferencial à foliação milonítica.

Os cristais de olivina, enstatita, pigeonita, kaersutita e pargasita podem estar parcialmente alterados para serpentina e/ou opacos. Os cristais de espinélio podem estar parcialmente alterados para opacos.

Os opacos observados em lâmina podem ser primários ou secundários: os primários correspondem à diminutas inclusões e exsoluções no interior de outros porfiroclastos, e os secundários correspondem à alteração de borda de porfiroclastos, da matriz recristalizada ou de borda de microfraturas. Essas microfraturas ocorrem orientadas preferencialmente à direção da foliação da matriz.

4.1.1 MILONITOS PERIDOTÍTICOS

As 5 lâminas descritas foram coletadas na porção oeste da Ilha Belmonte, nos milonitos peridotíticos de Campos *et al.* (2009).

HARZBURGITO ULTRAMILONÍTICO - IBE45a

A textura da rocha é porfiroclástica equigranular fina em meio à matriz muito fina à afanítica. Foram observados porfiroclastos de olivina, enstatita e espinélio, equigranulares finos (0,1mm a 1mm), com hábito anédrico e forma elíptica alongada frequente.

A olivina exibe bordas parcialmente recristalizadas (FIGURA 8a), agregados de novos grãos (FIGURA 8b), extinção ondulante fraca a moderada, lamelas de deformação (FIGURA 8c), rara geminação mecânica (FIGURA 8d) e algumas vezes, caudas de recristalização com granulação muito fina (< 0,1mm).

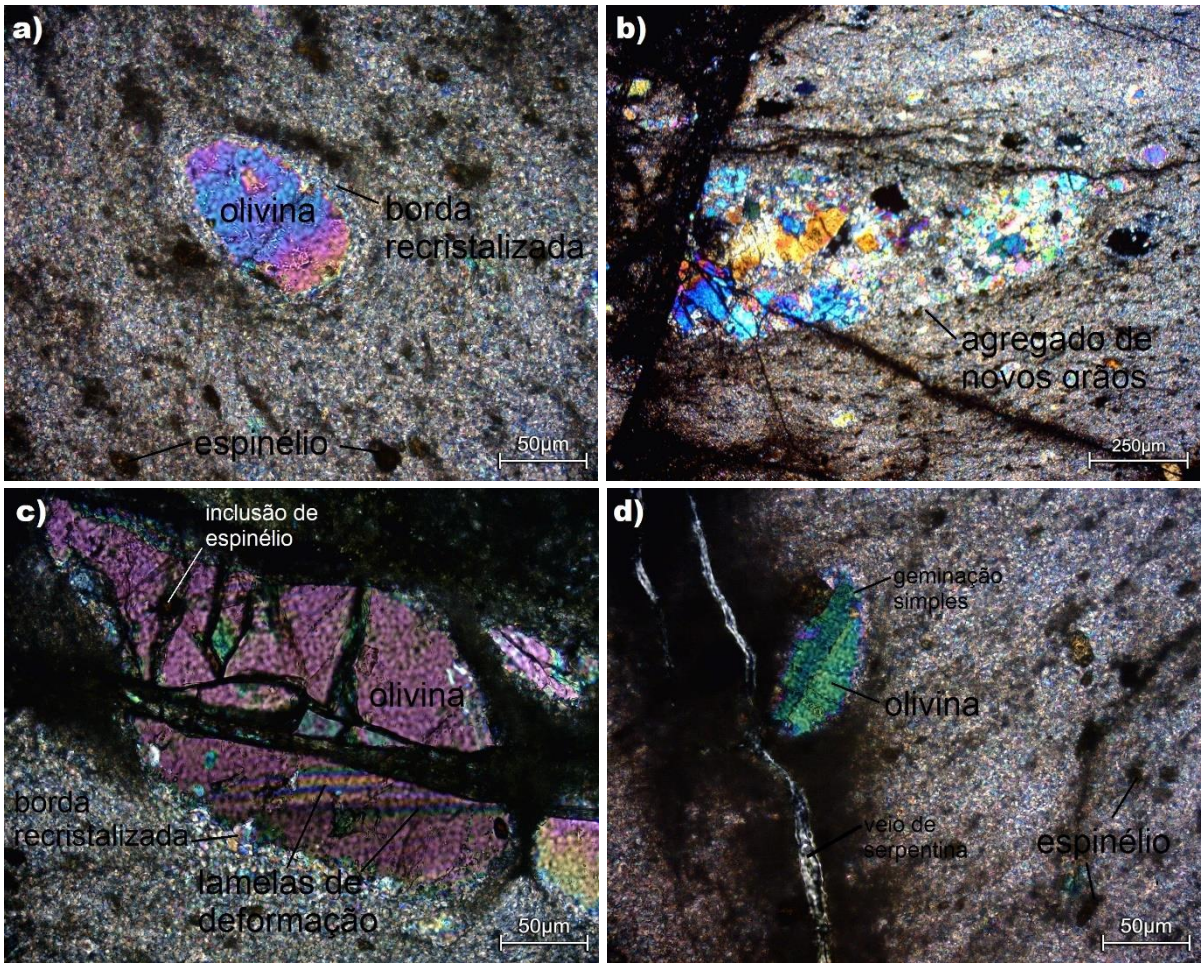


Figura 8 – Fotomicrografias da amostra de harzburgito ultramilonítico (IBE45a), com polarizadores cruzados, de porfiroclastos finos de olivina e suas feições. A) Porfiroclasto fino de olivina com borda recristalizada em meio a matriz muito fina com cristais muito finos de espinélio (aumento de 10X). B) Agregados de novos grãos de olivina, com opacos e espinélio distribuídos na matriz ultramilonítica (aumento de 2,5X). C) Porfiroclasto fino de olivina com fratura, inclusões de espinélio, borda recristalizada e lamelas de deformação (aumento de 10X). D) Porfiroclasto fino de olivina com borda recristalizada e geminação mecânica, em meio a matriz ultramilonítica com espinélio muito fino (em detalhe na porção esquerda da fotomicrografia ocorre uma microfratura preenchida por serpentina) (aumento de 10X).

A enstatita apresenta bordas parcialmente recristalizadas, agregados de novos grãos, extinção ondulante fraca à forte e cauda de recristalização com

granulação muito fina. Os porfiroclastos de espinélio apresentam forma anédrica, microfraturas e orientação preferencial em direção a foliação da matriz.

A matriz é muito fina (< 0,1 mm) à afanítica, composta provavelmente por grãos recristalizados anédricos de espinélio (até 10% de matriz), olivina, piroxênio e possivelmente anfibólios. A orientação da matriz recristalizada é paralela à foliação ultramilonítica, microfraturada e com veios de serpentina.

DUNITO MILONÍTICO - IBE45b

A textura da rocha é porfiroclástica equigranular fina em meio à matriz muito fina à afanítica. Foram observados porfiroclastos de olivina, enstatita e espinélio, equigranulares finos (0,1mm a 1mm), com hábito anédrico e forma elíptica alongada frequente.

A olivina exibe bordas parcialmente recristalizadas, agregados de novos grãos, extinção ondulante fraca a forte, lamelas de deformação e por vezes cauda de recristalização com granulação muito fina.

A enstatita mostra bordas parcialmente recristalizadas, poucos cristais formando agregados de novos grãos, extinção ondulante variando de fraca a forte e caudas de recristalização com granulação muito fina. Os porfiroclastos de espinélio são anédricos e com rara orientação preferencial em direção a foliação milonítica (FIGURA 9a, b).

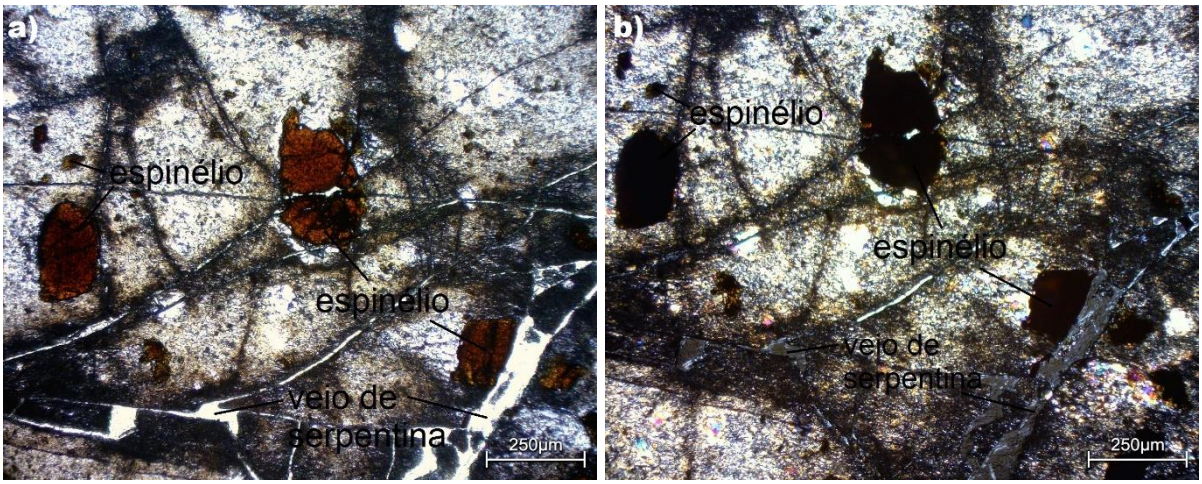


Figura 9 – Fotomicrografias da amostra de dunito milonítico (IBE45b) com porfiroclastos finos de espinélio em meio a matriz afanítica e mostrando veios de serpentina preenchendo microfraturas. A) Polarizadores paralelos e aumento de 2,5X. B) Polarizadores cruzados e aumento de 2,5X.

A matriz é afanítica (< 0,1 mm), sendo composta provavelmente por grãos recristalizados anédricos e elípticos de espinélio (até 10% da matriz) e por grãos anédricos de olivina, piroxênio e possivelmente anfibólios. A orientação da matriz recristalizada é paralela à foliação milonítica, com microfraturas preenchidas por veios de serpentina.

Olivina e enstatita compõem ainda veios de espessura submilimétrica perpendiculares à foliação milonítica. Estes veios mostram localmente arranjo *en échelon* e apresentam fraturas preenchidas por veios de serpentina. Cristais anédricos de opacos e espinélio muito finos ocorrem disseminados em ambos os veios (FIGURA 10).

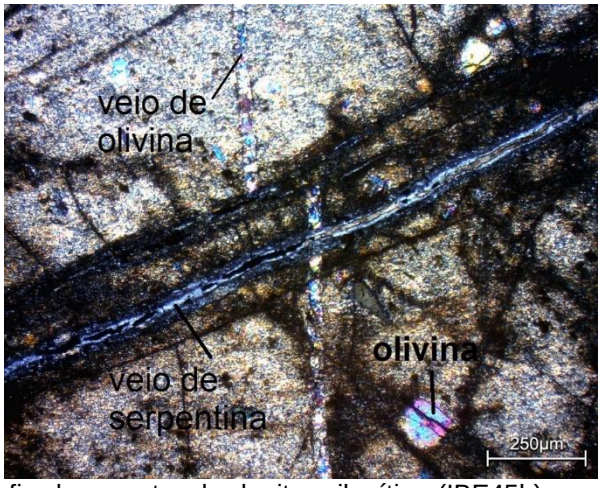


Figura 10 – Fotomicrografia da amostra de dunito milonítico (IBE45b) apresentando veio estreito de olivina e enstatita, perpendicular à foliação milonítica da rocha e cortado por microfalha preenchida por serpentina (polarizadores cruzados e aumento de 2,5X).

DUNITO ULTRAMILONÍTICO - IBE23Da

A textura da rocha é porfiroclástica equigranular fina em meio à matriz muito fina à afanítica. Foram observados porfiroclastos de olivina, enstatita e espinélio (traço), equigranulares finos (0,1mm a 1mm), com hábito anédrico e forma elíptica e alongada frequente.

Os porfiroclastos de olivina apresentam bordas parcialmente recristalizadas, agregados de novos grãos (FIGURA 11a), extinção ondulante fraca a moderada e

algumas vezes caudas de recristalização com granulação muito fina (FIGURA 11b) orientadas ao longo da foliação ultramilonítica (FIGURA 11c, d).

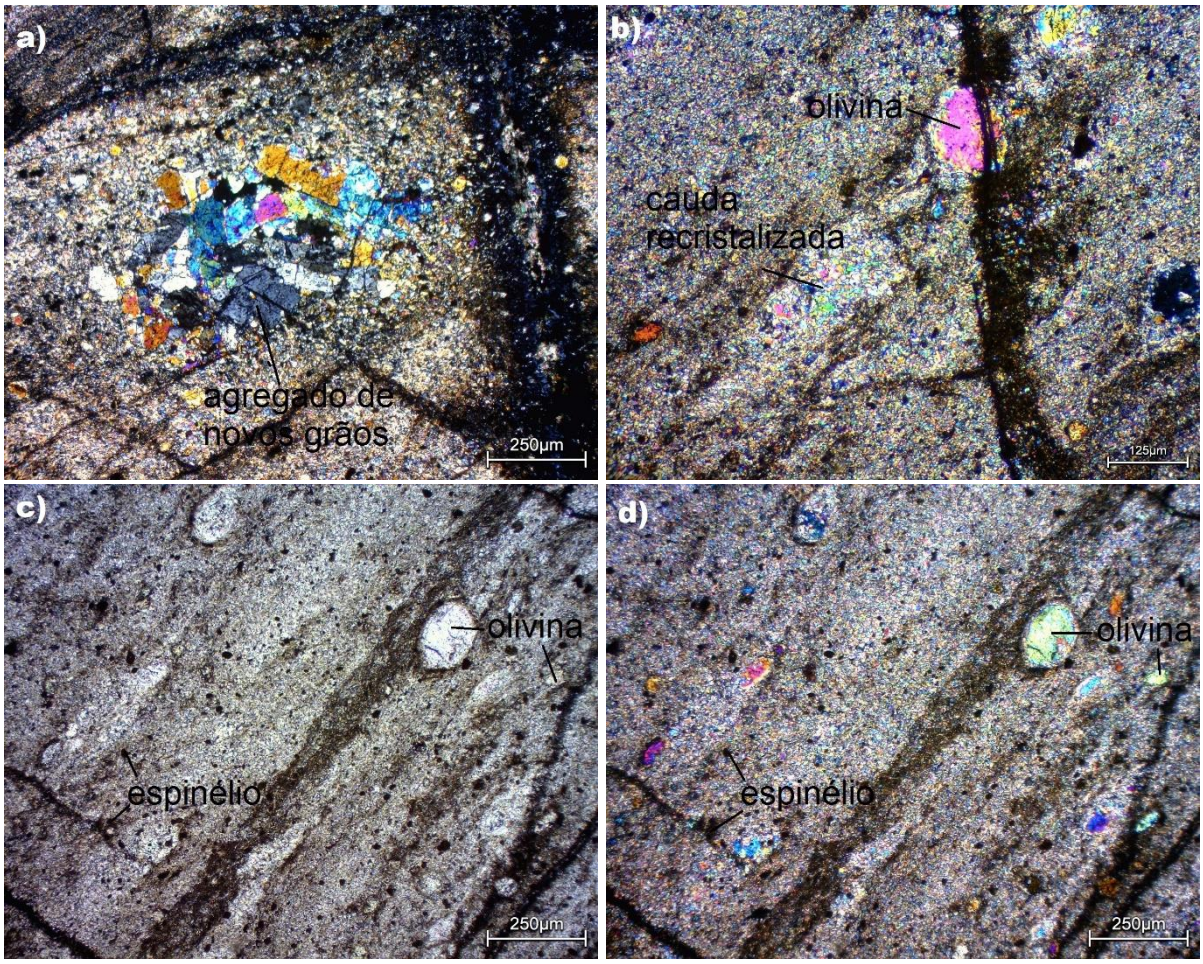


Figura 11 – Fotomicrografias da amostra de dunito ultramilonítico (IBE23Da) e suas feições. A) Agregado de novos grãos de olivina e enstatita (polarizadores cruzados e aumento de 2,5X). B) Cauda recristalizada de porfiroclasto de olivina em meio a matriz ultramilonítica (polarizadores cruzados e aumento de 4X). C) Porfiroclastos finos de olivina em meio a matriz ultramilonítica com cristais muito finos de espinélio (polarizadores paralelos e aumento de 2,5X). D) Porfiroclastos finos de olivina em meio a matriz ultramilonítica com cristais muito finos de espinélio (polarizadores cruzados e aumento de 2,5X).

Os cristais de enstatita apresentam bordas parcialmente recristalizadas, extinção ondulante fraca a forte e raras caudas de recristalização com granulação muito fina. Os porfiroclastos de espinélio (traço) ocorrem com orientação preferencial paralela a foliação da matriz.

A matriz apresenta granulação muito fina (< 0,1 mm) à afanítica, sendo composta por grãos recristalizados anédricos e elípticos de espinélio (até 5% da matriz) e provavelmente por novos grãos anédricos de olivina, piroxênio e possivelmente anfibólios. A orientação da matriz recristalizada é paralela à foliação ultramilonítica, com microfraturas preenchidas por veios de serpentina.

CLINOPIROXENITO MILONÍTICO - IBE23Ba

A textura da rocha é porfiroclástica fina, em meio a matriz muito fina à afanítica. Foram observados porfiroclastos de pigeonita, olivina, espinélio e enstatita (traço), equigranulares finos (0,1mm a 1mm), com hábito anédrico e forma elíptica e alongada frequente.

Os cristais de pigeonita apresentam extinção ondulante fraca e bordas parcialmente recristalizadas. Os cristais de olivina (FIGURA 12) apresentam bordas parcialmente recristalizadas e extinção ondulante fraca a forte. Os raros cristais de enstatita mostram extinção ondulante variando de fraca a forte e borda de recristalização.

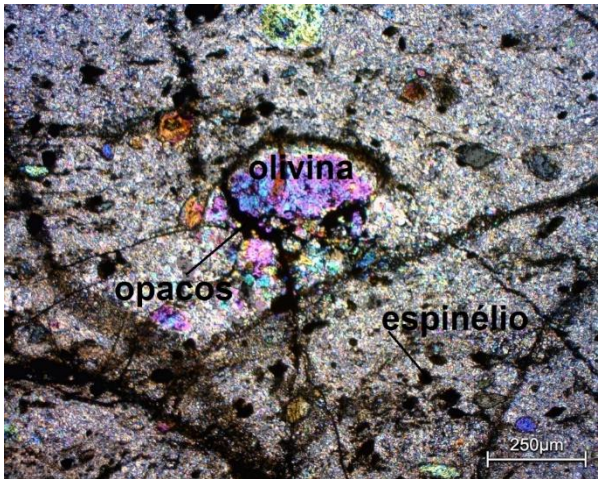


Figura 12 – Fotomicrografia da amostra de clinopiroxenito milonítico (IBE23Ba) mostrando um porfiroclasto de olivina com borda alterada para opacos em meio a matriz milonítica e com cristais muito finos de espinélio (polarizadores cruzados e aumento de 2,5X).

A matriz é muito fina (< 0,1 mm) com domínios afaníticos. É composta por grãos recristalizados anédricos e elípticos de espinélio (até 10% da matriz) e por grãos anédricos de olivina e piroxênio. Microfraturas preenchidas por serpentina também ocorrem paralelas à direção da foliação.

OLIVINA WEBSTERITO MILONÍTICO - IBE23Bb

A textura da rocha é porfiroclástica fina, em meio a matriz muito fina à afanítica. Foram observados porfiroclastos de pigeonita, olivina, enstatita e espinélio

equigranulares finos (0,1mm a 1mm), com hábito anédrico e forma elíptica e alongada frequente.

Os porfiroclastos de pigeonita apresentam extinção ondulante fraca e bordas parcialmente recristalizadas. Os cristais de olivina apresentam bordas parcialmente recristalizadas, cauda recristalizada (FIGURA 13) e extinção ondulante variando de fraca a forte. A enstatita mostra extinção ondulante variando de fraca a forte e borda de recristalização. Os cristais de espinélio apresentam orientação preferencial em direção a foliação milonítica da matriz.

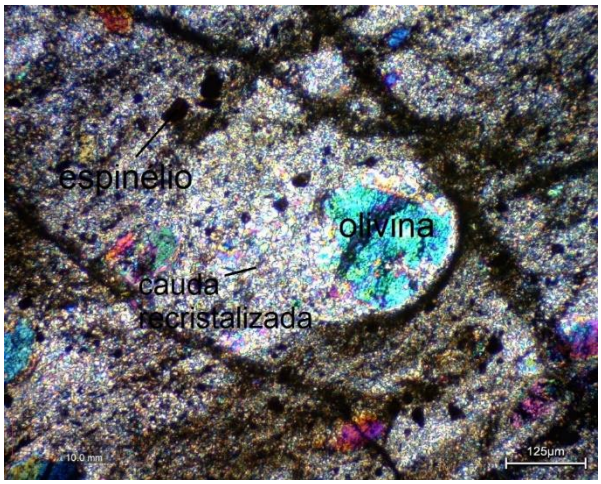


Figura 13 – Fotomicrografia da amostra de olivina websterito milonítico (IBE23Bb) mostrando um porfiroclasto de olivina com cauda recristalizada em meio a matriz milonítica e com cristais muito finos de espinélio (polarizadores cruzados e aumento de 4X).

A matriz apresenta granulação muito fina (< 1mm) à afanítica e ocorre altamente criptoserpentinizada. É composta predominantemente por piroxênio, olivina e espinélio, este último em proporções de até 15%. Em proporções traço, é composta por anfibólio com cor verde pálido à incolor (pargasita?), e por flogopita castanha, ambos anédricos e muito finos. Cristais anédricos de provável magnetita (secundária?), ocorrem distribuídos próximo aos veios de serpentina. As microfraturas penetrativas na matriz são preenchidas por serpentina.

4.1.2 MILONITO PERIDOTÍTICO SERPENTINIZADO

As 8 lâminas descritas foram coletadas no milonito peridotítico serpentinizado de Campos *et al*. (2009) e a suas localizações são apresentadas individualmente.

OLIVINA CLINOPIROXENITO ULTRAMILONÍTICO - IBE30a

A lâmina de rocha descrita foi coletada na porção central da Ilha Belmonte.

A textura da rocha é porfiroclástica equigranular fina em meio à matriz muito fina à afanítica. Foram observados porfiroclastos de pigeonita (FIGURA 14a, b), olivina, enstatita e espinélio equigranulares finos (0,1mm a 1mm), com hábito anédrico e forma elíptica e alongada frequente.

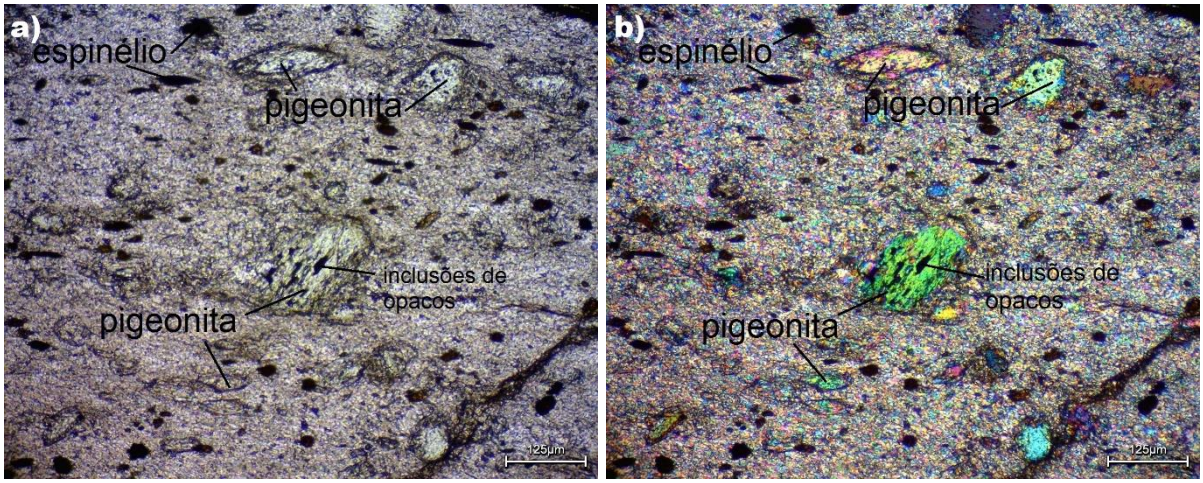


Figura 14 – Fotomicrografias da amostra de olivina clinopiroxenito ultramilonítico (IBE30a) dos porfiroclastos finos de pigeonita em meio a matriz ultramilonítica mostrando opacos distribuídos na matriz. A) Polarizadores paralelos e aumento de 4X. B) Polarizadores cruzados e aumento de 4X.

Os cristais de pigeonita apresentam extinção ondulante fraca e bordas parcialmente recristalizadas. A orientação preferencial de pigeonita predomina em relação à direção da foliação da matriz. Os cristais de olivina e enstatita mostram extinção ondulante variando de pouco a bem desenvolvida e bordas parcialmente recristalizadas.

A matriz ultramilonítica apresenta granulação muito fina (< 1mm) à afanítica. É composta predominantemente por piroxênio, provavelmente pigeonita e enstatita, olivina e espinélio recristalizados. Ocorre ainda intensamente microfraturada, com veios de serpentina cortando a foliação ultramilonítica, e altamente criptoserpentinizada. O espinélio compõe até 10% da matriz. Cristais anédricos de opacos (magnetita?), ocorrem predominantemente distribuídos próximo aos veios de serpentina.

OLIVINA WEBSTERITO MILONÍTICO - IBE30b

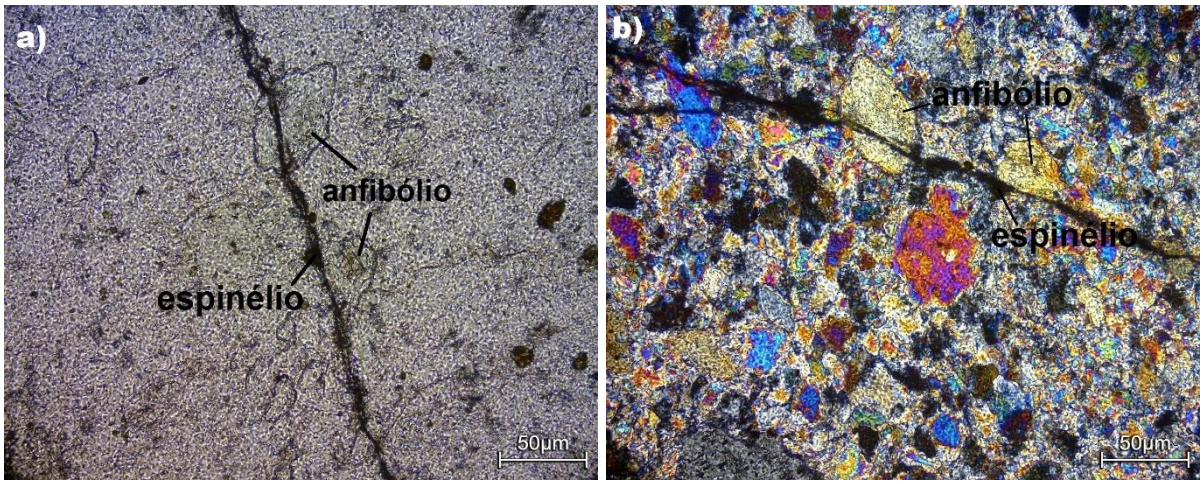
A lâmina de rocha descrita foi coletada na porção central da Ilha Belmonte.

A textura da rocha é porfiroclástica equigranular fina em meio à matriz muito fina à afanítica. Foram observados porfiroclastos de pigeonita, olivina, enstatita e espinélio equigranulares finos (0,1mm a 1mm), com hábito anédrico e forma elíptica alongada frequente.

Os porfiroclastos de pigeonita mostram extinção ondulante fraca e bordas parcialmente recristalizadas. A orientação preferencial de pigeonita predomina na direção da foliação da matriz milonítica. Os cristais de olivina apresentam bordas parcialmente recristalizadas, novos grãos, extinção ondulante variando de pouco a bem desenvolvida e algumas vezes caudas de recristalização com granulação muito fina.

Verificou-se nesta lâmina de rocha a presença de um porfiroclasto de olivina que se destaca pela sua maior dimensão: apresenta granulação grossa com cerca de 7 mm de comprimento, hábito anédrico elíptico e alongado, com fratura, extinção ondulante e cor de interferência verde de 2ª ordem. A matriz foliada em torno do porfiroclasto apresenta-se arqueada. Exibe ainda minerais opacos nas fraturas.

Os cristais de enstatita mostram extinção ondulante variando de fraca a forte e borda recristalizada. Sugere-se a ocorrência rara de pargasita (traço) devido a presença de seções basais indicando anfibólio (FIGURA 15a, b e c).



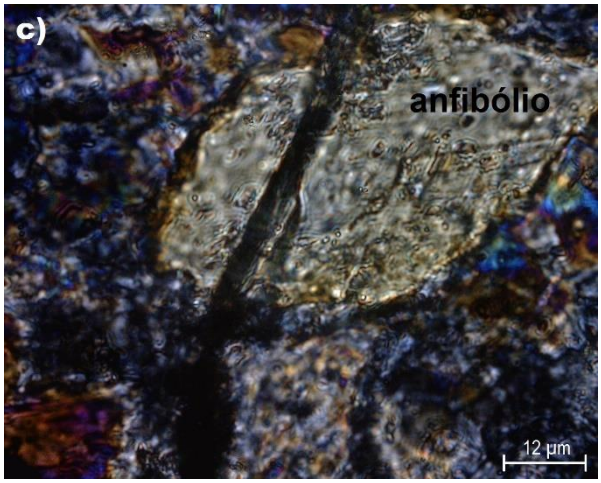


Figura 15 – Fotomicrografias da amostra de olivina websterito milonítico (IBE30b) mostrando um provável porfiroclasto fino de anfibólio pargasita em meio a matriz ultramilonítica com espinélio distribuído na matriz. A) Polarizadores paralelos e aumento de 10X. B) Polarizadores cruzados e aumento de 10X. C) Polarizadores cruzados e aumento de 40X.

A matriz apresenta granulação muito fina (< 1mm) à afanítica. É composta predominantemente por piroxênio (pigeonita e enstatita), olivina e espinélio recristalizados. O espinélio compõe até 10% da matriz. Cristais anédricos de prováveis magnetita ocorrem predominantemente distribuídos próximo aos veios de serpentina. A matriz ainda ocorre altamente microfraturada, com veios de serpentina preenchendo as microfraturas, e criptoserpentinizada.

OLIVINA WEBSTERITO MILONÍTICO - ICO3a

A lâmina de rocha descrita a seguir foi coletada na porção noroeste da Rocha Coutinho do ASPSP.

A textura da rocha é porfiroclástica equigranular fina em meio à matriz muito fina à afanítica. Foram observados porfiroclastos de enstatita, olivina, pigeonita e espinélio equigranulares finos (0,1mm a 1mm), com hábito anédrico e forma elíptica alongada frequente.

Os porfiroclastos de enstatita exibem extinção ondulante variando de fraca a forte, borda de recristalização e novos grãos. Os cristais de olivina apresentam bordas parcialmente recristalizadas, novos grãos, extinção ondulante variando de fraca a forte e algumas vezes cauda recristalizada com granulação muito fina. Os cristais de pigeonita mostram extinção ondulante pouco desenvolvida e bordas parcialmente recristalizadas.

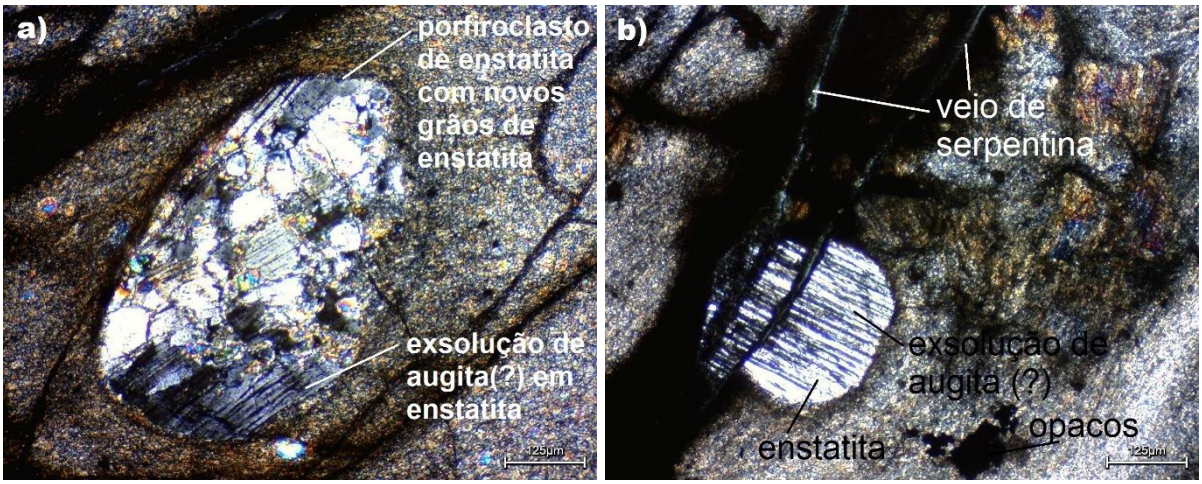
A matriz apresenta granulação muito fina (< 1mm) à afanítica. É composta provavelmente por piroxênio (enstatita e pigeonita), olivina e espinélio recristalizados com anfibólio traço, sendo que a presença destes foi determinada apenas pela seção basal característica e pela cor associada ao pleocroísmo. O espinélio compõe até 10% da matriz. Cristais anédricos de provável magnetita ocorrem distribuídos próximo e nos veios de serpentina. A matriz ainda ocorre intensamente microfraturada com veios de serpentina preenchendo as fraturas, e altamente criptoserpentinizada.

OLIVINA ORTOPIROXENITO ULTRAMILONÍTICO - ICO1Ba

A lâmina descrita foi coletada na porção sudeste da Rocha Coutinho no ASPSP.

A textura da rocha é porfiroclástica equigranular fina em meio à matriz muito fina à afanítica. Foram observados porfiroclastos de enstatita, olivina e espinélio equigranulares finos (0,1mm a 1mm), com hábito anédrico e forma elíptica alongada frequente.

Os porfiroclastos de enstatita mostram extinção ondulante variando de pouco a bem desenvolvida, borda recristalizada e novos grãos (FIGURA 16a). Alguns cristais exibem exsolução (FIGURA 16b) com prováveis composições mais cálcicas (augita?), e deformação podendo formar *kink bands* (FIGURA 16c).



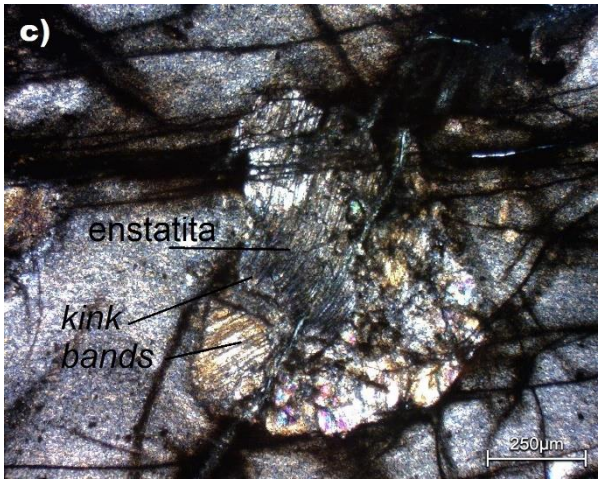


Figura 16 – Fotomicrografias da amostra de olivina ortopiroxenito ultramilonítico (ICO1Ba) com porfiroclastos finos de enstatita em meio a matriz ultramilonítica. A) Porfiroclasto de enstatita com novos grãos apresentando exsolução cálcica (augita?) (polarizadores cruzados e aumento de 4X). B) Porfiroclasto de enstatita apresentando exsolução cálcica (augita?) (polarizadores cruzados e aumento de 4X). C) Porfiroclasto de enstatita deformado apresentando *kink bands* (polarizadores cruzados e aumento de 2,5X).

Um cristal de enstatita destaca-se pela sua granulação grossa com até 5 mm de comprimento e 2,5 mm de largura, e um segundo cristal com 2,5 mm de comprimento. O primeiro apresenta extinção ondulante e hábito anédrico elíptico alongado. O segundo porfiroclasto apresenta novos grãos, estes com exsolução possivelmente cálcica (augita?).

Os cristais de olivina apresentam bordas parcialmente recristalizadas, novos grãos, extinção ondulante variando de pouco a bem desenvolvida e lamelas de deformação.

A matriz apresenta granulação muito fina (< 1mm) à afanítica. É composta provavelmente por piroxênio, olivina e espinélio. As microfraturas penetrativas e os veios de serpentina ocorrem cortando a foliação ultramilonítica da matriz, esta intensamente criptoserpentinizada. O espinélio perfaz em até 10% do total da matriz.

HARZBURGITO ULTRAMILONÍTICO - IS5Ea

A lâmina descrita a seguir foi coletada na porção central da pequena Ilha Sirius.

A textura da rocha é porfiroclástica equigranular fina em meio à matriz muito fina à afanítica. Foram observados porfiroclastos de olivina, enstatita e espinélio

equigranulares finos (0,1mm a 1mm), com hábito anédrico e forma elíptica alongada frequente.

Os porfiroclastos de olivina e a enstatita apresentam extinção ondulante, porém apenas na enstatita foi visualizada a formação de subgrão. Ambas podem apresentar cauda de recristalizada e bordas parcialmente recristalizadas.

Foi observado em seção delgada um veio composto predominantemente por olivina e enstatita cortando a foliação ultramilonítica (FIGURA 17a). No interior desse veio há a formação de um veio de serpentina anédrica preenchendo uma microfratura paralelizada internamente às paredes do veio de olivina e enstatita. As microfraturas e os veios de serpentina da rocha, com carbonato e minerais opacos no seu interior, cortam o veio de olivina e enstatita. Veios secundários de olivina e enstatita muito finos com origem no veio de olivina ocorrem paralelamente à direção da foliação da rocha.

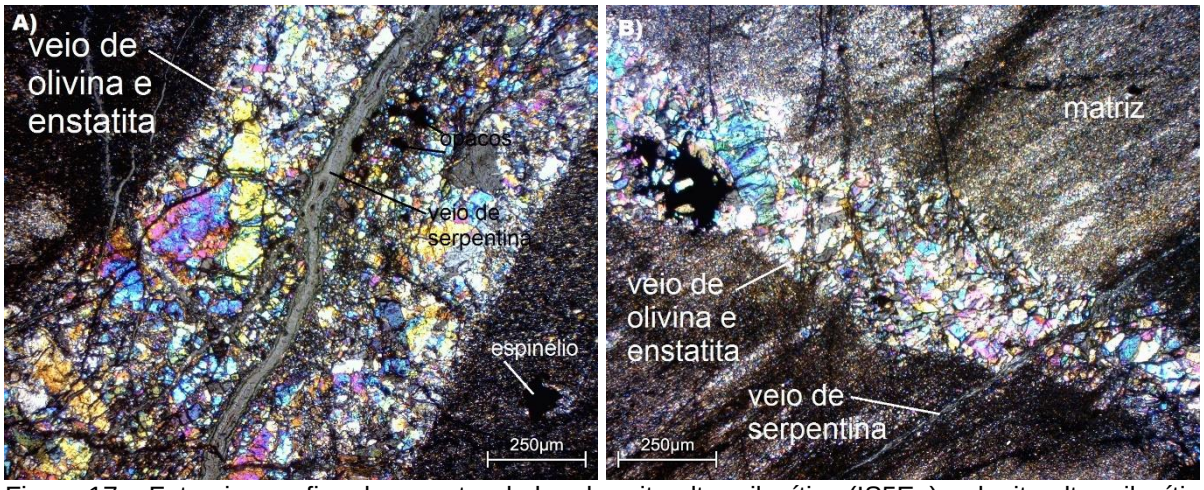


Figura 17 – Fotomicrografias da amostra de harzburgito ultramilonítico (IS5Ea) e dunito ultramilonítico (IS5Eb) exibindo veios de olivina e enstatita e suas feições características A) Amostra IS5Ea - polarizadores cruzados e aumento de 2,5X. B) Amostra IS5Eb - polarizadores cruzados e aumento de 2,5X.

A matriz ultramilonítica apresenta granulação muito fina (<0,1mm) à afanítica. Exibe espinélio marrom muito fino disperso por toda a matriz. Essa matriz foi posteriormente microfraturada e cortada por veios de serpentina.

DUNITO ULTRAMILONÍTICO - IS5Eb

A lâmina descrita a seguir foi coletada na porção central da pequena Ilha Sirius.

A textura da rocha é porfiroclástica equigranular fina em meio à matriz muito fina à afanítica. Foram observados porfiroclastos de olivina e espinélio equigranulares finos (0,1mm a 1mm), com hábito anédrico e forma elíptica alongada frequente.

Os porfiroclastos de olivina e espinélio ocorrem orientados preferencialmente em direção à foliação ultramilonítica da matriz. A olivina apresenta extinção ondulante, cauda recristalizada e novos grãos muito finos. O espinélio fraturado apresenta concentração de material recristalizado no interior das fraturas (FIGURA 18).

Figura 18 – Fotomicrografia da amostra de dunito ultramilonítico (IS5Eb) exibindo um porfiroclasto de espinélio fraturado com novos grãos de olivina e enstatita preenchendo as fraturas - polarizadores cruzados e aumento de 4X.

A rocha apresenta finos veios de olivina paralelos a foliação ultramilonítica da matriz que acessam um veio de olivina mais espesso e perpendicular à foliação ultramilonítica (FIGURA 17b). Exibe ainda finos cristais anédricos de minerais opacos (magnetita?). Esse espesso veio de olivina é cortado pelas microfraturas da rocha e por veios de serpentina.

A matriz ultramilonítica apresenta-se criptoserpentinizada, com granulação muito fina (< 0,1 mm) à afanítica, sendo composta por até 10% de espinélio dispersos aleatoriamente e, por provavelmente olivina. Essa matriz foi posteriormente microfraturada e cortada por veios de serpentina.

DUNITO ULTRAMILONÍTICO - INE72

A rocha descrita foi amostrada na porção nordeste da Ilha Nordeste.

A textura da rocha é porfiroclástica equigranular fina em meio à matriz afanítica. Foram observados porfiroclastos de olivina, enstatita e espinélio equigranulares finos (0,1mm a 1mm), com hábito anédrico e forma elíptica alongada frequente.

Os porfiroclastos de olivina, enstatita e espinélio apresentam orientação variada em relação à foliação ultramilonítica (FIGURA 19). A olivina e a enstatita apresentam bordas recristalizadas, novos grãos e extinção ondulante. Apenas a olivina exibe lamelas de deformação.

Figura 19 – Fotomicrografia da amostra de dunito ultramilonítico (INE72) mostrando um cristal de olivina em meio à matriz ultramilonítica cortada por veios de serpentina anédrica - polarizadores cruzados e aumento de 2,5X.

A rocha ultramilonítica é composta por 95% de matriz recristalizada afanítica. Apresenta ainda cristais muito finos à afaníticos de espinélio em 10% da composição total da matriz. A rocha foi posteriormente microfraturada e cortada por veios de serpentina anédrica com minerais opacos anédricos alongados.

DUNITO ULTRAMILONÍTICO - INE1Ca

A rocha descrita foi amostrada na porção nordeste da Ilha Nordeste.

A textura da rocha é porfiroclástica equigranular fina em meio à matriz afanítica. Foram observados porfiroclastos de olivina, enstatita e espinélio (tr) equigranulares finos (0,1mm a 1mm), com hábito anédrico e forma elíptica alongada frequente.

A rocha é composta por 96% de matriz afanítica exibindo bandas claras e escuras intercaladas, com espessura micrométrica e paralelas à foliação ultramilonítica microdobrada (FIGURA 20a, b e c).

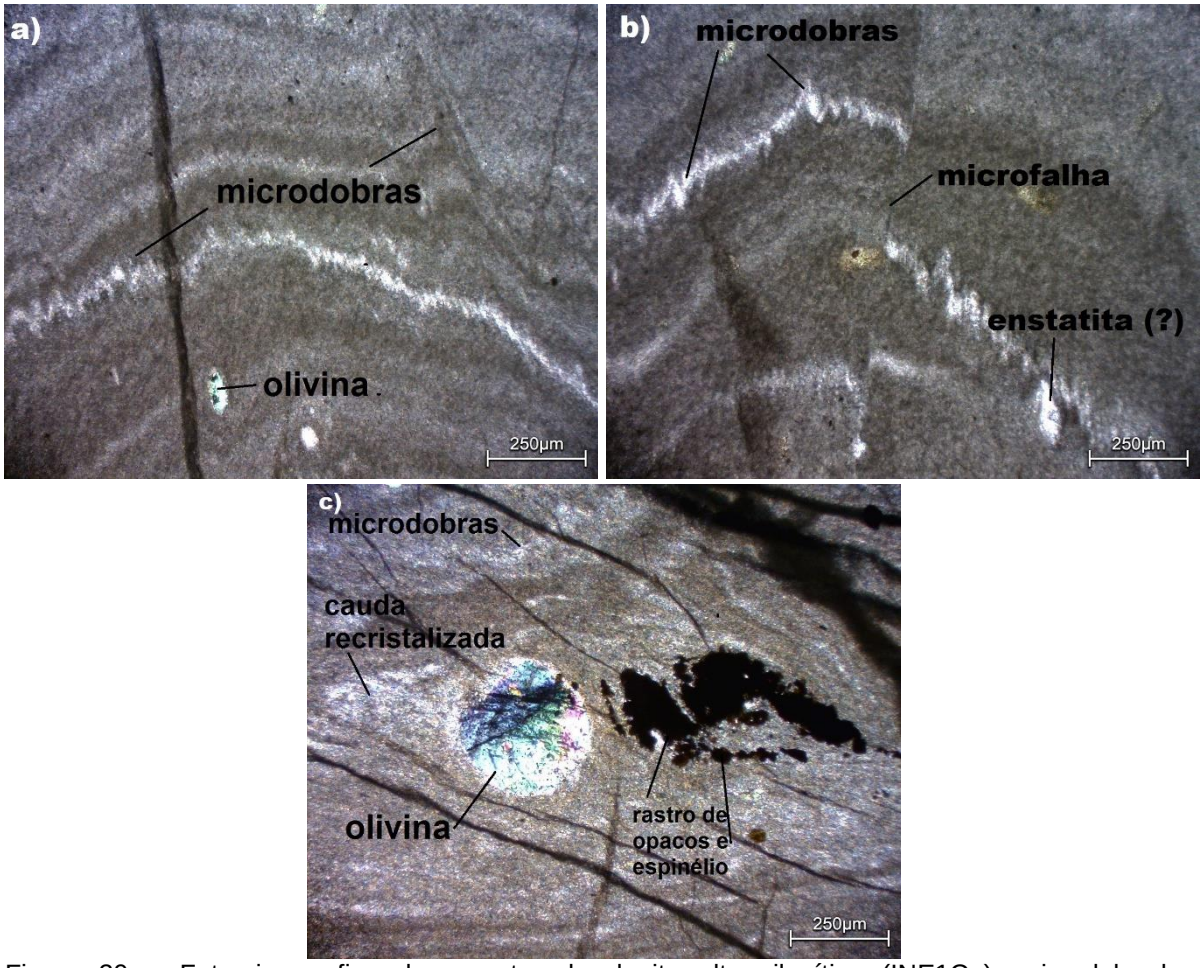


Figura 20 – Fotomicrografias da amostra de dunito ultramilonítico (INE1Ca), microdobrado e microfalhado. A) Ultramilonito microdobrado e microfraturado (polarizadores cruzados e aumento de 2,5X). B) Ultramilonito microdobrado e microfalhado (polarizadores cruzados e aumento de 2,5X). C) Porfiroclasto de olivina rotacionado e rastro de opacos orientados preferencialmente à direção do plano axial das microdobras (polarizadores cruzados e aumento de 2,5X).

Os porfiroclastos apresentam orientação na direção da foliação ultramilonítica da matriz ou, paralelamente na direção dos planos axiais das microdobras. As microdobras também apresentam raras falhas com micro-rejeito. A foliação ultramilonítica foi microdobrada, microfalhada, microfraturada e serpentinizada.

4.1.3 MILONITO PERIDOTÍTICO-KAERSUTÍTICO

As 2 lâminas descritas foram coletadas na porção leste Ilha Challenger, no milonito peridotítico-kaersutítico de Campos *et al.* (2009).

LHERZOLITO MILONÍTICO - ICH4Ba

A rocha classificada como lherzolito milonítico apresenta bandamento composicional com bandas peridotíticas e kaersutíticas (FIGURA 21a, b). As bandas claras acinzentadas peridotíticas são mais espessas e apresentam espessura de 2,5 cm em lâmina delgada. As bandas castanhas kaersutíticas mais finas apresentam espessuras variáveis com aproximadamente 2,5 mm.

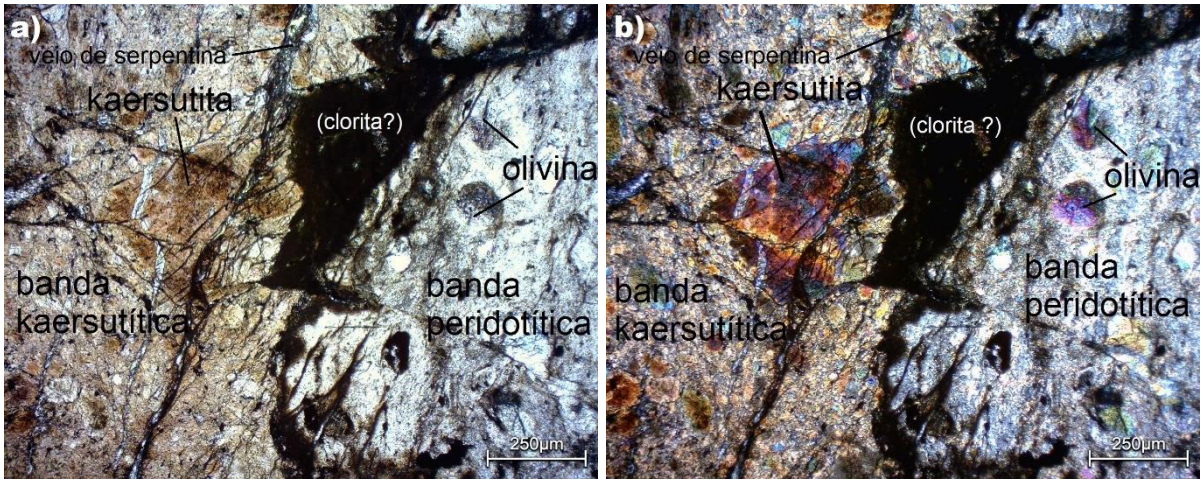


Figura 21 – Fotomicrografias da amostra de lherzolito milonítico (ICH4Ba), mostrando a banda kaersutítica (à esquerda nas imagens) em contato com a banda peridotítica (à direita nas imagens), com clorita (?) no contato entre as duas bandas. A) Polarizadores paralelos e aumento de 2,5X. B) Polarizadores cruzados e aumento de 2,5X.

As bandas peridotíticas exibem aproximadamente 85% de matriz e as bandas kaersutíticas, 80% de matriz. As bandas peridotíticas contém porfiroclastos de olivina, kaersutita, enstatita e espinélio. O espinélio apresenta-se distribuído na matriz milonítica das bandas kaersutíticas e peridotíticas em tamanho muito finos. A olivina, a kaersutita e a enstatita apresentam extinção ondulante e lamelas de deformação. As bandas kaersutíticas apresentam 95% de porfiroclastos de kaersutita e 5% de opacos. Os cristais de opacos formam rastros de opacos na matriz. O contato entre as duas bandas exibe alteração para clorita (?).

A matriz milonítica exibe microfraturas, com preenchimento parcial por serpentina. A textura da rocha é porfiroclástica equigranular fina em meio à matriz muito fina e afanítica.

DUNITO MILONÍTICO - ICH4b

A textura da rocha é porfiroclástica fina, em meio a matriz muito fina à afanítica. Foram observados porfiroclastos de olivina, kaersutita, enstatita, espinélio (traço) e opacos equigranulares finos (0,1mm a 1mm), com hábito anédrico e forma elíptica alongada frequente.

Os porfiroclastos de olivina exibem extinção ondulante, lamelas de deformação e bordas parcialmente recristalizadas. A kaersutita exibe hábito anédrico e *kink bands* (FIGURA 22a, b).

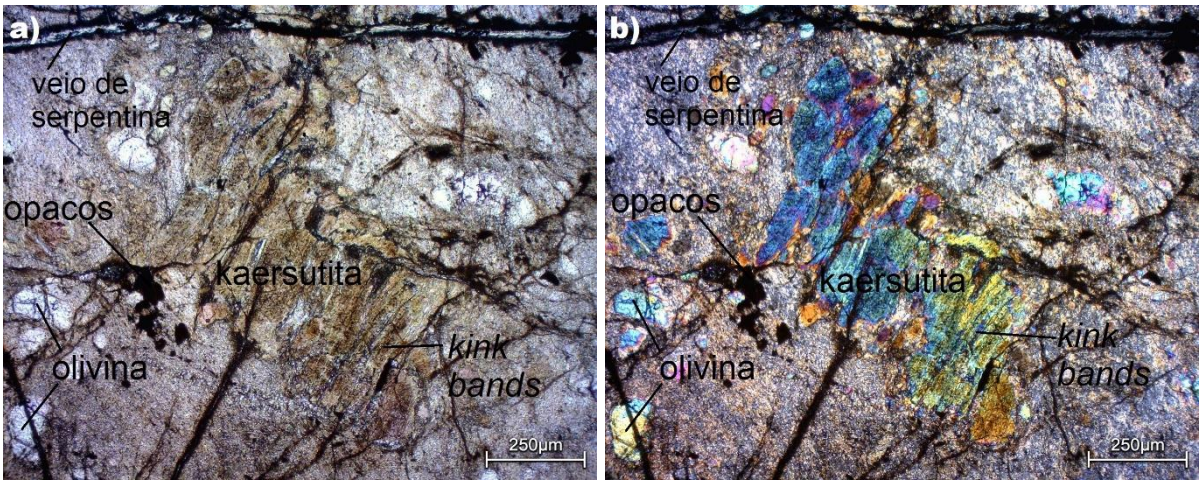


Figura 22 – Fotomicrografias da amostra de dunito milonítico (ICH4b), mostrando porfiroclasto fino com cor castanho avermelhado de kaersutítica (imagem esquerda) com *kink bands.* A) Polarizadores paralelos e aumento de 2,5X. B) Polarizadores cruzados e aumento de 2,5X.

Na matriz milonítica pode ser observada a orientação preferencial de opacos anédricos ocorrendo estirados (FIGURA 23) e paralelos às microfraturas, estas parcialmente preenchidas por serpentina. Os opacos também ocorrem como alteração de espinélio, de fraturas em porfiroclastos e em veios de serpentina. O espinélio presente compõe 5% da matriz recristalizada.

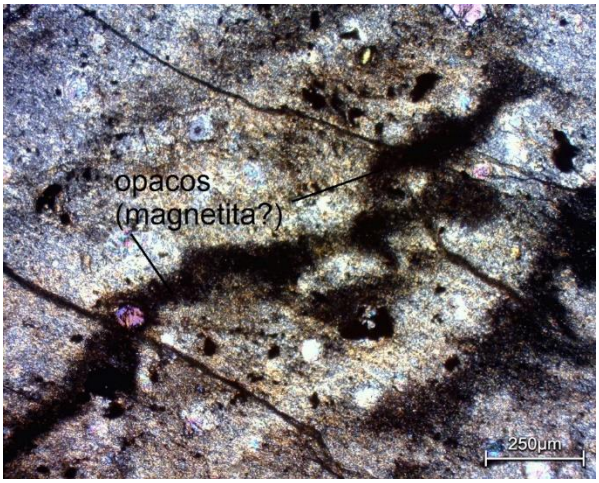
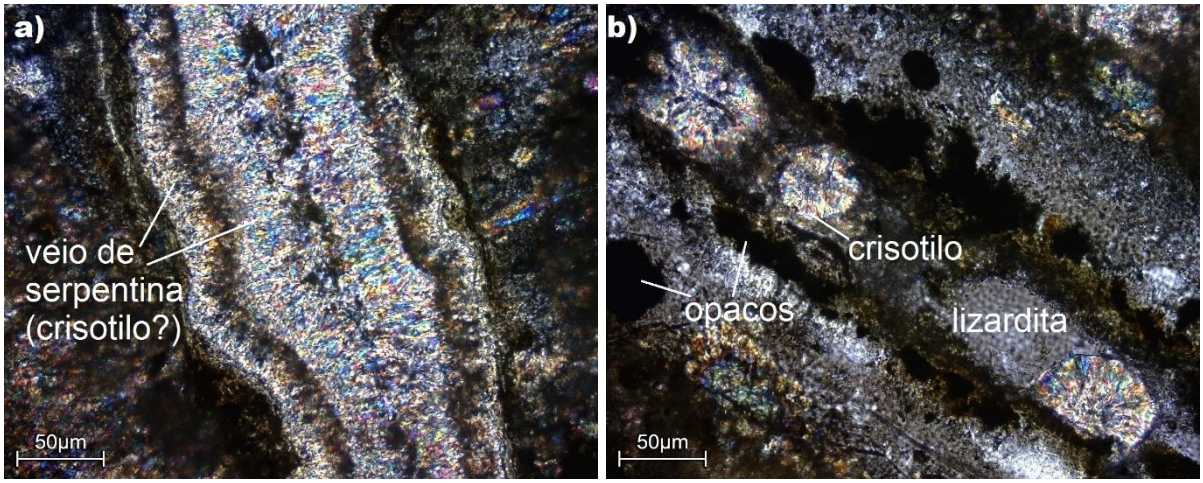


Figura 23 – Fotomicrografia da amostra de dunito milonítico (ICH4b) mostrando opacos anédricos ocorrendo estirados nas porções anastomosadas da matriz - polarizadores cruzados e aumento de 2,5X.

4.1.4 FASE HIDROTERMAL

A fase hidrotermal é formada por veios de serpentina anédrica (lizardita?) e/ou fibrosa (crisotilo?) (FIGURA 24a, b), com carbonato (FIGURA 24c) e opacos subordinados (FIGURA 24d), que preenchem as microfraturas das rochas do ASPSP. O preenchimento no interior dos veios se assemelham às feições sintaxiais de cristalização. Ocorrem distribuídos heterogeneamente por todas as amostras e permitem inferir ao menos duas fases hidrotermais principais.



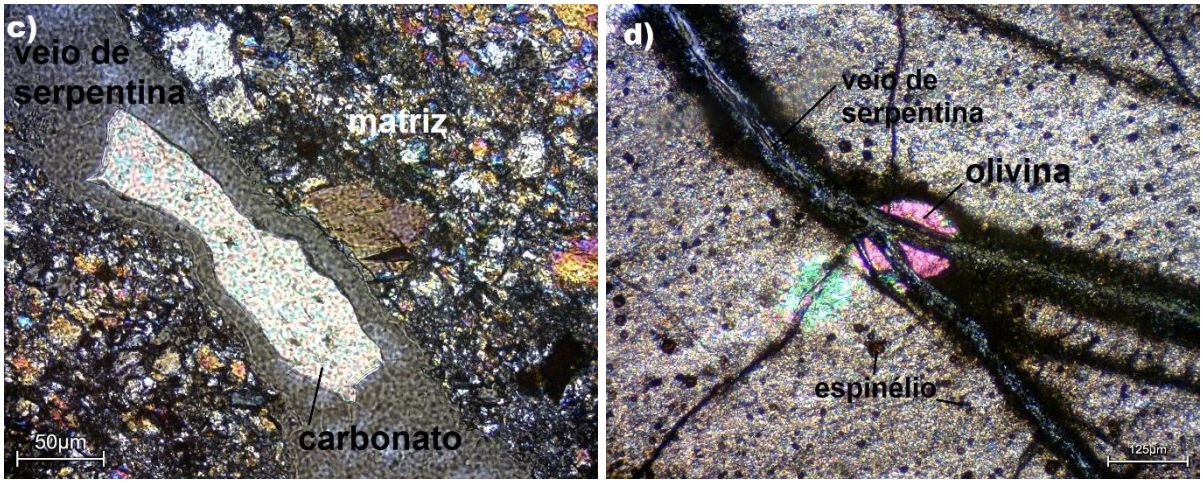


Figura 24 – Fotomicrografias exibindo os veios de serpentina e suas feições características A) Veio de serpentina crisotilo (?) fibroso (amostra IBE30a - polarizadores cruzados e aumento de 10X). B) Veio de serpentina com lizardita (?) anédrica e crisotilo (?) fibroradiado (amostra IBE23Bb - polarizadores cruzados e aumento de 10X). C) Veio de serpentina anédrica com carbonato magnesita (?) (amostra ICO3a - polarizadores cruzados e aumento de 10X). D) Veio de serpentina anédrica cortando o porfiroclasto de olivina e substituindo o mesmo (amostra INE72 - polarizadores cruzados e aumento de 4X).

A primeira fase hidrotermal apresenta veios de espessura muito fina e com cristalização predominante de serpentina anédrica (lizardita?). Na segunda fase os veios são mais espessos e cortam a primeira fase, podendo apresentar até 1,5mm de espessura em lâmina. O englobamento de grãos recristalizados da matriz é aleatório.

As feições desses veios mais tardios indicam a expansão das fraturas devido a entrada de sequências de fluidos. Apresentam ainda a disseminação de opacos anédricos (magnetita?), e de carbonato (magnesita?), com granulação fina à afanítica.

Os opacos de origem secundária ocorrem em todas lâminas de rocha descritas anteriormente e se apresentam principalmente disseminados em veios de serpentina correspondendo possivelmente aos minerais de magnetita. Raramente ocorrem como produto de alteração do espinélio, correspondendo majoritariamente à produtos de alteração de borda de porfiroclastos (de olivina, piroxênio e anfibólio), de borda das microfraturas ou da matriz recristalizada.

4.2 QUÍMICA MINERAL

Os dados de química mineral obtidos pela técnica de EDS - espectroscopia de dispersão de energia de raios X - em microscópio eletrônico de varredura/MEV, correspondem a 389 pontos de análise distribuídos ao longo das 15 lâminas de rocha do ASPSP.

Devido à falta de resolução das imagens virtuais geradas em EDS/MEV - relativas a transcodificação da energia emitida pelas partículas dos materiais estudados durante a incidência do feixe de elétrons do MEV - não foi possível associar os minerais mapeados nas imagens virtuais com os minerais em petrografia. Isso pode ter ocorrido devido ao diminuto tamanho dos cristais analisados e/ou em razão das bordas dos cristais estarem recristalizadas em materiais muito finos que ficam obscurecidos no imageamento por MEV/EDS. O resultado das imagens são porfiroclastos com bordas irregularmente diferentes dos apresentados em luz natural e transmitida do microscópio óptico.

Todas as análises das amostras 4 e 5 (IBE23Ba e IBE23Bb, respectivamente) apresentaram mais de 0,5% de erro nos dados das porcentagens em peso de óxidos, sendo invalidado o processamento de dados das mesmas.

Do total de 389 análises, 249 não puderam ser tratadas devido às altas porcentagens em peso de CO_2 e SO_3. Das 140 análises restantes que foram tratadas, apenas as fórmulas químicas da olivina presente na matriz afanítica apresentam fechamento (TABELA 2).

Tabela 2 – Resultados de química mineral de olivina (Fo_{92-89}) presente na matriz muito fina a afanítica das rochas do ASPSP. Número de íons com base em 4 oxigênios.

Amostra	Análise	SiO_2	Al_2O_3	FeO	Cr_2O_3	NiO	MgO	MnO	CaO	Total
IBE45a	61	43,03	0,81	7,44	0,36	—	48,10	—	0,27	100,01
IBE45b	28	42,36	2,10	8,04	1,26	—	45,99	—	0,26	100,01
IBE23Da	40	41,91	1,56	8,12	—	—	47,48	—	0,93	100,00
IBE30a	134	43,28	1,56	7,35	0,28	—	46,37	—	1,16	100,00
IBE30b	77	44,50	0,80	7,45	—	—	46,36	0,16	0,73	100,00
ICO3a	37	43,23	1,94	6,99	0,64	—	46,14	—	1,06	100,00
ICO1Ba	87	43,13	—	7,69	0,29	—	48,75	—	0,14	100,00
IS5Ea	58	42,33	3,20	7,31	0,84	—	44,18	—	2,15	100,01
IS5Eb2	28	48,63	1,87	7,15	0,39	—	40,96	—	1,00	100,00
INE72	74	42,68	0,76	7,66	—	0,34	48,03	—	0,53	100,00
INE1Ca	38	45,55	1,47	6,91	0,33	0,38	44,24	—	1,13	100,01
ICH4Ba	58	45,61	0,85	8,73	—	—	44,36	0,25	0,20	100,00
ICH4Bb	21	41,25	2,52	10,23	0,67	0,30	44,62	0,19	0,18	99,96

Amostra	Análise	Si	Al	Fe^{2+}	Cr	Ni	Mg	Mn	Ca	Total	Mg/Mg+Fe
IBE45a	61	1,036	0,023	0,150	0,007	—	1,726	—	0,007	2,949	0,92
IBE45b	28	1,024	0,060	0,163	0,024	—	1,657	—	0,007	2,934	0,91
IBE23Da	40	1,015	0,045	0,164	—	—	1,714	—	0,024	2,963	0,91
IBE30a	134	1,042	0,044	0,148	0,005	—	1,664	—	0,030	2,933	0,92
IBE30b	77	1,068	0,023	0,150	—	—	1,658	0,003	0,019	2,921	0,92
ICO3a	37	1,039	0,055	0,141	0,012	—	1,653	—	0,027	2,927	0,92
ICO1Ba	87	1,040	—	0,155	0,006	—	1,752	—	0,004	2,957	0,92
IS5Ea	58	1,023	0,091	0,148	0,016	—	1,591	—	0,056	2,924	0,92
IS5Eb2	28	1,150	0,052	0,141	0,007	—	1,444	—	0,025	2,820	0,91
INE72	74	1,031	0,022	0,155	—	0,007	1,730	—	0,014	2,958	0,92
INE1Ca	38	1,089	0,041	0,138	0,006	0,007	1,576	—	0,029	2,887	0,92
ICH4Ba	58	1,095	0,024	0,175	—	—	1,588	0,005	0,005	2,893	0,90
ICH4Bb	21	1,010	0,073	0,209	0,013	0,006	1,628	0,004	0,005	2,947	0,89

Os dados que não apresentam fechamento da fórmula química correspondem aos porfiroclastos, as bordas recristalizadas finas e a matriz recristalizada muito fina. Os erros apresentados ocorrem no último sítio catiônico octaédrico dos minerais, exibindo a ultrapassagem da quantidade permitida para o sítio em questão (TABELA 3).

Tabela 3 – Dados não acurados de química mineral dos porfiroclastos, da matriz recristalizada e da borda de porfiroclastos. Número de íons com base em 6 oxigênios para piroxênio e 23 para anfibólio em base anidra. (PC=centro de porfiroclasto; PB=borda de porfiroclasto; MR=matriz recristalizada)

Amostra	Análise	Mineral	Situação	SiO_2	Al_2O_3	FeO	TiO_2	Cr_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	Total
IBE45b	18	enstatita	PC-1	23,94	26,14	10,18	—	8,45	30,61	0,68	—	—	100,00
IBE45b	20	enstatita	PB-1	26,81	23,46	9,89	—	6,98	31,96	0,83	—	—	99,93
IBE23Da	1	pigeonita	PC-2	45,26	9,19	5,66	0,42	0,40	30,65	6,35	1,60	0,14	99,67
IBE23Da	3	enstatita	PB-2	47,81	3,51	6,37	—	0,28	39,18	2,74	—	—	99,89
IBE23Da	31	pigeonita	MR	46,56	5,75	5,99	0,22	0,38	35,26	4,74	0,81	0,11	99,82
IBE23Da	34	enstatita	MR	31,90	22,82	8,30	—	2,79	32,53	1,58	—	—	99,92
ICH4Ba	52	pargasita	PC-3	44,47	13,62	5,81	2,50	—	18,90	11,16	2,03	0,83	99,32

Amostra	Análise	Mineral	Situação	Si	Al	Fe^{2+}	Ti	Cr	Mg	Ca	Na	K	Total	WoEnFs
IBE45b	18	enstatita	PC-1	0,904	1,163	0,321	—	0,252	1,722	0,027	—	—	4,389	$Wo_1En_{83}Fs_{16}$
IBE45b	20	enstatita	PB-1	1,004	1,036	0,310	—	0,207	1,784	0,033	—	—	4,374	$Wo_1En_{84}Fs_{15}$
IBE23Da	1	pigeonita	PC-2	1,629	0,390	0,170	0,011	0,011	1,644	0,245	0,112	0,006	4,218	$Wo_{12}En_{80}Fs_8$
IBE23Da	3	enstatita	PB-2	1,699	0,147	0,189	—	0,008	2,076	0,104	—	—	4,223	$Wo_4En_{88}Fs_8$
IBE23Da	31	pigeonita	MR	1,667	0,243	0,179	0,006	0,011	1,882	0,182	0,056	0,005	4,231	$Wo_8En_{84}Fs_8$
IBE23Da	34	enstatita	MR	1,163	0,981	0,253	—	0,080	1,768	0,062	—	—	4,306	$Wo_3En_{85}Fs_{12}$
ICH4Ba	52	pargasita	PC-3	6,227	2,248	0,680	0,263	—	3,944	1,674	0,551	0,148	15,736	—

Apesar desses espectros não exibirem a acurácia necessária, os dados resultantes não foram descartados. As fórmulas químicas finais, apesar de imprecisas, podem indicar possíveis minerais, como a enstatita, a pigeonita e a pargasita, identificadas em petrografia. Assim sendo, complementam a análise petrográfica e, posteriormente, podem servir de base para estudos que busquem

identificar as possíveis causas dos erros diante de novas análises. Não obstante, novas análises devem ser feitas para a confirmação dos minerais dessas rochas.

5 DISCUSSÕES

Os resultados obtidos na petrografia, e complementados pela química mineral, revelam uma história geológica complexa de deformação das rochas peridotíticas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo durante a ascensão mantélica e o encaixe dessas rochas na crosta oceânica.

Apesar das altas taxas de deformação e serpentinização que obliteraram quase toda composição modal original do ASPSP, as fases minerais e as feições de deformação identificadas nas lâminas de rocha revelaram um conteúdo rico de informações a respeito dos processos e mecanismos envolvidos durante a evolução desse corpo rochoso.

5.1 PETROGRAFIA

Os resultados obtidos na petrografia correspondem ao material esperado para dunitos, peridotitos e piroxenitos milonitizados, ultramilonizados e serpentinizados. Os porfiroclastos identificados em ordem decrescente de ocorrência são: a olivina, a enstatita, a pigeonita, o espinélio, a kaersutita e a pargasita, a última subordinadamente. Assim sendo, a composição dos porfiroclastos ao longo das rochas do ASPSP não é homogênea.

Ao contrário da proposta de Campos *et al.* (2009), as rochas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo também apresentam composições dunítica e piroxenitícas. Foi observado que quando a ocorrência de pigeonita aumenta consideravelmente, as porcentagens de olivina e enstatita diminuem, e vice-versa (TABELA 4). Essas composições associadas a presença de bandas kaersutíticas podem indicar que a rocha protólito do ASPSP era heterogênea e que sua origem

pode estar relacionada a exumação de cumulatos precoces de uma câmara magmática, resfriada lentamente e formando estratificações ígneas.

Tabela 4 – Dados das porcentagens de porfiroclastos estimados visualmente em petrografia, distribuídos nas lâminas de rocha do ASPSP. (P=banda peridotítica; K=banda kaersutítica).

Amostra	Porfiroclastos (%)						
	Olivina	Enstatita	Pigeonita	Espinélio	Kaersutita	Pargasita	Opacos
IBE45a	85	10	—	5	—	—	tr
IBE45b	90	5	—	5	—	—	tr
IBE23Da	95	5	—	tr	—	—	tr
IBE23Ba	3	tr	95	2	—	—	tr
IBE23Bb	5	5	85	5	—	—	tr
IBE30a	10	5	85	tr	—	—	tr
IBE30b	30	5	60	5	—	tr	tr
ICO3a	20	70	5	5	—	—	tr
ICO1Ba	25	70	—	5	—	—	tr
IS5Ea	50	45	—	5	—	—	tr
IS5Eb	95	tr	—	5	—	—	tr
INE72	90	5	—	5	—	—	tr
INE1Ca	95	5	—	tr	—	—	tr
ICH4Ba (P)	65	5	—	5	25	—	tr
ICH4Ba (K)	—	—	—	—	95	—	5
ICH4Bb	80	5	—	tr	10	—	5

Na petrografia foram identificados opacos ocorrendo como inclusões e possíveis exsoluções na maioria dos porfiroclastos. A química mineral apresentou diversas análises, tanto de olivina como de piroxênio, com composições baixas de Ti e Cr, que associadas ao Fe e/ou ao Al, quando presentes, podem corresponder a magnetita; ilmenita; e/ou Cr-espinélio.

Os opacos também ocorrem como alteração de borda de porfiroclastos gerados provavelmente durante a serpentinização dos milonitos e como possível produto de criptoserpentinização da matriz quando estes materiais se encontram próximo à microfraturas e veios de serpentina.

5.2 QUÍMICA MINERAL

Os óxidos determinados por EDS/MEV foram: SiO_2, MgO, FeO, Al_2O_3, CaO, Cr_2O_3, TiO_2, NiO, MnO, Na_2O e K_2O. Quando o Na_2O é presente nas análises, pode ultrapassar as quantidades de um ou outro óxido de CaO, Cr_2O_3, TiO_2, NiO e MnO.

Devido a invalidação majoritária das análises com CO_2 e SO_3, porfiroclastos de espinélio, opacos, kaersutita etc. não puderam ser avaliados. Os dados da química mineral para a matriz muito fina a afanítica foram conclusivos para forsterita (Fo_{92-89}).

A presença de pequenas quantidades Al nas análises químicas da forsterita, encontrada na matriz recristalizada, pode ter ocorrido devido a este material ser muito fino à afanítico. O feixe de elétrons do MEV/EDS pode ter incidido em outros minerais próximos ao centro de incidência do feixe, analisando composições químicas de possíveis inclusões da forsterita recristalizada ou mesmo de outros minerais da matriz muito fina a afanítica. Isso também explica a ocorrência de Cr e Ti em análises de outros porfiroclastos, indicando a presença de inclusões e exsoluções de magnetita, espinélio, ilmenita etc.

Quantidades de até 3% de Al no sítio tetraédrico são aceitos na olivina. Nos dados químicos esses valores chegam a 0,09. Isso pode ser explicado pelas altas temperaturas pelas quais essas rochas foram mantidas durante o metamorfismo, expandido o sítio tetraédrico e permitindo a entrada desse cátion em quantidades levemente maiores.

Esses cristais também apresentam pequenas quantidades de Ca, que são aceitos em quantidades de até 1% em peso sob a forma de óxidos. A presença do Al e do Ca também podem ser explicados pela alteração da olivina. Esses cátions substituem Mg, Fe^{+2} e Si.

Os veios de serpentina são compostos predominantemente por serpentina anédrica e serpentina fibrosa, podendo corresponder a lizardita e crisotilo, respectivamente. Em menores quantidades, ocorrem opacos e carbonato disseminados. Os opacos podem corresponder à magnetita (Fe_3O_4), como produto de serpentinização da olivina e da enstatita, e o carbonato pode corresponder à magnesita ($MgCO_3$). O Mg da magnesita pode ter origem na dissolução da olivina

exposta nas microfraturas durante a percolação de fluidos hidrotermais em altas pressões.

As altas quantidades de CO_2 e SO_3 nas análises podem estar relacionadas a presença de magnesita e de sulfetos. No entanto, a rara presença de carbonato e opacos nas seções delgadas sugerem que esses dados podem ter sido gerados por calibração inadequada do MEV/EDS (em relação ao dióxido de carbono) e/ou por influência do feixe de elétrons incidindo sobre o material muito fino nas proximidades do espectro gerado e apresentando essas anomalias de SO_3 provindo dos opacos disseminados na rocha.

A metalização das seções delgadas com carbono também pode ter sido responsável pela presença de altas quantidades de CO_2. Uma solução para esse problema poderia ser a metalização das lâminas delgadas com Au.

5.3 HISTÓRIA DE DEFORMAÇÃO E ESTIMATIVA GEOTERMOBAROMÉTRICA

Através da petrografia das seções delgadas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo foi observado que essas rochas estão milonitizadas e ultramilonitizadas.

A composição dos porfiroclastos tais como: olivina magnesiana (forsterita), ortopiroxênio (enstatita) e clinopiroxênio (pigeonita) magnesianos e anfibólios magnesianos (kaersutita e pargasita), associados a presença de espinélio indicam a origem mantélica dessas rochas. As quantidades relevantes de espinélio (5% - 10%) nessas rochas permitem classificá-la em espinélio lherzolito (Gill, 2010).

Com base nas classificações de microestruturas propostas por Passchier & Trouw (2005), as feições de deformação dúctil observadas em lâmina de rocha foram: extinção ondulante, subgrão, novos grãos, lamelas de deformação, borda de grão recristalizada, cauda de recristalizada, feições núcleo-manto e geminação mecânica. Foram observados ainda as foliações miloníticas e ultramiloníticas, além da formação de raros veios compostos por olivina e enstatita.

As feições observadas nos porfiroclasotos, acima citadas, indicam processos de plasticidade intracristalina relacionados à recristalização dinâmica. A formação do

veio de olivina e enstatita pode estar relacionada a processos de transferência de massa por difusão iônica ou no estado sólido. Esses processos ocorreram durante de metamorfismo dinâmico das rochas do ASPSP.

As feições de deformação rúptil observadas em lâmina delgada são: microfraturas com rejeito milimétrico e microfalha.

A fase hidrotermal é composta por veios finos e espessos de serpentina, com opacos e carbonatos. Suas feições sugerem uma fase hidrotermal menos intensa, cortada por uma segunda fase mais intensa que gerou veios mais espessos nas rochas, com quantidades maiores de opacos e carbonato disseminados.

De acordo com estudos de Melson *et al*. (1967) a estabilidade da olivina associada a minerais hidratados sugere recristalizações acima de temperaturas de no mínimo 430 °C e que são encontradas a 15 km de profundidade com base no gradiente geotérmico médio de 30°C/km.

Estudos de Jaroslow *et al.* (1995) em olivina de milonitos finos inferem que a temperatura de deformação dúctil da olivina continua até 600°, reduzindo os limites inferiores de 700°C (à 1000°C) determinados experimentalmente por Cannat *et al.* (1992; citado por Jaroslow *et al.,* 1995), com geração de veios de serpentina deformada a 350°. Na presença de fluidos, as primeiras serpentinas se formam entre 620°C e 520°C, em profundidades de 2,5GPa e 0,5 GPa, respectivamente. (BUCHER AND GRAPES, 2011).

Sendo assim, estima-se que a deformação dúctil que milonitizou os peridotitos do Arquipélago de São Pedro e São Paulo sob a ação da Zona da Falha Transformante de São Paulo, se processou entre temperaturas estimadas de 1000° a 500°, a partir de aproximadamente 15 km de profundidade na crosta oceânica.

Com o soerguimento crustal e a subsequente diminuição da temperatura, as rochas do ASPSP, que se encontravam sob influência de regime dúctil de deformação, passaram a ter influência de regime rúptil. Os esforços gerados por cisalhamento simples predominante na Zona da Falha Transformante de São Paulo passaram a microfraturar a rocha. Visto que o material peridotítico já se encontrava em baixas profundidades e próximo à superfície do fundo oceânico, o

microfraturamento penetrativo foi fundamental para a entrada de água nesses espaços, que reagiu com a olivina, com o piroxênio e o anfibólio, formando veios de serpentina. Estima-se que a serpentina tenha começado a se formar no intervalo de 500º-350°C.

Devido ao resfriamento progressivo do milonito peridotítico durante o soerguimento crustal, e associado aos complexos movimentos cisalhantes, a contração do material pode ter permitido a entrada de uma fase hidrotermal mais tardia nos espaços formados com a contração. Essa fase hidrotermal tardia teria percolado as microfraturas, cortando os veios mais finos da rocha.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Arquipélago de São Pedro e São Paulo é composto por rochas ultramáficas milonitizadas e ultramilonitizadas. Esses materiais foram posteriormente microfraturados e serpentinizados durante a história de deformação dúctil e rúptil de encaixe e soerguimento do peridotito na crosta oceânica.

Os dados de petrografia, complementados pelos de química mineral, foram razoavelmente satisfatórios na determinação das fases minerais e dos processos de deformação e alteração pelos quais as rochas do ASPSP foram submetidas.

A partir da petrografia foram observados a ocorrência de porfiroclastos anédricos, elípticos e finos de olivina, enstatita, pigeonita, espinélio, kaersutita e pargasita subordinada, compondo os dunitos, peridotitos e piroxenitos. Na química mineral, apenas a matriz forsterítica foi determinada. Estima-se que ela também seja composta pelos mesmos materiais dos porfiroclastos, além da forsterita.

Para a química mineral mais detalhada sugere-se que as análises por EDS/MEV sejam refeitas visando à calibração do equipamento através de uso de parâmetros pré-determinados para o trabalho com estes tipos de rochas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bucher K., Grapes R. 2011. *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. Springer. London-New York, 428 pp.

Deer W., A., Howie R., A., Zussman. 2000. *Minerais Constituintes das Rochas: Uma Introdução*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 724 pp.

Campos T. F. C., Virgens Neto J., Amorim V. A., Hartmann, L. A., Petta R. A. 2003 Modificações metassomáticas das rochas milonitizadas do complexo ultramáfico do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Atlântico Equatorial. *Geochimica Brasiliensis*, **17**(2): 81-90.

Campos T. F. C., Virgens Neto J., Srivastava N. K., Petta R. A., Hartmann, L. A., Moraes J. F. S., Mendes L., Silveira S. R. M. 2005. Arquipélago de São Pedro e São Paulo - Soerguimento tectônico de rochas infracrustais no Oceano Atlântico. *SIGEP – Capítulo impresso*. Vol. II. Parte **8**: 253-266.

Campos T. F. C., Petta R. A., Theye T., Sichel S. E., Simões L. S. A., Srivastava N. K., Motoki A., Virgens Neto J., Andrade F. G. G. 2009. Posição ímpar do Arquipélago de São Pedro e São Paulo na diversidade geológica da Terra. Em: Secirm, Marinha do Brasil, Orgn. Danielle de Lima Viana...(*et al*.). O Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos de Estação Científica. Brasília, Distrito Federal, p. 54-63.

Gill R. 2014. *Rochas e processos Igneos: Um Guia Prático*. Bookman, Porto Alegre, 427 pp.

Jaroslow G. E., Hirth G., Dick H. J. B. 1996. Abyssal peridotite mylonites: implications for grain-size sensitive flow and strain localization in the oceanic lithosphere. *Tectonophysics*, Woods Hole, MA, **256**:17-37

Melson W. G., Jarosewich E., Bowen V. T., Thompson G. 1967. St. Peter and St. Paul Rocks: A High-Temperature, Mantle-Derived Intrusion. *Science* **155** (3769), 1532-1535.

Motoki A., Sichel S. E., Campos T. F. C. Vargas T., Soares R., Motoki K. F. 2010. Morfologia abissal em torno do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial, e sua relação ao tectonismo de soerguimento ativo. *Revista de Geografia* Recife: UFPE – DCG/NAPA, v. especial VIII SINAGEO, n. 2, 318 - 330.

Passchier C. W., Trouw R. A. J. 2005. *Microtectonics*. Springer, Berlin, 366 p.

Secirm, Marinha do Brasil. 2009. *O Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos de Estação Científica*. Orgs. Danielle de Lima Viana... (*et al*). Brasília, DF. 348 p.

Sichel S. E., Esperança S., Motoki A., Maia M., Horan M. F., Szatmari P., Alves E. C., Mello S. L. M. 2008. Geophysical andgeochemical evidence for cold upper mantle beneath the equatorial atlantic ocean. *Revista Brasileira de Geofísica.* (26)1: 69-86

Sichel S. E., Motoki A., Vargas T., Savi D. C., Campos T. F. C., Simões L. S. A. 2009. Rocha ultramáfica do manto abissal. Em: Secirm, Marinha do Brasil, Orgn. Danielle de Lima Viana...(*et al.).* O Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos de Estação Científica. Brasília, Distrito Federal, p. 64-73.

8 ANEXOS

ANEXO1 - Folha de assinaturas do aluno, orientador e co-orientador.

Curitiba, 25 de novembro de 2016

Bianca de Andrade Golle

Aluna

Carlos E. de M. Barros

Orientador