



1

O que é migmatito?

- rocha metamórfica formada por fusão parcial
- rocha típica de terrenos de alto grau, heterogênea, com pelo menos duas partes de petrografia distintas
 - uma com aspecto metamórfico
 - outra com aspecto ígneo
 - essas partes têm uma relação petrogenética

definição do Prof. Edward Sawyer
com algumas modificações feitas por mim



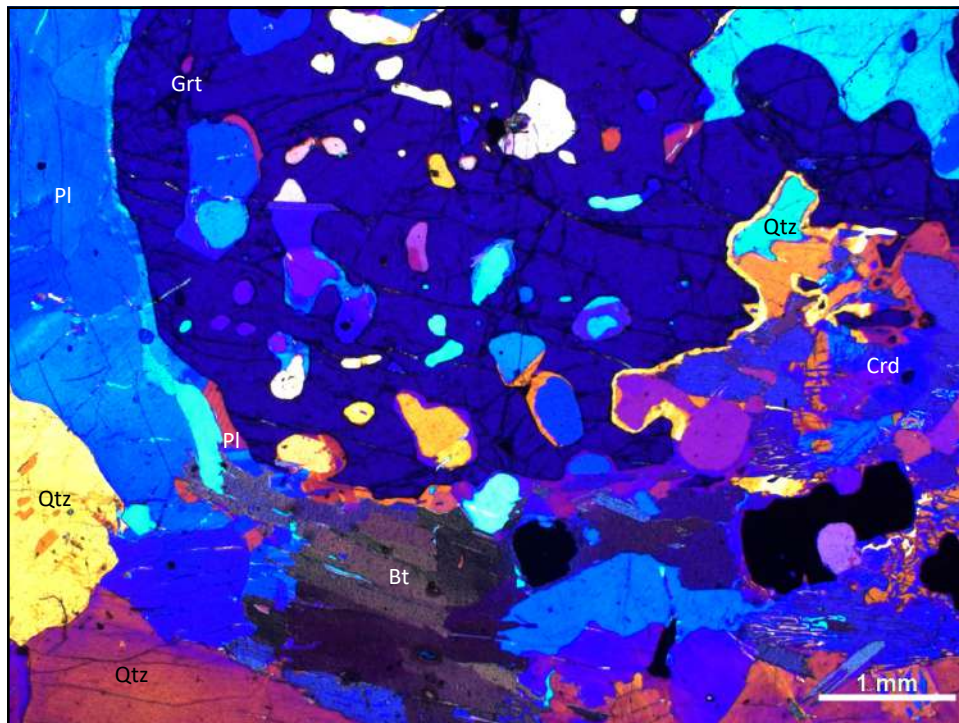
2



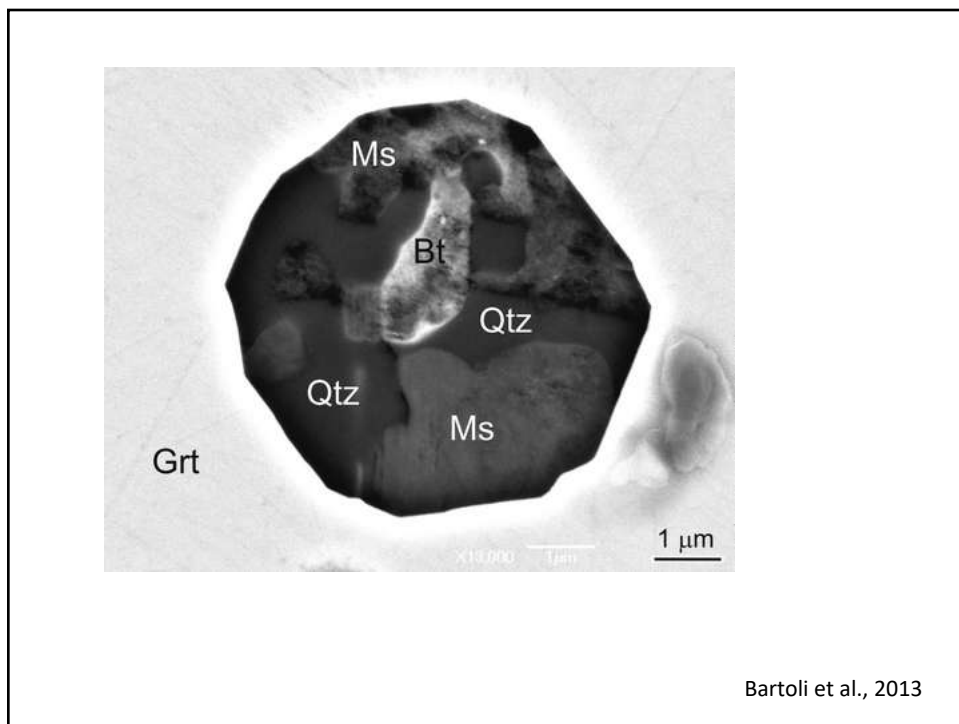
3



4



5



Bartoli et al., 2013

6

Classificação de Mehnert



- **Mehnert** (1968) elaborou a classificação de migmatitos, usada durante décadas, mas apesar de ele ter tentado elaborar a classificação não genética, isso **não** funcionou pelos nomes escolhidos para descrever as partes dos migmatitos (neossoma e paleossoma)
- **Migmatito** – rocha constituída por duas ou mais partes petrográficas distintas em escala megascópica; uma é a rocha encaixante com seu aspecto metamórfico e a outra tem aspecto granítico (plutônico)

7



8

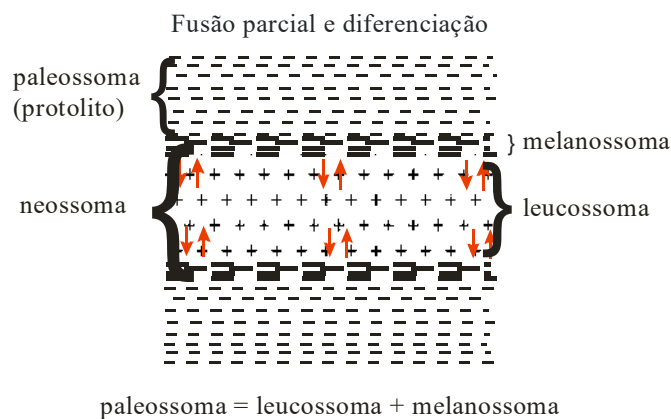
Classificação de Mehnert

- **Migmatito** – As seguintes partes podem ser reconhecidas (termos descritivos):
- **Paleossoma** – a parte **não “alterada”** ou levemente modificada da rocha parental (protolito) ou rocha encaixante
- **Neossoma** – a parte **nova** formada no migmatito
 - **Leucossoma** – parte clara onde predominam minerais félsicos (quartzo e feldspato).
 - **Melanossoma** – parte escura onde predominam minerais máficos (biotita, hornblenda, granada, cordierita).

9

Classificação de Mehnert

Mehnert (1968)



sistema precisa ser fechado e o protolito homogêneo

10

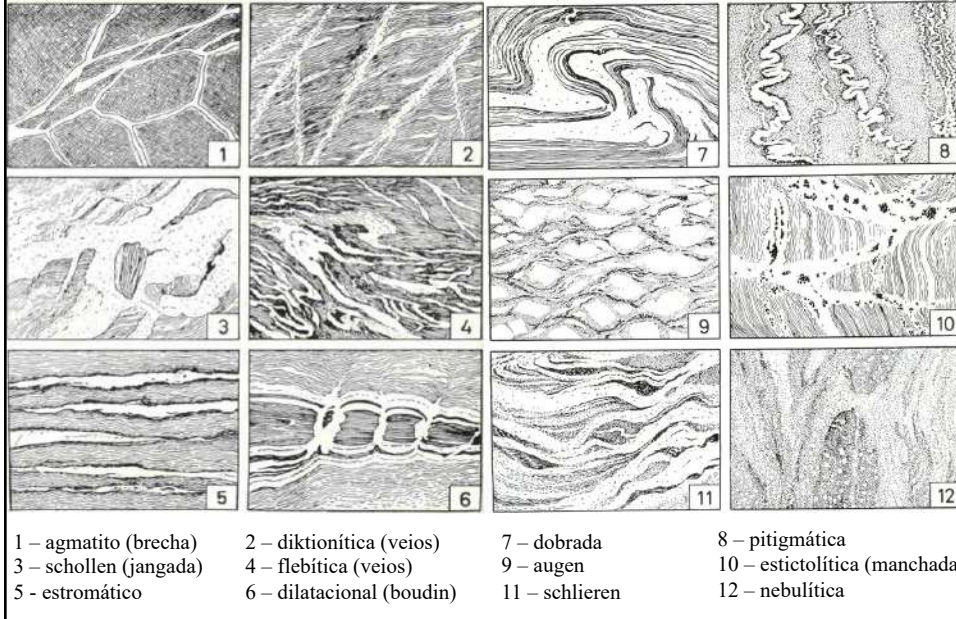


11



12

Classificação estrutural de Mehnert



13

O que acontece quando uma rocha funde?

- A fusão é parcial, então
 - uma parte funde
 - uma parte continua sólida
- O fundido permanece em sua fonte
- O fundido é segregado
 - gera um resíduo
 - cristaliza em diferentes porções da rocha
 - é extraído totalmente do sistema

14

Partes do migmatito (Sawyer, 2008)

- A morfologia dos migmatitos depende da taxa de fusão (M) e a taxa de fundido retido (M_f)
- Ocorrem quatro partes principais:
 - Parte da rocha que sofreu fusão parcial e reteve o fundido ($M = M_f$, **neossoma não segregado**)
 - Parte da rocha que sofreu fusão parcial e perdeu parte ou praticamente todo o fundido ($M \gg M_f$, **resíduo – neossoma** – *existe um tipo especial de resíduo que é o melanossoma que é formado só por minerais máficos*)
 - Parte da rocha que ganhou fundido ou concentrou o fundido gerado ($M \ll M_f$, **leucossoma - neossoma**)
 - Parte da rocha que não fundiu ($M = 0$, **resistato de fusão**)*

15

Neossoma não segregado

Protolito: metapsamito



Foto: Edward Sawyer

16

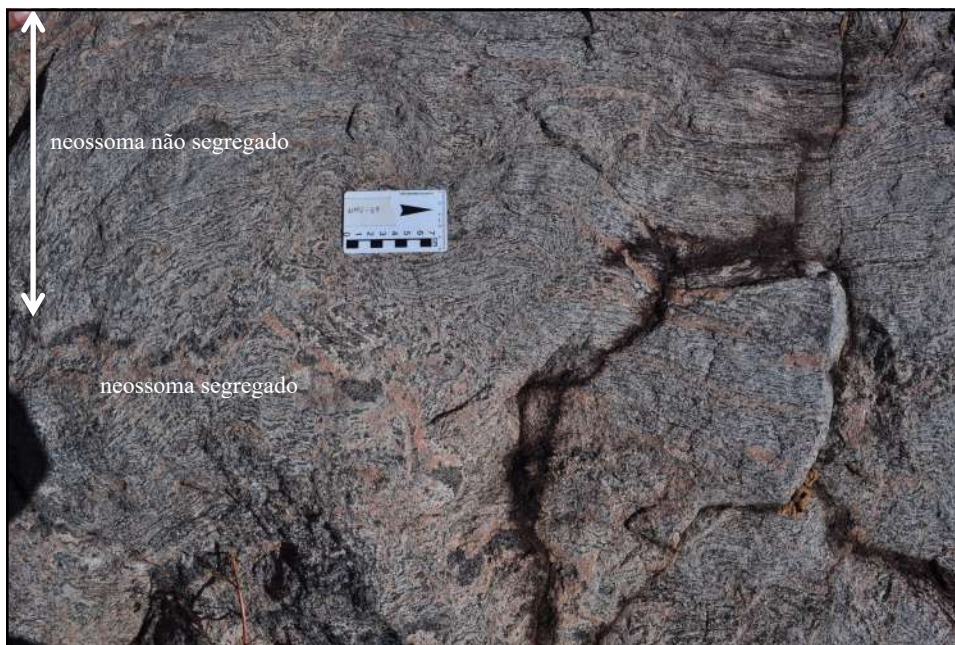
Neossoma não segregado

Protolito: leucogranito



Foto: Edward Sawyer

17



Complexo Bacaeri-Mogno, MT
Protolito - pelito

Foto: Renato Moraes

18

Partes do migmatito

- **Neossoma** – parte do migmatito gerada pela fusão parcial, seja o resíduo do protolito, seja o fundido cristalizado, ou o resíduo das reações de fusão (fases peritéticas) ($M > 0$)
 - As partes do neossoma são petrogeneticamente relacionadas (fonte do fundido ou resíduo, fundido cristalizado, resíduo da reação de fusão)

19

O que é o resíduo?

- **Resíduo** – parte do neossoma que sofreu fusão parcial e perdeu parte do fundido gerado
- Pode guardar a estrutura da rocha original ($M > 0$, $M \ll M_f$)
- O resíduo é a rocha que sobrou depois da fusão parcial e da qual o líquido gerado foi segregado
- O resíduo permanece *in situ*
- É constituído pelas fases em excesso da reação metamórfica + fases peritéticas

20

O que é o resíduo?

- Ocorrem fases que estavam em excesso nas reações metamórficas + fases peritéticas + líquido aprisionado
 - $Qtz + Pl + Bt + Sil = Kfs + Crd + Grt + Liq$
- Por exemplo, se na rocha $Qtz + Bt \ggggg Pl + Sil$, o resíduo ficará destituído de Pl e Sil e terá Qtz e Bt (que estavam em excesso) e ainda pode ganhar Kfs + Crd + Grt (fases peritéticas)
- Taxa de fusão \ggggg que a taxa de líquido presente

21



22

Resíduo

- O resíduo permanece *in situ*
- Perceba! O resíduo **não precisa** ser máfico!
- Se a rocha original tinha Qtz + Pl + Kfs + Bt + Sil, o resíduo pode ser formado por Qtz + Kfs + Sil com alguma (ou muita) + Grt + Crd
- $Qtz + Pl + Bt + Sil = \mathbf{Kfs} + \mathbf{Crd} + \mathbf{Grt} + Liq$
- $Qtz + Ms + Pl = \mathbf{Bt} + Ky + Liq$ (exemplo de baixa T)

23

Resíduo

- Dependendo do volume original de Bt e da temperatura, a rocha pode ser um aglomerado de Crd e Grt!
- **Melanossoma** – parte do neossoma formada por minerais escuros, **resíduo sólido** (peritético) das reações de fusão (biotita, granada, cordierita, hornblenda, piroxênio)
 - $Qtz + Pl + Bt + Sil = \mathbf{Kfs} + \mathbf{Crd} + \mathbf{Grt} + Liq$

24



25



26



27



28

- Aumento contínuo de temperatura vai nos levar à fácies granulito, com super resíduos, os granulitos, às vezes chamados de restitos

29

Nappe Socorro-Guaxupé
Resíduo granulítico ou restito ou granulito (qtz – kfs – pl – opx – grt – ilm / opx - grt)



Foto: Renato Moraes

30

Restito granulítico com opx, grt, crd, spr, spl
Complexo Anápolis-Itaçu, GO



Foto: Renato Moraes

31

Resíduo de anfibolito fundido em alta P rico em hbl e cpx ± grt
Nappe Varginha-Três Pontas, MG

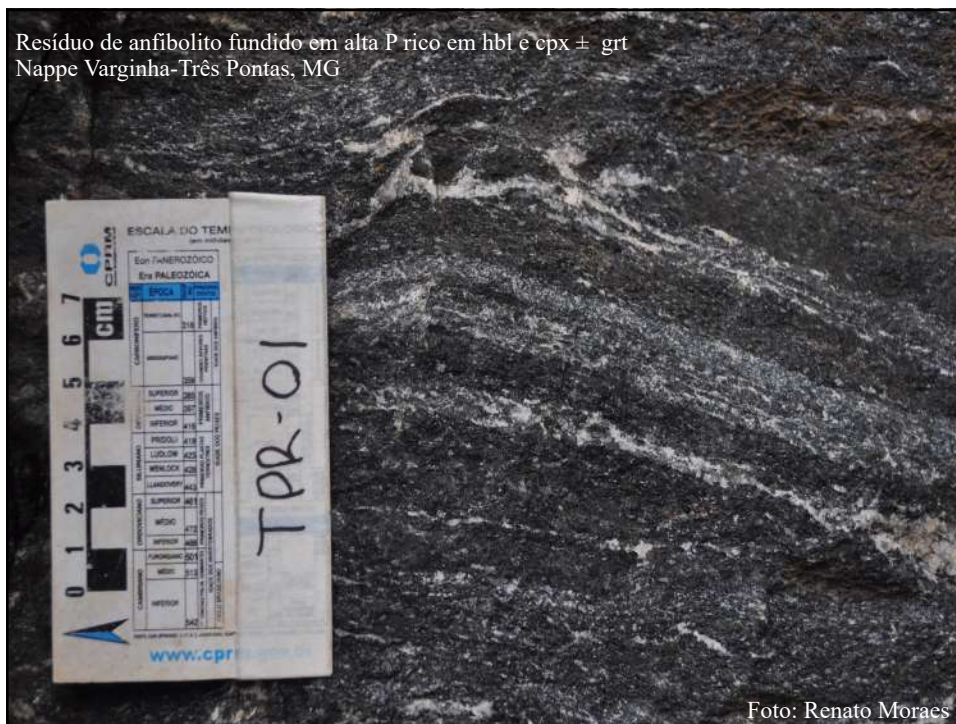
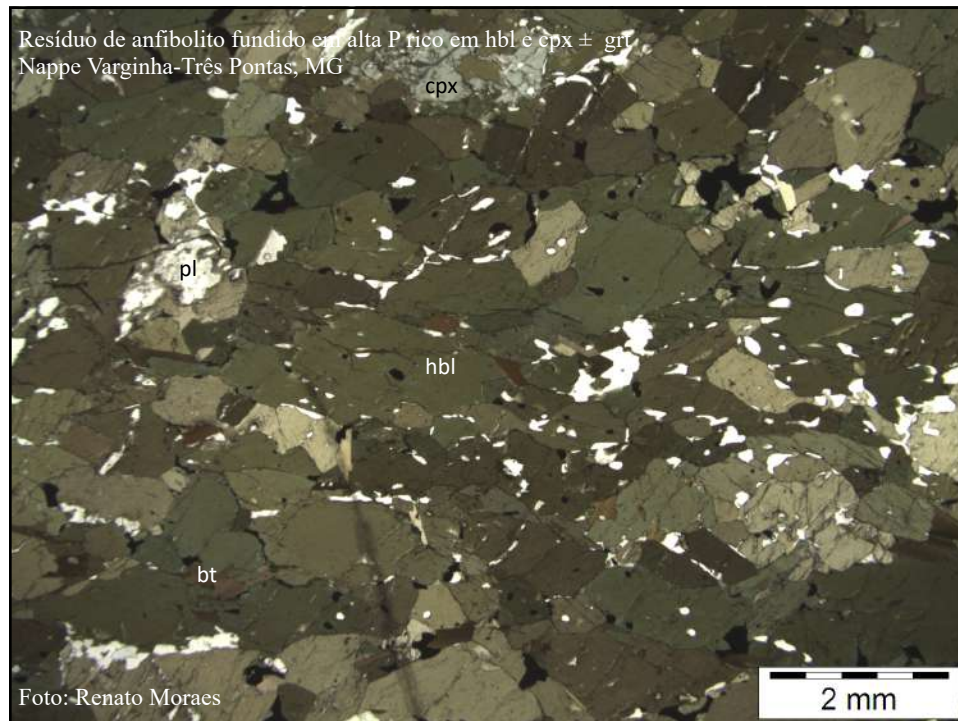


Foto: Renato Moraes

32

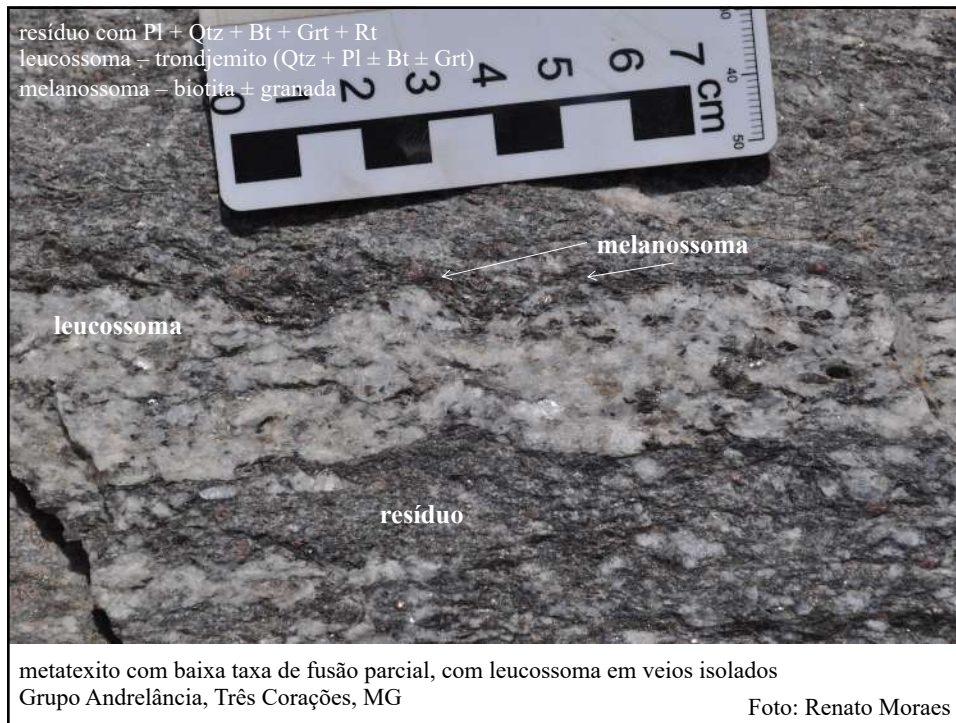


33

Leucossoma

- **Leucossoma** – parte do neossoma formada por minerais claros (quartzo e feldspatos). Acumulou ou ganhou fundido que cristalizou.
- Apresenta texturas ígneas ($M > 0$, $M \gg M_f$)
- O leucossoma envolve segregação do fundido a partir da sua fonte, deixando um resíduo para trás
- Pode envolver cristalização fracionada e, por isso, raramente terá composição de um líquido anatótico primário ou de um fundido mínimo (ou eutético)

34



35



36

Fases peritéticas

- As fases peritéticas são importantes
 - indicam condições *P-T* de fusão / metamorfismo
 - indicam grau de hidratação da rocha **durante a fusão parcial**
 - fases peritéticas hidratadas (Bt e Hbl) indicam presença de H₂O
 - fases peritéticas anidras (Opx, Grt) indicam ausência de H₂O
 - indicam o grau em que o sistema ficou fechado ou quanto do líquido foi segregado
- Quando concentradas, podem ser chamadas de **melanossoma**

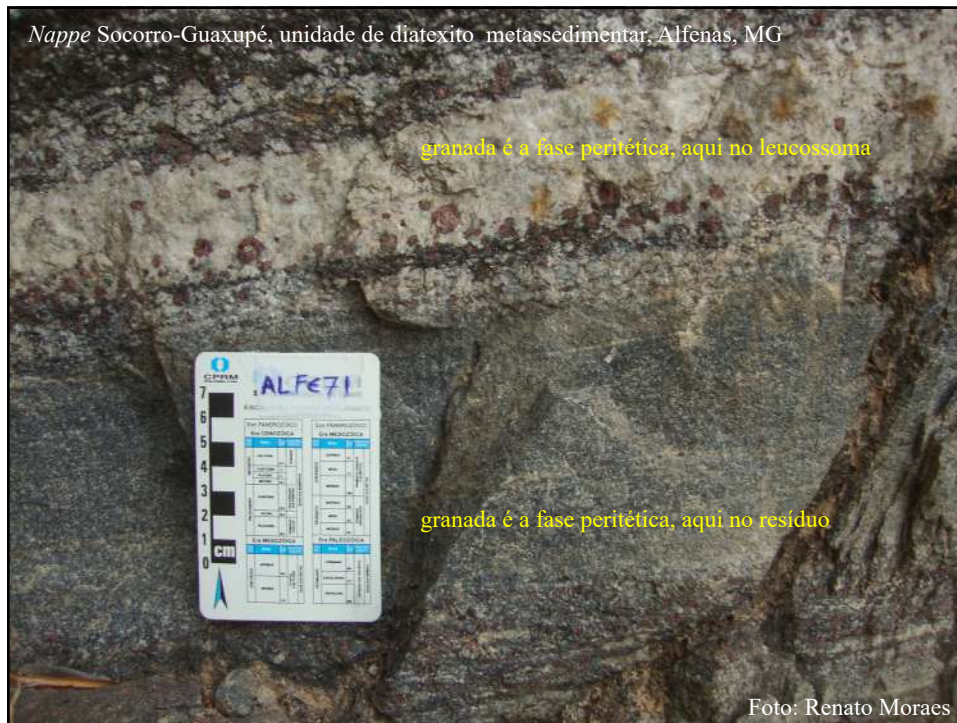
37



Metatexito estromático na zona de cisalhamento Pernambuco
Hbl peritética

Foto: Lucas Tesser

38

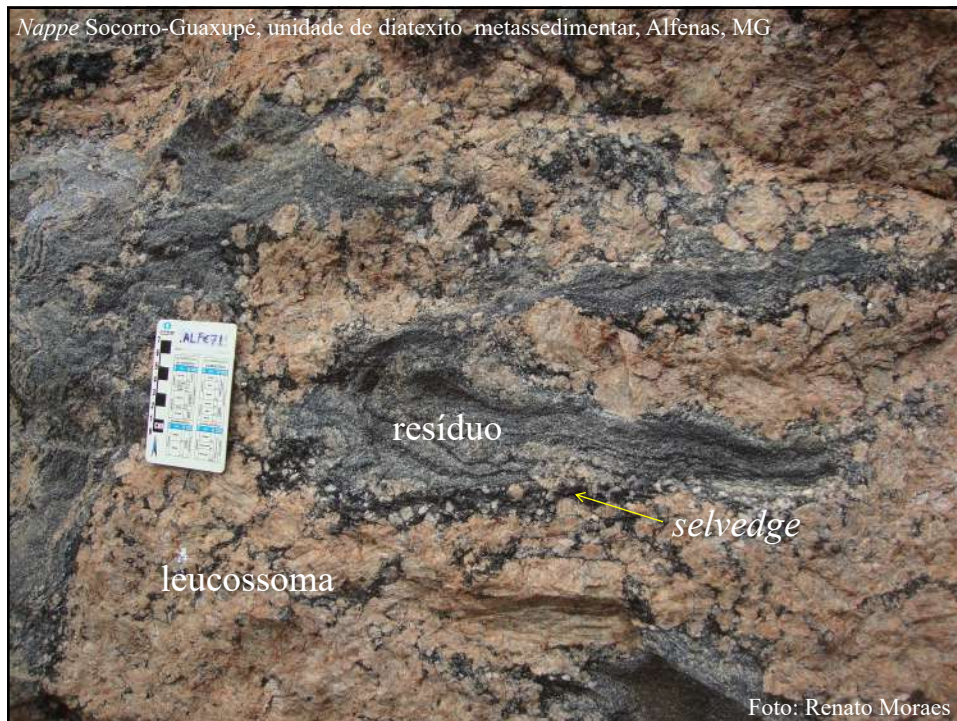


39

Selvedge

- *Selvedge* – camada que separa duas partes do migmatito, em geral o leucossoma do resíduo, e é formada pela reação tardia entre eles

40



41

Leucossoma

- Podem ocorrer **três tipos de leucossoma**
 - *in situ* – produto de cristalização do líquido anatético, ou de parte dele, que sofreu segregação do seu resíduo, mas ainda próximo ao sítio da fusão
 - *in source* – produto de cristalização do líquido anatético, ou de parte dele, e que migrou do sítio da fusão, mas ainda está na camada que sofreu fusão
 - veios leucocráticos - produto de cristalização do líquido anatético, ou de parte dele, que migraram da sua camada fonte e que cortaram ou se alojaram em outras partes do migmatito

42



43

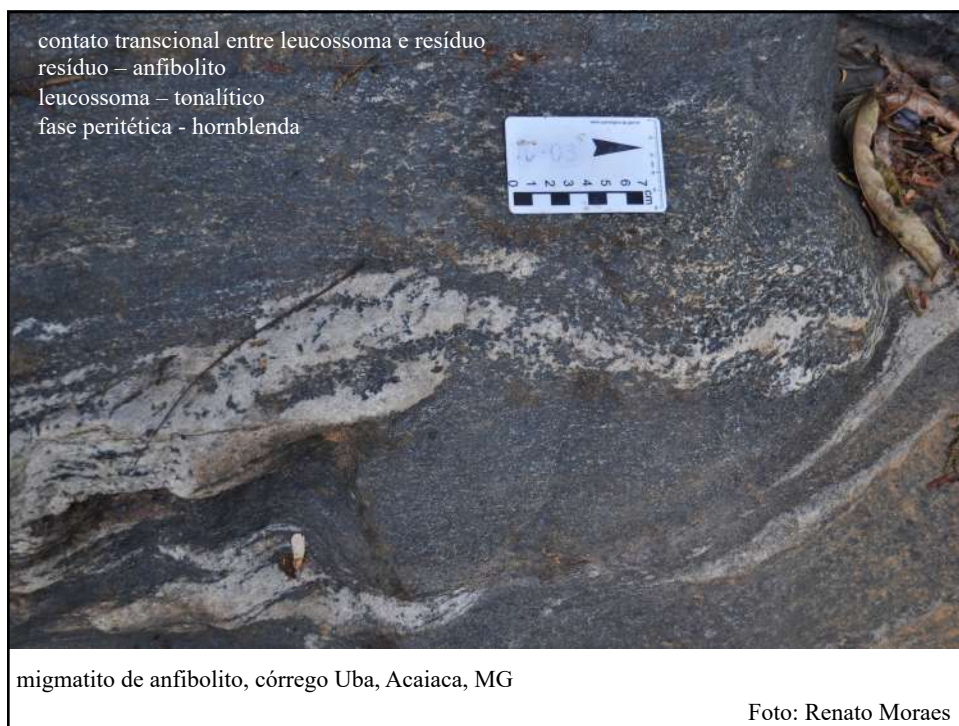
Como saber se a rocha sofreu fusão?

- Porção com aspecto ígneo tem composição granítica
- Resíduo, leucossoma e fases peritéticas têm relação petrogenética
- O contato entre leucossoma e resíduo é transicional

44



45



46



47

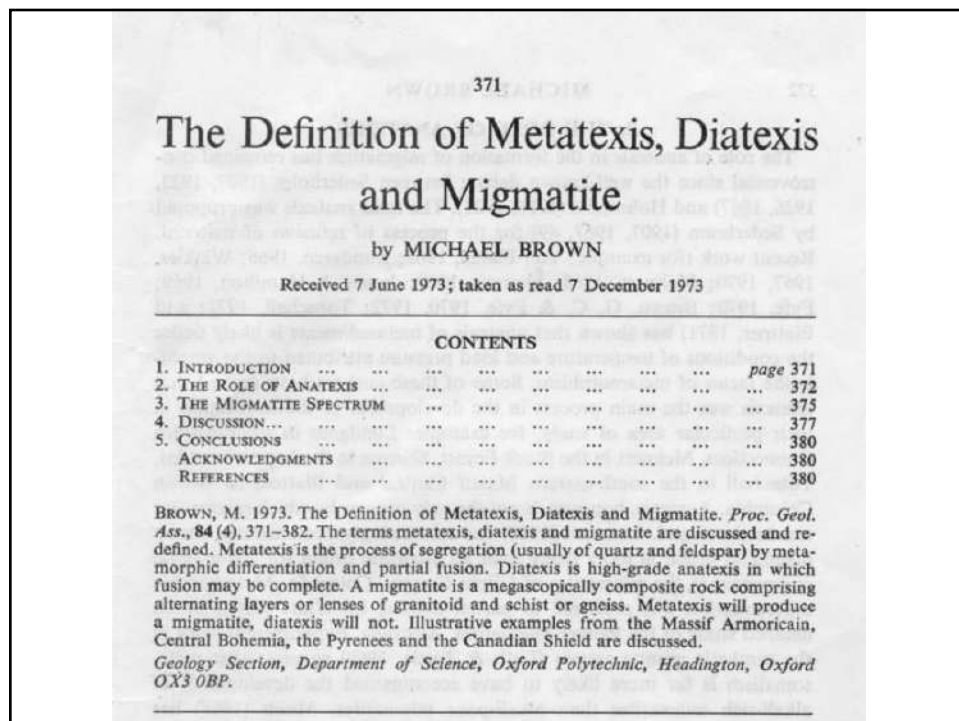
Resistatos de fusão *

- Qualquer anfibolito ou camada de rocha quartzosa ou calcissilcática pode não fundir quando em meio à pelitos. Essas rochas são **resistatos de fusão**
- Sawyer (2008) decidiu nomeá-las de **paleossoma**, o que é ruim, pois mudou a concepção original do termo, que já não era boa

48



49



50

Qual a utilidade da classificação de Mehnert?

- Útil na descrição de afloramentos
- Não é útil como critério para mapeamento
- Classificação de Brown (1973)
 - divisão de migmatitos em dois grupos
 - metatexito
 - diatexito



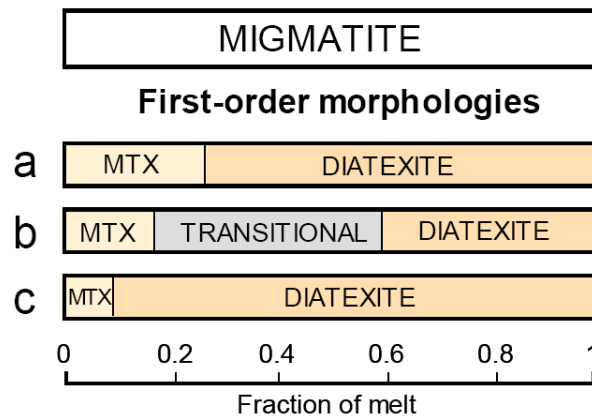
51

Nomenclatura e classificação

- Divisão de primeira ordem - Relacionada com a taxa de fusão e proporção de fundido presente

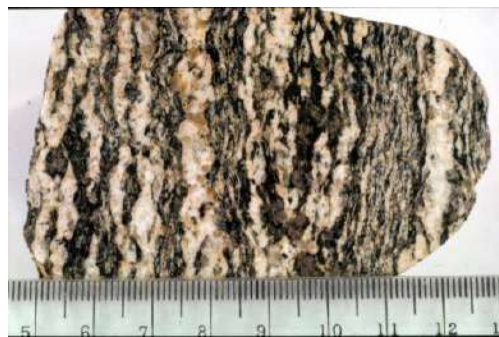
– metatexito

– diatexito



52

- **Metatexito:** migmatito heterogêneo na escala de afloramento
- estruturas pré-fusão ainda são coerentes e preservadas no resíduo
- leucossoma bem desenvolvido
- separação clara entre leucossoma, resíduo e melanossoma



Fotos: Michael Brown

53

- **Diatexito:** migmatito em que o neossoma predomina
- fusão ocorreu de forma homogênea no protolito
- estruturas primárias são raras e substituídas por estruturas de fluxo sin-anatéticas (*schlieren* ou foliação magmática)
- resíduo pode estar presente como enclaves ou *rafts* (*schollen*)

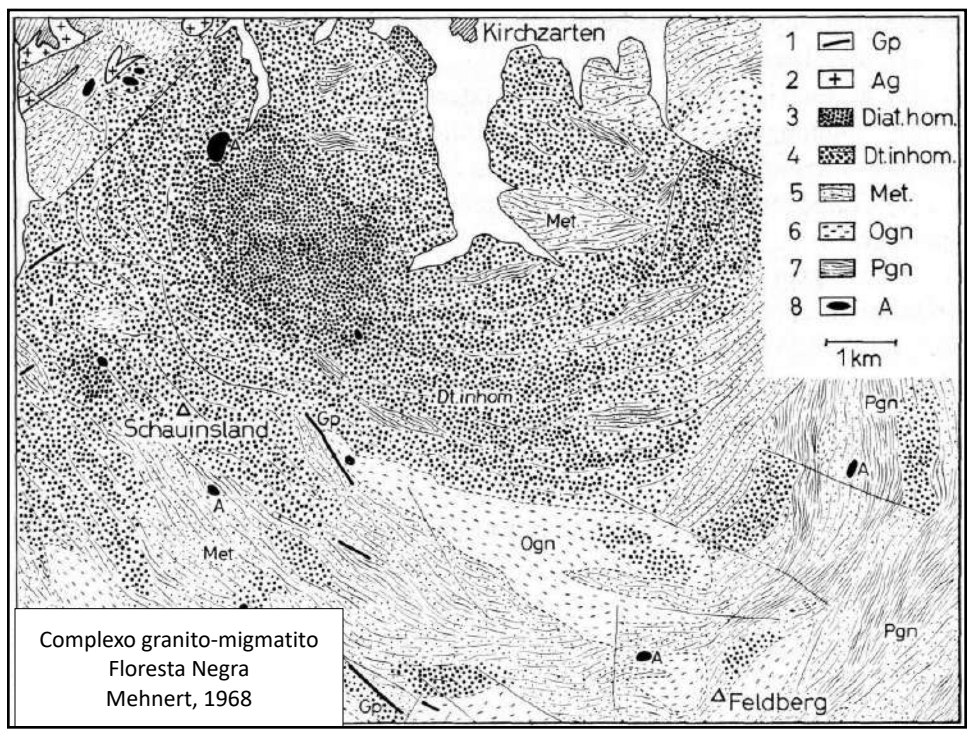


Fotos: Michael Brown

54



55



56



Complexo Bacaeri-Mogno, MT

Foto: Renato Moraes

57



Foto: Renato Moraes

58



59



60



Foto: Renato Moraes

61



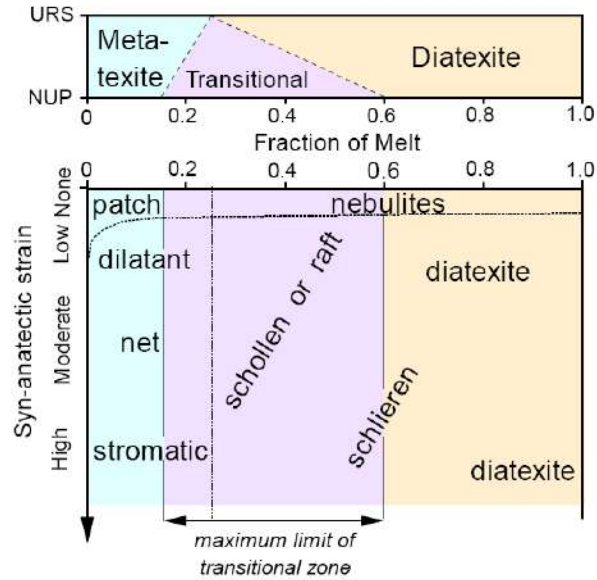
Foto: Renato Moraes

62

Divisão de segunda ordem

Divisão de segunda ordem diz respeito à morfologia do migmatito

Está relacionada à proporção de fusão e à deformação sin-anatética



63

Migmatização incipiente (*patch*)

Sawyer, 2008



64



65



66



67



68



69



70

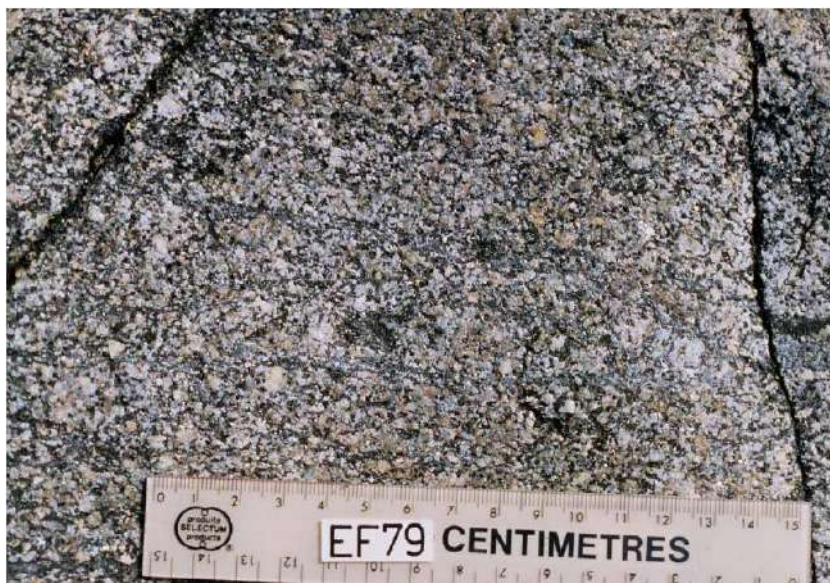
Diatexito com *schollen* ou *raft*



Sawyer, 2008

71

Diatexito uniforme



Sawyer, 2008

72

Diatexito heterogêneo



Sawyer, 2008

73

Diatexito estromático

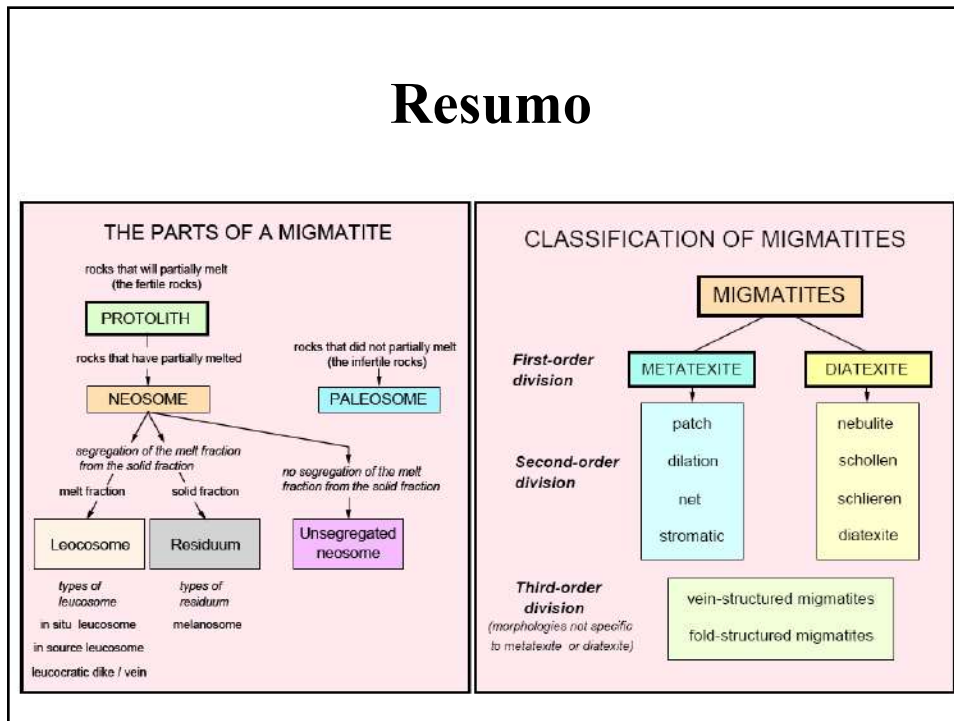


Complexo Itatins, Peruibe, São Paulo

Foto: Renato Moraes

74

Resumo



75

Histórico sobre migmatitos

76



Jakob Johannes Sederholm

Definição original

- ▶ O termo **migmatito** foi introduzido por Sederholm (1907), que definiu o termo como:

○ mistura de dois constituintes que diferem geneticamente... **um intrusivo relativo ao outro**... A este grupo pertencem os gnaisses graníticos que mostram estruturas em rede (*net structure*), **característica de fusão incipiente**, também são frequentes veios com terminações cegas (*blinding ending veins*), granitos brechados com inúmeros fragmentos de rochas mais antigas “mais ou menos” dissolvidos, e finalmente porções de granitos listrados (*lit-par-lit*) nos quais as estruturas paralelas, parcialmente preservadas, indicam fraco indícios remanescentes da propriedade original da rocha

77

- O processo de formação dos migmatitos foi chamado de **palingenesis**, e embora esse processo inclua fusão parcial e dissolução, Sederholm achava que a injeção de magma, com formação de veios e brechas, era algo fundamental no processo
- Sederholm também cunhou o nome **anatexia** para fusão parcial



78

Migmatitos e metamorfismo regional

- Holmquist (1916) percebeu que em alguns terrenos migmatíticos não haviam granitos por perto e deduziu que as porções com aspecto ígneo eram geradas através de **fusão *in situ***
- Holmquist introduziu o termo **ultrametamorfismo** para indicar que as condições de T para a **fusão parcial** da rocha (**anatexia**) eram mais elevadas do que aquelas reinantes durante o metamorfismo regional

79

Bowen e os magmas graníticos

- Os trabalhos experimentais de Bowen (1915, 1928) sugeriam que os magmas graníticos não são primários e deveriam ser formados por diferenciação de magma basáltico
- Isso é incompatível com o volume de magma granítico observado na crosta terrestre
- Na época começaram a ser elucidadas as teorias de granitização da crosta, a “seco” ou envolvendo fluidos (metassomatismo)



Norman Levi Bowen

80

Classificação de Mehnert



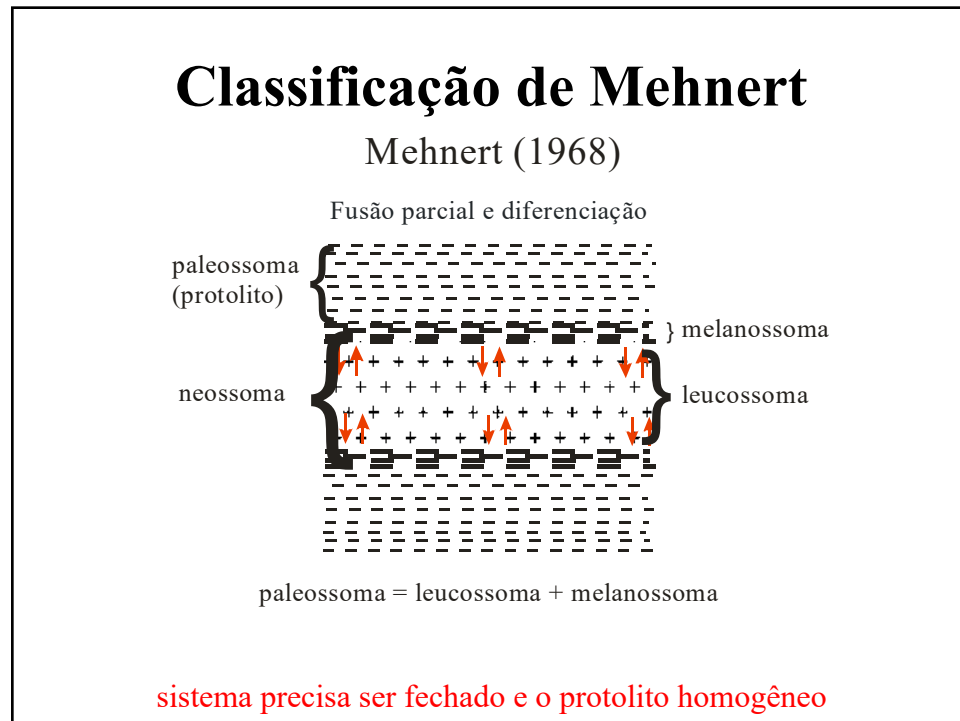
- **Mehnert** (1968) elaborou a classificação de migmatitos, usada durante décadas, mas apesar de ele ter tentado elaborar a classificação não genética, isso **não** funcionou pelos nomes escolhidos para descrever as partes dos migmatitos (neossoma e paleossoma)
- **Migmatito** – rocha constituída por duas ou mais partes petrográficas distintas em escala megascópica; uma é a rocha encaixante com seu aspecto metamórfico e a outra tem aspecto granítico (plutônico)

81

Classificação de Mehnert

- **Migmatito** – As seguintes partes podem ser reconhecidas (termos descritivos):
- **Paleossoma** – a parte **não “alterada”** ou levemente modificada da rocha parental (protolito) ou rocha encaixante
- **Neossoma** – a parte **nova** formada no migmatito
 - **Leucossoma** – parte clara onde predominam minerais félsicos (quartzo e feldspato).
 - **Melanossoma** – parte escura onde predominam minerais máficos (biotita, hornblenda, granada, cordierita).

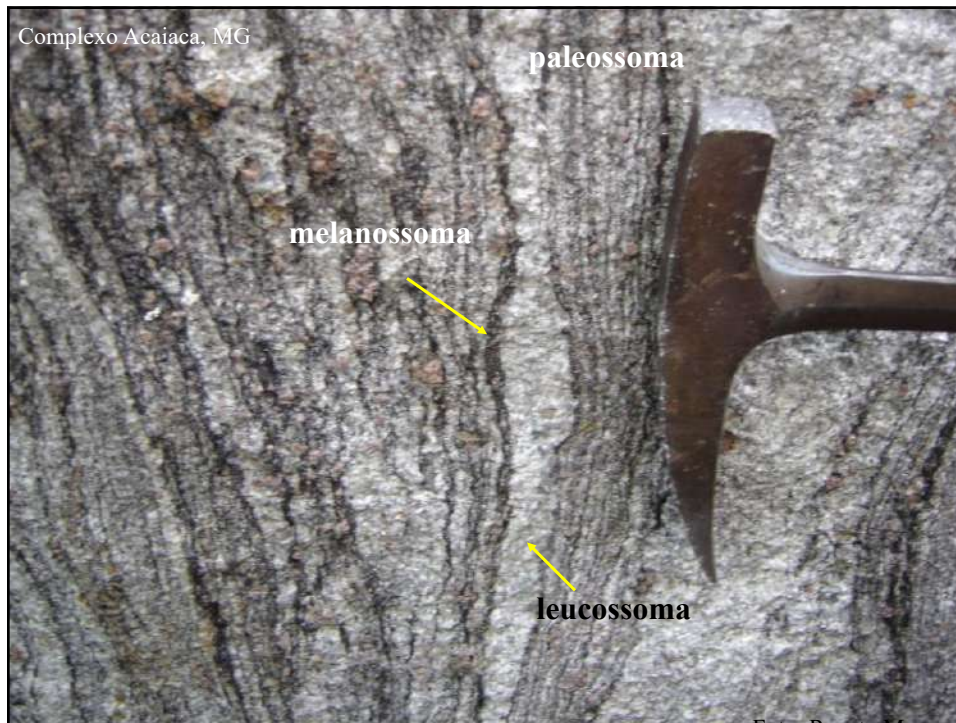
82



83



84

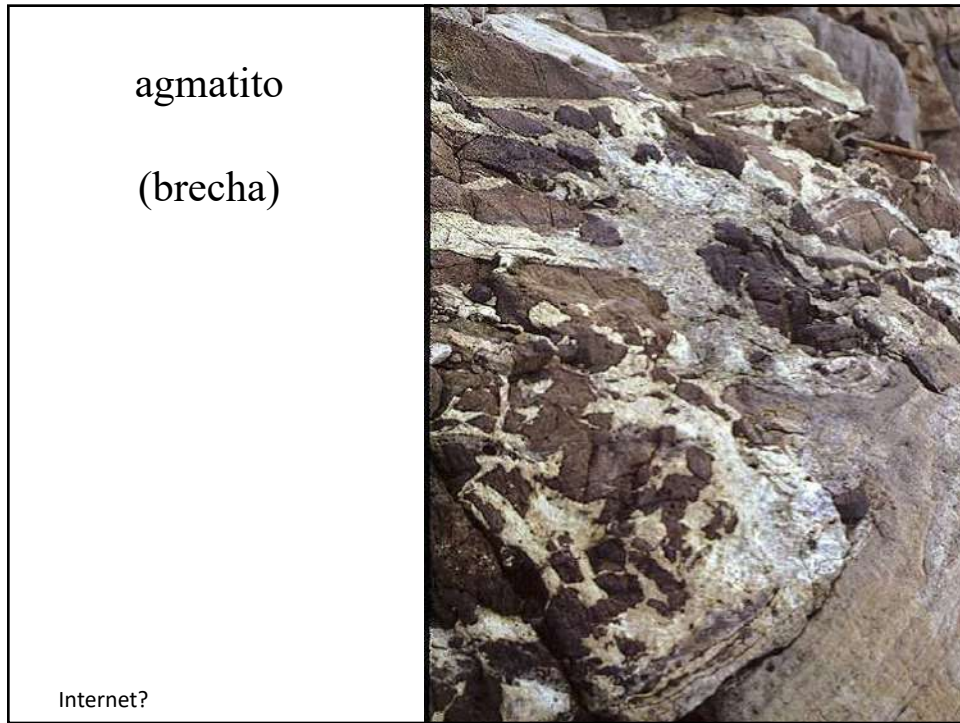


85

Classificação estrutural de Mehnert

1 – agmatito (brecha)	2 – diktionítica (veios)	7 – dobrada	8 – pitigmática
3 – schollen (jangada)	4 – flebítica (veios)	9 – augen	10 – estictolítica (manchada)
5 – estomático	6 – dilatacional (boudin)	11 – schlieren	12 – nebulítica

86



87



88



89



90

scholen, raft ou jangada



Sawyer, 2008

91



Brown

flebitica
(veios)

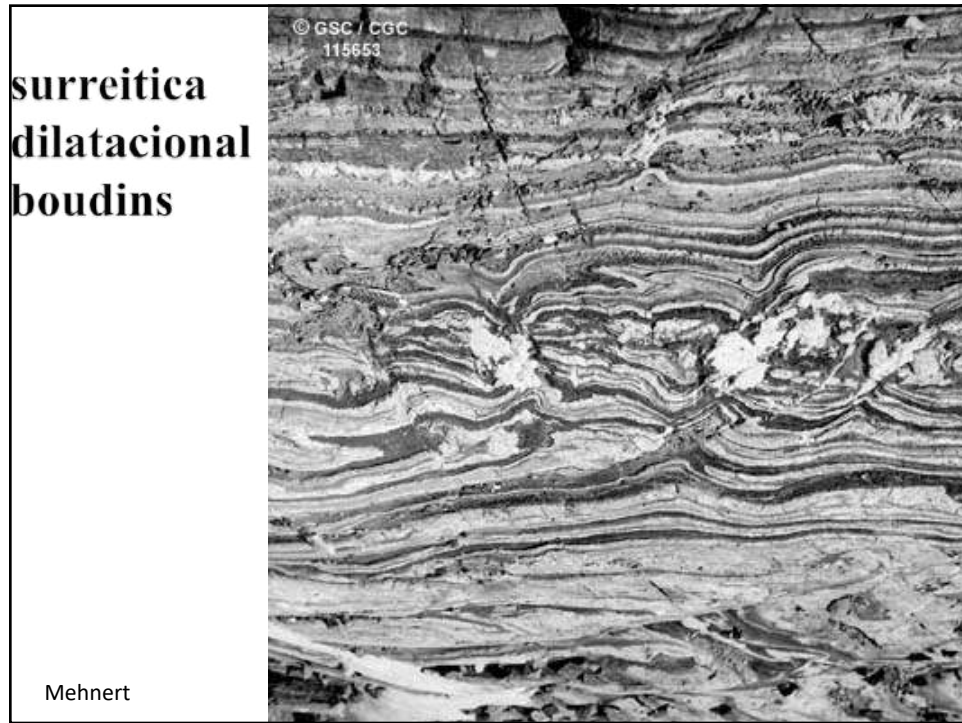
92



93



94



95



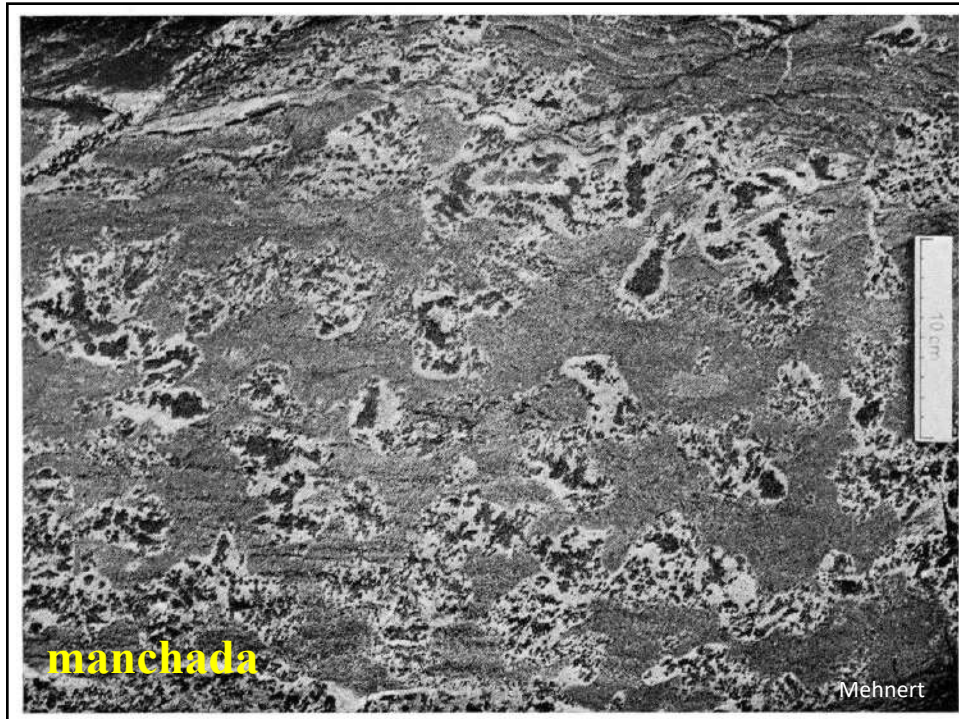
96



97



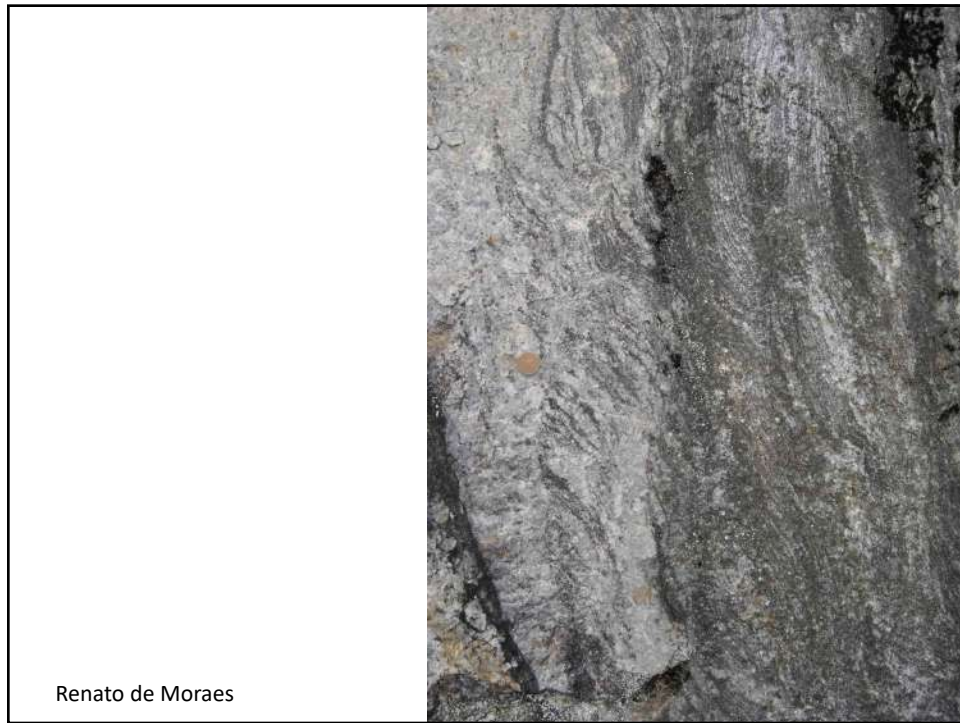
98



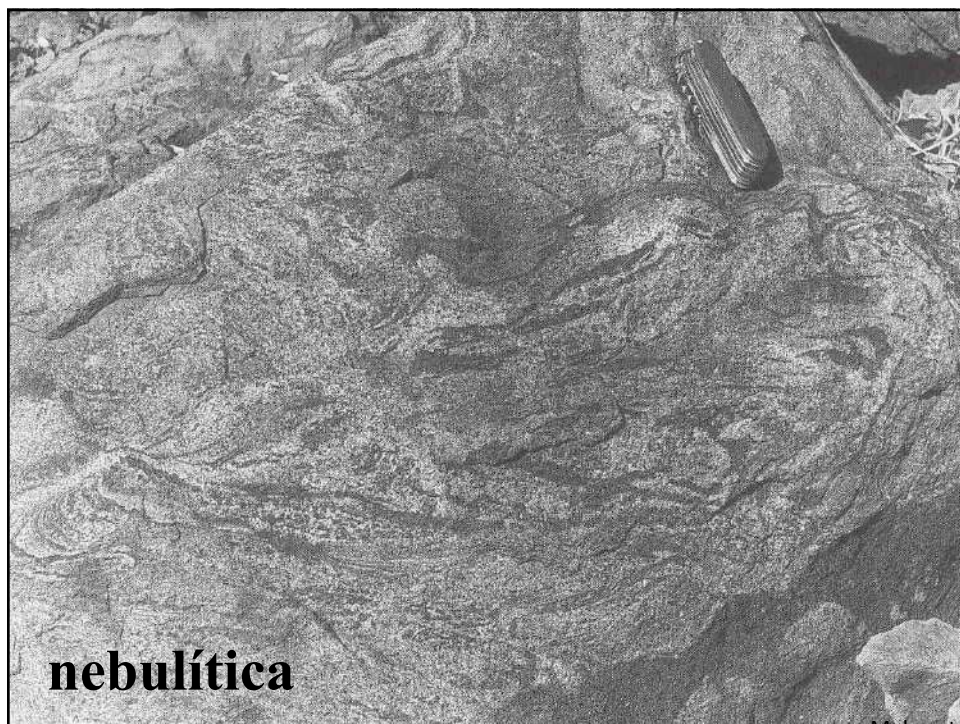
99



100



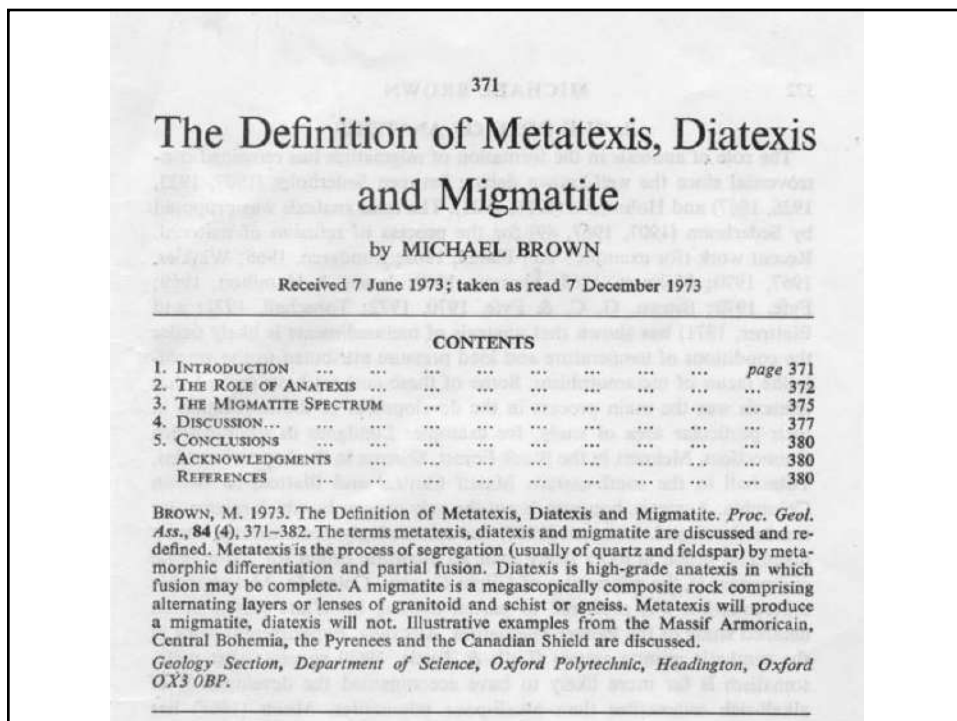
101



102



103



104

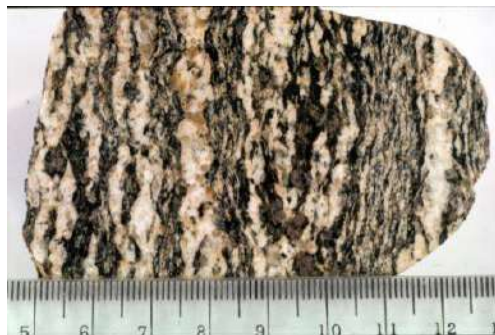
Qual a utilidade da classificação de Mehnert?

- Útil na descrição de afloramentos
- Não é útil como critério para mapeamento
- Classificação de Brown (1973)
 - divisão de migmatitos em dois grupos
 - metatexito
 - diatexito



105

- **Metatexito:** migmatito heterogêneo na escala de afloramento
- estruturas pré-fusão ainda são coerentes e preservadas no paleossoma
- leucossoma bem desenvolvido
- separação clara entre leucossoma e melanossoma



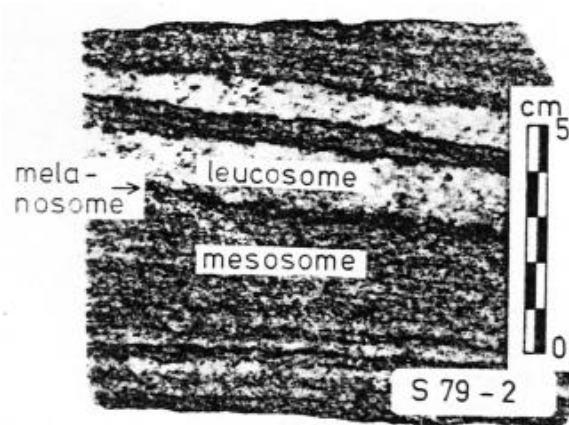
106

- **Diatexitos:** migmatito em que o neossoma predomina
- fusão ocorreu de forma homogênea no protolito
- estruturas primárias são raras e substituídas por estruturas de fluxo sin-anatéticas (*schlieren* ou foliação magmática)
- paleossoma pode estar presente como enclaves ou *rafts*



107

O que é mesossoma?



108

Contributions to
Mineralogy and
Petrology
© Springer-Verlag 1992

Contrib Mineral Petrol (1982) 79:114-123

Origin and Evolution of a Migmatite

W. Johannes and L.N. Gupta*

Mineralogisches Institut der Universität, Welfengarten 1, D-3000 Hannover, Federal Republic of Germany

Abstract. The development of a stromatic¹ migmatite exposed east and southeast of Arvika (Western Sweden) is described in four stages beginning with the country rock and following evolution through three areas characterized by low, medium and high amounts of leucosomes (areas L, M, and H, respectively).

The country rock is a paragneiss composed of thin, alternating fine- and coarse-grained layers. Composition of the layers varies from granitic (fine) to tonalitic (coarse layers).

The bulk of the stromatic migmatite is composed of leucocratic layers of magmatic appearance (leucosomes) and darker layers of gneissic aspect (mesosomes). Petrographical and chemical data (given in the form of Niggli values and K_2O/SiO_2 diagrams) show a close relationship between the fine-grained paragneiss layers and the leucosomes on the one hand and between the coarse-grained layers and the mesosomes on the other.

At relatively low temperatures only those garnis layers with a suitable (granitic) composition are transformed into leucosomes. This process is interpreted to be due to recrystallization of the feldic minerals via partial melting and to the separation of biotite.

With increasing metamorphism, leucosomes become broader and more frequent due to partial melting of layers with less suitable composition. Contacts between different generations of leucosome can be recognized in the form of relict melanosomes.

These observations favour essentially isochemical melting, followed by later in-situ crystallization. This model of an isochemical layer-by-layer transformation is supported by the preferential formation of hornblende in leucosomes and relict melanosomes, as well as by almost identical compositions of migmatite and country-rock plagioclase.

ical and experimental data. This is particularly true for layered migmatites. If in-situ partial melting is to be accepted as a working hypothesis for the formation of stromatic migmatites, then it should be possible to provide detailed proof from petrographic observation. So far such proof is lacking.

At present there exist not only contradictory models, but there is also disagreement between field observations and such models in explaining the formation of migmatites (Vandley 1977). The following observations and questions will be treated here:

- 1) What does "in-situ" formation really mean? Does it mean separation and concentration of partial melts in the light, magmatic-looking leucosome layers and simultaneous concentration of relict material in the darker mesosomes² or melanosomes (hitherto accepted)? Or can the formation of stromatic migmatites be explained by mere in-situ formation and crystallization of partial melts?
- 2) Are stromatic migmatites much more heterogeneous than their parent rock (as they seem to be at first glance), or can the layers of migmatites be correlated band by band with their country rocks?
- 3) The composition of plagioclase is almost identical in leucosome, mesosome and melanosome layers. This observation is in contrast with models postulating separation and concentration of partial melts in leucosomes. Can we explain this contrast without establishing a new model?
- 4) According to Melmert (1968), mesosomes (classified as "paleosomes" by Melmert) represent the parent rock of migmatite. The observations discussed in this paper do not fit into this model. If mesosomes (paleosomes) do not represent the parent rocks, then what else are they?

Preliminary investigations (Henkes and Johannes 1981) have shown that an area south-east of Arvika (Western Sweden) may be suitable for solving most of the unanswered questions outlined

Johannes, 1983, 1985, 1988
Johannes & Gupta, 1982

109

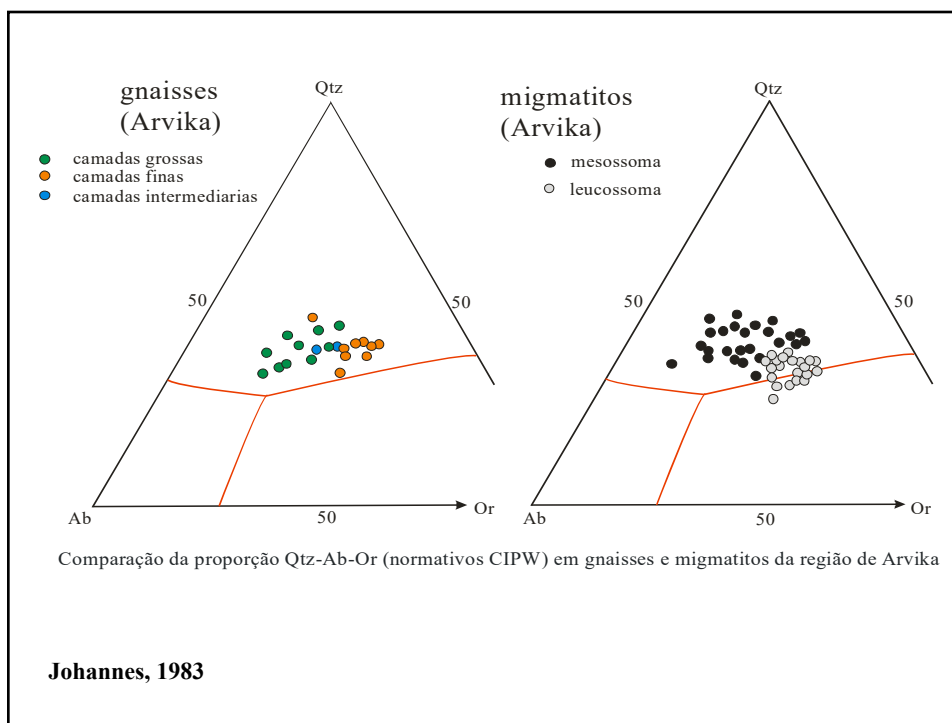


110

O paleossoma representa o protolito?

- **Leucossoma** – porção clara e composta principalmente por quartzo e feldspatos
- **Melanossoma** – porção escura em que predominam minerais máficos, (biotita, granada, anfibólio, cordierita, piroxênio, sillimanita)
- **Mesossoma** – porção do migmatito que é intermediária em cor entre o leucossoma e o melanossoma. Não representa necessariamente o protolito primitivo
- Apesar de Johannes ter usado com bom senso o termo, ao longo dos anos, **mesossoma** é usado para tudo o que **não se sabe o que é**

111



112

descrição	leucossoma (neossoma)	melanossoma (neossoma)	resíduo (neossoma)	paleossoma	<i>selvedge</i>	mesossoma
Mehnert (1967)	porção leucocrática Qtz + Kfs + Pl	porção melanocrática Bt, Grt, Crd, Hbl, Px	porção da rocha que sobrou da fusão após segregação do fundido	- porção da rocha pouco ou não modificada pela fusão -rocha encaixante - protolito		
Brown (1973)	porção leucocrática Qtz + Kfs + Pl	porção melanocrática Bt, Grt, Crd, Hbl, Px	porção da rocha que sobrou da fusão após segregação do fundido	porção da rocha que sobrou da fusão após segregação do fundido		
Johannes & Gupta (1982)	porção leucocrática Qtz + Kfs + Pl	porção melanocrática Bt, Grt, Crd, Hbl, Px	porção da rocha que sobrou da fusão após segregação do fundido			resíduo mesocrático de qualquer rocha bandada
Sawyer (2008)	porção leucocrática Qtz + Kfs + Pl	porção melanocrática Bt, Grt, Crd, Hbl, Px fases peritéticas das reações de fusão	porção da rocha que sobrou da fusão após segregação do fundido	rocha que não fundiu (algo totalmente diferente do protolito)	porção máfica que separa duas porções diferentes do migmatito	
Kriegsman (2000)	porção leucocrática Qtz + Kfs + Pl	porção melanocrática Bt, Grt, Crd, Hbl, Px	porção da rocha que sobrou da fusão após segregação do fundido	várias definições	porção máfica tardia (confunde com a definição de melanossoma)	

115

origem	leucossoma (neossoma)	melanossoma (neossoma)	resíduo (neossoma)	paleossoma	<i>selvedge</i>	mesossoma
Mehnert (1967)	cristalização do fundido após segregação	fases residuais da fusão parcial	rocha que sobra após fusão e segregação de fundido	termo mal definido (um enigma), pois a definição muda ao longo livro ~ resíduo do protolito		
Brown (1973)	cristalização do fundido após segregação	fases residuais da fusão parcial	rocha que sobra após fusão e segregação de fundido	resíduo do protolito		
Johannes & Gupta (1982)	cristalização do fundido após segregação	fases residuais da fusão parcial				resíduos mesocráticos de rochas bandadas submetidas à fusão parcial
Sawyer (2008)	cristalização do fundido após segregação com cristalização fracionada ou não	fases residuais (peritéticas) da fusão parcial	rocha que sobra após fusão e segregação de fundido	parte que não fundiu da rocha uma rocha totalmente diferente do protolito do migmatito	porção máfica formada por reação entre o fundido e uma porção adjacente, normalmente resíduo, durante o resfriamento	
Kriegsman (2000)	cristalização do fundido após segregação	fases residuais (peritéticas) da fusão parcial	rocha que sobra após fusão e segregação de fundido	várias definições	porção máfica tardia gerada por reação entre fundido e porção adjacente melanossoma	

116

BOM SENSO

117

Ashworth J.R. and Brown M. (Eds.) 1990. High-Temperature Metamorphism and Crustal Anatexis. The Mineralogical Society Series. 384 p.

Ashworth, J.R. 1985 Migmatites. Kluwer Academic Publishers, 320 p.

Atherton, M.P. & Gribble, C. D. (Eds.) 1983. Migmatites, melting and metamorphism; Proceedings/ Meeting High grade metamorphism, migmatites and melting of the Geochemical Group of the Mineralogical Society of the University of Glasgow. 326 p.

Mehnert, K.R. 1968 Migmatites and the origin of the granitic rocks. Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 393 p.

Sawyer, E. W. 2008. Atlas of Migmatites. Special Publications of The Canadian Mineralogist, Vol. 9. 386pg.

Sawyer, E.W. 2010. Migmatites formed by water-fluxed partial melting of a leucogranodiorite protolith: Microstructures in the residual rocks and source of the fluid. Lithos, 116: 273-286.

Vernon, R. H., Clarke, G. 2008. Principles of Metamorphic Petrology. Cambridge University Press. 446p.

118