

INVESTIGAÇÃO DE MICROESTRUTURAS E CRESCIMENTO MINERAL EM OLIVINAS DAS ILHAS FLORES E CORVO – PORTUGAL: ENSAIO SOBRE A VARIAÇÃO CRISTALOQUÍMICA E MINERALOGÊNESE

INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURES AND MINERAL GROWTH IN OLIVINES FROM FLORES AND CORVO ISLANDS - PORTUGAL: ESSAY ON CRYSTALLOCHEMISTRY VARIATION AND MINERALOGENESIS

Diogo Gabriel SPERANDIO¹, Cristiane Heredia GOMES², João Pedro de Jesus SANTANA³

¹Universidade Federal de Minas Gerais. Avenida Antônio Carlos, 6627, Pampulha – Belo Horizonte. E-mail: dsperandio@ufmg.br

²Universidade Federal do Pampa. Avenida Pedro Anunciação, 111, Caçapava do Sul – RS. E-mail: cristianegomes@unipampa.edu.br

³Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Avenida Bento Gonçalves, 9.500, Agronomia, Porto Alegre - RS
E-mail: santanapjoao@hotmail.com

Introdução
Método Analítico
Resultados e Discussão
Conclusões

RESUMO - Neste estudo os autores investigam variações cristaloquímicas e a mineralogênese de olivinas magmáticas de rochas vulcânicas das ilhas das Flores e Corvo, Arquipélago dos Açores-PT. Esta investigação é realizada por meio de microscopia eletrônica de varredura e difração de raios X com energia dispersiva-EDX e são analisados aspectos de microestruturas e assinaturas químicas registradas durante a formação das olivinas. Tendo conhecimento das características reológicas deste mineral, que transcendem pressões médias de 0,3 a 15 GPa e profundidades de 400 km, as Olivinas são a chave para o conhecimento da dinâmica do manto superior. Assim, este estudo possibilita a discussão acerca dos processos petrogenéticos e cristaloquímicos atuantes na formação destas olivinas e, conseqüentemente, das rochas vulcânicas das ilhas Flores e Corvo. Portanto, discute-se aqui, os processos diferenciados aos quais estes minerais foram submetidos, e que permaneceram impressos em sua composição química e morfologia, tais como fracionamento magmático, variações nas condições de pressão e, também, de temperatura para as rochas e outros produtos magmáticos das duas ilhas do Arquipélago dos Açores.

Palavras-chave: Olivinas, Crescimento mineral, Cristaloquímica, Mineralogênese, Arquipélago dos Açores.

ABSTRACT - In this study the authors investigate crystallochemical variations and the mineralogenesis of magmatic olivines from volcanic rocks of the islands Flores and Corvo, Archipelago of the Azores-PT. This investigation is carried out by means of scanning electron microscopy and x-ray diffraction with dispersive energy-EDX and aspects of microstructures and chemical signatures registered during the formation of olivines are analyzed. Having knowledge of the rheological characteristics of this mineral, which transcend average pressures from 0.3 to 15 GPa and depths of 400 km, olivines are the key to understanding the dynamics of the upper mantle. Thus, this study makes possible the discussion about the petrogenetic and crystallochemical processes active in the formation of these olivines and, consequently, of the volcanic rocks of the Flores and Corvo islands. Therefore, we discuss here the differentiated processes to which these minerals were subjected, and which remained imprinted in their chemical composition and morphology, such as magmatic fractionation, variations in pressure conditions and, also, temperature for rocks and other products of the two islands of the Azores Archipelago.

Keywords: Olivine, mineral growth, crystallochemistry, mineral genesis, Azores archipelago.

INTRODUÇÃO

A olivina é um dos minerais mais comuns da terra e pertence ao grupo dos nesossilicatos, sua estrutura consiste em tetraedros de SiO₄ independentes ligados entre si por cátions Fe e Mg em coordenação seis. A olivina forma uma série isomórfica entre dois membros finais: Forsterita (Mg₂SiO₄) e Faialita (Fe₂SiO₄). Além destes dois *end-members* a série apresenta uma completa série sólida com membros intermediários: Crisólita (Fo₇₀₋₉₀), Hialosiderita (Fo₅₀₋₇₀), Hortonolita (Fa₇₀₋₅₀) e Ferrohortonolita (Fa₉₀₋₇₀). A cristalização ocorre em um sistema ortorrômbico, classe cristalográfica bipiramidal

rômbica, onde as formas cristalinas relacionam-se com os três eixos cristalográficos de comprimentos desiguais formando ângulos de 90° entre si (Klein & Dutrow, 2012). As posições octaédricas são muitas vezes ocupadas exclusivamente por átomos divalentes e Al trivalente, onde o Fe é ausente ou presente em pequena quantidade. Substituições entre o Mg²⁺ e Fe²⁺ por Mn²⁺ e Ca²⁺ podem ocorrer resultando minerais como: Tefroíta (Mn₂SiO₄), Knebelita (Fe, Mn)₂SiO₄ e Monticelita (CaMgSiO₄). Nos cristais de olivina é relativamente comum a ocorrência de zoneamentos químicos, onde o

núcleo é mais rico em Mg e as bordas são mais ricas em Fe conforme as condições do ambiente geoquímico onde foram formados.

Comum em rochas máficas e ultramáficas ou em menor proporção em rochas metamórficas, a olivina é o produto inicial da cristalização fracionada apresentando em sua curva de estabilidade mineral temperaturas entre 1900°C e 1200°C. Este mineral têm um ponto de fusão elevado, por exemplo, a temperatura de fusão da forsterita é em média 1900°C enquanto que a da faialita é em torno de 1200°C. As características reológicas da olivina, que transcendem a uma pressão média de 0,3 a 15 GPa e a uma profundidade de 400 km, tornam este mineral a chave para o conhecimento da estrutura térmica e da dinâmica do manto superior (Kroll et al., 2012, Finkelstein et al., 2014, Hushur et al., 2009, Katsura et al., 2009, Trots et al., 2012, Ford et al., 1983, Sperandio et al., 2018, Sperandio 2019).

Wenk & Tomé (1999) sugerem que a deformação deste mineral controla a reologia do manto superior. A história de crescimento de minerais como a olivina e piroxênio pode ser conservada no padrão de zoneamento químico de cristais individuais. Aliado à isto, a olivina mostra singular importância ao fato de que ela é o primeiro mineral a cristalizar a baixas pressões independentes da fonte mantélica, conforme sugerido por Falloon et al. (2007). Em processos de cristalização magmática fracionada podemos encontrar fenocristais de olivina com diversas composições. Neste sentido, para situações normais de cristalização, a olivina apresenta uma zonação Fe-Mg (série forsterita-faialita), com núcleos mais ricos em magnésio e bordas ricas

em ferro como um reflexo deste processo de fracionamento magmático e cristalização (Danyushevsky et al., 2002, Jones et al., 2005). Em contrapartida, grãos reliquiais (*dusty olivine*) são fortes evidências de desequilíbrio no sistema. Eles são facilmente identificados por conterem numerosas micro inclusões de Fe-Mg (Kracher et al., 1984).

Connolly Jr. & Hewins (1991) sugerem que a variação de texturas na olivina é condicionada pela razão Fe/Mg, estando assim, as texturas diretamente relacionadas às mudanças no grau de fusão. Isto porque elas são produzidas por nucleação heterogênea, em uma relação cristal-núcleo. A temperatura, neste caso, exerce um papel fundamental junto com a composição da olivina.

O perfil de zoneamento químico desses minerais constitui um importante registro da história de cristalização magmática e de eventos difusos durante o resfriamento subsequente (Clark et al., 1981). Olivinas normais podem ter cristalizado no final da fusão e olivinas reliquiais formadas em uma geração anterior, onde o Fe foi reduzido devido às altas temperaturas (*solidus* para *liquidus*) (Leroux et al., 2003).

As características da olivina demonstram que esse mineral cristaliza em ambientes com condições ímpares. Os processos diferenciados, seja de fracionamento magmático, pressão ou temperatura, a que foi submetida ficaram impressos em sua composição química e morfologia. Gill (2010) destaca estudos empíricos acerca da cristalização de olivinas em magmas ultrabásicos em função da velocidade de resfriamento (Figura 1).

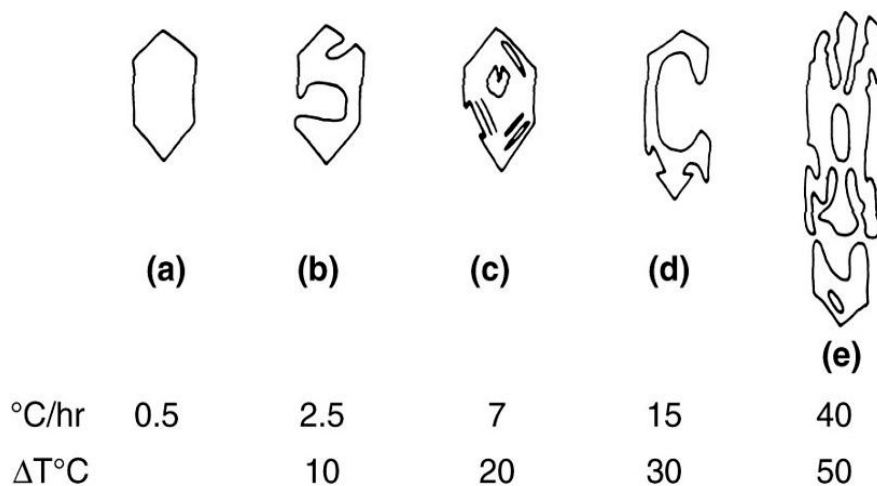


Figura 1 - Morfologias típicas de olivinas cristalizadas experimentalmente em líquidos magmáticos ultrabásicos em função da velocidade de resfriamento (°C por hora). Onde ΔT °C indica o grau de super resfriamento abaixo do *liquidus*, no qual a olivina começa a se formar (Gill, 2010).

No âmbito da reologia de minerais magmáticos para rochas básicas e ultramáficas, principalmente, a olivina está muitas vezes associada com outros minerais que cristalizam durante os primeiros estágios do fracionamento magmático, tais como: piroxênios (enstatita, hiperstênio, augita), anfibólios (hornblenda, cummingtonita, tremolita), plagioclásio cálcico e minerais de minério como a magnetita, titanomagnetita, ilmenita e cromita. Nos últimos estágios da cristalização magmática a olivina reage com esses minerais ou com o líquido intersticial, formando coroas ou bordas de reação.

Quando o mineral é observado na rocha ele já foi alterado por processos deutéricos ou hidrotermais como o resultado de equilíbrio subsequente. Por exemplo, a olivina intercrescida com o piroxênio e a magnetita em um sistema magmático, ou com a serpentina muitas vezes acompanhadas de minuciosas exsoluções de magnetita, comum em um sistema metamórfico, ou, ainda, olivina em intercrescimento com a iddingsita e, por vezes, outros filossilicatos em uma alteração deutérica (Delvigne et al., 1979).

MÉTODO ANALÍTICO

Foram selecionadas onze imagens de olivinas das ilhas Corvo e das Flores do Arquipélago dos Açores-PT. As análises minerais e químicas foram realizadas em combinação com um microscópio eletrônico de varredura-MEV (JEOL, JSM-5800) e Microsonda Eletrônica (Cameca SX-50) com detector WDS no Centro de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS e da Universidade Federal do Pampa-Unipampa.

As análises em microscópio eletrônico foram conduzidas com um feixe de elétrons com resolução nominal de 0.0035 μm , de 15 keV, 10nA e tempo de contagem de 100 segundos para cada análise. Oxigênio foi calculado por estequiometria

Deste modo, para o estudo destas características cristal químicas e petrogenéticas das olivinas utilizou-se imagens de elétrons retroespalhados, obtidas por microscopia eletrônica de varredura – MEV. Uma técnica excepcionalmente útil e precisa para a investigação da reologia e subsequente desenvolvimento de fenocristais ferromagnesianos – tais como a olivina. Para que, por fim, investigue-se a variação textural destes minerais e suas implicações frente aos processos termais e dinâmicos do manto superior. A abordagem delineada neste trabalho – imagens de elétrons retroespalhados em MEV, é desenvolvida de modo a discutir a existência de fases interdigitadas e sobrecrecidas no desenvolvimento destas olivinas, as quais apresentam propriedades ópticas que normalmente impedem a detecção de tais características na seção delgada, e fornece uma definição extremamente clara da variação composicional química desse mineral e aplicável no estudo de minerais magmáticos e suas relações morfológicas (Sperandio et al., 2018; 2019).

(como O^{-2}) e a calibração dos equipamentos foi realizada com um conjunto de cristais (naturais e sintéticos). As imagens do MEV foram geradas predominantemente por detector de elétrons retroespalhados (*backscatter electrons detector*), no qual os níveis de cinza são proporcionais ao peso atômico médio dos elementos excitados pelo feixe de elétrons durante a varredura, portanto, imagens composicionais com os tons mais claros representam as fases de peso atômico médio mais elevado e as com tons mais escuros, as fases de peso atômico médio menos elevado. A resolução da microanálise por EDX é da ordem de 1 μm de raio em superfície e em uma profundidade da ordem de 1,5 a 5 μm .

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A olivina proveniente da ilha Flores é excepcional porque contém múltiplos grãos de diferentes tipos, tamanhos e composições. Os grãos normais são de olivinas com Fo_{63-73} (Tab. 1) e faixas estreitas nas bordas ricas em Fe (>250 μm ; Figura 2A). Por vezes, é claramente observável o zoneamento químico progressivo nos grãos (Figura 2B-C). Esses grãos mostram um crescimento excessivo de Fe, que marca o

contorno do grão (Fa_{71} ; Tab. 1). Olivina com zoneamento normal mostra núcleo rico em Mg (Fo_{73} ; Tab. 1) e sempre está contornada por um crescimento excessivo em Fe (Fo_{63-73} ; Tab. 1) do que os grãos normais. Grãos subédricos com inclusões de magnetita são também comuns e fraturas bem marcadas (Figura 2D). Olivinas normais sempre apresentam os núcleos magnesianos quando coexistem com as *dusty*

olivines. Esta é uma indicação provável de que os grãos normais foram formados em uma segunda etapa. No entanto, estes grãos são claramente mais forsterísticos do que em outras olivinas da Ilha Flores.

A identificação da *dusty olivine* (Fa₆₃₋₇₁; Tabela 1) é baseada na presença de diminutas formas alinhadas em seu núcleo (Figura 2A-B). Esta *dusty olivine* é claramente mais arredondada do que a olivina normal e com tamanho menor

(200µm). Ela tem uma aparência manchada marcada por diminutas formas que ao microscópio eletrônica parecem ser mais claras. Estas porções são mais enriquecidas em Fe do que as partes escuras, que se mostram ricas em Mg. Algumas *dusty olivines* apresentam um zoneamento químico bem marcado e normal, onde o núcleo é rico em Mg. Notadamente observa-se o excessivo sobrecrecimento de Fe no seu entorno.

Tabela 1 – Composição química das olivinas obtida ao MEV/EDX. Note que o número inicial da amostra indica o número da figura neste artigo (1a-1 = figura 1, olivina A, análise EDX número 1).

Elem (%) Amostra	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	ZrO
1a-1 (Fo ₇₂)	35.48 (±0.49)		40.14 (±0.55)			24.37 (±0.96)		
1b-1 (Fa ₇₂)	6.58 (±0.27)	13.10 (±0.64)	41.67 (±0.63)	0.96 (±0.15)	6.11 (±0.39)	31.58 (±0.97)		
1b-2 (Fo ₇₃)	36.31 (±0.51)		39.90 (±0.57)			23.79 (±0.97)		
1c-1 (Fo ₇₃)	36.01 (±0.52)		40.40 (±0.57)			23.59 (±0.99)		
1c-2 (Fa ₅₆)	21.18 (±0.48)		29.09 (±0.47)			49.73 (±1.11)		
1e-1 (Fa ₅₆)	3.14 (±0.26)	3.88 (±0.23)				72.68 (±0.83)	14.93 (±0.31)	5.37 (±0.33)
1e-2 (Fo ₅₆)	26.44 (±0.35)		29.54 (±0.36)			36.73 (±0.78)		7.29 (±0.35)
1e-3 (Fo ₅₃)	24.33 (±0.48)		27.72 (±0.51)			37.98 (±1.09)		9.97 (±0.52)
2a-1 (Fa ₆₃)	17.87 (±0.43)		27.54 (±0.45)			54.59 (±1.13)		
2b-1 (Fo ₇₁)	13.12 (±0.46)		26.10 (±0.46)		0.68 (±0.14)	60.10 (±1.25)		
2e-1 (Fa ₇₁)	13.92 (±0.45)		23.17 (±0.44)		0.94 (±0.14)	62.94 (±1.23)		
3a-1 (Fo ₇₅)	36.95 (±0.52)		41.97 (±0.60)			21.08 (±1.01)		
3b-1 (Fo ₉₃)	42.15 (±0.55)		52.37 (±0.77)			5.48 (±0.54)		
3b-2 (Fo ₈₁)	38.01 (±0.68)		47.08 (±0.89)			14.91 (±1.36)		
3c-1 (Fo ₉₃)	42.79 (±0.55)		52.21 (±0.76)			5.00 (±0.50)		
3d-1 (Fo ₈₁)	39.47 (±0.50)		44.87 (±0.60)			15.66 (±0.94)		
3d-2 (Fa ₅₁)	22.25 (±0.44)		34.66 (±0.46)		1.47 (±0.28)	41.62 (±1.02)		

Contudo, o núcleo da olivina rica em Mg mostra uma textura distinta em comparação com a borda homogênea. Esse núcleo parece uma trama de filetes entrelaçados ricos em Mg e empobrecidos em Fe (Fo₆₃₋₇₃; Tab. 1). Em alguns grãos é possível observar o núcleo mais destruído, assumindo um padrão em favo de mel (Figura 3C).

Quando algumas trilhas ricas em Mg desaparecem, o lugar ocupado por elas fica com uma aparência de superfícies de dissolução (Figura 3D-E). A identificação desses grãos como *reliquiaries* se baseia em parte no tamanho do núcleo anormalmente grande, que é visivelmente marcado pelo aspecto manchado do grão.

A olivina da ilha Corvo (Fo₇₅₋₉₃) é claramente mais destruída do que a olivina da ilha Flores. Os grãos são cortados por vênulas de iddingsita com ângulos retos, às vezes mais espessa e outras vezes mais compacta (Figura 4A-B). Consequen-

temente, os grãos mostram filetes escuros ricos em Mg e claros ricos em Fe da iddingsita. A quantidade de grãos sempre acompanhados de sobrecrecimento por Fe é superior à dos grãos euédricos e sem alteração, por exemplo a olivina das ilhas Flores. Por outro lado, algumas olivinas mostram uma textura interessante (Figura 4C), esses grãos, em particular, mostram um núcleo vermicular e bordas mais claras (Figura 4D-E). O núcleo é uma combinação de olivina com interstício vermicular de iddingsita. Em geral, a borda tem uma textura homogênea, mas, em alguns casos, as bordas têm aparência pontilhada. Isto, possivelmente devido à presença de inúmeras glóbulos ricos em Fe.

A presença de iddingsita (MgO*Fe₂O₃*3Si₂O₂*4H₂O; onde o CaO pode substituir o MgO) pode ser uma evidência para um ambiente aquoso, altamente oxidante sob temperaturas intermediárias e baixas pressões (Gay & Le Maitre, 1961). A iddingsita é um mineral

deutérico, encontrado em rochas extrusivas e/ou hipabissais, derivado do resfriamento final das lavas em que ocorre por uma reação entre gases, água e olivina. As rochas as quais pertencem as olivinas são altamente vesiculares, podendo argumentar-se sobre a presença e fácil escape de

uma abundância de gases. Como é sabido, a iddingsita não é um produto de intemperismo e tampouco depende da composição original da olivina, podendo ser formado por processos de oxidação e hidratação (Gay & Le Maitre, 1961; Ross & Shannon, 1925).

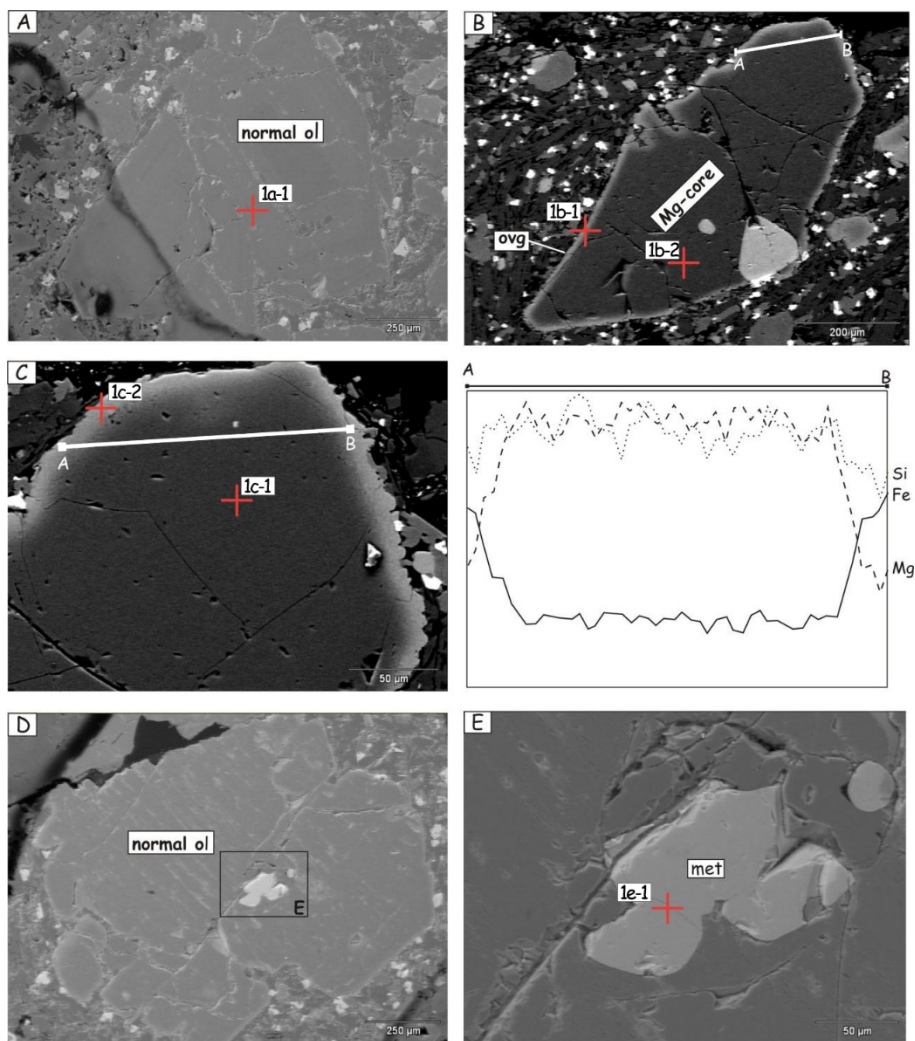


Figura 2 - Imagem de elétrons retro-espalhados obtida por MEV ilustrando a textura da olivina da ilha Flores. **A)** Olivina normal (normal ol) com fraturas e veios (linhas claras). **B)** Olivina com zoneamento composicional - núcleo rico em Mg (Mg-core) e borda com sobrecrecimento de Fe (ovg). **C)** Olivina normal zonada com núcleo magnésiano e borda rica em Fe. Estas características são ilustradas no perfil A-B para os elementos Si, Fe e Mg. O enriquecimento de Fe é bem marcado na borda enquanto há um empobrecimento de Mg. No núcleo ocorre o inverso. **D)** Olivina normal fraturada com inclusões de melt. Nota-se que as inclusões são cristalinas e apresentam várias formas. Feições semelhantes são observadas na matriz próxima as bordas do mineral. **E)** – Detalhe da imagem D mostrando a maior inclusão da olivina (melt = met). 1a-1 = figura 1, olivina A, análise EDX número 1.

Embora grande parte das olivinas da Ilha das Flores, conforme mostrado anteriormente, mostram-se com bordas irregulares e formas desiguais, o mesmo não se aplica às olivinas encontradas na Ilha Corvo, as quais apresentam-se, caracteristicamente, euédricas ou subédricas.

A olivina é muitas vezes completamente ou parcialmente transformada em piroxênio sob a influência dos processos finais de magmatismo (equação 1).

Se a transformação de olivina em piroxênio

for completa e a olivina desaparecer, o piroxênio será o constituinte primário da assembleia mineral e os minerais secundários serão derivados da alteração do piroxênio. Como se objetiva uma relação mineral-líquido é importante que exista uma transformação parcial entre os minerais.

A transformação olivina-piroxênio é dada pela seguinte equação (Gill, 2014):

$$\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Mg}_2\text{SiO}_6$$
 onde temos:

$$\text{olivina} + \text{SiO}_{2(\text{melt})} \rightarrow \text{enstatita (piroxênio)}.$$

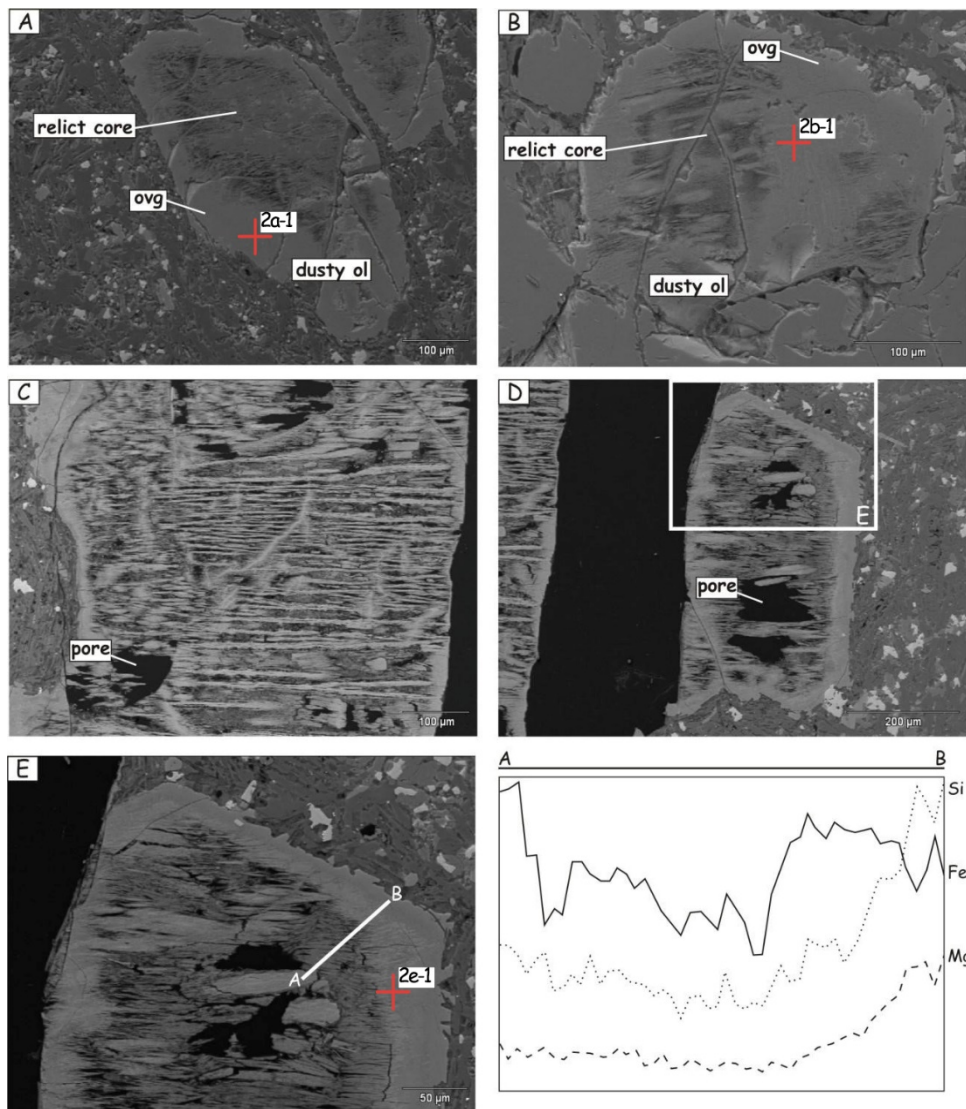


Figura 3 - Imagem de imagem de elétrons retro-espalhados ilustrando a textura da olivina da ilha Flores. **A)** Duas *dusty olivines* (*dusty ol*) com núcleo reliquiar (*relict core*) com interdifusão de Fe-Mg e sobrecrescimento rico em Fe (*ovg*). **B)** Núcleos agregados de forsterita e sobrecrescimento da borda rico em Fe. **C)** Olivina reliquiar rica em Mg com textura esquelética. As partes escuras do núcleo são ricas em Mg e as partes claras ricas em Fe. Nestas olivinas são comuns poros (*pore*), que são formados pela dissolução do Mg. **D)** Olivina reliquiar rica em Mg mostrando o estágio mais avançado da dissolução com aumento do tamanho dos poros. **E)** Detalhe da imagem D e localização do perfil A-B. Ao lado, representação gráfica do perfil mostrando a distribuição de Fe, Mg e Si. O limite entre o núcleo e a borda é marcado pelo enriquecimento em Fe e empobrecimento em Mg. A borda próxima ao ponto B é rica em Fe, mas próxima a matriz o conteúdo de Fe diminui e os conteúdos de Mg e Si aumentam. 2a-1 = figura 2, olivina A, análise EDX número 1.

Note que as olivinas estudadas, em sua maioria, apresentam uma distinção entre o núcleo rico em Mg e as bordas ricas em Fe. Em geral, a quantidade de Mg nas olivinas investigadas na ilha Corvo supera a quantidade de Mg analisado nas olivinas da ilha das Flores (Tab. 1). Isto sugere que na ilha Corvo, no momento de cristalização deste mineral havia um ambiente mais rico em magnésio do que na ilha das Flores. Toplis & Carroll (1995) sugerem que a composição da olivina afeta a relação olivina-magma original. Neste caso, a olivina rica em Mg tende a ter composições próximas às composições do magma original. Neste sentido, principalmente a olivina da ilha Corvo possivelmente esteja mais

próxima da composição do magma original do que a olivina da ilha Flores.

Sabe-se, também, que a formação de olivina rica em ferro se dá em temperaturas inferiores às da olivina rica em magnésio (Deer, 1966). Neste caso é sugestivo que uma parte do ferro que havia disponível no sistema foi absorvido pela iddingsita. Isto nos faz pensar em uma erupção vulcânica mais próxima da superfície com vários pulsos que propiciaram o zoneamento e a interdigitação do Fe e do Mg nas olivinas em um ambiente oxidante. As temperaturas, possivelmente, mais elevadas e quantidades insuficientes de SiO₂ limitaram o desenvolvimento de clinopiroxênio. A formação de

forsterita, por exemplo na ilha Corvo, sugere uma cristalização em um ambiente com temperaturas acima de 1200°C. (ver Gordeychik et al., 2018). Embora dados empíricos demonstrem que a forsterita é fundida em temperaturas próximas a 1800-1900°C, a presença de outros óxidos – e

fases hidratadas, no líquido magmático força uma diminuição desta temperatura.

Já a presença de serpentina deixa claro um ambiente geoquímico hidratado, de forma que a presença de vapores é um argumento a ser cogitado (Ruzicka et al., 2008).

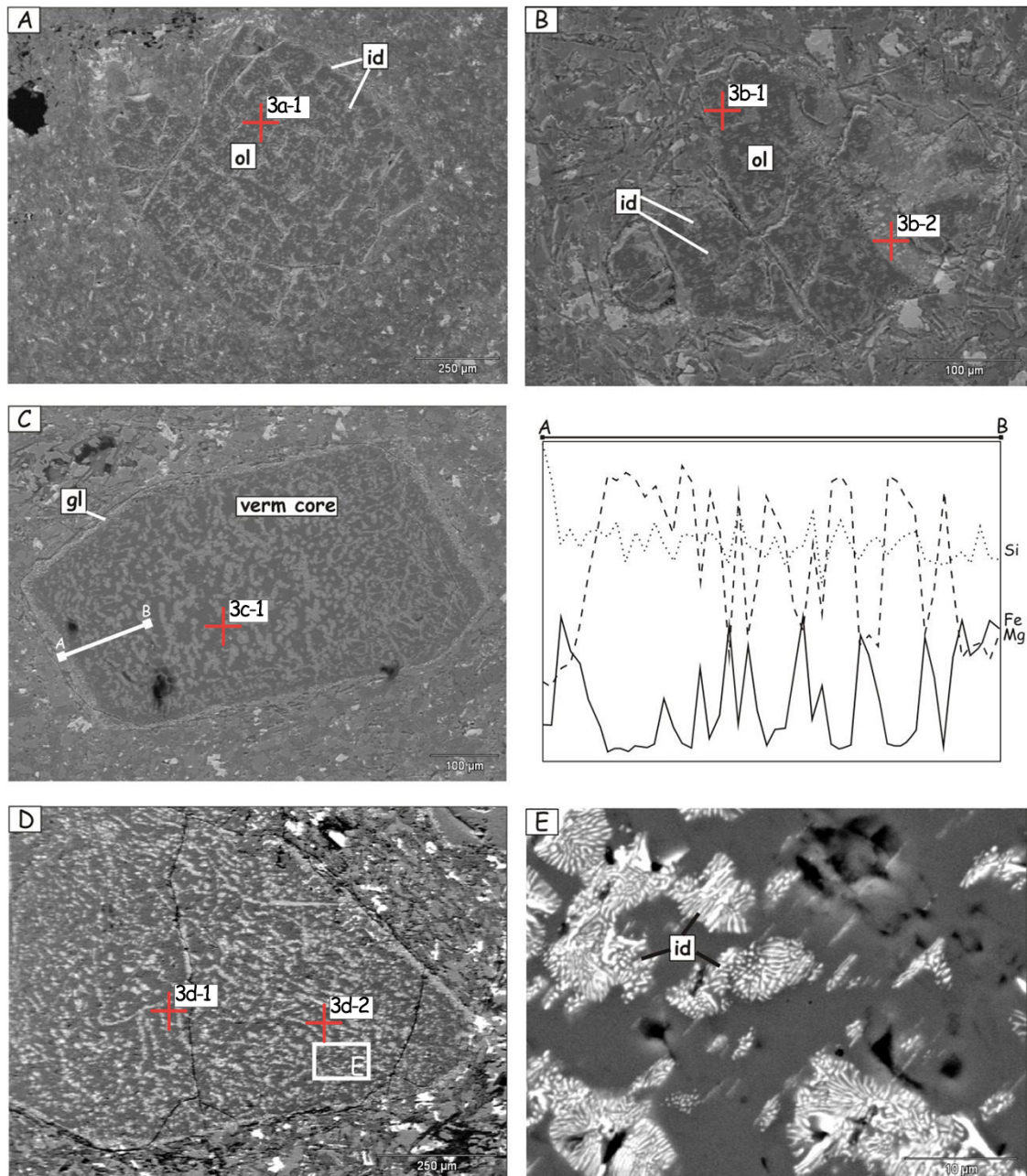


Figura 4 - Imagem de imagem de elétrons retro-espalhados obtida por MEV ilustrando a textura da olivina da ilha Corvo. **A)** Olivina (ol) fraturada com veios de iddingsita (id). Nota-se que os veios claros cortam a olivina em diferentes direções. **B)** Olivina fraturada com veios de iddingsita bem pronunciados. **C)** Olivina euédrica mostrando núcleo vermicular (verm core) e bordas bem marcadas por vidro vulcânico (gl). Na representação gráfica do perfil A-B é possível observar a intensa interdifusão Fe-Mg. Da borda para o núcleo é clara a diminuição do Fe e aumento do Mg. **D)** Olivina subédrica com núcleo vermicular. **E)** Detalhe da imagem D mostrando a característica fibroradial formadas por intercrescimento de iddingsita. Nota-se o desenvolvimento radial e irregular da iddingsita.

CONCLUSÕES

A variação do teor de forsterita nas olivinas presentes na Ilha das Flores e Ilha do Corvo demonstra claramente que ao momento da cristalização o ambiente geoquímico do magma

para a Ilha do Corvo estava mais enriquecido em Mg. Isto sugere um líquido magmático com processos de diferenciação mais atenuados e, portanto, mais próximos da composição original.

Para as *dusty olivines* - olivinas com núcleos reliquiares, da ilha das Flores contém grãos mais fortemente zonados, marcados por núcleos magnesianos e bordas férricas. É sugestivo que isto seja resultado de processos de cristalização fracionada. No entanto, em alguns casos a identificação deste zoneamento é incerta. Portanto sugere-se que os núcleos destes grãos são reliquiares e que as bordas férricas e os intercrescimentos foram formados em um evento de fusão secundário.

Para a Ilha do Corvo, no momento da cristalização das olivinas, é convincente que o ambiente geoquímico do líquido magmático estivesse enriquecido em magnésio em relação à ilha das Flores uma vez que a quantidade de Mg presente nas olivinas daquela ilha supera a quantidade de Mg desta segunda. Isto nos faz crer que as olivinas encontradas na ilha do Corvo

estejam, possivelmente, mais próximas da composição do magma original do que as olivinas encontradas na ilha das Flores. Na ilha do Corvo a presença ou ausência de glóbulos de óxido de ferro na olivina é provavelmente controlada, pela temperatura de extrusão. Uma temperatura baixa de extrusão proporciona condições que favorecem a completa cristalização da olivina, reduzindo assim a quantidade de óxido de ferro voláteis no interior da olivina.

Devido à presença de iddingsita marcado nas olivinas, acreditamos que a olivina da Ilha do Corvo foi desenvolvida sob temperaturas mais elevadas do que a olivina da ilha das Flores e, num ambiente mais oxidante. Em todos os casos, os grãos normais contêm relativamente mais núcleos magnesianos do que os Mg-olivina reliquiares ou as *dusty olivinas*.

REFERÊNCIAS

- CLARK, A.H.; PEARCE, T. H.; ROEDER, P. L.; WOLFSON, I. Oscillatory zoning and other microstructures in magmatic olivine and augite: Nomarski interference contrast observations on etched polished surfaces. **American Mineralogist**, v. 7, n. 1, p. 734-741, 1981.
- CONNOLLY JR., H.C. & HEWINS, R.H. The influence of bulk composition and dynamic melting conditions on olivine chondrule textures. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 55, n. 10, p. 2943-2950, 1991.
- DANYUSHEVSKY, L.V.; SOKOLOV, S.; FALLON, T.J. Melt inclusions in olivine phenocrysts: using diffusive re-equilibration to determine the cooling history of a crystal, with implications for the origin of olivine-phyric volcanic rocks. **Journal of Petrology**, v. 43, p. 1651-1671, 2002.
- DEER, W.A.; HOWIE, R.A.; ZUSSMAN, J. **An introduction to the rock-forming minerals**. 2nd ed. Harlow, Essex, England: New York, NY: Longman Scientific & Technical. 1992.
- DELVIGNE, J.; BISDOM, E.B.A.; SLEEMAN, J.; STOOPS, G. Olivines, their pseudomorphs and secondary products. In: Advisory Panel on Weathering Phenomena and Neof ormations. **Pedologie** v. XXIX, n. 3, p. 247-309, 1979.
- FALLOON, T.J.; DANYUSHEVSKY, L. V.; ARISKIN, A.; GREEN, D. H.; FORD, C. E. The application of olivine geothermometry to infer crystallization temperatures of parental liquids: Implications for the temperature of MORB magmas. **Chemical Geology**, v. 241, p. 207-233, 2007.
- FINKELSTEIN, G.J.; DERA, P.K.; JAHN, S.; OGANOV, A.R.; HOLL, C.M.; MENG, Y.; DUFFY, T.S. Phase transitions and equation of state of forsterite to 90 GPa from single-crystal X-ray diffraction and molecular modeling. **American Mineralogist**, v. 99, n. 1, p. 35-43, 2014.
- FORD, C.E.; RUSSELL, D.G.; CRAVEN, J.A.; FISK, M.R. Olivine-liquid equilibria: temperature, pressure and composition dependence of the crystal/liquid cation partition coefficients for Mg, Fe²⁺, Ca and Mn. **Journal of Petrology**, v. 24, n. 3, p. 256-266, 1983.
- GAY, P. & LEMAITRE, R.W. Some observations on "iddingsite". **American Mineralogist**: **Journal of Earth and Planetary Materials**, v. 46, n. 1-2, p. 92-111, 1961.
- GILL, R. **Chemical fundamentals of geology and environmental geoscience**. John Wiley & Sons. 288 p. 2014.
- GILL, R. **Igneous rocks and processes: a practical guide**. John Wiley & Sons. 2010.
- GORDEYCHIK, B.; CHURIKOVA, T.; KRONZ, A.; SUNDERMEYER, C.; SIMAKIN, A.; WÖRNER, G. Growth of, and diffusion in, olivine in ultra-fast ascending basalt magmas from Shiveluch volcano. **Nature Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 1-15, 2018.
- HUSHUR, A.; MANGHNANI, M. H.; SMYTH, J. R.; NESTOLA, F.; FROST, D. J. Crystal chemistry of hydrous forsterite and its vibrational properties up to 41 GPa. **American Mineralogist**, v. 94, n. 5-6, p. 751-760, 2009.
- JONES, A.G.; LEDO, J.; FERGUSON, I.J. Electromagnetic images of the Trans-Hudson orogen: the North American Central Plains anomaly revealed. **Can. J. Earth Sci.** v. 42, p. 457-478, 2005.
- KATSURA, T.; YAMADA, H; NISHIKAWA, O.; SONF, M. Olivine-wadsleyite transition in the system (Mg, Fe) 2SiO₄. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 109, n. B2, 2004.
- KLEIN, C. & DUTROW, B. **Manual de Ciências dos Minerais (23ª edição)**. Tradução e revisão técnica: Rualdo Menegat. Ed. Bookman, Porto Alegre, Brasil. 2012.
- KRACHER, A.; SCOTT, E.R.; KEIL, K. Relict and other anomalous grains in chondrules: implications for chondrule formation. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 89, n. S02, p. B559-B566, 1984.
- KROLL, H.; KIRFEL, A.; HEINEMANN, R.; BARBIER, B. Volume thermal expansion and related thermophysical parameters in the Mg, Fe olivine solid-solution series. **European Journal of Mineralogy**, v. 24, n. 6, p. 935-956, 2012.
- LEROUX, H.; LIBOUREL, G.; LEMELLE, L.; GUYOT, F. Experimental study and TEM characterization of dusty olivines in chondrites: Evidence for formation by in situ reduction. **Meteoritics & Planetary Science**, v. 38, n. 1, p. 81-94. 2003.
- ROSS, C.S.; SHANNON, E.V. The origin, occurrence, composition, and physical properties of the mineral iddingsite. **Proceedings of the United States National Museum**, 1925.
- RUZICKA, A.; FLOSS, C.; HUTSON, M. Relict olivine grains, chondrule recycling, and implications for the chemical, thermal, and mechanical processing of nebular materials. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 72, p. 5530-5557. 2008.
- SPERANDIO, D.G. Novos insights metodológicos na revelação de traços de fissão espontâneos em olivinas magmáticas da Ilha

- das Flores, Arquipélago dos Açores, Portugal. Caçapava do Sul. 2019. 93 p. Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharelado em Geologia, Universidade Federal do Pampa.
- SPERANDIO, D.G.; SANTANA, J.P.J.; GOMES, C.H. Cristaloquímica e Mineralogênese em Olivinas Magmáticas da Ilha das Flores, Arquipélago dos Açores - Portugal. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 10, n. 2, 2018. 7 p.
- TOPLIS, M.J. & CARROLL, M.R. An experimental study of the influence of oxygen fugacity on Fe-Ti oxide stability, phase relations, and mineral—melt equilibria in ferro-basaltic systems. **Journal of Petrology**, v. 36, n. 5, p. 1137-1170, 1995.
- TROTS, D.M.; KURNOSOV, A.; BALLARAN, T.B.; FROST, D.J. High-temperature structural behaviors of anhydrous wadsleyite and forsterite. **American Mineralogist**, v. 97, n. 10, p. 1582-1590, 2012.
- WENK, H.R. & TOMÉ, C.N. Modeling dynamic recrystallization of olivine aggregates deformed in simple shear. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 104, n. B11, p. 25513-25527, 1999.

Submetido em 26 de fevereiro de 2020

Aceito para publicação em 11 de agosto de 2020