

Conceitos fundamentais sobre migmatitos

INTRODUCTION TO STUDY OF MIGMATITES: FUNDAMENTAL CONCEPTS

RENATA AUGUSTA AZEVEDO^{1,2}

1- DEP. DE GEOLOGIA – UNIV. FED. DE MINAS GERAIS,

2- CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR (CDTN) – CNEN. CAMPUS UFMG, AV. ANTÔNIO CARLOS 6.627, PAMPULHA, 31270-901, BELO HORIZONTE, MG, BRASIL.

E-MAIL: RENATA.A.AZEVEDOSILVA@GMAIL.COM

Abstract: migmatites are heterogeneous rocks formed by partial melting in contact aureoles or inside collisional orogens, due to overlapping processes that can occur in an incomplete, diachronic way, and in which there is total or partial obliteration of stages previous to those observed. However, although complex, the study of rocks is useful to understand the formation of plutons derived from crustal melting, formation of granites in shear zones, evolution of orogens, movement of granitic magmas in regional shear zones, and the understanding of crustal differentiation. Thus, it is essential that the concepts necessary for description and interpretation be known and understood. Therefore, it is necessary to make available didactic material that complement the information already available in igneous and metamorphic petrology manuals. This article proposes to present introductory concepts for the study of migmatites.

Manuscrito:

Recebido: 18/09/2018

Correção: 27/10/2018

Accepted: 05/12/2018

citação: Azevedo, R. A. 2019. Conceitos fundamentais sobre migmatitos. *Terræ Didática*, 15, 1-7, e01001. doi:10.20396/td.v15i0.8653435

Palavras-chaves: estudo de migmatitos, estudo de diatexitos, estudo de metatexitos.

Introdução

Migmatitos são rochas heterogêneas formadas pela fusão parcial em auréolas de contato ou no interior de orógenos colisionais (Sawyer, 2008a; Sawyer, 2008b; Brown 2008). São constituídas de duas ou mais partes petrograficamente distintas em uma ou mais características (e.g. cor, granulação, composição mineralógica, deformação) chamadas “fácies” (Sawyer, 2008a; Sawyer, 2008b). Embora diferentes, as fácies estão relacionadas entre si e ao seu protólito (i.e., rocha submetida a anatexia) por fusão parcial ou segregação de fundido (*melt*) da fração sólida (Sawyer, 2008a). Portanto, a gênese dessas rochas ocorre através da sobreposição de processos (i.e. metamorfismo, fusão parcial, segregação, drenagem e cristalização) que podem ocorrer de maneira incompleta (excetuando o metamorfismo), diacrônica em que há obliteração total ou parcial das etapas anteriores ao que é observado. Entretanto, a maneira como o processo seguinte se desenrola e o resultado deste é fortemente influenciado pelos processos anteriores.

Apesar de complexo, o estudo dessas rochas é útil para compreender a formação de plútons derivados de fusão crustal, granitos em zonas de cisalhamento, evolução de orógenos (Brown, 2008), formação de granitos (Brown, 1994; Sawyer, 1998;

Solar & Brown, 2001), movimentação de magmas graníticos em zonas de cisalhamento regionais (Brown & Solar, 1998; Solar & Brown, 2001; Brown, 2008) e processos de diferenciação crustal (Brown, 2010). Portanto, é de extrema importância que os conceitos necessários à descrição e interpretação dessas rochas ganhe cada vez mais espaço na literatura geológica.

Esse artigo se propõe a apresentar conceitos introdutórios para o estudo de migmatitos.

As fácies

As diferentes porções observadas em afloramentos de migmatitos são chamadas de *fácies* e são separadas em *paleossoma* e *neossoma*. O paleossoma corresponde a porção não submetida a fusão parcial e preserva estruturas pré-anatéticas. Por sua vez, o neossoma corresponde a porção afetada por fusão parcial. Dentro do neossoma, há separação em resíduo (*residuum*), melanossoma e leucossoma (Fig. 1). O resíduo (*residuum*) corresponde a parte do neossoma formada pela fração sólida deixada para trás após a fusão parcial e da qual toda ou parte da fusão foi extraída. Trata-se de um termo genérico que não remete a cor ou a composição mineralógica específica já que ambos dependem

da rocha submetida a fusão (Sawyer, 2008a). Para rochas claras formadas por grande proporção de quartzo e feldspato (e.g. quartzitos e leucogrânitos), o resíduo também será claro. Entretanto, para rochas como pelitos, psamitos e rochas máficas, o resíduo conterà grande proporção de minerais ferromagnesianos. Nesse caso, será melanocrático e receberá a designação específica de *melanossoma* (Sawyer, 2008a). O resíduo pode preservar estruturas pré-anatéticas (e.g. foliação) embora a sua atitude não corresponda necessariamente aquela da etapa metamórfica (Fig. 2).

O leucossoma corresponde à parte clara do migmatito formada por cristalização do fundido (*melt*) gerado por fusão parcial. A composição do leucossoma pode não ser a mesma do magma anatético caso ocorra cristalização fracionada ou segregação de fundido (*melt*) fracionado. A distância entre o local onde foi gerado e o local de sua cristalização separa os leucossomas em três tipos: leucossoma *in situ* (*in situ leucosome*) leucossoma *in-source* (*in-source leucosome*) ou leucossoma na forma de veios leucocráticos (*leucocratic vein*) (Sawyer, 2008a) (Fig. 1 e 2). O leucossoma *in situ* é produto da cristalização do magma anatético ou, parte dele, que foi segregado do resíduo, mas permanece no local onde foi formado (Sawyer, 2008a). Por outro lado, o leucossoma *in-source* é produto da cristalização do magma produzido na anatexia, ou parte dele, que migrou para fora do local onde foi formado, mas permaneceu confinado à camada fonte (Sawyer, 2008a). Os veios leucocráticos são produtos da cristalização do magma anatético ou, parte dele, que migrou para fora da região (ou camada) submetida a anatexia e intruiu em outra parte do migmatito, que pode ser próximo ou distante do local de sua formação

(Sawyer, 2008a) (Fig. 1 e 2).

Quando há ausência de tensão deviatória, não ocorre a separação do neossoma em parte residual e parte formada a partir da cristalização de fundido (i.e. leucossoma). Nesses casos, a fácies desenvolvida recebe apenas o nome de neossoma independentemente de seu índice de cor (Sawyer, 2008b).

Morfologia de primeira ordem

Os migmatitos são divididos de acordo com a fração de fusão e preservação de estruturas pré-anatéticas em *metatexitos* e *diatexitos*. Essa divisão é chamada de *Morfologia de primeira ordem* (Sawyer, 2008a). O *metatexitos* são migmatitos heterogêneos em escala de afloramento que apresentam baixa fração de fundido e que preservam estruturas pré-anatéticas. Por outro lado, os migmatitos em que o neossoma é dominante, o fundido é pervasivo e as estruturas anteriores à fusão parcial são substituídas por estruturas sin-anatéticas são chamados de *diatexitos* (Sawyer, 2008a) (Fig. 3).

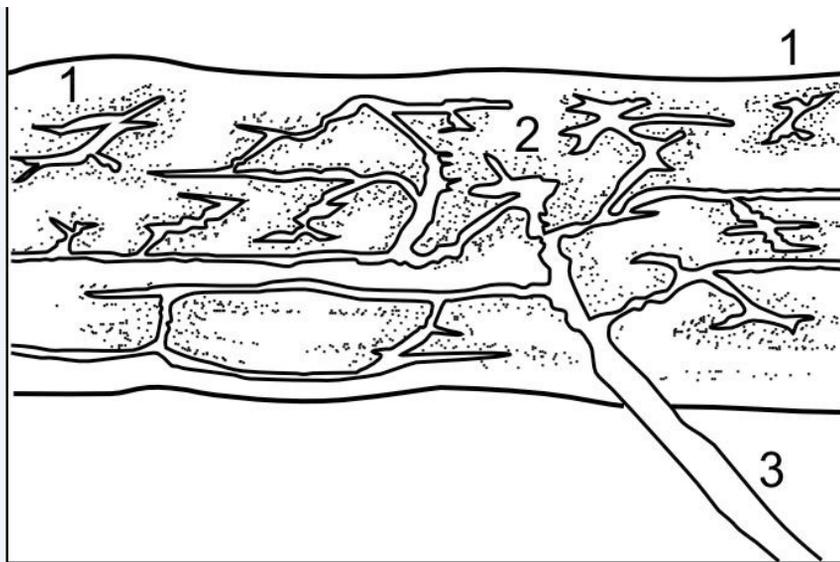


Figura 1. Desenho esquemático que mostra a diferença entre leucossoma *in situ*, leucossoma *in-source* e leucossoma em veios leucocráticos. Os leucossomas *in situ* (1) ocorrem nas estruturas de dilatação e são rodeados por melanossoma (em pontilhado). Alguns leucossomas *in situ* são interligados em rede e constituem um sistema de canais através dos quais o fundido escapa da sua camada de origem. O fundido que se moveu de onde foi formado, mas, cristalizou dentro de sua camada fonte é chamado de leucossoma *in-source* (2). Algumas porções do leucossoma *in-source* podem ter melanossoma outras não. Onde o leucossoma *in-source* deixou completamente sua camada de origem e entrou em uma camada diferente do migmatito, tornou-se leucossoma do tipo veio leucocrático sendo desprovido de melanossoma ao seu redor. Essa camada pode conter seu próprio leucossoma *in-source* e leucossoma *in situ*. Esse esboço foi baseado em um migmatito de *Limpopo Mobile Belt*, em que os leucossomas *in situ* e *in-source* formaram-se em uma camada máfica (Sawyer, 2008a)

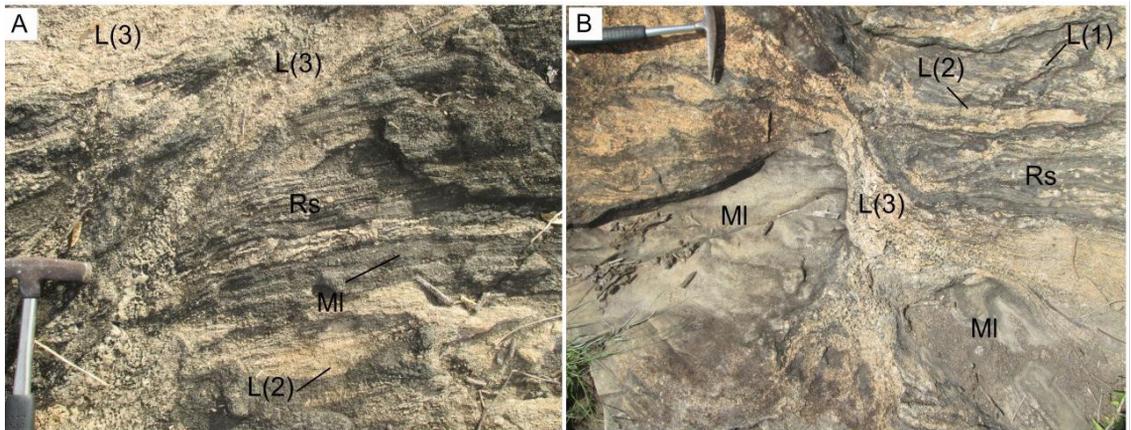


Figura 2. Fácies encontradas em partes distintas de lajedo de granada-biotita diatexito formado no interior do Orógeno Brasília Meridional. A) Veios leucocráticos (L(3)) que acompanham uma zona de cisalhamento sinistrógrica que corta o resíduo (Rs) em contato com melanossoma (MI) e leucossoma *in-source* (L(2)). B) Resíduo (R) em contato com leucossoma *in situ* (L(1)) e, nos planos de foliação, com leucossoma *in-source* (L(2)). É cortado por veio leucocrático (L(3)) que acompanha zona de cisalhamento destrógrica. Em (a) e em (b) os resíduos são compostos por Kf (30%) + Bt (30%) + Pl (20%) + Qz (12%) + Grt (5%) + Op (3%); os melanossomas são compostos por Bt (25%) + Ab (22%) + An (21%) + Or (20%) + Qz (10%) + Opq (2%); os leucossomas *in situ* são compostos por Kf (40%) + Pl (25%) + Qz (22%) + Bt (10%) + Grt (3%); os leucossomas *in-source* são compostos por Or (35%) + Qz (25%) + Ab (25%) + Mc (10%) + Bt (3%) + Grt (2%); os veios leucocráticos são compostos por Kf (34%) + Qz (30%) + Pl (23%) + Bt (10%) + Grt (3%). Sigla dos minerais: Ab = albita; An = anortita; Bt = biotita; Kf = K-feldspato; Grt = granada; Mc = microclina; Or = ortoclásio; Op = minerais opacos; Pl = plagioclásio; Qz = quartzo

Morfologia de segunda ordem

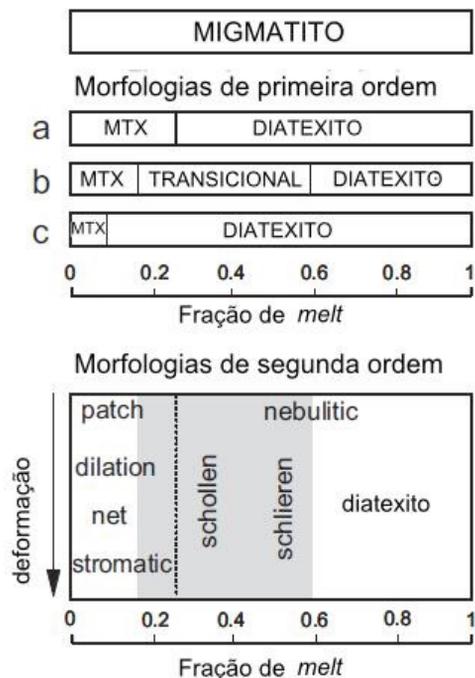
A morfologia de segunda ordem é o termo adotado por Sawyer (2008a) para designar ao que é comumente chamado de estrutura migmatítica. Dependendo da fração de fundido e da deformação vigente durante a formação do migmatito (Fig. 3).

Formação das fácies

A identificação e a caracterização detalhada das fácies é de fundamental importância no estudo de migmatitos. Essa prática é o primeiro passo para identificar os processos aos quais a rocha foi

submetida (e.g. metamorfismo, fusão, segregação, drenagem e cristalização), bem como o contexto em que ocorreram (e.g. sin-deformacional e tardi a pós-deformacional) e traçar uma linha evolutiva que levará à formulação de modelos genéticos. O reconhecimento deve se iniciar no campo e seguir com os estudos petrográficos e laboratoriais (e.g. geocrono-

Figura 3 Morfologia de primeira e segunda ordem para migmatitos. Na morfologia de primeira ordem o limite entre metatexitos e diatexitos para rochas que são compostas por esferas rígidas uniformes ocorre entre 0,26 de fração de fundido (linha tracejada) (A). Para rochas com espectro de tamanhos e formas o limite ocorre entre 0,16 e 0,6 (faixa cinza) (B). Entretanto, se o movimento entre os cristais ocorre por deslizamento dos limites dos grãos (*grain boundary sliding*) ou solução-precipitação (*solution-precipitation*), o limite pode ocorrer com fração de fundido por volta de 0,08 (C). A morfologia de segunda ordem resulta da combinação de fração de fundido e deformação (Modif. Sawyer, 2008a)



logia, geoquímica). A prática de inferir informações genéticas somente a partir de dados macroscópicos não se aplica ao estudo de migmatitos já que existem feições determinantes, tanto para classificação de fácies quanto para proposição de modelos, que só são observáveis em escala microscópica (e.g. microestruturas que indicam início de fusão).

A quantidade de fácies em um migmatito depende de vários fatores, tais como: protólito, taxa de fusão, taxa de segregação, taxa de resfriamento, cristalização e deformação (Sawyer, 2008a; Sawyer, 2008b). Assim, a identificação de grande variabilidade de fácies em um mesmo afloramento pode indicar protólitos diferentes justapostos, partição da fusão seguindo estruturas anteriores a anatexia, diferentes temperaturas atingidas durante a fusão e taxa de resfriamento distintas (Sawyer, 2008a).

Tipos de contato

No estudo de migmatitos o contato entre as fácies justapostas está diretamente relacionado à relação petrogenética entre elas. Assim, o contato pode funcionar como indicador de troca de energia e/ou matéria ou como indicador de intervalo de tempo entre a formação de fácies em contato e ajudar a estabelecer uma cronologia relativa (Azevedo, 2016). Portanto, para classificar os contatos em migmatitos é importante que se utilize um

sistema de classificação que leve em conta os processos peculiares à formação dos mesmos (Tab. 1).

O contato bem determinado (Tab. 1) (Fig. 4 e 5), excetuando o caso do contato entre melanossoma e leucossoma, pode significar que uma das fácies já estava cristalizada quando a outra se formou ou que os últimos processos que afetaram a ambas não estão geneticamente associados. Em outros termos, a presença da fácies exerceu pouca ou nenhuma influência para o desenrolar dos últimos processos que afetaram a fácies justaposta (Azevedo, 2016). Neste tipo de contato é comum observar a presença de halo (*selvedge*), félsico ou máfico, entre a parte rica em fundido do neossoma (i.e. leucossoma) e a parte pobre em fundido do neossoma (i.e. *residuum* ou melanossoma) ou entre paleossoma e neossoma (Fig. 4) (Sawyer, 2008a; Azevedo, 2016).

O contato difuso (Tab. 1) (Fig. 5) indica possível troca de matéria e energia entre as fácies em estágio em que uma delas estava em condições de mais alta temperatura e a outra parcialmente cristalizada ou parcialmente fundida. Nesse caso, não necessariamente a formação da fácies alocada está relacionada com a hospedeira em contato, mas, indica que alguma delas ou ambas foram submetidas a algum tipo de alteração em uma ou mais de suas características originais (e.g. composição, granulação, cor, índice de cor etc).

Tabela 1. Natureza dos contatos e sua respectiva definição (Azevedo, 2016)

Tipos de contato	Definição
Brusco	Há mudança brusca na mineralogia e/ou granulação expressa pela existência de uma descontinuidade onde as características de uma fácies (ou corpo) são subitamente substituídas pelas características de outra.
Bem determinado	É possível observar a mudança na granulação e/ou mineralogia através da formação de uma borda milimétrica com características distintas ou intermediárias entre as duas fácies. Distingue-se do contato brusco por não se apresentar como uma descontinuidade e do gradativo pela mudança entre uma fácies e outra não ser gradual.
Difuso	É possível observar que se tratam de fácies diferentes, mas, a mudança ocorre em uma faixa centimétrica a decimétrica em que não é possível delimitar exatamente onde está o contato.
Gradativo	A mudança de granulação e/ou mineralogia ocorre de forma gradual em que uma fácies perde suas características e vai adquirindo as características da fácies em contato. Essa mudança ocorre desde em escala milimétrica a centimétrica.



Figura 4. Halo (*selvedge*) máfico e félsico no contato entre melanossoma e resíduo. O halo (*selvedge*) máfico é composto por biotita e magnetita (indicado pela seta amarela). Por outro lado, o halo félsico tem composição quartzo-feldspática. Modif. Azevedo (2016)

A alteração pode ser causada por: deformação e deslocamento de fundido formado em locais distantes seguido de alocação na fácies hospedeira enquanto essa estava parcialmente cristalizada; fusão parcial da hospedeira após seu alojamento ou continuidade das condições de temperatura e pressão na hospedeira não totalmente cristalizada (Azevedo, 2016).

O contato gradativo (Tab. 1) (Fig. 5) indica que a formação das fácies justapostas relacionam-se entre si por meio de algum processo (e.g. fusão parcial) e se deu durante longo intervalo de tempo (Sawyer, 2008b) (capaz de registrar as fases de nucleação, cristalização obedecendo à cinética e aos intervalos de pressão e temperatura responsáveis pela formação de ambas as fácies). Neste caso, ambas podem ter passado por processos similares (e.g. fusão parcial, segregação ou cristalização) quase sincronicamente. Isso não significa necessariamente que ambas formaram ao mesmo tempo, mas que, durante a última fase (e.g. fusão parcial, segregação e cristalização) houve participação de uma das fácies na formação da outra (Azevedo, 2016). Caso esse tipo de contato ocorra entre dois tipos de leucossomas (e.g. leucossoma *in-source* e veio leucocrático) significa que ambos estavam como fundidos e que formavam rede com material alojado em sítios estruturais (e.g. fraturas, zonas de cisalhamento, charneira de dobras e etc) (Sawyer, 2008a; Sawyer, 2008b).

O contato brusco (Tabela 1) (Figura 6) é comum em veios (ou diques) tardios e indica que a alocação destes é posterior a anatexia e cristalização das fácies. Ocorre, por exemplo, entre veios ou diques félsicos tardios e o migmatito (Sawyer, 2008a; Azevedo, 2016).

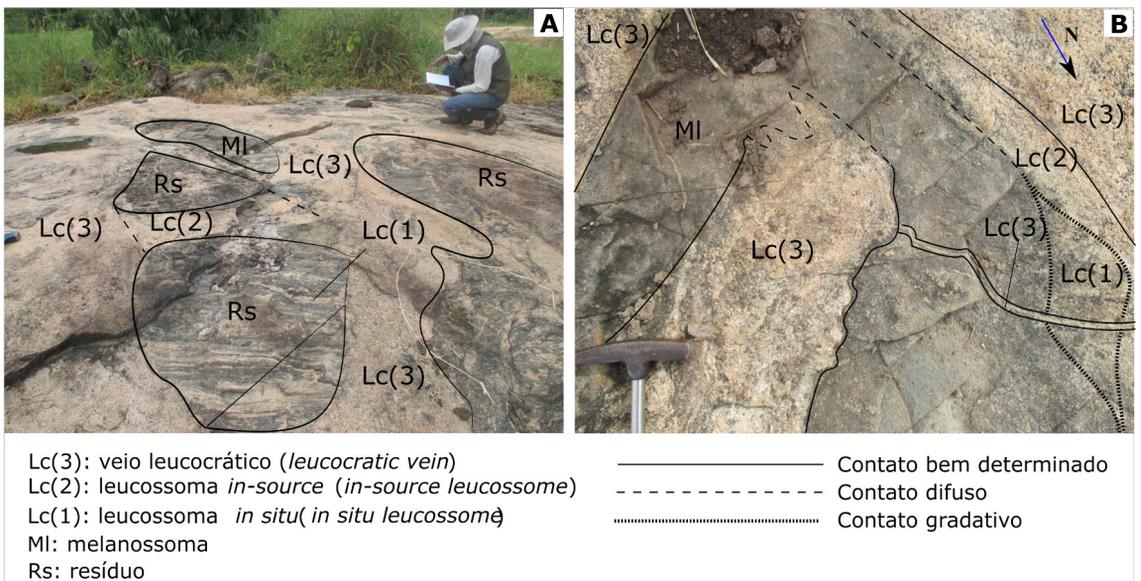


Figura 5. Tipos de contato observados em granada-biotita diatextito no Orógeno Brasília Meridional, sudoeste de Minas Gerais. A) Contato bem determinado entre Rs e Lc(2), entre Rs e o Lc(3) e entre MI e Lc(3). Esse tipo de contato indica que houve um intervalo de tempo entre a estabilização das fácies justapostas. Entretanto, o contato difuso entre Lc(2) e Lc(3) indica provável contribuição de material de Lc(2) para formação de Lc(3). Foto com visada S30W. B) Detalhe do contato entre o melanossoma (MI), leucossoma em veio leucocráticos (Lc(3)), leucossoma *in-source* (Lc(2)) e leucossoma *in situ* (Lc(1)). O contato difuso e gradativo indicam contribuição de matéria de uma fácies para a formação da outra. Modif. Azevedo (2016)



Figura 6. Dique félsico tardio cortando granada-biotita diatexito no Orógeno Brasília Meridional, sudoeste de Minas Gerais. Modif. Azevedo (2016)

Sobreposição de fácies segregadas

A sobreposição de fácies segregadas (i.e. leucossomas) pode indicar mais de um pulso de fusão associados a manutenção por longo tempo do pico metamórfico ou a existência de outro evento capaz de gerar fusão parcial ou segregação (Azevedo, 2016). A distinção entre essas possibilidades pode ser estimada analisando o tipo de fácies segregada, a natureza do contato desta com a fácies hospedeira e a relação das fácies com a deformação. Caso a fácies hospedada esteja *in situ* e o contato com a fácies hospedeira seja gradativo significa a possibilidade de manutenção do pico metamórfico durante grande intervalo de tempo (Sawyer, 2008b). Se o contato é bem determinado, há a possibilidade de outro evento térmico ou pulsos de segregação e drenagem (Deiner & Fagereng, 2014). Caso a fácies hospedeira esteja deformada e a hospedada não, significa que houve manutenção de condições de alta temperatura e pressão suficientes para gerar anatexia e deformação para impulsionar segregação e drenagem. Entretanto, após a segregação e drenagem, a deformação cessou e a cristalização não a registrou (Azevedo, 2016).

Cronologia relativa

Em regiões metamórficas a cronologia relativa frequentemente adotada leva em conta a substituição de antigas estruturas por estruturas mais jovens. Já em regiões ígneas, a cronologia relativa adotada considera que rochas que ‘cortam’ as demais são mais jovens. Nos terrenos migmatíticos, a cronologia relativa adotada é a soma dessas duas, associada

ao processo de segregação e trapeamento (Sawyer, 2008b; Brown, 2008).

Assim, o paleossoma e o resíduo são considerados imóveis e são tidos como mais antigos. Por outro lado, a fração fundida (i.e. leucossoma) é considerada mais jovem já que é resultado da fusão, segregação e drenagem do paleossoma e resíduo associada à deformação normalmente registrada em ambos. Entre os leucossomas, partindo-se do mesmo fundido inicial, o leucossoma *in situ* é o mais antigo, seguido pelo leucossoma *in-source* e pelos veios leucocráticos (Sawyer, 2008b).

Comentários finais

A necessidade de se ampliar o número de pesquisadores e profissionais que se interessam pelo estudo de migmatitos é extremamente urgente tanto para o desenvolvimento da Geologia como ciência como para capacitar geólogos de exploração. Nesse sentido, cabe a realização de um esforço para disponibilizar materiais didáticos que complementem as informações já disponíveis em manuais de petrologia ígnea e metamórfica. Por outro lado, cabe aos estudantes e profissionais se capacitarem de forma adequada para que essa importante ferramenta do registro geológico não sobreviva apenas no imaginário ou permaneça como obstáculo à interpretação da evolução das suas áreas de estudo.

Referências

- Azevedo, R. A. (2016). *Descrição e interpretação de migmatitos: metodologia para abordagem em campo, exemplo na Faixa Brasília Meridional*. (Dissertação de Mestrado). Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: Instituto de Geociências, UFMG..
- Brown, M. (1994). The generation, segregation, ascent and emplacement of granitic magma: the migmatite-to-crustally-derived granite connection in thickened orogens. *Earth Science Reviews*, 36, 83-130.
- Brown, M. & Solar, G.S. (1998). Shear-zone systems and melts: feedback relations and self-organization in orogenic belts. *Journal Structural Geology*, 20, 211-227.
- Brown, M. (2008). Granites, migmatites and residual granulites: relationships and processes. In: E. W. Sawyer & M. Brown (Eds.) (2008). *Working with migmatites*, Short Course Series, 38 (1st ed., pp. 97-144). Quebec City, Canada: Mineral Association of Canada.
- Brown, M. (2010). Melting of the continental crust during orogenesis: the thermal, rheological, and

-
- compositional consequences of melt transport from lower to upper continental crust. *Canadian Journal of Earth Science*, 47, 655-694.
- Deiner, J.F. & Fagereng, A. (2014). The influence of melt and melt drainage on crustal rheology during orogenesis. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119, 1-18.
- Sawyer, E. W. (1998). Formation and evolution of granite magmas during crustal reworking: the significance of diatexites. *Journal of Petrology*, 39, 1147-1167.
- Sawyer, E. W. (2008a). Working with migmatites: nomenclature for the constituent parts. In: E. W. Sawyer & M. Brown (Eds.), *Working with migmatites*, Short Course Series, 38 (1st ed., pp. 1-28). Quebec City, Canada: Mineral Association of Canada.
- Sawyer, E. W. (2008b). Identifying the parts of migmatites in the field. In: E. W. Sawyer & M. Brown (Eds.), *Working with migmatites*, Short Course Series, 38 (1st ed., pp. 29-36). Quebec City, Canada: Mineral Association of Canada.
- Solar, G. S. & Brown, M. (2001). Petrogenesis of migmatites in Maine, USA: possible source of peraluminous leucogranite in plutons? *Journal of Petrology*, 42, 789-823.