

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

**MIRMEQUITIZAÇÃO PENETRATIVA E A PARTIÇÃO DA
DEFORMAÇÃO EM SIENITOS SINTECTÔNICOS: CRISTALIZAÇÃO-
DEFORMAÇÃO DO SIENITO ARROIO DAS PALMAS SOB
CONDIÇÕES DE FÁCIES GRANULITO EM REGIME
TRANSPRESSIVO.**

GIUSEPPE BETINO DE TONI

ORIENTADORA – Prof^a. Dr^a. Maria de Fátima Bitencourt
CO-ORIENTADOR – Pr. Dr. Lauro Valentim Stoll Nardi

Porto Alegre – 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

**MIRMEQUITIZAÇÃO PENETRATIVA E A PARTIÇÃO DA
DEFORMAÇÃO EM SIENITOS SINTECTÔNICOS: CRISTALIZAÇÃO-
DEFORMAÇÃO DO SIENITO ARROIO DAS PALMAS SOB
CONDIÇÕES DE FÁCIES GRANULITO EM REGIME
TRANSPRESSIVO.**

GIUSEPPE BETINO DE TONI

ORIENTADORA – Prof^a. Dr^a. Maria de Fátima Bitencourt

CO-ORIENTADOR – Pr. Dr. Lauro Valentim Stoll Nardi

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Roberto Weinberg – School of Geosciences, Monash University, Victoria,
Austrália

Dr. Luiz Fernando G. Morales – German Research Centre For Geosciences (GFZ-
Potsdam), Helmholtz Zentrum Potsdam, Alemanha

Prof. Dr. Ruy Paulo Philipp – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

Dissertação de Mestrado apresentada como
requisito parcial para a obtenção do Título de
Mestre em Geociências

Porto Alegre – 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Rui Vicente Oppermann

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

De Toni, Giuseppe Betino

Mirmequitização penetrativa e a partição da deformação em sienitos sintectônicos: cristalização-deformação do Sienito Arroio das Palmas sob condições de fácies granulito em regime transpressivo. . / Giuseppe Betino De Toni. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2015. [60 f.] il.

Dissertação (Mestrado).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2015.

Orientador(es): Maria de Fátima Bitencourt
Coorientador(es): Lauro Valentim Stoll Nardi

1. Magmatismo Sintectônico 2. Mirmequita 3. Partição da Deformação 4. Mecanismos de Deformação I. Título.

CDU 550.4

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Renata Cristina Grun

CRB 10/1113

Dedico este trabalho a todos aqueles que se dedicam às mais nobres das atividades exercidas pela humanidade:

Dedico ele aos que plantam e aos que colhem,

aos que ensinam e educam,

e aos que cantam, tocam, escrevem, desenham e pintam.

Dedico este trabalho também aos que ousam sair das caixinhas que nos são dedicadas.

“A primeira verdade é que o mundo é como parece, e entretanto não é. Não é tão sólido e real como nossa percepção foi levada a crer, mas também não é uma miragem. O mundo é uma ilusão, como tem sido dito; ele é real por um lado, e irreal por outro. Preste muita atenção nisso, pois isso deve ser compreendido, e não simplesmente aceito. Nós percebemos. Isto é um fato concreto. Mas o que percebemos não é um fato concreto, porque aprendemos o que perceber.

Algo lá fora afeta nossos sentidos. Esta é a parte que é real. A parte irreal é o que eles dizem estar lá. Tome uma montanha, por exemplo. Nossos sentidos dizem-nos que se trata de um objeto. Ela tem tamanho, corpo, forma. Nós temos até várias categorias de montanhas, extremamente precisas. Não há nada de errado com isso; a falha está simplesmente em que nunca nos ocorreu que nossos sentidos desempenham apenas um papel superficial. Eles percebem do modo como o fazem porque uma qualidade específica de nossa consciência força-os a atuar desse modo.”

(Don Juan, em O Fogo Interior, de Carlos Castaneda)

AGRADECIMENTOS

Meu agradecimento número 1 vai pra orientadora deste trabalho, Fátima Bitencourt (“madrinha”), pelos seguintes motivos: pelo exemplo de profissional, professora e geóloga, como poucos ousam ser; pela dedicação irrestrita ao ensino de Geologia, tanto nas turmas de Geologia Estrutural e Mapeamento Geológico do curso de graduação desta Universidade, quanto na orientação de alunos de iniciação científica, trabalhos temáticos (de conclusão de curso) e alunos de pós-graduação; e por fim, mas não menos importante, pela paciência, confiança e amizade! Gracias!

Ao Lauro, meus sinceros agradecimentos pelo exemplo de mente aberta e isenta, neste trabalho e em todas as conversas e cafés tomados juntos na sala 203 do DEGEO. Tão importantes foram as contribuições dele na construção do modelo apresentado que acho que nem ele sabe. Obrigado também pelas dicas filosóficas.

Aos colegas do grupo de pesquisa Magmatismo Sintectônico (os velhos e os novos), é um prazer ter todos vocês como amigos e companheiros, e cada dia de campo com vocês valeu mais do que qualquer aula ou qualquer festa. Deixo meus mais sinceros agradecimentos em especial ao amigo Samuel “Fera” Sbaraini, pela ajuda com o mapa; ao *rock brother* Amós Martini, pelos inúmeros trabalhos de campo que fizemos juntos trilhando a Estrada do Chanã ao som do Green River (álbum do Creedence Clearwater Revival, primeiro por falta de opção, depois por opção mesmo), e ao novo companheiro no grupo Pedro Sulzbach, pela ajuda, na reta final, com as figuras.

Ao Instituto de Geociências desta Universidade, pelo apoio em “n” momentos da minha trajetória nesta instituição, que já dura 8 anos, em especial ao corpo docente que contribuiu para a minha formação (mencionar algum nome seria injustiça com outros tantos que eu esqueceria) e ao corpo de funcionários, sempre atenciosos e prontos pra solucionar algum problema de última hora. Não posso deixar de mencionar aqui os motoristas Jarson “Cobra”, Adalto “Mudinho”, Claudinho “Toda manha!” e Armando; o Paulão (obrigado por nos ter apresentado o Green River!); os funcionários do Programa de Pós-Graduação em Geociências, Roberto e Letícia, e suas bolsistas; o pessoal do Laboratório de Preparação de Amostras (Anexo), Marcelo e Juliano, cada vez mais competentes na arte da laminação e polimento; e os técnicos do Laboratório de Microsonda Eletrônica, em especial a

geóloga Susan Drago, que conduziu análises e pacientemente me orientou no manuseio da máquina. Também devo aqui uma menção honrosa ao colega de graduação Laércio Dal Olmo Barbosa, bolsista do Laboratório de Geologia Isotópica, que em um 19 de dezembro de 2013 me acompanhou no MEV. Nem eu imaginava o quanto ia render aquela sessão.

Aos demais colegas de graduação e pós-graduação que reúnem-se sob o teto do Centro Acadêmico dos Estudantes de Geologia, e que eu insisto em chamar de Tribo CAEGang: Mantenham a chama acesa! Um salve especial para a /07 e para a faixa 7 do Mapeamento Geológico Básico (PVC-2011).

Aos amigos de fé e de farra, em especial Rafael Firmino Ballester e Thiago Garcia Suita, com quem tive o prazer de crescer junto e seguir trilhando a amizade entre acordes musicais, disputas no tabuleiro de xadrez, etc., mesmo ora mais longe, ora mais perto, declaro meu amor fraternal.

À minha família, que resume-se em mãe e irmã, Cláudia Hernandez Ogeda e Fabrizzia De Toni, que foram as primeiras a serem lembradas nos agradecimentos de TCC, deixo um sincero obrigado pela compreensão nas horas de ausência. Também amo vocês!

À minha Rocha mais amada, Mariah, gratidão pela parceria e por me mostrar que eu posso ser melhor, e também pela compreensão na ausência desta reta final que foi concluir este trabalho. É muito bom estar e poder contar contigo.

Por fim, um agradecimento anônimo a todos os que em algum momento trocaram uma ideia comigo sobre este(s) tema(s), seja no campo, no CAEG, num congresso, na rua, ou em qualquer lugar. Pois cada vez que conversamos para mim ficou um pouco mais claro o que eu consegui colocar aqui no papel. Meu sincero MUITO OBRIGADO!

Obviamente eu não poderia deixar de agradecer também ao amigo que está lendo.

Seja quem for, espero que faça bom proveito.

RESUMO

A formação de mirmequitas ricas em cálcio é descrita em sienitos sintectônicos formados sob condições de fácies granulito, intrusivos nas rochas metamórficas do Complexo Várzea do Capivarita na região de Encruzilhada do Sul (RS). Os sienitos são encontrados em zonas de alta e baixa deformação, cujas microestruturas e composição mineral são comparadas. Injeções tardi-magmáticas ricas em água ocorrem distribuídas heterogeneamente em escala de afloramento e são consideradas responsáveis pela partição da deformação em zonas de alta deformação secas e úmidas, onde mecanismos de deformação contrastantes são observados. Em zonas de alta deformação secas, K-feldspato e clinopiroxênio são recristalizados por mecanismos típicos de condições de alta temperatura. Em zonas de alta deformação úmida, a desestabilização de clinopiroxênio e a substituição penetrativa de porfiroclastos de K-feldspato relativamente indeformados por mirmequita, e subordinadamente por intercrescimentos do tipo gráfico, indica que *dissolution-replacement creep* foi o mecanismo de deformação dominante. O retrabalhamento destes intercrescimentos pela deformação é observado e considerado como um fator importante no desenvolvimento da sua foliação milonítica e bandamento. Um modelo para a partição da deformação é proposto e correlaciona em um mecanismo de retroalimentação positiva a reação formadora de mirmequita, *strain softening* e o influxo contínuo de líquidos tardi-magmáticos assistindo a deformação por *dissolution-replacement creep* na zona úmida, às expensas da mineralogia original, que é preservada nas zonas secas. Resguardadas as limitações do modelo, o mecanismo de *melt-assisted dissolution-replacement creep* em ambientes sintectônicos sob condições de fácies granulito pode estender o campo de ocorrência de *dissolution-replacement creep* para a crosta continental inferior.

ABSTRACT

The formation of Ca-rich myrmekites is described in syntectonic syenites formed under granulite facies conditions, which are intrusive in the metamorphic rocks of the Várzea do Capivarita Complex, nearby Encruzilhada do Sul city (RS). The syenites are found in high- and low-strain zones where microstructure and mineral composition are compared. Heterogeneously distributed water-rich, late-magmatic liquids were responsible for strain partitioning into dry and wet high-strain zones at outcrop scale, where contrasting deformation mechanisms are reported. In dry high-strain zones K-feldspar and clinopyroxene are recrystallized under high-T conditions. In wet high-strain zones, the de-stabilization of clinopyroxene and pervasive replacement of relatively undeformed K-feldspar porphyroclasts by myrmekite and subordinate graphic-like intergrowths indicates dissolution-replacement creep as the main deformation mechanism. The reworking of these intergrowths is observed and is considered to contribute significantly to the development of the mylonitic foliation and banding. A model is proposed for strain partitioning relating a positive feedback between myrmekite-forming reaction, strain softening, continuous inflow of late-magmatic liquids and dissolution-replacement creep in the wet zone at the expenses of original mineralogy preserved in the dry zones. Regarding the constraints of the model, melt-assisted dissolution-replacement creep in syntectonic environments under granulite-facies conditions may extend the field of operation of dissolution-replacement creep to the lower continental crust.

SUMÁRIO

RESUMO	1
ABSTRACT	2
SUMÁRIO	3
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	4
CAPÍTULO II – O ESTADO DA ARTE	7
CAPÍTULO III - METODOLOGIA	11
1. A abordagem integrada como Filosofia de Pesquisa	11
2. A importância da representação visual	11
3. Trabalho de campo	12
3.1 <i>Localização do Afloramento-chave</i>	12
3.2 <i>Croquis de detalhe</i>	13
3.3 <i>A Notação Estrutural “Regra da Mão Esquerda”</i>	13
3.4 <i>Coleta de amostras orientadas</i>	13
4. Petrografia	14
4.1 <i>Confecção das lâminas</i>	14
4.2 <i>Descrição e Croquis de Lâminas, Separação de Sítios Microestruturais de Interesse e Fotomicrografias</i>	14
4.3 <i>Contagem modal</i>	15
5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	16
6. Microsonda Eletrônica	16
CAPÍTULO IV – ARTIGO SUBMETIDO AO JOURNAL OF STRUCTURAL GEOLOGY	18
CAPÍTULO V – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	47
REFERÊNCIAS	49
ANEXO A – CARTA DE SUBMISSÃO DO ARTIGO	53
ANEXO B – RESUMO PUBLICADO NO AGU FALL MEETING 2014	54

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Mirmequita, cuja primeira descrição data de mais de um século atrás (Michel-Lévy, 1875), é possivelmente a feição microscópica mais debatida da literatura geológica, tanto pela ampla ocorrência, em uma diversidade de rochas e ambientes geológicos, quanto pela polêmica acerca de sua origem. Sua definição mais tradicional a descreve como um intercrescimento entre quartzo vermicular e plagioclásio, adjacente ou sobrecrescendo um K-feldspato (Phillips, 1974, Smith & Brown, 1988). Apesar de a correlação da formação de mirmequitas com a deformação já ter sido bem estabelecida por diversos autores (Simpson & Wintsch, 1989; Vernon, 1991; Tsurumi, 2003; Menegon *et al.*, 2006, 2008), o papel dos fluidos neste processo ainda é tema de debate (Vernon, 1991; Wintsch & Yi; Menegon *et al.*, 2006, 2008), e a sua gênese e condicionantes ainda não foram, de fato, totalmente compreendidos.

Já a importância dos fluidos nos mecanismos de deformação e transformações minerais vigentes na crosta (Carter *et al.*, 1990; Putnis & Austrheim, 2010), e mesmo no manto (Soustelle *et al.*, 2010), é um tema cada vez mais emergente na comunidade científica. Dentro desta perspectiva, os fluidos (e dentre eles, principalmente a água) deixam de ser considerados como simples catalizadores de reações para serem reconhecidos como protagonistas de processos. Dentre estes processos, destacam-se: *dissolution-replacement creep* e *reaction-softening*, responsáveis por acomodar e concentrar a deformação das rochas através de reações de dissolução, substituição e precipitação de minerais e difusão de massa assistida por fluidos. Estes mecanismos são considerados vigentes em terrenos submetidos à deformação em condições de fácies anfíbolito (Wintsch & Yi, 2002; Menegon, 2008; Mukai, 2014) e eclogito (Austrheim *et al.* 1997), e sua eficácia em condições mais profundas é assunto de interesse. Em ambientes de fácies granulito, embora a presença água seja restrita (Lal, 1995), fusões podem ser o principal tipo de fluido presente (Etheridge *et al.* 1983) e

mecanismos de *melt-assisted dissolution and reprecipitation* nestas condições já foram reportados (Alvares-Valero *et al.* 2005).

A intrusão de magmas em ambientes tectonicamente ativos é uma tendência na natureza, e nos dá a oportunidade de entender quão dinâmicos e complexos são os processos de posicionamento e deformação subsequente nestes corpos e qual o seu papel na evolução geotectônica de uma região (Paterson *et al.* 1989). As relações mútuas entre deformação e magmatismo já são assunto de debate há décadas (Neves *et al.* 1996; Brown & Solar, 1998). Sabe-se que o contraste de viscosidade entre o magma e suas rochas encaixantes causa a partição da deformação, com a intrusão absorvendo grandes quantidades de deformação durante o fluxo magmático e a cristalização, e na progressão para o fluxo de estado sólido em alta temperatura, quando as feições primárias podem ser obliteradas pela própria progressão da deformação regional. Esta dificuldade no reconhecimento do caráter sintectônico de rochas magmáticas exige uma abordagem multidisciplinar, integradora de diferentes técnicas (Bitencourt, 1996).

O presente trabalho apresenta e discute dados de campo, petrografia e química mineral de uma associação de sienitos sintectônicos a um evento metamórfico-deformacional de fácies granulito em regime transpressivo (De Toni, 2012; Bitencourt *et al.*, 2011; 2013), aflorantes na região de Encruzilhada do Sul, RS. Quando estas rochas são encontradas em zonas de alta deformação, é possível observar, em um mesmo afloramento, os efeitos da presença e da ausência de líquidos tardi-magmáticos, lado-a-lado. Esta influência é materializada na forma de injeções leucocráticas distribuídas heterogeneamente no afloramento, e em transformações minerais e distintos mecanismos de deformação atuantes nos sienitos injetados. A ocorrência penetrativa de mirmequitas é o principal indício das transformações desencadeadas pela presença destes líquidos, e a sua íntima relação com a deformação é observada. Um modelo para a partição da deformação envolvendo um mecanismo de retroalimentação positiva entre a mirmequitização penetrativa e o influxo de fluidos é proposto.

Os conteúdos apresentados em cada capítulo desta dissertação são:

No **Capítulo II** é ilustrado o atual estado da arte acerca dos temas abordados. Uma revisão histórica da textura mirmequítica, com a evolução da sua compreensão ao longo dos anos é apresentada, salientando-se as discussões mais recentes da

sua relação genética com a deformação e com a presença de fluidos, a relação dos fluidos com a deformação e o limite desta relação com a fácies granulito é questionado.

No **Capítulo III** é apresentada a metodologia empregada, incluindo a filosofia de pesquisa adotada, e posteriormente cada método empregado é brevemente descrito. Também neste capítulo é dada brevemente a localização do afloramento-chave utilizado no presente trabalho e disponibilizados *links* para o *download* das tabelas de análises de química mineral.

O **Capítulo IV** consiste no corpo essencial da dissertação, na forma de um artigo científico intitulado “**Strain partitioning into dry and wet zones and the formation of Ca-rich myrmekite in syntectonic syenites: a case for melt-assisted dissolution-replacement creep under granulite facies conditions**”, submetido ao periódico *Journal of Structural Geology*. Neste capítulo é apresentado brevemente o estado da arte do tema e o contexto geológico da área estudada, para então serem apresentados dados inéditos acerca da relação das diferentes deformações registradas pelo Sienito Arroio das Palmas com a presença e ausência de líquidos tardi-magmáticos do próprio sistema, no ambiente de fácies granulito. Um modelo é proposto para a gênese das feições observadas, e suas limitações e possíveis implicações são brevemente discutidas.

No **Capítulo VI** procura-se sintetizar os resultados e conclusões apresentados no Capítulo V com considerações, reflexões e dúvidas acerca dos temas abordados que não tiveram espaço no artigo, mas que podem servir de perspectivas para trabalhos futuros.

O **Anexo A** apresenta a carta de submissão do artigo ao *Journal of Structural Geology*. O **Anexo B** é um resumo publicado no congresso anual (*Fall Meeting*) de 2014 da *American Geophysical Union*.

Espera-se que este trabalho contribua, mesmo que minimamente, para a continuidade das discussões apresentadas.

CAPÍTULO II

O ESTADO DA ARTE

Mirmequita – Definição e um breve histórico

A definição de mirmequitas tradicionalmente aceita é a de um intercrescimento do tipo simplectítico, de quartzo vermicular em um plagioclásio sódico (geralmente oligoclásio), em contato ou substituindo pseudomorficamente um K-feldspato adjacente (Phillips, 1974; Smith & Brown, 1988). Esta definição é expandida para mirmequitas cálcicas, em que quartzo vermicular ocorre intercrescido em plagioclásio cálcico, geralmente substituindo um plagioclásio menos cálcico, em rochas básicas (Dymek and Schiffries, 1987; Efimov *et al.* 2010; Mukai *et al.* 2014). No presente trabalho mirmequita é considerada um intercrescimento simplectítico formado por quartzo vermicular em um plagioclásio (independente do seu teor de An), em contato ou pseudomorficamente substituindo um feldspato.

Mirmequitas possuem uma ampla bibliografia dedicada a sua descrição e discussão genética (uma revisão é apresentada por Phillips, 1974; e uma lista completa de trabalhos é encontrada em Collins, 2001). Isto ocorre em parte devido ao amplo espectro de rochas e contextos em que ocorrem, e em parte devido a uma polêmica gerada pelos primeiros trabalhos que trataram do assunto, em que diferentes modelos foram propostos para a sua formação. Duas escolas de pensamento surgiram a partir dos trabalhos de Becke (1908) e Schwantke (1909), respectivamente responsáveis pelas hipóteses de substituição (ou metassomática) e de exsolução.

A hipótese de Becke interpretou o intercrescimento de quartzo e plagioclásio como produto de reação de emanações ou soluções ricas em Ca^{++} e Na^+ com um K-feldspato.

Já a hipótese de Schwantke propôs que um feldspato alcalino cristalizado em alta temperatura poderia conter uma molécula hipotética, rica em sílica. Esta molécula equivaleria a duas células unitárias de um feldspato, com um cálcio equilibrando a valência de uma vacância no outro sítio octaédrico: $\text{CaAl}_2\text{Si}_6\text{O}_{16}$. Com o rebaixamento da temperatura esta molécula seria convertida para An e expulsa, assim como na exsolução que forma a pertita.

Com o passar dos anos, ambas hipóteses ganharam adeptos e mostraram-se válidas em situações distintas (como argumentado por Ashworth, 1972). Phillips (1980) propôs que pode haver mais de uma origem possível para diferentes tipos de mirmequitas. O autor sugeriu que mirmequitas de exsolução são comumente encontradas em granitóides indeformados, enquanto a hipótese de substituição é mais adequada a rochas deformadas ou metamórficas, e ainda que ambas as hipóteses podem ser aplicáveis simultaneamente (também de acordo com Ashworth, 1972; Tsurumi, 2003).

Mirmequitas, deformação e fluidos

A relação das mirmequitas com a deformação foi muito bem documentada por Simpson & Wintsch (1989), quando estudaram granitos miloníticos de fácies anfíbolito. Estes autores que elaboraram um modelo conceitual para a gênese de mirmequitas induzida pela deformação, ao apontar para a localização preferencial da textura nas faces de porfiroclastos assimétricos paralelas à foliação, nos quadrantes normais à tensão compressiva. Segundo estes autores, o acúmulo de energia deformacional elástica ou o *strain hardening* relacionado aos emaranhados de dislocações, seriam possíveis fontes de energia que focariam a mirmequitização nestas regiões. A formação de mirmequitas foi por eles interpretada como uma espécie de dissolução por pressão incongruente (Beach, 1982), cujo balanço estequiométrico se daria pela cristalização de K-feldspato em zonas de baixa pressão (caudas de recristalização ou fraturas).

A importância da mirmequitização como fator contribuinte para a formação da foliação milonítica é evidenciada por Vernon (1991), que aponta a redução de tamanho de grão e o conseqüente aumento da área superficial como fatores para uma menor competência do agregado e para o acesso facilitado de fluidos, que promoveriam o movimento dos limites de grão durante a recristalização. Este mesmo autor levanta uma série de questões sobre a participação da deformação para o

desenvolvimento de mirmequitas, algumas das quais seguem em discussão. O autor descreve mirmequitas sobrecrescendo porfiroclastos com núcleo de K-feldspato relativamente indeformado, e sendo simultaneamente recristalizadas na retaguarda das “colônias”, o que aponta para uma condição metaestável da mirmequitização frente à deformação. Baseado nisso, ele sugere que a energia deformacional não é o fator principal para a nucleação e o crescimento de mirmequitas, mas que contribui indiretamente para o acesso de fluidos aos sítios de reação. Isto é suportado pelo fato de que a reação de formação de mirmequitas é acompanhada por um decréscimo de volume de 10% (Simpson & Wintsch, 1989) a 8,5% (Menegon *et al.*, 2006).

Tsurumi *et al.* (2003) apontam para uma retroalimentação positiva entre a deformação e a formação de mirmequitas em milonitos gerados sobre granitos e aplitos, caracterizando *strain softening* e sugerindo a possibilidade de um sistema aberto pela ação de fluidos.

O papel dos fluidos e da deformação na formação de mirmequitas foi mais recentemente discutido por Menegon *et al.* (2006), que demonstraram que ambos fatores podem mesmo competir pelo controle da reação. O estudo destes autores demonstrou que em metagranitos de fácies anfíbolito, nos estágios iniciais da deformação, tensão e concentrações de deformação elástica em lamelas de pertita e maclas de microclínio são fatores desencadeadores da reação formadora de mirmequitas. Por outro lado, com o aumento da deformação, os fluidos passam a ser cada vez mais importantes, causando a formação generalizada de mirmequitas, o que por sua vez causa *reaction-softening*. Menegon *et al.* (2008) consideraram estas mirmequitas como produto de *dissolution-precipitation creep*.

Wintsch & Yi (2002) estudaram um caso semelhante, e consideram que *dissolution-replacement creep* é um mecanismo de deformação dependente da presença de fluidos, semelhante à dissolução por pressão, que deve operar em rochas úmidas mesmo em temperaturas relativamente elevadas (condições de fácies anfíbolito/nível crustal médio), deslocando o campo de atividade do mecanismo *dislocation creep*.

No que tange o campo de eficiência deste mecanismo de deformação, vale ainda ressaltar a descrição feita por Álvares-Valero *et al.* (2005) de enclaves metapelíticos de fácies granulito encontrados em rochas vulcânicas na Espanha.

Estas rochas são interpretadas como restitos de onde fusões foram extraídas. Vidro de composição granítica ocorre como inclusões na maioria dos minerais encontrados e também preenchendo interstícios. Granadas elípticas ocorrem nestas rochas, com razões de forma de até 10:1, onde observam-se microestruturas de manto-e-núcleo interpretadas como formadas por dissolução e reprecipitação assistidas por fusões (*melt-assisted dissolution and reprecipitation*).

O presente trabalho pretende contribuir para a discussão de longa data acerca do processo de mirmequitização, sua relação com a deformação e o papel dos fluidos no processo. Espera-se também contribuir para a consolidação da discussão do mecanismo de *melt-assisted dissolution-replacement creep* em condições de fácies granulito.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Neste capítulo serão abordados, nos primeiros dois itens, questões relacionadas à Filosofia de Pesquisa adotada, e nos itens seguintes serão apresentados os métodos empregados no estudo da partição da deformação de sienitos sintectônicos em escala de afloramento. Para a realização deste estudo, foram integradas técnicas de trabalho de campo na representação esquemática e detalhamento estrutural de um afloramento-chave, petrografia na observação e documentação de 3 amostras selecionadas, com ênfase nas microestruturas, e o estudo de sua química mineral (através de MEV e microsonda eletrônica).

1. A abordagem integrada como Filosofia de Pesquisa

Tendo em vista que os processos geológicos desenvolvem-se em múltiplas escalas, como manifestação de um sistema auto-organizado e distante do equilíbrio (e.g. diferenciação, deformação, e a própria Tectônica de Placas - Ortoleva, 1994; Brown & Solar, 1998; Stern, 2007; Nardi, 2011), faz-se necessário abordá-los sistemicamente (de forma holística) para que seja possível uma compreensão menos parcial destes fenômenos e de suas interrelações. No que tange o presente trabalho, salienta-se a importância da coleta criteriosa de informações pontuais, espacialmente referenciadas, em diversas escalas (do mapa à lâmina delgada), que permitam a sua posterior integração em uma interpretação geológica confiável, e que contribua efetivamente para a compreensão destas interrelações. Estas interrelações podem incluir retroalimentações positivas ou negativas de certos fenômenos, e conduzir a evolução do sistema. A tentativa de compreensão e/ou representação de um sistema é um modelo.

2. A importância da representação visual

Cabe ressaltar a importância das técnicas de desenho e representação na Geologia, e em especial na Geologia Estrutural, no que tange a compreensão do objeto estudado (De Paor, 1996; Shippley *et al.*, 2013). Na tentativa de

representação, forçamo-nos à observação integral do objeto, e não nos fixamos apenas nas partes ou características que mais nos chamam a atenção, ou com as quais já estamos familiarizados. Outra vantagem de representar graficamente é a de que filtramos, através de critérios pré-estabelecidos, os ruídos presentes na imagem percebida (e.g. líquens ou “encobertos” de um afloramento; ausência ou descontinuidade de afloramentos em uma área mapeada ou perfil) e classificamos e conectamos idealmente as partes de um todo, geralmente incompleto. Neste trabalho foi de suma importância a realização de desenhos esquemáticos de escala de afloramento e de lâminas delgadas, que permitiram a visualização de heterogeneidades e padrões que doutra forma poderiam ser descritos apenas como “complexos”.

3. Trabalho de campo

A partir da compilação de dados existentes na bibliografia (Martil, 2007; UFRGS, 2008; Martil *et al.*, 2011; De Toni, 2012; entre outros) e de reconhecimentos preliminares de campo e petrografia, foi selecionado um afloramento-chave para o estudo do problema. Neste afloramento, em um trabalho de campo de dois dias, foram confeccionados croquis de detalhe (que compõem a Fig. 6 no capítulo IV) e realizadas coletas sistemáticas de amostras orientadas para laminação e de medidas estruturais representativas, utilizando-se a Regra da Mão Esquerda (detalhada a seguir).

3.1 Localização do Afloramento-chave

O afloramento fica localizado na porção oeste da Folha Passo das Canas (SH.22-Y-A-III-4/MI – 2984/4), e corresponde às seguintes coordenadas UTM: 338533/6637552 (Datum: Córrego Alegre). Para chegar ao afloramento, a partir de Encruzilhada do Sul (RS), segue-se para oeste pela BR-471 por cerca de 3,5 Km, saindo para NNW pela chamada Estrada do Chanã (não-pavimentada). Após cerca de 6 Km nesta estrada haverá uma bifurcação, daonde segue-se para noroeste, logo em seguida cruzando a ponte sobre o Arroio Chanã (também chamado Arroio Iruí). Mantendo-se na via (de direção NW) por cerca de 6,5 Km, encontra-se nova bifurcação, daonde segue-se para WNW, bordejando o Cerro Partido (que forma uma bela feição geomorfológica a norte da estrada). Após cerca de 8 Km, logo após cruzar a ponte sobre o Arroio Lajeado, chega-se a uma via principal N-S, também de estrada de chão. Seguindo por esta via, cerca de 3 Km para norte, chega-se ao Rancho dos Compadres (do lado oeste da estrada). O afloramento ocorre na forma

de uma sequência de lajeado no leito da sanga, que corre para NW. Atualmente há uma grande área reflorestada logo à norte do Rancho dos Compadres, que por ora serve de ponto de referência. Ainda servem de pontos de referência a Fazenda Graúna, com seus belos açudes, que fica na margem leste da estrada, cerca de 1 Km à norte do Rancho dos Compadres, e a entrada para a fazenda Butiá, que fica cerca de 2 Km à norte do Rancho.

3.2 *Croquis de detalhe*

O afloramento foi dividido em dois lajeados principais, que foram desenhados em escala 1:12,5 utilizando-se trena e folha A3 milimetrada, para que as proporções fossem mantidas. Medidas representativas e amostras coletadas foram plotadas nos croquis. Os croquis foram posteriormente digitalizados com um escaner de mesa e vetorizados e integrados no *software* Corel Draw X6™.

3.3 *A Notação Estrutural “Regra da Mão Esquerda”*

Para se obter a orientação de uma estrutura planar, procede-se da seguinte forma: com a palma da mão virada para baixo, utilizando o dedo indicador da mão esquerda como referência da direção do plano e o polegar indicando o mergulho.

Todo dado estrutural planar contém:

- I. Azimute da direção da camada (linha horizontal contida no plano; é um número de 3 dígitos), que por convenção sempre estará a 90 graus anti-horários do sentido de mergulho;
- II. Ângulo de mergulho da camada com relação a um plano horizontal (é um número de 2 dígitos).

Ex.: $S_{mil} (000/87)$

Lê-se que o plano de foliação milonítica tem direção 000° (Norte) e mergulha 87° no sentido 090° (Leste), visto que a direção da camada indicada está por convenção a 90° anti-horários do sentido de mergulho.

3.4 *Coleta de amostras orientadas*

A coleta de amostras orientadas permite a correlação de dados obtidos em laboratório com sua posição original em campo, contribuindo assim para a abordagem integradora de diferentes escalas. Após a coleta simples, procede-se recolocando a amostra na posição original e medindo um plano qualquer da mesma. Anota-se a orientação do plano (conforme item anterior) e marca-se na face medida

o símbolo que representa o plano (direção do plano, com seta na posição equivalente ao dedo indicador da mão esquerda, e sentido do mergulho, indicado por um traço ortogonal). Quando a amostra é coletada com o intuito de ser laminada é preferível que o corte seja marcado em campo, tendo em vista orientá-lo corretamente com referência às direções de foliação e de lineação.

4. Petrografia

A descrição petrográfica das amostras é feita no campo e complementada em laboratório, quando pertinente, com o auxílio de microscopia óptica. A partir do seu reconhecimento, três amostras representativas de termos-finais de variações texturais e composicionais do Sienito Arroio das Palmas foram selecionadas para descrição detalhada, contagem modal e trabalho de química mineral.

4.1 Confeção das lâminas

As lâminas foram confeccionadas no Laboratório de Preparação de Amostras (LPA) do Instituto de Geociências (IGEO) da UFRGS, e no LPA do IGEO da USP. As lâminas que posteriormente foram selecionadas para análises em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e/ou Microsonda Eletrônica foram polidas no LPA do IGEO da UFRGS. Tomou-se sempre o cuidado de marcar os cortes das amostras perpendiculares à foliação e paralelos à lineação, onde observam-se o estiramento verdadeiro, a verdadeira espessura das camadas e indicadores cinemáticos confiáveis.

4.2 Descrição e Croquis de Lâminas, Separação de Sítios Microestruturais de Interesse e Fotomicrografias

Os aparelhos utilizados nas descrições das lâminas delgadas foram um microscópio petrográfico ZEISS e uma lupa de luz transmitida Micronal, ambos localizados na sala 203 do Departamento de Geologia da UFRGS. O uso da lupa de luz transmitida permite que se observem as texturas e microestruturas em uma escala intermediária entre a de amostra de mão e a microscópica, sendo útil no reconhecimento preliminar da rocha e especialmente valioso no estudo de microestruturas. Utilizando este recurso foram confeccionados croquis das lâminas estudadas inteiras em folhas A4, com um aumento de cerca de 10x (reproduzidos em forma reduzida na Fig. 1 deste capítulo, correspondem às lâminas exibidas na Fig. 9 do capítulo IV), os quais, juntamente com escaneamentos das mesmas (Fig. 9 do capítulo IV), serviram como mapas para guiar as sessões de MEV e Microsonda Eletrônica (descritas a seguir). Durante o processo de desenho foram selecionados

os sítios microestruturais de interesse. Nestes sítios, os quais foram fotografados e desenhados, foram observadas as interrelações entre as diferentes fases minerais, cristalizadas ou recristalizadas, o que possibilitou a integração de estudos microestruturais e de química mineral.

As fotomicrografias de sítios microestruturais de interesse e de feições-chave foram obtidas com um microscópio petrográfico ZEISS acoplado a uma máquina digital controlada por computador, localizado na sala 104 do Departamento de Mineralogia e Petrologia da UFRGS, e gentilmente cedidos pelos professores Dr. L. F. De Ros e Dra. Karin Goldberg.

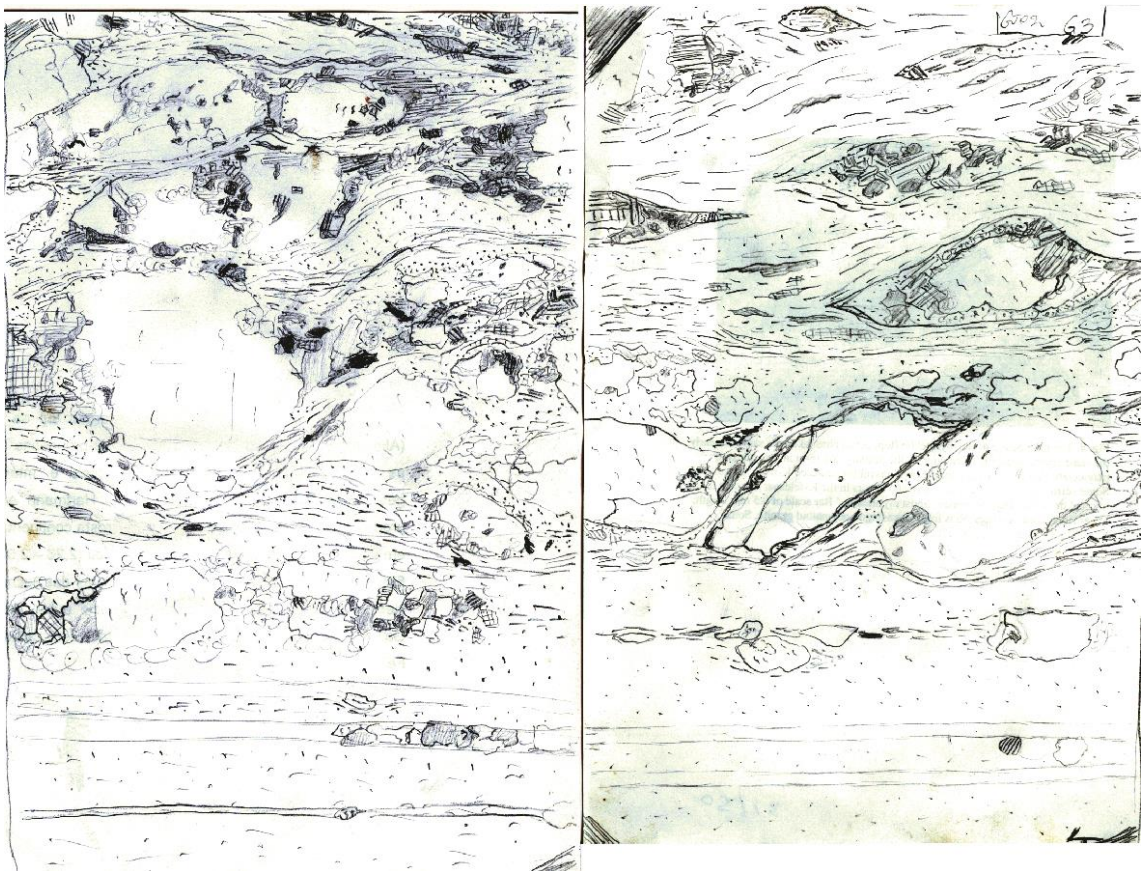


Figura 1 - Croquis de lâmina inteira que serviram como mapas nas seções de MEV e microsonda eletrônica. Correspondem às mesmas lâminas exibidas na Figure 9 do capítulo IV.

4.3 Contagem modal

As análises de composição modal mineral das rochas estudadas também foram realizadas na sala 104 do Depto. de Mineralogia e Petrologia da UFRGS. Para tal foi utilizado um microscópio com *charriot* ajustado para deslocamentos de 0,4 mm e o software HardLedge™ para o registro da contagem. Os pontos foram contados em transversas perpendiculares à foliação, espaçadas em cerca de 2,4 mm, de

forma a cobrir a variação textural e composicional da lâmina da forma mais representativa possível.

Lâminas representativas de duas das rochas estudadas tiveram cerca de 550 pontos contados (07B – sienito indeformado e 02B – sienito milonitizado à seco), enquanto duas lâminas contíguas de uma terceira amostra (02G – sienito milonitizado à úmido) tiveram cerca de 1500 pontos contados no total, devido a sua maior variação mineralógica e de tamanho de grão. Ainda foi contada uma estreita banda isolada nesta mesma rocha, de grão muito fino, que teve 147 grãos contados em 0,5 cm². As contagens modais realizadas foram sintetizadas na figura 6 do capítulo X.

5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Uma sessão de MEV foi realizada no Laboratório de Geologia Isotópica do IGEO-UFRGS, no dia 19/12/2013. O equipamento utilizado foi um JEOL JSM-6610LV. A amostra foi metalizada com carbono e as condições analíticas foram uma corrente elétrica de 15 eV. Nesta sessão foram realizadas análises químicas pontuais semi-quantitativas e mapas composicionais contíguos, com o intuito de mapear um sítio estrutural de interesse. Os mapas foram unidos utilizando-se o *software* AutoStitch™ em um mosaico apresentado na figura 9 do capítulo IV.

6. Microsonda Eletrônica

Três sessões de microsonda eletrônica foram realizadas no Laboratório de Microsonda Eletrônica do IGEO-UFRGS, nos dias 23/05/2014, 08-09/10/2014 e 15/10/2014. A máquina utilizada foi uma Cameca SXFive, e as condições analíticas foram padrão para silicatos, com potencial de aceleração de 14,8 keV, corrente de amostra de 15nA e feixe de 20 µm. Ao todo foram realizadas 221 análises úteis: 57 determinações de composição química para biotita, 17 determinações para clinopiroxênio e 147 determinações de feldspatos.

Os resultados em forma de tabelas foram manipulados utilizando-se o *software* Microsoft Excel 2010™ e as fórmulas composicionais foram calculadas seguindo as recomendações de Deer *et al.* (1992). Para o cálculo da fórmula de minerais anidros utilizou-se como base o número ideal de oxigênios, enquanto para as biotitas foi utilizado o número de 22 ânions. Os gráficos binários foram plotados no mesmo *software*, já os ternários, no *software* Origin™.

Devido a visualização de dados ser prejudicada na forma impressa pela quantidade de análises, as planilhas de resultados foram disponibilizadas nos *links* abaixo, e quando publicado o artigo, as mesmas serão disponibilizadas como material de suporte, também apenas em formato digital.

Tabela de análises de feldspatos:

https://drive.google.com/file/d/0B5H_GhPNMDreMHVrSlpxa3BoSjA/view?usp=sharing

Tabelas de análises de clinopiroxênios:

https://drive.google.com/file/d/0B5H_GhPNMDreWE9GajhkNEh4U2s/view?usp=sharing

Tabela de análises de biotitas:

https://drive.google.com/file/d/0B5H_GhPNMDreZIFSSmRCd3FmbGM/view?usp=sharing

CAPÍTULO IV

Strain partitioning into dry and wet zones and the formation of Ca-rich myrmekite in syntectonic syenites: a case for melt-assisted dissolution-replacement creep under granulite facies conditions

De Toni, G.^{1*}, Bitencourt, M.F.^{1,2} and Nardi, L.V.S. ^{1,2}

¹ Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, 91500-000, RS, Brazil

² Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, 91500-000, RS, Brazil

* Corresponding author. E-mail: gdetoni@ufrgs.br; Phones: +555191177911; +555133086371

Abstract

The formation of Ca-rich myrmekites is described in syntectonic syenites formed under granulite facies conditions. The syenites are found in high- and low-strain zones where microstructure and mineral composition are compared. Heterogeneously distributed water-rich, late-magmatic liquids were responsible for strain partitioning into dry and wet high-strain zones at outcrop scale, where contrasting deformation mechanisms are reported. In dry high-strain zones K-feldspar and clinopyroxene are recrystallized under high-T conditions. In wet high-strain zones, the de-stabilization of clinopyroxene and pervasive replacement of relatively undeformed K-feldspar porphyroclasts by myrmekite and subordinate graphic-like intergrowths indicates dissolution-replacement creep as the main deformation mechanism. The reworking of these intergrowths is observed and is

considered to contribute significantly to the development of the mylonitic foliation and banding. A model is proposed for strain partitioning relating a positive feedback between myrmekite-forming reaction, continuous inflow of late-magmatic liquids and dissolution-replacement creep in the wet zone at the expenses of original mineralogy preserved in the dry zones. Regarding the constraints of the model, melt-assisted dissolution-replacement creep in syntectonic environments under granulite-facies conditions may extend the field of operation of dissolution-replacement creep to the lower continental crust.

Keywords: syntectonic magmatism; syntectonic syenites; myrmekite; dissolution-replacement creep; strain partitioning; granulite facies conditions

1. Introduction

Myrmekite is one of the most described and discussed microscopic features in geology. This is in part due to its common occurrence in a diversity of rocks and environments, and also because of the controversy generated since the early debate between the two proposed models for its genesis by replacement (Becke, 1908) and exsolution (Schwantke, 1909). Years of research on the subject have produced extensive literature (see Phillips, 1974 for a review), and nowadays a strong tendency is observed toward a balance of arguments from both schools of thought (Ashworth, 1972; Phillips, 1980). In a conciliatory paper Phillips (1980) suggests that the exsolution model is best applied to undeformed granitoids, while the replacement model generally fits better in deformed and metamorphosed rocks. He also says that both models could operate together (as agreed upon by Ashworth, 1972 and Tsurumi, 2003).

The correlation between deformation and myrmekite genesis was well demonstrated by Simpson & Wintsch (1989), who have interpreted it as a form of incongruent pressure solution (Beach, 1982) in the compressive quadrants of asymmetric porphyroclasts in mylonitic granites of amphibolite facies conditions. The close relationship between myrmekite and deformation is supported by many papers (Vernon, 1991; Tsurumi, 2003; Menegon, 2006, and references therein).

Some key questions concerning the relative importance of the role played by deformation and fluids in the genesis of myrmekite in deformed rocks were addressed by Vernon (1991) and remain under discussion. This author describes myrmekite overgrowing non-deformed K-feldspar (Kfs) and simultaneously

recrystallized at the rear of the growing lobes. Based on this evidence he suggests that strain energy is not the major contributing factor for myrmekite nucleation and growth (since syndeformational myrmekite opposite deformation is metastable), but contribute indirectly by facilitating the access of fluids to growth sites. This is supported by a volume loss resulting from the myrmekite forming-reaction, which in turn facilitates the access of fluids and promotes the continuity of the reaction. This negative volume change was calculated by Simpson & Wintsch (1989) at approximately 10%, and is also supported by calculations of 8.5% volume loss by Menegon *et al.* (2006).

The role of fluids and deformation in myrmekite genesis was more recently addressed by Menegon *et al.* (2006), who showed that both factors may compete for the main control of myrmekite-forming reactions. Their study of lower-amphibolite facies metagranites in the Gran Paradiso nappe (North-Western Alps) has demonstrated that at initial stages of deformation, stress and elastic strain concentrations at perthite lamellae and microcline twinning are the triggering factor to start the reaction, but with increasing deformation, fluids appear to become increasingly important, causing widespread myrmekite formation, which in turn causes reaction-softening. Menegon *et al.* (2008) consider this occurrence of myrmekites to be a product of dissolution-precipitation creep. A similar case is reported by Wintsch & Yi (2002), who consider dissolution and replacement creep as a fluid-dependent deformation mechanism, similar to pressure solution that may operate in wet rocks even at relative high temperatures (mid crustal levels/amphibolite facies conditions), displacing the field of operation of dislocation creep.

In the lower continental crust, although the granulite facies conditions are typically considered as dry or H₂O-poor (Lal, 1995 and references therein), melt could be present (Etheridge *et al.* 1983), and melt-assisted dissolution and reprecipitation could be effective, as described in metapelitic enclaves partially melted at granulite facies metamorphism by Alvares-Valero *et al.* (2005).

In this paper we describe a Neoproterozoic syntectonic syenite from southernmost Brazil, which was crystallized and progressively deformed under granulite facies conditions. In high-strain zones, the occurrence of interspersed mylonitic syenites formed by contrasting deformation mechanisms, in one of which myrmekite is a

penetrative feature, suggests that strain was partitioned, and that melt-enhanced dissolution and replacement creep have operated heterogeneously.

Myrmekite is strictly defined as an intergrowth of sodic plagioclase (generally oligoclase) and vermicular quartz, in contact or pseudomorphically replacing any K-feldspar (Phillips, 1974; Smith & Brown, 1988). A more general definition of myrmekite also covers intergrowths of vermicular quartz included in calcic plagioclase, which usually replaces a less calcic (intermediate) plagioclase in basic rocks (Dymek and Schiffries, 1987; Efimov *et al.* 2010; Mukai *et al.* 2014). In this paper we consider myrmekite as a symplectite formed by vermicular quartz hosted in plagioclase (independently of its An content) in contact or pseudomorphically replacing an adjacent feldspar.

2. Samples and methods

The results of an integrated approach of fieldwork, petrography, SEM and microprobe analysis are presented in this paper. A representative outcrop from a high-strain zone of the Arroio das Palmas Syenite was selected, where sketching and systematic sampling were done. Two representative samples (02B and 02G) were chosen from this key-outcrop as representative of highly-deformed varieties, to be compared in terms of mineral composition and microstructures with an undeformed one (sample 07B) taken from a low-strain zone. A preliminary study of mineral chemistry was done using SEM only in sample 02G, including chemical mapping of microstructures and punctual EDS analyses. These results have provided some insights to guide the microprobe analyses in the three samples. In order to be as clear as possible, the results obtained independently by different techniques will be presented integrated in subsections by the different samples analysed.

SEM analysis was carried out at the Isotope Geology Laboratory of Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Brazil), using a JEOL JSM-6610LV machine, with carbon coat and 15 keV current. Microprobe analyses were performed at the Microprobe Laboratory of the same university, using a Cameca SXFive. The analytical conditions were 14,8 keV, 15 nA current, and beam size of 20 μm .

3. Geological Setting

3.1. Geotectonic Framework

The study area is located in the central-northern portion of the Sul-rio-grandense Shield (SRGS - Fig. 1a). The SRGS, together with the shield areas in Santa Catarina and Uruguay form the southern segment of the Mantiqueira Province, which is a

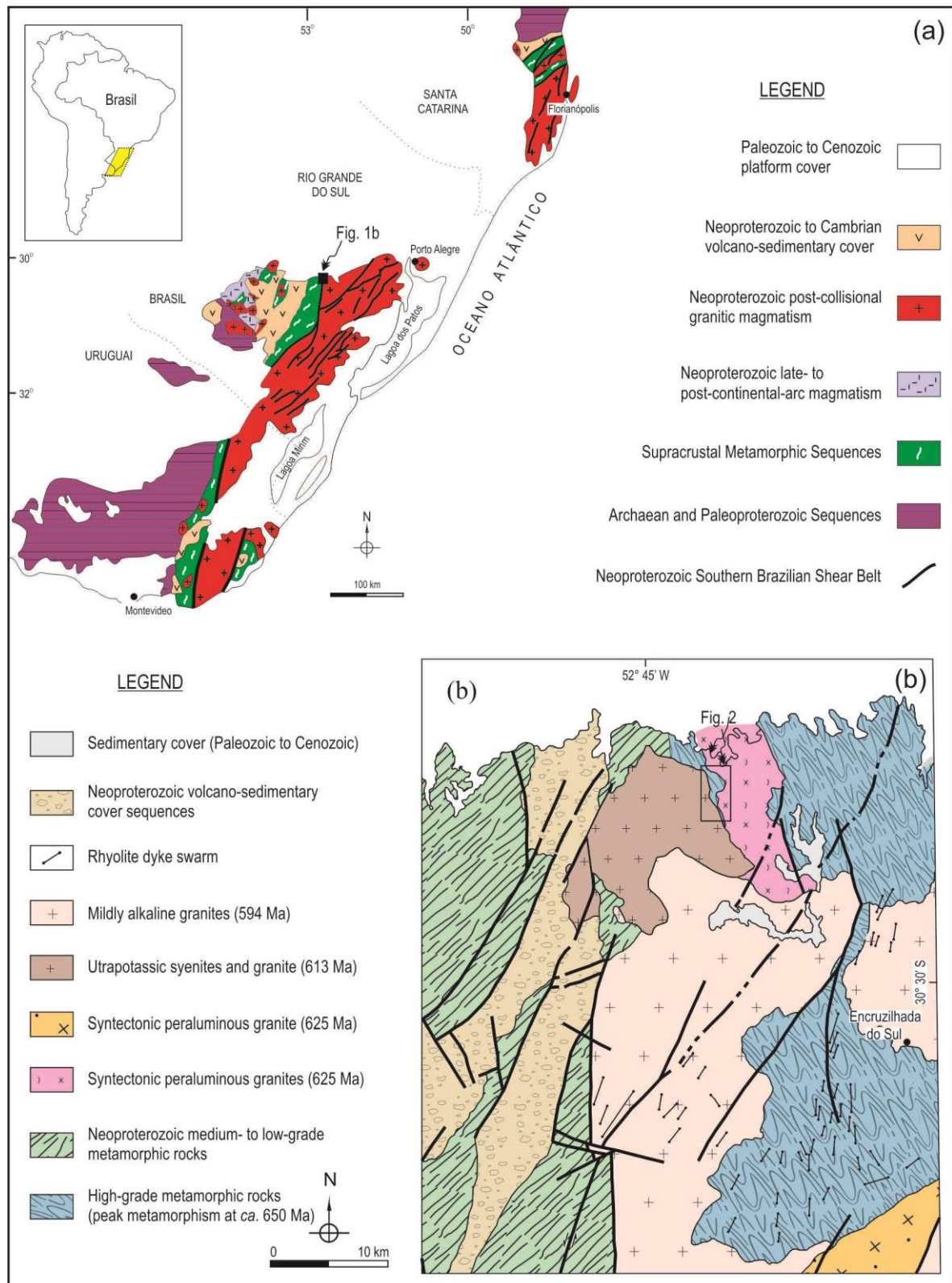


Figure 1 - (a) Geotectonic domains in the southern segment of the Mantiqueira Province, from southern Brazil to Uruguay (modified from Bitencourt and Nardi, 2000). (b) Regional geological map with location of study area (modified from Martil et al. 2011).

Neoproterozoic orogenic feature resulting from the amalgamation of Gondwana (Almeida et al. 1967, 2000). Cratonic remnants of Paleoproterozoic to Archaean ages occur in the southwestern part of the SRGS, but the so-called Rio de La Plata Craton is best exposed in the Uruguayan Shield. The Neoproterozoic record in the SRGS is present in the Dom Feliciano Belt (as defined by Fragoso-Cesar, 1980), which is described and compartmented in terms of three major domains (Fernandes et al., 1995; Hartmann et al. 2007). The juvenile rock association adjacent to the cratonic area (Fig. 1a) is interpreted as a former continental magmatic arc of 753-680 Ma (Hartmann et al., 2011). In the central portion of the SRGS, low- to medium-grade supracrustal metamorphic rocks (Jost & Bitencourt, 1980), are partly covered by a Neoproterozoic to Cambrian volcano-sedimentary succession. The eastern part features a large volume of post-collisional granites called Pelotas Batholith (Philipp & Machado, 2005). The granites are structurally controlled by the Sul-brasileiro Shear Belt (SBSB – Bitencourt and Nardi, 2000), which is an anastomosed trans-lithospheric framework of shear zones that has acted as conduit for magmas through the crust and also promoted decompression of shallower levels of the mantle during late-Neoproterozoic. The rocks reported in this paper are located at the northwest border of the Pelotas Batholith (Fig. 1b), where a NNW-trending branch of the SBSB has conditioned the intrusion of syntectonic peraluminous granites (Niessing et al., 2011) and ultrapotassic syenites (object of this paper; Bitencourt et al., 2013). The early evolution of this structure is also imprinted in the metamorphic wall rocks.

3.2. Local Geology

The Várzea do Capivarita Complex (VCC) comprises granulite facies gneisses and syntectonic intrusive syenites. It is part of the roof of the Pelotas Batholith post-collisional granites and forms patches of several square kilometers near its northwestern limit (Fig. 1b). Pelitic and calc-silicate paragneisses are the dominant rocks in the VCC, while orthogneisses form a subordinate volume. Interleaving of different lithological types at multiple scales is due to shearing of a thrust pile under granulite facies conditions, as described by Martil et al. (submitted to publication).

The geometry of this thrust pile is only locally preserved. Progressive deformation in a transpressive regime has led to dextral shearing along subvertical zones that follow the same NNW regional trend (Fig. 2a) and contain sub-horizontal stretching lineations (Fig. 2b). The granulite-facies metamorphism of the VCC was dated at 648

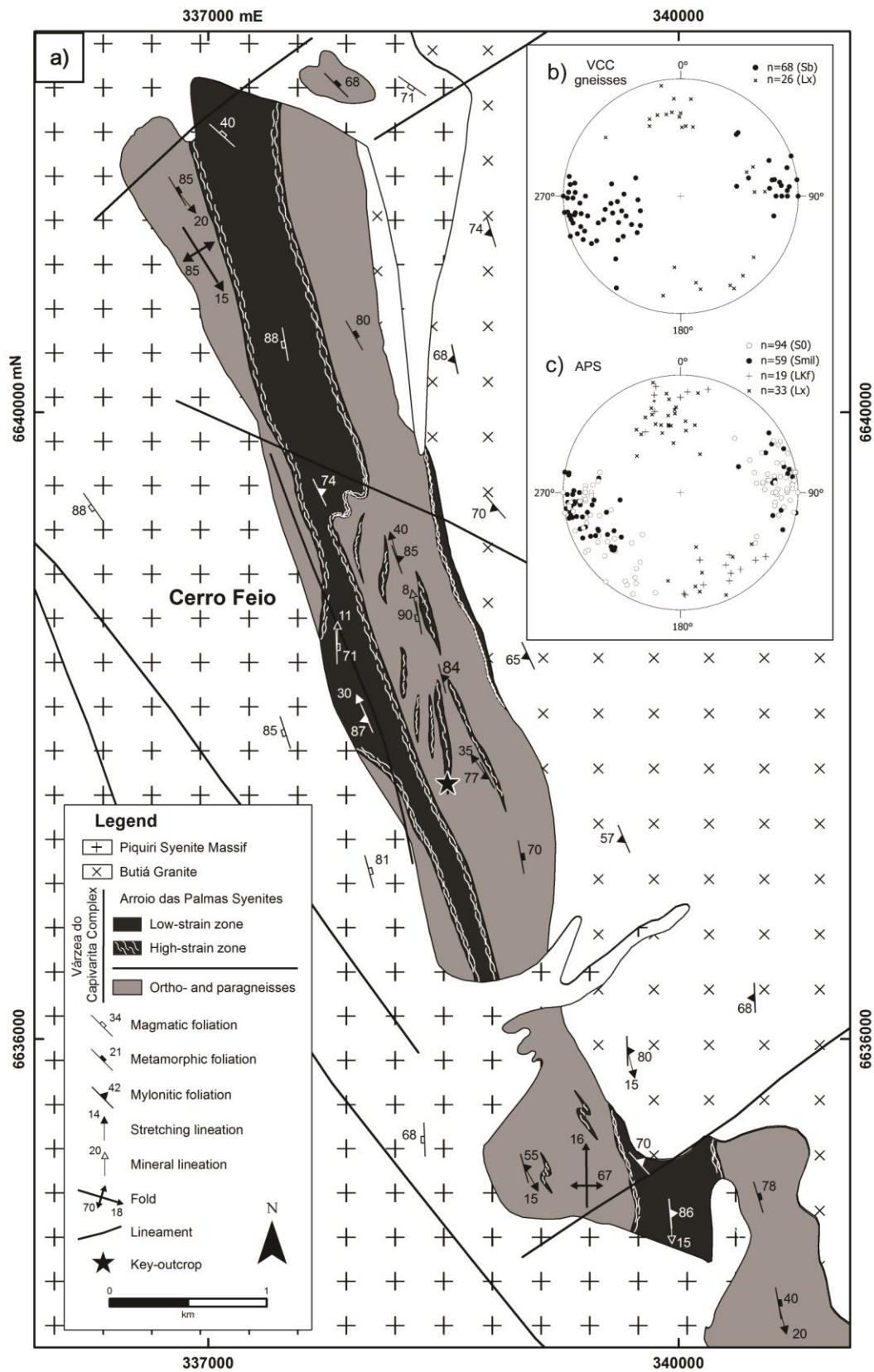


Figure 2 - Geological features of the Arroio das Palmas Syenite and host rocks. (a) Geological map, with indication of detailed outcrop. (b-c) Lower-hemisphere, equal-area pole point plots of structural elements from APS and host rocks.

± 5 Ma (U-Pb SHRIMP in zircon – Martil et al., submitted to publication), which is interpreted as the approximate age of collision.

The Arroio das Palmas Syenite (APS) is the intrusive part of the VCC in the study area. It exhibits parallel-trending magmatic and mylonitic structures (Fig. 2c) and will be described in detail next. The Butiá Granite (eastern part of Fig. 2a) is a syntectonic, sillimanite-bearing peraluminous granite emplaced along a NNW-striking transcurrent shear zone that is part of the Southern Brazilian Shear Belt. Magmatic ages obtained in zircon and monazite point to a crystallization age of ca. 625 Ma (Niessing *et al.*, 2011). The Piquiri Syenite Massif (western part of Fig. 2a) is a late-tectonic intrusion of ca. 611 Ma (Philipp et al, 2002).

3.3. *The Arroio das Palmas Syenite*

The Arroio das Palmas Syenite (APS) is the intrusive part of the VCC in the study area. Its intrusion and crystallization occurred during deformation at granulite-facies conditions, as indicated by its igneous age of 642 ± 10 Ma (LA-ICP-MS zircon – Bitencourt et al. 2011) obtained in virtually undeformed variety, situated within error of the VCC metamorphic age reported by Martil et al. (submitted). Concordant to subconcordant intrusive relations are best seen in low-strain zones, where intrusion geometry is preserved from further deformation (Fig. 3a).

The APS main rock type is a porphyritic syenite containing ca. 40% of megacrystic, white K-feldspar (Kfs - ca. 2 cm) set in a mafic-rich, medium-grained groundmass composed of biotite and clinopyroxene (cpx) with minor amounts of amphibole and interstitial quartz. Zircon and apatite are the main accessory phases. A subordinate variety is a medium- to fine-grained, inequigranular syenite of similar composition. Scattered, subhedral Kfs megacrysts are commonly found in the finer-grained syenite (Fig. 3b), and cm-long lenses of the fine-grained variety in the porphyritic one (upper part of Fig. 3b) are interpreted as indicative of their co-magmatic character. Fine- to medium-grained leucosyenites or syenogranites are found as predominantly concordant, but occasionally discordant, cm-thick veins crosscutting the other varieties (Fig. 3b). They are interpreted to represent the late-stages of the APS magmatism.

The APS forms several foliated (Fig. 3c), tabular bodies of variable thickness (centimetres to tens of meters) intrusive parallel to the foliation of the metamorphic

rocks (Fig. 3a). Their internal structure is given by the cm- to m- alternation of the two main varieties (Fig. 3b), and a similar relation is observed between the APS and the VCC gneisses.

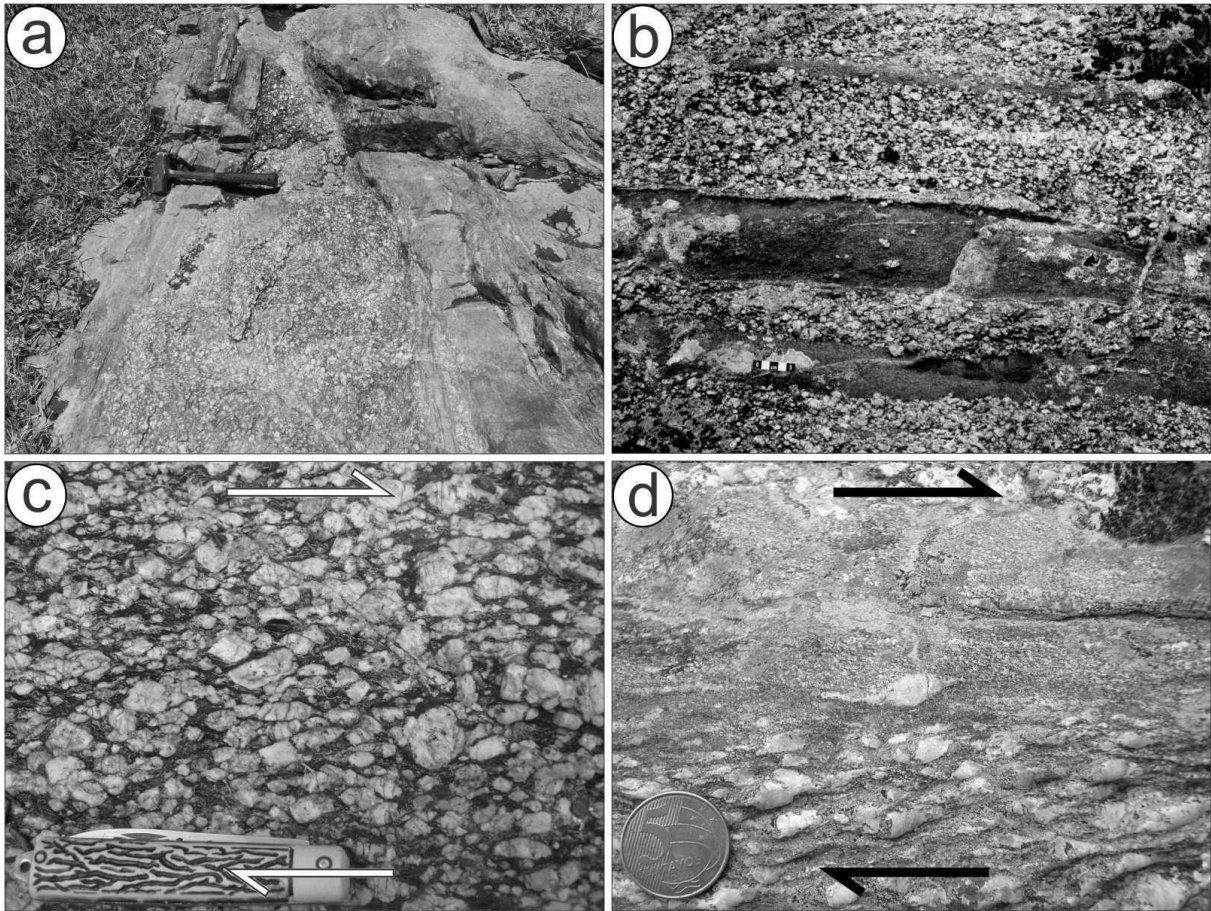


Figure 3 – Mesoscale features of the APS. (a) Intrusive contact of APS porphyritic variety in paragneisses of the VCC as preserved within a low-strain zone. Notice the greater thickness of the injection in the first plane and the thinner tip in perspective, which suggests opening of the of the wall rock foliation. (b) Fine-grained varieties alternating with porphyritic either as tabular bodies of sharp contacts (center and lower part) or as highly elongate lenses of diffuse contacts (upper part). Irregular contacts and variable amount of scattered Kfs megacrysts within the fine-grained rocks indicate their coeval character. Leucocratic, cm-thick injections are either parallel or oblique to the main foliation. (c) Weakly-deformed porphyritic syenite observed on XZ plane. Most of the aligned subhedral Kfs megacrysts mark the foliation trace (parallel to the photograph base) and some delayed crystals indicate dextral shear sense. (d) Highly-deformed porphyritic (lower part) and fine-grained (upper part) syenites observed on XZ plane. At the contact (center of the photograph), the long recrystallization tails of a strongly deformed, asymmetric porphyroclast indicate dextral shear-sense of the foliation.

A discrete second foliation (S') is sometimes observed, either in high- or low-strain zones, unrelated to deformation intensity. The S' planes are widely spaced (cm to m), and they trend EW, with steep dips. The S' planes drag the main foliation with opposite (sinistral) shear sense and may be interpreted to form a conjugate pair with the main planar structure. They are observed in the wall rocks as well, and commonly act as emplacement sites for APS late-magmatic varieties.

The APS textural variation is enhanced by the heterogeneous development of solid-state deformation under high-temperature conditions, which is responsible for the development of mylonitic structures parallel to the primary ones (Fig. 2b-c). The progressive character of the subsolidus deformation relative to the magmatic structures of the APS is observable as a gradual transition from high- to low-strain zones, which alternate at variable scales, i.e., from hundreds of meters (Fig. 2a) to outcrop scale. Within high-strain zones a porphyroclastic texture develops, and the original grain-size contrast of the main varieties is enhanced by grain-size reduction (Fig. 3d).

The parallelism of APS igneous and mylonitic structures with the metamorphic foliation of its wall rocks, and the overlapping of metamorphic and magmatic ages are taken as evidence of their syntectonic character.

4. Structural features and mineral composition of the APS in low-strain zones

Strain partitioning throughout the magmatic unit was responsible for the preservation of igneous textures and structures in several places, and in very low strain zones the rocks are virtually undeformed, preserving their sheet-like geometry. The APS has a generally well-developed, steeply-dipping igneous foliation marked by the shape alignment of Kfs megacrysts and biotite flakes, and by elongate aggregates of equant clinopyroxene. The shape alignment of Kfs also marks a shallow to medium-plunge mineral lineation. When observed in the plane perpendicular to the foliation and parallel to the lineation (XZ) the orientation of some Kfs megacrysts shows that they are delayed relative to the foliation trace, indicating dextral shear sense (Fig. 3c). S' planes are rarely observed, but when present are seen to partly control the geometry of late-stage injections.

The main textural feature of the APS undeformed rocks is given by the aligned Kfs megacrysts surrounded by the mafic groundmass (Fig. 4a). Kfs composition ranges from $Or_{87}Ab_{13}$ to $Or_{97}Ab_{03}$ (Fig. 5a), and the crystals commonly have fine perthite lamellae (less than 0.1 mm thick). Wherever two Kfs megacrysts touch, swapped rim-type microstructures develop, either as perthite (Voll, 1960) or as fine (less than 0.1mm) myrmekite (Vernon, 2004), as observed in the upper-left and center of figure 4a. This type of myrmekite is relatively rare in the APS, and it is restricted to this

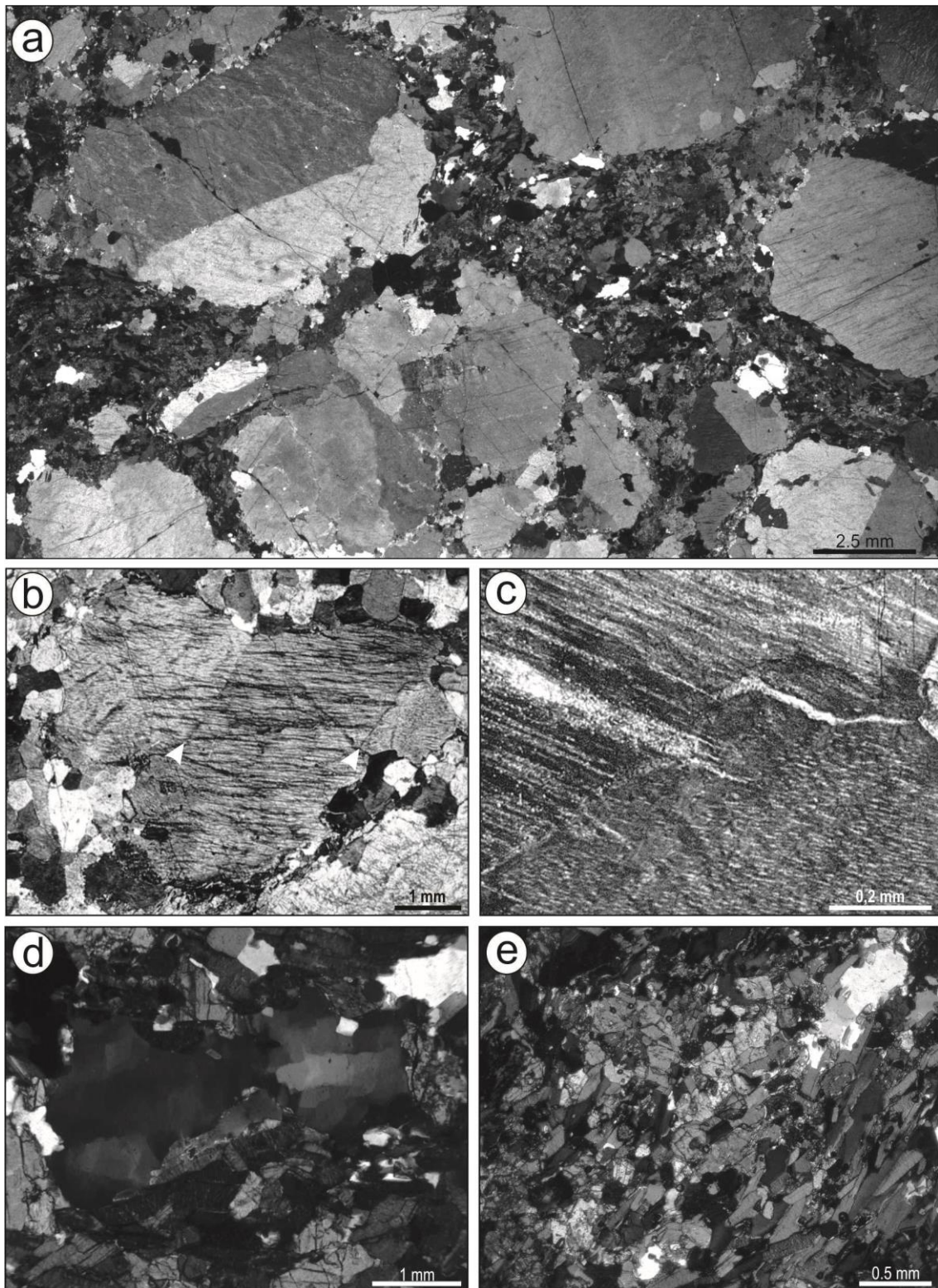


Figure 4 - Microstructural features of undeformed APS. (a) Thin-section scan showing the general aspect of least deformed porphyritic variety with subhedral, aligned Kfs megacrysts in mafic-rich groundmass; notice finer grains developed by exsolution and/or recrystallization where megacrysts touch. (b) Perthitic K-feldspar megacryst locally surrounded by granoblastic feldspar grains which develop at the contact with another megacryst (upper right and left), and are absent where megacryst is in contact with the groundmass (bottom). Misorientation within the megacryst (white arrows) may be due either to subgrain boundaries or microcracks. The boundary at the top right handside is enlarged in the detail (c) to show that perthite not only crosscuts them but also fills up the discontinuity. (d) Interstitial quartz with chessboard pattern subgrains; the surrounding groundmass is predominantly composed by biotite and cpx. (e) Detail of mafic groundmass texture, with aligned biotite flakes and cpx aggregates. Thin-section scanning by Monika Niessing is gratefully acknowledged.

structural conditioning. Its plagioclase composition lies between $Ab_{77}An_{22}$ and $Ab_{89}An_{10}$ with optical orientation usually continuous with that of the neighbouring perthite suggesting a common genesis for these microstructures.

In mesoscopically undeformed samples microscopical evidence of intracrystalline deformation is registered in Kfs megacrysts. Microcracks parallel to cleavages, undulose extinction and subgrains of 0.5 to 1 mm maximum diameter are locally observed (as in the center of Fig. 4a). Marginal recrystallization, with ca. 0.5 mm granoblastic grains, is mostly restricted to the border regions of interactive Kfs megacrysts (upper-right of Fig. 4a and 4b). Deformational features in these mesoscopically undeformed grains, like microcracks and/or subgrain boundaries, are locally cut or partly filled by perthite lamellae (Fig. 4c), which indicates that deformation was effective above the solvus temperature. Interstitial quartz usually exhibits chessboard pattern subgrains (Fig. 4d), indicative of high-T deformation (Mainprice et al., 1986, Kruhl, 1996). The main texture in the groundmass is defined by the orientation of biotite lamellae or cpx grains and aggregates which surround the megacrystic Kfs (Fig 4e).

The average Cpx composition is $Wo_{45} En_{34.7} Fs_{18.7} Aeg_{01.5}$ (Fig. 5b) overlapping the augite to diopside fields in the classification of Morimoto (1988). The grains are elongate to equant with maximum 0.5 mm size. They form elongate aggregates of up to 1 cm length, with subordinate amount of biotite.

Biotite forms ca. 1 mm long, reddish brown lamellae. Apatite and zircon are characteristically abundant as 0.05 – 0.1 mm inclusions in biotite. The composition of biotite is characterized by low $Fe/(Fe+Mg)$ values, of 0.417 to 0.463, $Al^t = (Al^{iv}+Al^{vi})$ between 2.18 and 2.38 (Fig. 5c), and high Ti and Cl content, ranging from 0.245 to 0.46 a.f.u., and from 0.54 to 0.80 a.f.u., respectively (Fig. 5d).

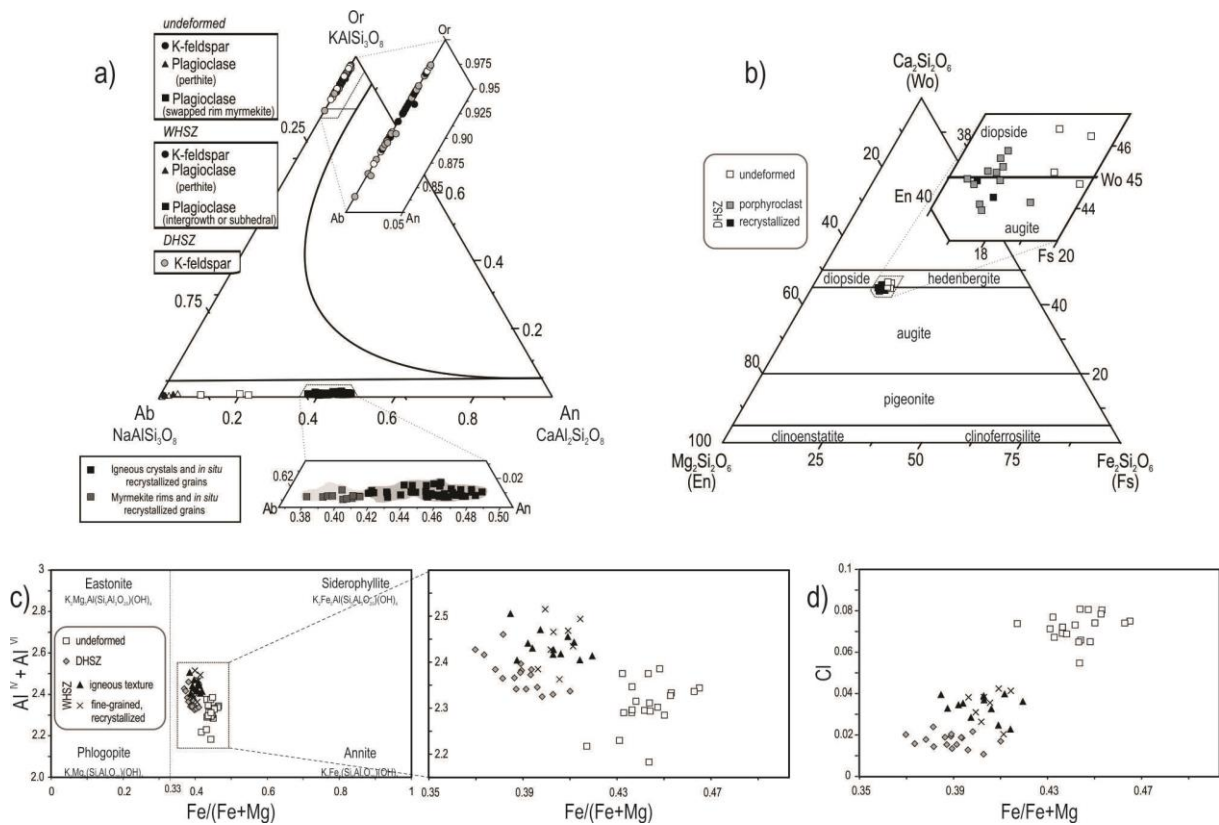


Figure 5- APS mineral chemical compositions plotted on classification diagrams. Dashed lines indicate enlargement of the marked field. (a) Feldspar classification ternary diagram (solvus for low-P from Parsons and Brown, 1983) with the analysis of undeformed, DHSZ and WHSZ. Different symbols indicate different minerals, whilst different colours indicate different samples. (b) Cpx classification ternary diagram (Morimoto, 1988) with analyses of undeformed and DHSZ samples. (c) Biotite classification diagram (Deer et al., 1992). (d) Cl vs. Fe/(Fe+Mg) diagram where two different populations of biotite are discriminated mainly with respect to Cl a.f.u. content.

5. Structural features and mineral composition of APS in high-strain zones

5.1. Mesoscale features of high-strain zones

In order to represent geometrical distribution and illustrate its main structural features, a representative outcrop of an APS high-strain zone was studied in detail, and the resulting sketch, with location of studied samples, is presented in figure 6a.

In high-strain zones the foliation (S) becomes even more well-developed as a result of progressive rotation of the Kfs porphyroclasts into alignment, and of their subsequent stretching into asymmetric, dextral shear sense recrystallization tails (Fig. 3d). The EW-striking, subvertical S' foliation, although still discrete, is more frequent and less widely-spaced than in low-strain zones, and drags the main foliation with sinistral shear sense (upper right and lower left in Fig. 6a).

The presence of heterogeneously distributed leucogranitic veins of variable thickness is remarkable, and their larger volumes coincide with the presence of dark-coloured,

concordant, mm- to dm-thick bands of fine-grained, mylonitic rocks whose composition oscillates between that of a syenite and that of a quartz-plagioclase rich rock (Fig. 6a). These veins are successively injected into the host syenites with the earlier ones being more strongly deformed along the main foliation, and locally crosscut and displaced by younger and less deformed ones. The same vein commonly branches out to follow either S or S' foliations (Fig. 6a, upper right corner), which again suggests the coeval character of these structures.

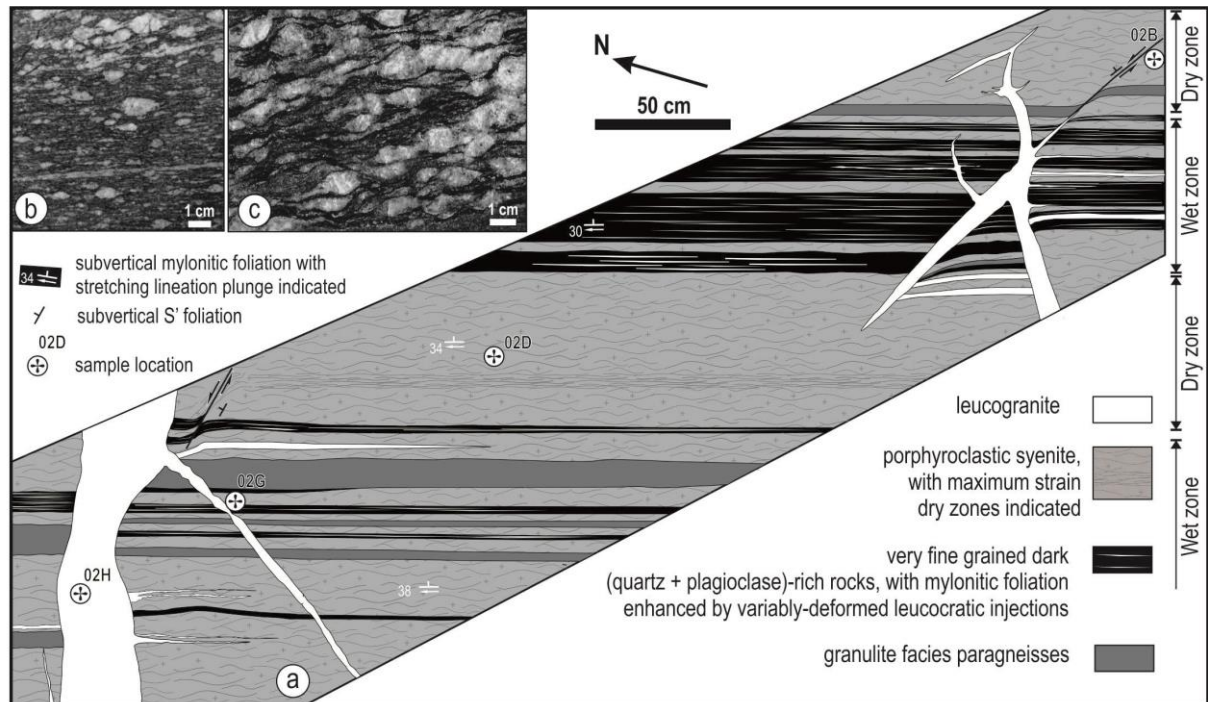


Figure 6 - (a) Outcrop sketch with main structural features, sample locations and rock slab photographs. (b) Sample 02B – dry high-strain zone. (c) Sample 02G – wet high-strain zone.

The correlation of the presence of nearby veins with the occurrence of distinct mineral compositions in the mylonitic syenites (as described next) has led us to divide the studied outcrop in dry and wet high strain zones (DHSZ – Fig. 6b, and WHSZ – Fig. 6c, respectively), which alternate at meter-scale. In the so-called dry zone leucogranitic veins are virtually absent, whilst the wet zone is characterized by their concentration as a network that percolates and interacts with APS varieties and possibly has aided or triggered mineral changes.

5.2. Compositional and microstructural variation across DHSZ and WHSZ

5.2.1. Comparative modal composition

In order to compare modal compositions of the studied samples, a bargraph is presented (Fig. 7) where it becomes clear that the dry zone mineralogical

composition is the same as that of the undeformed syenite. In both samples the main mineral is Kfs (54.5 and 42.3%, respectively), the two main mafic phases are biotite (20 and 24%) and clinopyroxene (15.8 and 8.3%), and quartz is subordinate (4 and 0.9%). In contrast, amphibole has some importance in the undeformed sample (6.7%), but is not significant in the deformed dry one (1.3%).

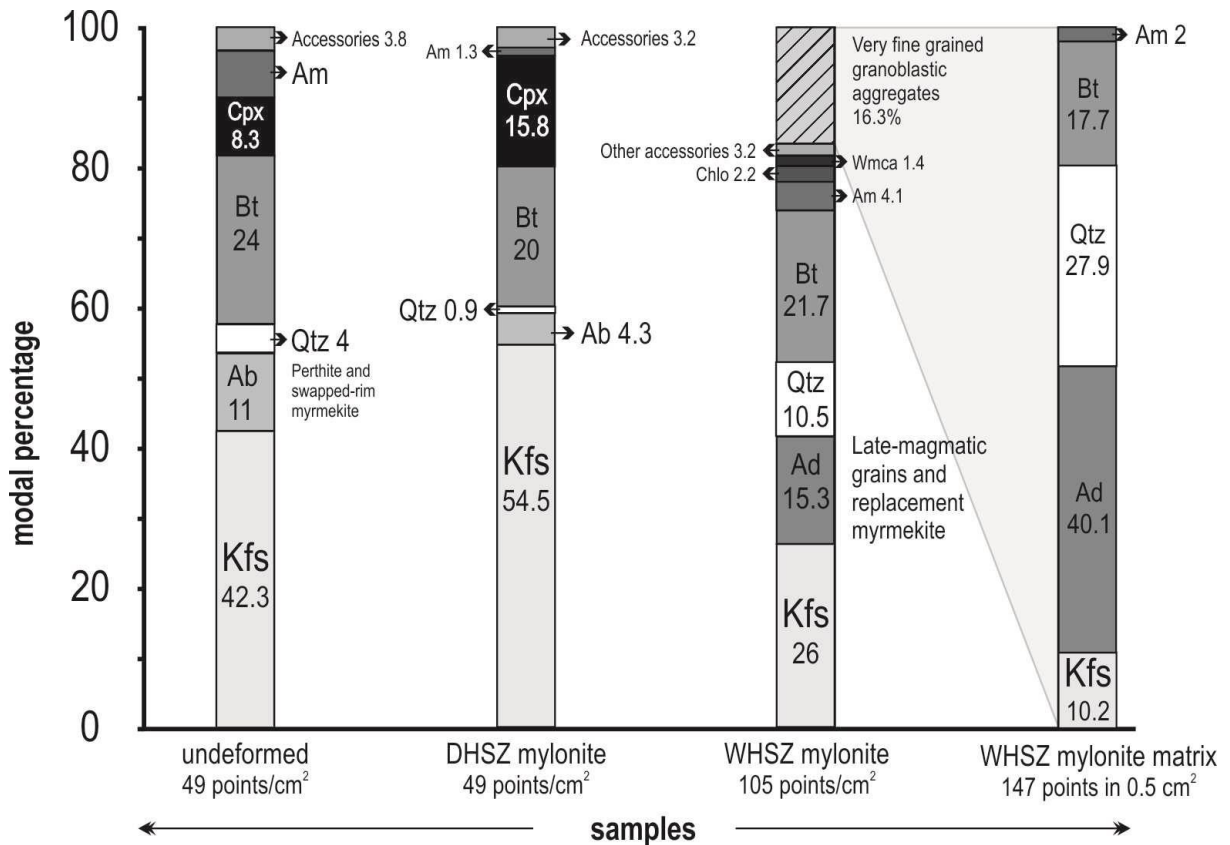


Figure 7 - Comparative bar-diagram modal compositions for undeformed syenite, dry and wet high-strain zone mylonites. Mineral abbreviations from Kretz (1983) except Ad = andesine.

The mineralogical composition contrast of the wet zone sample relative to primary and dry zone samples is also clear, in that the wet zone sample shows approximately equal amounts of Kfs and plagioclase, and over 10% quartz.

A very fine-grained, plagioclase-rich, quartz-feldspathic granoblastic groundmass (16.3%) surrounds Kfs porphyroclasts and sometimes forms elongate lenses interspersed with the mafic phases. Biotite continues to be the main mafic phase, but clinopyroxene disappears. Instead, a small amount of amphibole (4.1%) is found, together with other secondary phases (chlorite, white mica, albite, sulphide and calcite).

5.2.2. Microstructures and mineral composition of DHSZ

K-feldspar porphyroclasts from the dry high-strain zone show the same compositional range as the ones from undeformed samples (Fig. 5a). Undulose extinction is common, as well as 0.1 to 0.5 mm diameter subgrains which evolve to new grains by subgrain-boundary rotation recrystallization (Passchier and Trouw, 2005) at porphyroclast margins and tails (Fig. 8a). Exsolved albite commonly forms a thin film placed along subgrain boundaries (arrow in Fig. 8a) or between recrystallized Kfs grains. Swapped-rim type myrmekites are rarely seen in these rocks, and they possibly result from exsolution. The progression of Kfs porphyroclast recrystallization into granoblastic grains leads to the formation of lenslike granoblastic aggregates which alternate along the foliation with mafic aggregates to produce a discontinuous banding.

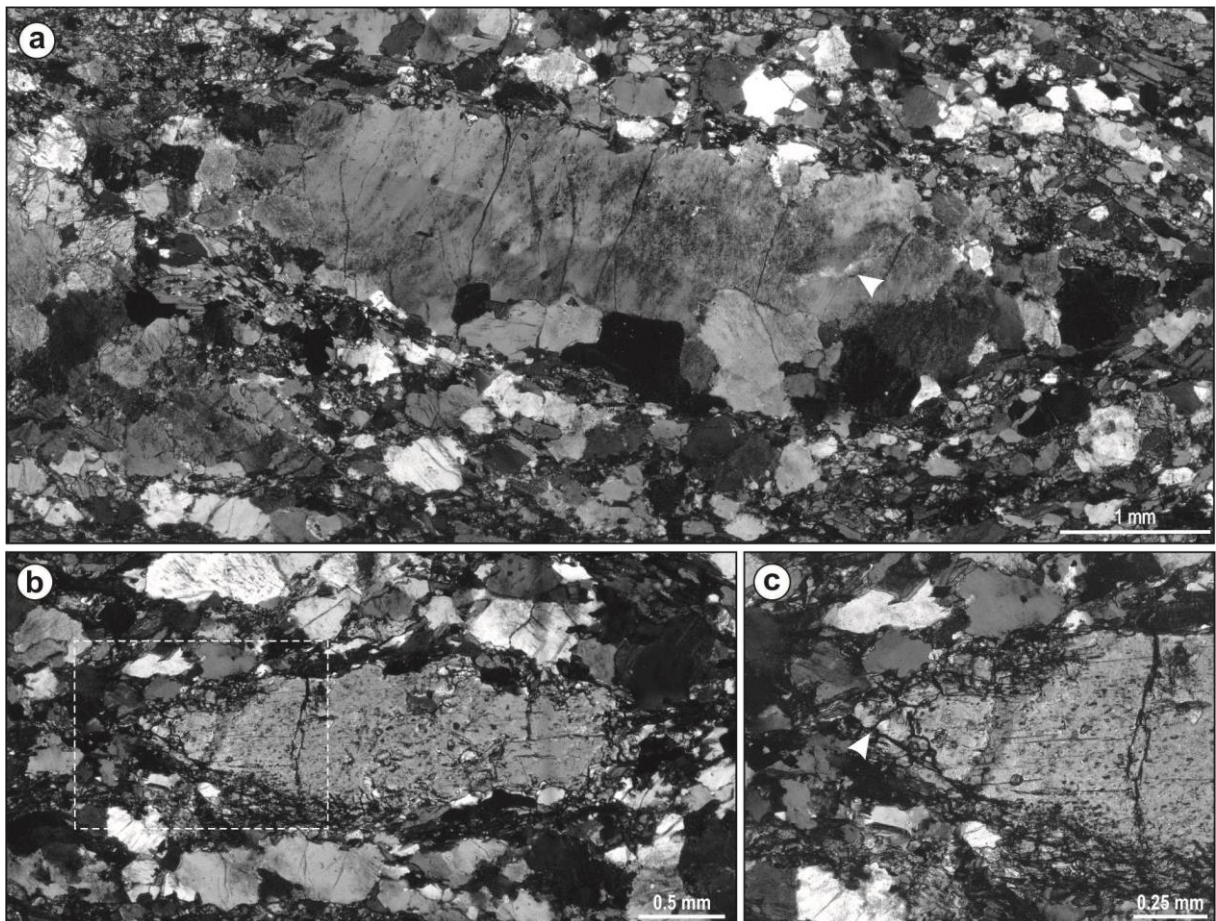


Figure 8 – Microstructural features of APS in dry high-strain zones. (a) Kfs porphyroclast with large subgrains and new grains formed by subgrain-boundary rotation recrystallization. Notice the relatively large size of recrystallized grains, and their preferential development along the porphyroclast lower longer boundary, while subgrains form at the tips. (b) Cpx porphyroclast with fine recrystallized grains at the tip, indicated by white arrow in detail (c). Dashed white rectangle indicates the area shown in (c).

Clinopyroxene grain size ranges from 0.5 to 2 mm, and the larger ones behave like porphyroclasts in the groundmass (Fig. 8b). The composition is similar to the one

obtained in the undeformed rock, $Wo_{44.5}En_{37.5}Fs_{17.1}Eg_{0.75}$, in average, and therefore slightly more magnesian than the primary ones (Fig. 5b). Cpx from DHSZ has locally developed recrystallized tails (Fig. 8c), with recrystallized grain size of about 0.1 mm and polygonal granoblastic texture. The recrystallized cpx also have the same composition of the parent grain. This microstructural record points to the high-temperature and low water content of the system during the deformation in dry zones.

Biotite from the dry zone is optically similar to the primary one as far as grainsize, inclusions and absorption colour are concerned, but has slight compositional differences. Its $Fe/(Fe + Mg)$ ratio is slightly lower than that of undeformed zone biotite (Fig. 5c), with values between 0.37 and 0.41, while $Al^{iv + vi}$ is slightly higher, ranging from ca. 2.3 to 2.5 a.f.u.. Ti contents are also comparable to primary biotites, from 0.32 to 0.53 a.f.u. Cl contents, on the other hand, are up to eight times lower than that of the primary crystals, with values from 0.010 to 0.024 a.f.u. (Fig. 5d)

5.2.3. *Microstructures and mineral composition of WHSZ*

In the WHSZ a mm-spaced, discontinuous banding is characterized by interspersed biotite-rich and quartz-feldspathic layers which surround porphyroclast systems, the latter being the main strain markers of the mylonitic rocks. Their asymmetric mantles and the angle between their long axes and the foliation indicate dextral shearing. Variable strain results in smaller porphyroclast systems or larger mantles, eventually resulting in fine-grained, granoblastic bands (Fig. 9).

5.3.2.1. *Porphyroclast systems and myrmekite mantles*

A porphyroclast system consists of a relict core of perthitic Kfs and a mantle of variable thickness where myrmekites replace Kfs preferentially along planes facing the foliation; coarse (up to 5 mm) plagioclase-quartz, graphic-like intergrowths may crystallize in strain shadows (Fig. 10a and b). Kfs ranges in composition from $Or_{88}Ab_{12}$ to $Or_{96}Ab_{04}$, whilst plagioclase from the mantle falls in two compositional groups of andesine (Fig. 5a). Myrmekitic plagioclase is An_{38-41} (green arrow in Fig. 10a), and graphic-like host plagioclase ranges from An_{42} to An_{48} (yellow arrow in Fig. 10a). Kfs cores are 1 to 20 mm in diameter and show virtually no intracrystalline deformation.

Therefore, undulose extinction or subgrains are only local and poorly-developed in

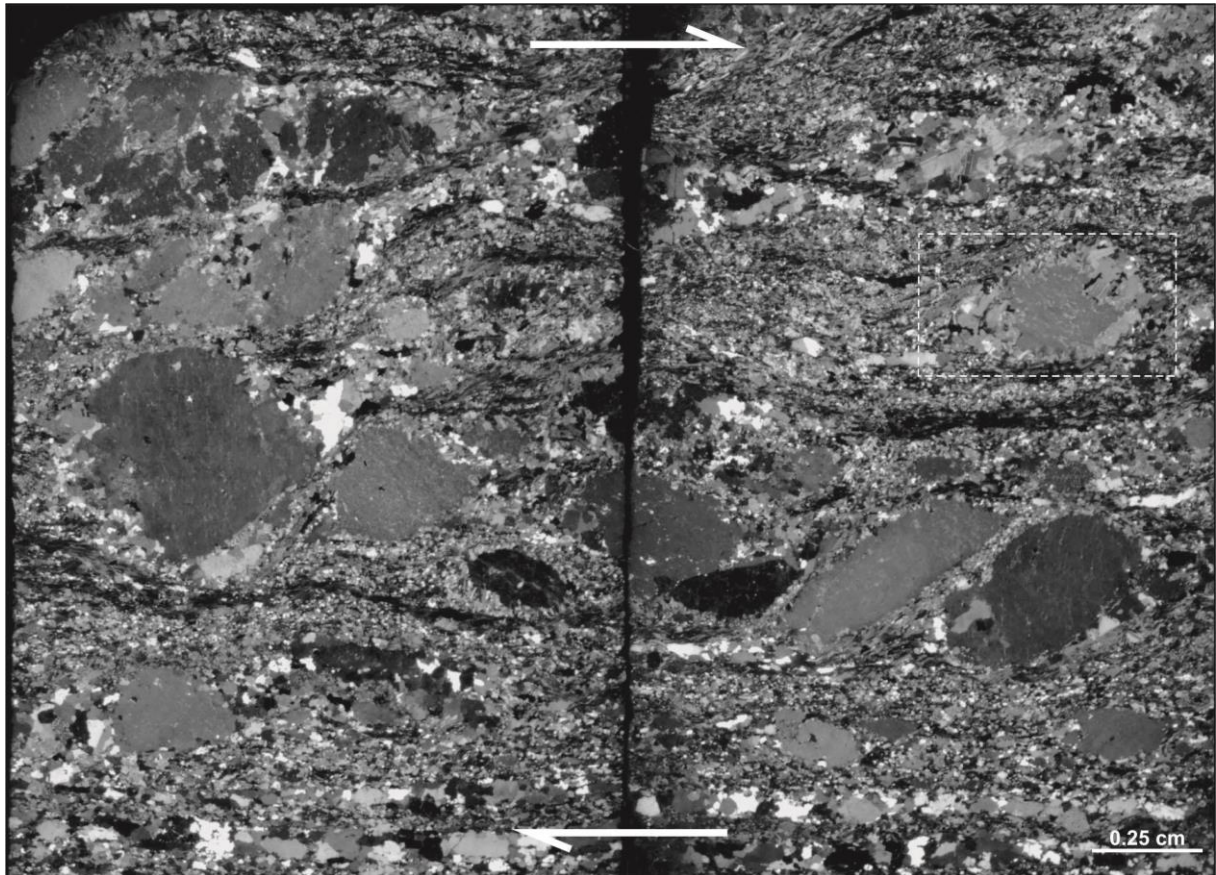


Figure 9 – Overview of two adjacent thin-sections scans in order to show porphyroclast-myrmekite mantle systems distribution and morphology. At the lower part of the photograph (quartz + plagioclase)-rich, mylonitic groundmass is dominant, whilst the upper part features different stages of myrmekite rim development around asymmetric porphyroclasts of dextral shear sense surrounded by the mylonitic foliation and mm-thick banding. Dashed rectangle indicates zoom area in figure 10.

these relict cores. Fractures parallel to cleavage planes are occasionally filled by quartz, secondary minerals, and more rarely, fine myrmekite. The irregular yellow patches within the reddish orange area near the Kfs core of figure 10b is due to Ca-rich white-micas, and the nearby plagioclase composition is albitic (blue arrow in Fig. 10a). Additionally, these minerals may form along the Kfs cleavages (right-hand side of Fig. 10). Such features are interpreted to result from the late-hydrothermal alteration of andesine.

Myrmekites nucleate preferentially along foliation-parallel faces, but may progressively develop into a full, usually thicker (up to 1.5 mm) rim, as shown in figure 11. Plagioclase from the myrmekite mantles is ca. 0.5 mm in size. Contacts between core and mantle are usually sinuous, as shown in the enlargement of figure

11b. The rim material may locally grow into the core along cleavage planes and other

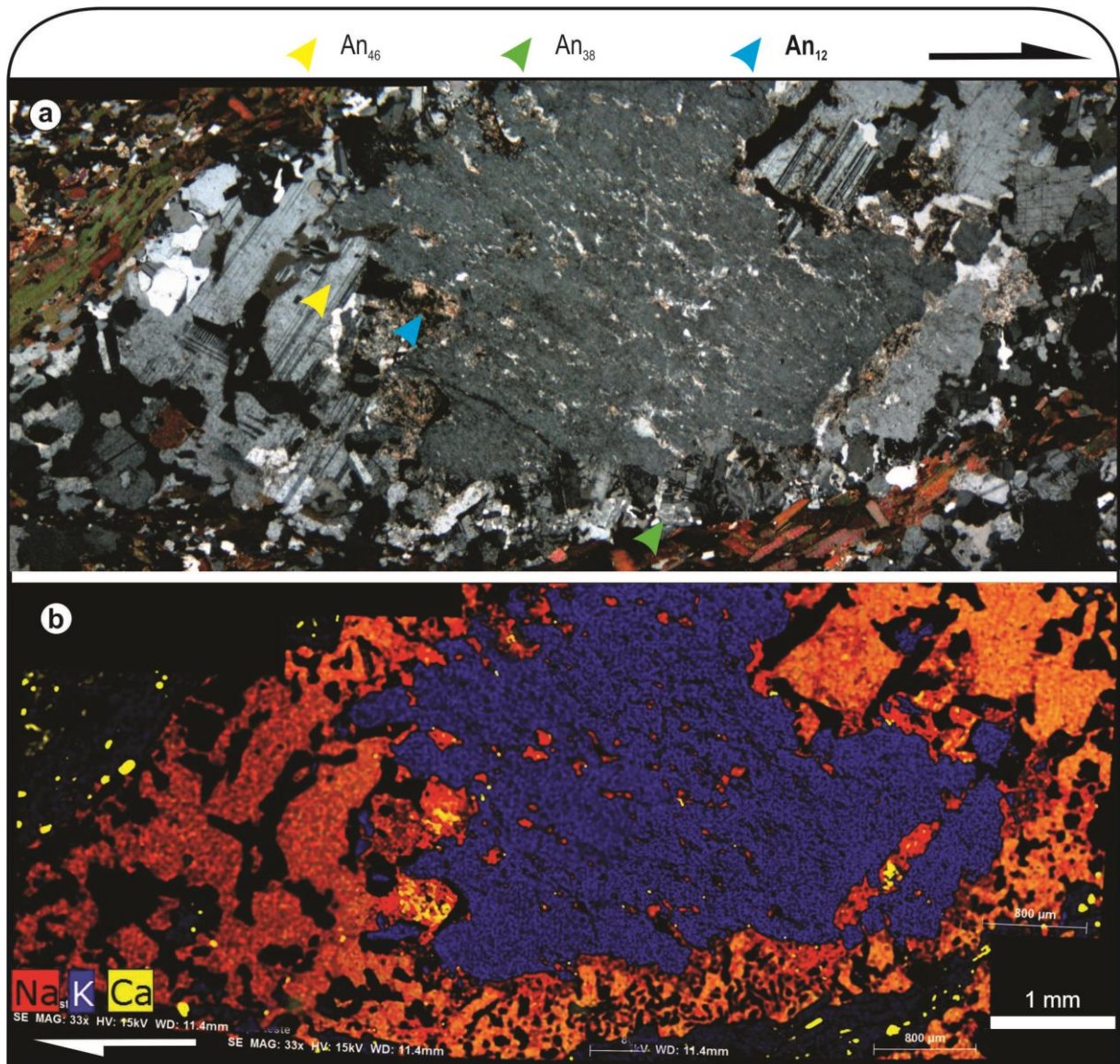


Figure 10– Photomicrograph (a) and SEM compositional map (b) of a Kfs porphyroclast (area indicated in figure 9) partially substituted by foliation-parallel myrmekite mantle and graphic-like coarse-grained aggregate of plagioclase and quartz crystallized in strain shadows. Black patches within orange areas in (b) are myrmekite, wormlike quartz grains in the central bottom part, and irregular coherent intergrowths within plagioclase of left and right strain shadows. Arrow colours in (a) indicate different plagioclase compositions obtained by microprobe analysis. Notice indented contact between porphyroclast core and mantle.

discontinuities, which suggests a percolative character of the replacement process. A gradation from myrmekite to a very fine-grained polygonal granoblastic texture is observed from the inner to the outer part of the rim, the incomplete process leading to coexistence of individual quartz blebs and granoblastic grains within the porphyroclast tail (Fig. 11b). Such features are suggestive of grain boundary migration (Passchier and Trouw, 2005) as a recrystallization mechanism for these finer grains.

The strain shadow, large plagioclase grains are anhedral and exhibit sutured contacts with the Kfs core. They form coherent intergrowths with irregular quartz grains that tend to alternately grow along different twin boundaries of the plagioclase (Fig. 10), and are thus considered as a type of graphic intergrowth. These graphic-like aggregates are also progressively recrystallized into the clast tails. An additional textural type of plagioclase is represented by subhedral grains (ca. 1 mm) of similar An content found preferentially in the myrmekitic mantles. (Fig. 11c). Both textures are suggestive of magmatic crystallization, which is reinforced by their common An content.

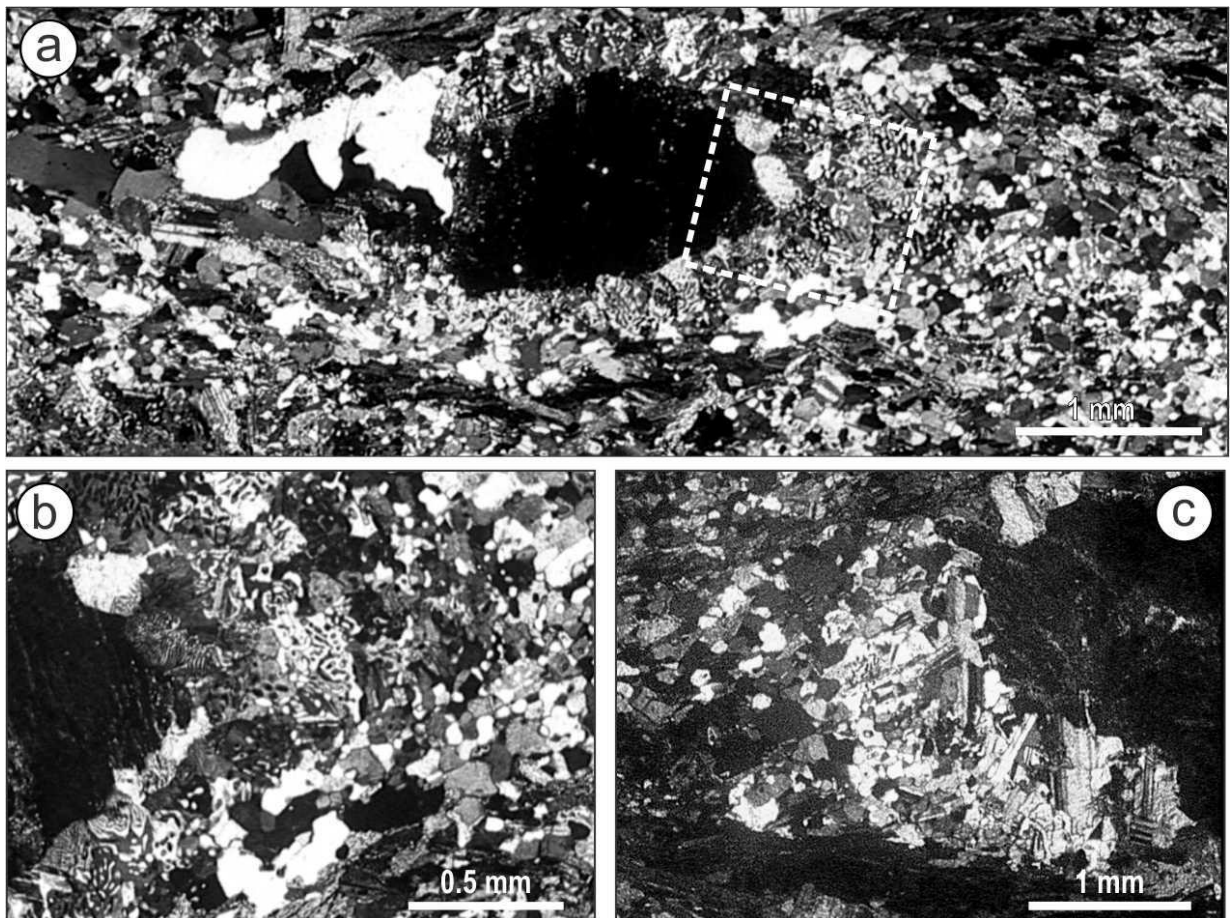


Figure 11 – Microstructural features from the wet zone mylonites. (a) Well-developed myrmekite mantle around Kfs porphyroclast, with dextral shear sense indicated by recrystallized tail asymmetry. Progression from myrmekite mantle to recrystallized tail is indicated by dashed rectangle and shown in detail (b). (c) Large euhedral plagioclase grains formed at the margin of Kfs core.

The progressive replacement of Kfs and recrystallization of the intergrowths described above sometimes lead to nearly complete substitution of the porphyroclasts by (quartz + plagioclase)-rich lenses of granoblastic aggregates (Fig. 12), which contribute to the observed mm-thick banding in thin section (Fig. 9) and

also forms thicker bands (lower part of Fig. 9), and eventually outcrop-scale bands (Fig. 6a).

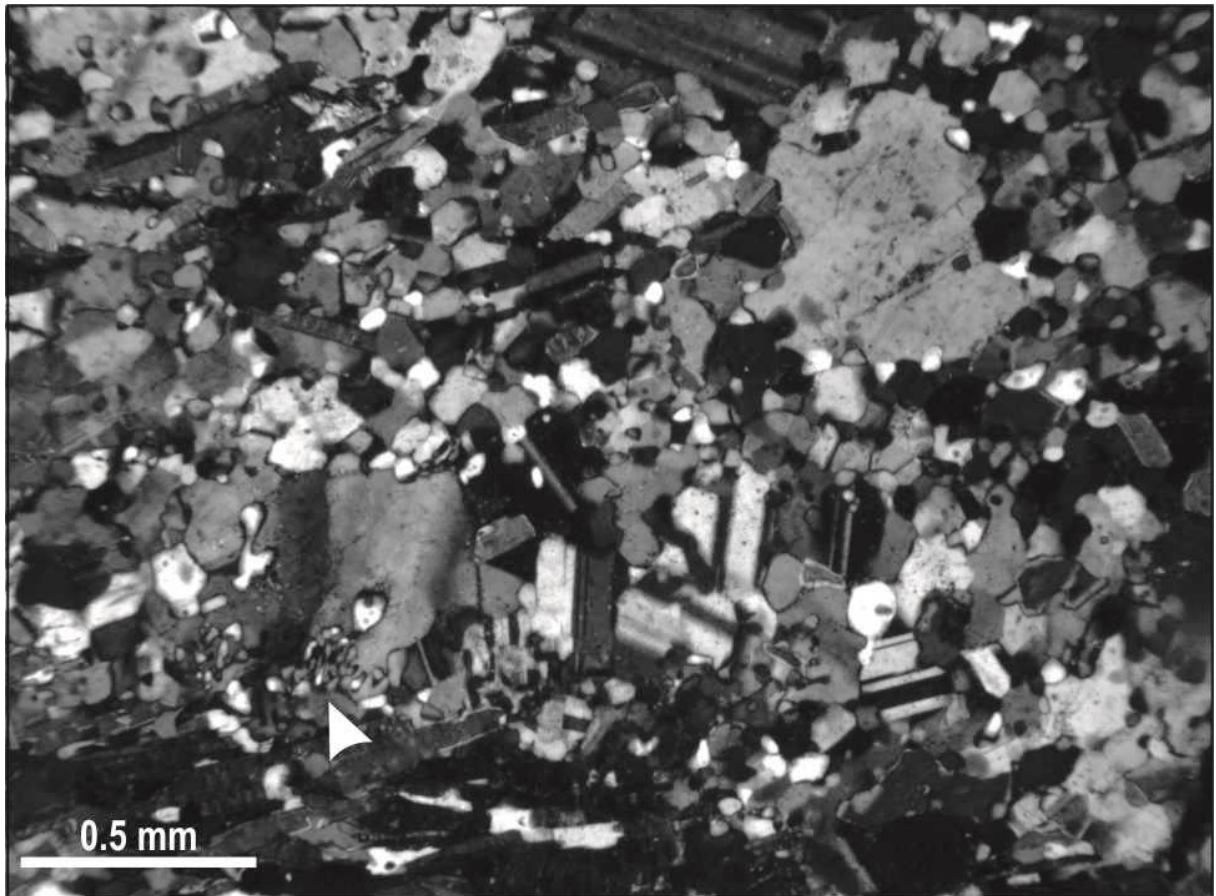


Figure 12 – Myrmekite relict (white arrow) in the very fine-grained (plagioclase + quartz)-rich mylonitic rock.

5.3.2.2. Biotite texture and composition of the WHSZ relative to that of other structural domains

Biotite is the main mafic phase from the WHSZ and occurs in two generations, separated initially by their texture. The primary-looking ones are dominant, with grain size, absorption colour and inclusions similar to the ones found in the undeformed and DHSZ counterparts. Their composition, if compared to the biotite from the other domains shows higher contents of Al^t (2.40 to 2.50) (Fig. 5c) with intermediate values of $Fe/(Fe+Mg)$ (0.38 to 0.42) and Cl (0.022 to 0.395) (Fig. 5d). The Ti content is compatible with those of undeformed and dry zone samples (0.28 to 0.44 a.f.u.).

The second generation of biotites is also well-aligned, but finer-grained (0.05 to 0.1 mm), and occurs either at the tips of strain shadows or as very fine trails in the recrystallized mantle, branching from the main foliation. It is in textural equilibrium

with recrystallized quartz and plagioclase grains (Fig. 11c). The composition of this finer biotite is approximately the same as that of the coarser ones (Fig. 5c and 5d)

Primary-looking and fine-grained biotites from the WHSZ and biotites from de DHSZ have parallel negative trends for $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ and Al^{\dagger} . They are both distinguished from biotites from the undeformed syenite by their lower $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ and higher Al^{\dagger} content, especially those from the WHSZ (Fig. 5c). The Cl content is the best discrimination parameter of biotites from different structural domain (Fig. 5d). It is highest in the undeformed rocks, with intermediate values in the WHSZ biotites and lowest in the DHSZ. A general positive trend of Cl with $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ contents is also apparent in this diagram.

6. Model for strain partitioning into dry and wet high-strain zones

During APS late-stage magmatic crystallization, the increased water activity combined with the strain-enhanced transport (Tullis *et al.*, 1996; Brown and Solar, 1998) of the residual magma through pre-existing foliations in high-strain zones was responsible for the de-stabilization and resorption of early-formed igneous cpx. The cpx dissolution released Ca^{++} to the liquid, and minor amounts of the cpx could have been replaced by amphibole, which would also release Ca^{++} . Kfs in turn, as the APS largest active marker, has promoted the concentration of liquid in surrounding dilatant sites and then became unstable under Ca-enriched conditions, being replaced by plagioclase plus quartz. Contrasting texture and microstructure, as well as slightly different composition of the newly formed plagioclase suggest two different kinds of interaction between the early-crystallized Kfs and the Ca-enriched, late-magmatic liquid. (i) Coupled dissolution of Kfs and crystallization of undeformed calcium-rich plagioclase (An_{42-48}) which forms either anhedral grains with graphic-like intergrowths or finer prismatic grains, which would have crystallized from the Ca-enriched melt. (ii) Direct replacement of Kfs by myrmekite with slightly more sodic plagioclase (An_{38-41}). The more sodic composition of the myrmekite plagioclase is probably due to a greater contribution of the sodic perthitic component in the replacement of Kfs. Mineral crystallization in dilatant sites was probably accompanied by the partial dissolution of the Kfs porphyroclast, since their core-mantle boundary is invariably sutured (Fig. 10). The K^+ ions expected to have been released during partial dissolution or replacement of Kfs could have been used to form second-generation biotite.

The presence of graphic-like texture in strain shadows suggests the water-rich condition of the late-magmatic liquid (Fenn, 1986) necessary to start cpx dissolution. Accordingly, the biotite Cl content in WHSZ is approximately twice that observed in DHSZ, which confirms the more significant role played by water in the first. The remaining late-magmatic water was also probably responsible for the local hydrothermal alteration of andesine to albite plus Ca-rich white mica.

With progressive strain both types of substitutional rims were stretched and recrystallized. The reworking/recrystallization of the mantles would probably demand less energy than the recrystallization of the original Kfs megacrysts due to their already polycrystalline character and to their previously reduced grain size.

Progressive deformation of the intergrowth mantle has effectively contributed to the genesis of the mylonitic foliation (as argued by Vernon, 1991), and together with a predicted volume reduction caused by the myrmekite-forming reaction (as demonstrated by Simpson and Wintsch, 1989, Menegon, 2006) has favoured the continuous inflow of water-rich magma. This has established a positive feedback between late-magmatic liquid inflow and strain softening in the wet zones, and promoted, in some cases, the complete replacement of Kfs by the replacement intergrowth rims. The end-member of this transformation in the APS was the generation of mm- to cm-thick bands of quartz-bearing ultramylonites of granodioritic modal composition where Kfs and myrmekite relicts are set in a very fine-grained granoblastic groundmass composed mainly of plagioclase plus quartz (Fig. 12), alternating with biotite-rich bands of approximately the same thickness (Fig. 9).

On the other hand, the areas neighbouring the wet zones were drained (or maintained dry) and became fluid-poor. The primary mineralogy was preserved and the deformation mechanisms were not influenced by the presence of melt in disequilibrium, but instead were controlled by the granulite-facies conditions. Kfs was recrystallized predominantly by subgrain-boundary rotation recrystallization. Clinopyroxene was also recrystallized, although to a lesser extent. The composition of DHSZ cpx porphyroclasts and recrystallization tails are virtually the same as in the undeformed syenite. Such result points toward compatible conditions of crystallization and recrystallization of the system, which is another piece of evidence for the syntectonic character of the APS.

Apart from the differences between wet and dry high-strain zones, the consistency of shear-sense indicators and the multiple evidences of syntectonic character of the magmatism indicates synchronous or progressive development of high-T deformation/crystallization in these different domains, thus indicating strain partitioning, with fluid-enhanced, highest strain concentration in the WHSZ.

In summary, both dissolution of cpx and replacement of Kfs (directly by mirmekite-forming reaction or by coupled dissolution and crystallization of andesine plus quartz from the late-magmatic liquid) have acted together through melt-assisted dissolution-replacement creep to transform the mineral composition of APS in the wet deformation zone, causing strain softening and a positive feedback with continuous water-rich magma inflow, whilst the adjacent rock volume was deformed under dry conditions.

7. Model constraints

In the studied case, more than one variable has contributed to allow melt-assisted dissolution-replacement creep to operate in the APS WHSZ. Among them, the high temperatures of granulite facies environment and the fertile composition of the ultrapotassic syenitic system, which have acted together to permit the development of the observed features.

The high temperature of the system might have been kept near the solidus for a time-span long enough to permit: i) the strain-assisted transport of the water-rich late-magmatic liquid throughout high-strain zones; and ii) the reequilibration of the early-crystallized phases (Kfs and cpx) by dissolution and replacement in the presence of this liquid. In this case, the granulite-facies conditions to which the wall rocks were submitted have favoured the slow-cooling of the magmatic system.

On the other hand, the fertile composition of the ultrapotassic syenite was determinant to permit these reequilibrium reactions. They are essentially due to the existence of an early crystallized anhydrous Ca-rich phase (cpx) and to the Ca-poor main mineral (Kfs). Both phases came into disequilibrium due to the percolation of water-rich, late-magmatic liquid and the consequent increase of Ca^{++} released from the first.

8. Final remarks

The compatibility of deformation between dry and wet high-strain zones of the APS is expressed by the concordance of structures and consistency of shear-sense indicators. Strain partitioning into dry and wet zones, and the fact that widespread myrmekite is restricted to the latter, demonstrates that in this case fluids are the necessary triggering factor to promote the formation of myrmekites. The Ca-rich composition of plagioclase from the studied myrmekites results from the Ca-rich nature of the percolating liquid, which in turn results from the de-stabilization of cpx.

The granulite-facies conditions may have contributed to maintain the temperature of the magmatic system near the solidus during a prolonged time. This factor helps to explain the re-equilibrium of early-crystallized varieties by water-rich late-magmatic liquids. The ultimate progression of this transformation process has locally produced granodioritic modal compositions from syenitic magmas by interaction of early-crystallized phases and water-rich, late-magmatic liquids under high-strain, high-T conditions.

Myrmekite genesis is accompanied by drastic grain-size reduction and volume decrease, which in turn assists fluid inflow. Pervasive myrmekite formation as a consequence of deformation coupled with late-magmatic liquid flow in syntectonic environments may contribute significantly to deformation partitioning and strain softening in the lower continental crust, thus expanding the field where dissolution-replacement creep operates. The proposed model may be able to account for significant changes in the lower-crust rheology.

Acknowledgements

We thank the Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), which gave us research support (MSc scholarship and Grants). We are also indebted to Laércio Dal Olmo Barbosa and Susan Drago for helping with the SEM and microprobe analytical procedures, respectively.

References

Almeida, F.F.M., 1966. Origem e evolução da plataforma brasileira. In: Anais, Segunda Semana de Debates Geológicos. Porto Alegre, Brasil, 46-89.

Almeida, F.F.M., Brito Neves, B.B. de, Carneiro, C.D.R., 2000. The origin and evolution of South American Platform. *Earth-Science Reviews* 50, 77-111.

Álvarez-Valero, A.M., Cesare, B., Kriegsman, L.M., 2005. Formation of elliptical garnet in a metapelitic enclave by melt-assisted dissolution and reprecipitation. *Journal of Metamorphic Geology* 23, 65-74.

Ashworth, J.R., 1972. Myrmekites of exsolution and replacement origins. *Geological Magazine* 109, 45-62.

Beach, A., 1982. Deformation mechanisms in some cover thrust sheets from the external French Alps. *Journal of Structural Geology* 4, 137-50.

Becke, F., 1908. Ueber Myrmekite. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen* 27, 377-390.

Bitencourt, M.F., Nardi, L.V.S., 2000. Tectonic setting and sources of magmatism related to the Southern Brazilian Shear Belt. *Brazilian Journal of Geology* 30, 186-189.

Bitencourt, M.F., De Toni, G. B., Florisbal, L. M., Martil, M. M. D., Niessing, M., Gregory, T. R., Nardi, L.V.S., Heaman, L.M., Dufrane, S.A., 2011. Structural geology and U-Pb age of unusual Neoproterozoic syn-collisional syenite-tonalite association from southernmost Brazil. In: *Seventh Hutton Symposium on Granites and Related Rocks, Abstracts Book, Universidad de Salamanca, Avila, 21.*

Bitencourt, M.F., Nardi, L.V.S., De Toni, G.B., Florisbal, L.M., 2013. Neoproterozoic late to post-collisional, quartz-bearing ultrapotassic syenites from southernmost Brazil. In: *Goldschmidt2013, Conference Abstracts, Florence, 710.* doi:10.1180/minmag.2013.077.5.2

Brown, M., Solar, G.S., 1998. Shear-zone systems and melts: feedback relations and self-organization in orogenic belts. *Journal of Structural Geology* 20, 211-227.

Dymek, R.F., Schiffries, C.M., 1987. Calcic myrmekite: possible evidence for the involvement of water during the evolution of andesine anorthosite from St-Urbain, Quebec. *Canadian Mineralogist* 25, 291-319.

- Efimov, A.A., Flerova, K.V., Maegov, V.I., 2010. The first find of calcic myrmekite (Quartz-plagioclase symplectites) in Uralian Gabbro. *Doklady Akademii Nauk*, 435, 81-84.
- Etheridge, M.A., Wall, V.J., Vernon, R.H., 1983. The role of fluid phase during regional metamorphism and deformation. *Journal of Metamorphic Geology*, 1, 205-226.
- Fenn, P.M., 1986. On the origin of graphic granite. *American Mineralogist* 71, 325-330.
- Fragoso-Cesar, A.R.S., 1980. O Cráton Rio de La Plata e o Cinturão Dom Feliciano no Escudo Sul-riograndense. IN: Congresso Brasileiro de Geologia, 31. SBG, V.5, Balneário Camboriú, 2979-2892.
- Fernandes, L.A.D. Menegar, R., Costa, A.F.U., Koester, E., Porcher, C.C., Tommasi, A., Kraemer, G., Ramgrab, G.E., Camozzato, E., 1995. Evolução tectônica do Cinturão Dom Feliciano no Escudo Sul-rio-grandense: Parte I – Uma contribuição a partir do registro geológico. *Brazilian Journal of Geology* 25, 351-374.
- Hartmann, L.A., Chemale Jr., F., Philipp, R.P., 2007a. Evolução Geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano. In: Ianuzzi, E.R., Frantz, J.C. (Eds.), 50 ano de Geologia: Instituto de Geociências. Contribuições. Comunicação e Identidade, Porto Alegre, 97-123.
- Hartmann, L.A., Santos, J.O.S., Philipp, R.P., McNaughton, N.J., 2011. Time frame of 753-680 Ma juvenile accretion during São Gabriel orogeny, southern Brazil. *Gondwana Research* 19, 84-99.
- Jost, H., Bitencourt, M.F., 1980. Estratigrafia e tectônica de uma fração da Faixa de Dobramentos Tijucas no Rio Grande do Sul. *Acta Geologica Leopoldensia*, 4(7), 27-60.
- Kruhl, J.H., 1996. Prism- and basal-plane parallel subgrain boundaries in quartz: a microstructural geothermobarometer. *Journal of Metamorphic Geology*, 14, 581-589.
- Lal, S.N., 1995. Activity of water during granulite metamorphism around Anakapalle, Vishakhapatnam District, A.P. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences (Earth and Planetary Sciences)*, 104, 79-84.

Mainprice, D.; Bouchez, J.L.; Blumenfeld, P. & Tubia, J.M. 1986. Dominant c slip in naturally deformed quartz: implications for dramatic plastic softening at high temperature. *Geology*, 14:819-822.

Martil, M.M.D., Bitencourt, M.F., Nardi, L.V.S., 2011. Caracterização estrutural e petrológica do magmatismo pré-colisional do Escudo Sul-rio-grandense: os ortognaisses do Complexo Metamórfico Várzea do Capivarita. *Pesquisas em Geociências*, 38, 181-201. ISSN 1518-2398.

Martil, M.M.D., Bitencourt, M.F., Armstrong, R., Nardi, L.V.S., Chemale Jr., F. Geochronology of orthogneisses from the Várzea do Capivarita Complex thrust pile and implications for the timing of continental collision in southernmost Brazil. *Precambrian Research* (submitted).

Menegon, L., Pennacchioni, G., Stünitz, H., 2006. Nucleation and growth of myrmekite during ductile shear deformation in metagranites. *Journal of Metamorphic Geology*, 24, 553-568.

Menegon, L., Pennacchioni, G., Spiess, R., 2008. Dissolution-precipitation creep of K-feldspar in mid-crustal mylonites. *Journal of Structural Geology*, 30, 565-579.

Morimoto, N., 1988. Nomenclature of Pyroxenes. *Mineralogical Magazine*, 52, 535-550.

Mukai, H., Austrheim, H., Putnis, C.V., Putnis, A., 2014. Textural evolution of Plagioclase Feldspar across a shear zone: Implications for Deformation Mechanism and Rock Strength. *Journal of Petrology*, 55, 1457-1477.

Niessing, M.; Bitencourt, M.F.; Kruhl, J.H. & Vlach, S.R.F. 2011. Sillimanite-bearing, S-type granite from post-collisional environment in southern Brazil. In: Seventh Hutton Symposium on Granites and Related Rocks, Avila, Spain, July 4-9 2011. Abstracts Book, Universidad de Salamanca, Avila p. 109.

Passchier, C.W., Trouw, R.A.J., 2005. *Micro-tectonics* (2nd ed.), Springer-Verlag, Heidelberg.

Philipp, R.P., Machado, R., 2005. The Late Neoproterozoic granitoid magmatism of the Pelotas Batholith, southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 19, 461-478.

- Philipp, R.P., Machado, R., Nardi, L.V.S., Lafon, J.M., 2002. O Magmatismo Granítico Neoproterozóico do Batólito Pelotas no sul do Brasil: Novos dados e revisão da Geocronologia regional. *Brazilian Journal of Geology*, 32, 277-290.
- Phillips, E. R., 1974. Myrmekite – one hundred years later. *Lithos*, 7, 181-194.
- Phillips, E.R., 1980. On polygenetic myrmekite. *Geological Magazine*, 117, 29-36.
- Schwantke, A., 1909. Die beimischung von Ca in Kalifeldspat und die Myrmekitbildung. *Zentralblatt für Geologie und Palaontologie*, 311-316.
- Simpson, C., Wintsch R.P., 1989. Evidence for deformation-induced K-feldspar replacement by myrmekite. *Journal of Metamorphic Geology*, 7, 261-275.
- Smith, J.V., Brown, W.L., 1988. *Feldspar Minerals (2nd ed.)*, vol. 1. Springer-verlag, Heidelberg.
- Tsurumi, J., Hosonuma, H., Kanagawa, K., 2003. Strain localization due to a positive feedback of deformation and myrmekite-forming reaction in granite and aplite mylonites along the Hatagawa Shear Zone of NE Japan. *Journal of Structural Geology*, 25, 557-574.
- Tullis, J., Yund, R., Farver, J., 1996. Deformation-enhanced fluid distribution in feldspar aggregates and implications for ductile shear zones. *Geology*, 24, 63-66.
- Wintsch, R.P., Yi K., 2002. Dissolution and replacement creep: a significant deformation mechanism in mid-crustal rocks. *Journal of Structural Geology*, 24, 1179-1193.
- Vernon, R.H., 1991. Questions about myrmekite in deformed rocks. *Journal of Structural Geology*, 13, 979-985.
- Vernon, R.H., 2004. *A practical guide to Rock Microstructure*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Voll, G., 1960. New work on petrofabrics. *Liverpool and Manchester Geological Journal*, 2, 521-525.

CAPÍTULO V

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A compatibilidade de composições químicas entre as fases máficas ígneas e recristalizadas analisadas no Sienito Arroio das Palmas é mais um indício que soma-se para a confirmação do seu caráter sintectônico.

A ocorrência no Sienito Arroio das Palmas de mirmequitas do tipo *swapped rims*, cujo plagioclásio tem composição e orientação compatível com a das lamelas de pertitas, é localizada e restrita aos sienitos indeformados e deformados à seco, o que indica que a sua origem foi por exsolução. Isto contrapõe-se à ocorrência de mirmequitização penetrativa nos sienitos deformados à úmido, cujo plagioclásio hospedeiro é andesina. O caráter penetrativo, em que pese que por vezes ocorre a substituição completa do K-feldspato, e a composição modestamente cálcica, indicam que a mirmequitização penetrativa das zonas de alta deformação úmidas necessariamente ocorreu por reação de substituição, ainda que o componente albita da pertita possa ter sido absorvido pela reação.

A compatibilidade da deformação entre zonas de alta deformação secas e úmidas do Sienito Arroio das Palmas é expressa pela concordância das estruturas e consistência de indicadores cinemáticos. A partição da deformação entre zonas secas e úmidas, e o fato de que a mirmequitização penetrativa é restrita à zonas úmidas, demonstram que, no caso estudado, os fluidos são o fator necessário para desencadear a formação de mirmequitas. A composição cálcica dos plagioclásios destas mirmequitas resulta da natureza cálcica do líquido responsável pela reação de substituição, o que por sua vez é fruto da instabilização (dissolução) do clinopiroxênio precocemente formado por este líquido, enriquecido em água no seu estágio tardi-magmático.

As condições da fácies granulito devem ter contribuído para a manutenção da temperatura do sistema magmático próxima da *solidus* durante um tempo prolongado. Este fator ajuda a explicar o reequilíbrio de minerais cristalizados

precocemente por um líquido tardi-magmático. O membro-final desta transformação de fases por interações com este líquido é uma rocha de composição modal granodiorítica, que contém relictos mirmequíticos e é formada localizadamente, na forma de bandas mm- a cm- em zonas de altíssima deformação, ora intercalada com bandas ricas em biotita.

Estudos preliminares de geoquímica de rocha total (Bitencourt *et al.* 2013) não delinearam qualquer diferença geoquímica significativa entre amostras das zonas secas e úmidas. Futuros trabalhos, com base no modelo proposto, podem ser conduzidos para procurar delimitar até que escala pode-se considerar que o sistema se manteve fechado, visto que na escala mineral ele se comportou como um sistema aberto.

A gênese da mirmequita é intrinsecamente acompanhada por redução drástica do tamanho de grão e diminuição de volume, ambos fatores facilitadores da percolação de fluidos. A formação penetrativa de mirmequitas como consequência da deformação acompanhada pela percolação de líquidos tardi-magmáticos em ambientes magmáticos sintectônicos pode contribuir significativamente com a partição da deformação e o *strain softening* na base da crosta. Com isto, expande-se o campo de atuação de *dissolution-replacement creep*. A ocorrência do modelo proposto na natureza pode ser responsável por mudanças significativas da reologia da base da crosta.

Considerando-se que o mecanismo de deformação por *melt-assisted dissolution-replacement creep* já foi descrito em rochas de fácies granulito, como simultâneo a sua fusão parcial (Álvares-Valero, 2005), questiona-se: Seria o modelo proposto, de retro-alimentação positiva entre a deformação por *melt-assisted dissolution-replacement creep* (envolvendo mirmequitização ou não), *strain softening* e o influxo de magma rico em fluidos, adaptável a uma trajetória temperatura ascendente, quando a fusão parcial estaria ocorrendo em rochas ou terrenos migmatíticos?

REFERÊNCIAS

- Álvares-Valero, A.M., Cesare, B., Kriegsman, L.M., 2005. Formation of elliptical garnet in a metapelitic enclave by melt-assisted dissolution and reprecipitation. *Journal of Metamorphic Geology* 23, 65-74.
- Ashworth, J.R., 1972. Myrmekites of exsolution and replacement origins. *Geological Magazine* 109, 45-62.
- Austrheim *et al.* 1997
- Beach, A., 1982. Deformation mechanisms in some cover thrust sheets from the external French Alps. *Journal of Structural Geology* 4, 137-50.
- Becke, F., 1908. Ueber Myrmekite. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen* 27, 377-390.
- Bitencourt, M. F. 1996. Granitóides sintectônicos da região de Porto Belo, SC: uma abordagem petrológica e estrutural do magmatismo em zonas de cisalhamento. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 310 p.
- Bitencourt, M.F., De Toni, G. B., Florisbal, L. M., Martil, M. M. D., Niessing, M., Gregory, T. R., Nardi, L.V.S., Heaman, L.M., Dufrane, S.A., 2011. Structural geology and U-Pb age of unusual Neoproterozoic syn-collisional syenite-tonalite association from southernmost Brazil. In: Seventh Hutton Symposium on Granites and Related Rocks, Abstracts Book, Universidad de Salamanca, Avila, 21.
- Bitencourt, M.F., Nardi, L.V.S., De Toni, G.B., Florisbal, L.M., 2013. Neoproterozoic late to post-collisional, quartz-bearing ultrapotassic syenites from southernmost Brazil. In: Goldschmidt2013, Conference Abstracts, Florence, 710.
doi:10.1180/minmag.2013.077.5.2
- Brown, M., Solar, G.S., 1998. Shear-zone systems and melts: feedback relations and self-organization in orogenic belts. *Journal of Structural Geology* 20, 211-227.
- Carter, N.L., Kronenberg, A.K., Ross, J.V., Wiltschko, D.V., 1990. Control of fluids on deformation of rocks. In: Knipe, R.J., Rutter, E.H. *Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics*. Geological Society Special Publication, 54, 1-13.
- Collins, L.G., 2001. Scientific errors that can result when myrmekite and geologic evidence are ignored. *Myrmekite and metassomatic granite* 39, ISSN 1526-5757.
<http://www.csun.edu/~vcgeo005/>

- De Paor, D.G., 1996. Bézier Curves and Geological Design. In: De Paor, D.G., Structural Geology and Personal Computers. Pergamon Press, Oxford.
- De Toni, 2012. Análise da Deformação dos Sienitos Sintectônicos do Complexo Várzea do Capivarita. *Monografia de Conclusão de Curso*, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, UFRGS. 63p.
- Dymek, R.F., Schiffries, C.M., 1987. Calcic myrmekite: possible evidence for the involvement of water during the evolution of andesine anorthosite from St-Urbain, Quebec. *Canadian Mineralogist* 25, 291-319.
- Efimov, A.A., Flerova, K.V., Maegov, V.I., 2010. The first find of calcic myrmekite (Quartz-plagioclase symplectites) in Uralian Gabbro. *Doklady Akademii Nauk*, 435, 81-84.
- Etheridge, M.A., Wall, V.J., Vernon, R.H., 1983. The role of fluid phase during regional metamorphism and deformation. *Journal of Metamorphic Geology*, 1, 205-226.
- Lal, S.N., 1995. Activity of water during granulite metamorphism around Anakapalle, Vishakhapatnam District, A.P. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences (Earth and Planetary Sciences)*, 104, 79-84.
- Martil, M. M. D. 2007. Relações de intrusão do Maciço Sienítico Piquiri, RS com suas Encaixantes. *Monografia de Conclusão de Curso*, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 63 p.
- Martil, M.M.D., Bitencourt, M.F., Nardi, L.V.S., 2011. Caracterização estrutural e petrológica do magmatismo pré-colisional do Escudo Sul-rio-grandense: os ortognaisses do Complexo Metamórfico Várzea do Capivarita. *Pesquisas em Geociências*, 38, 181-201. ISSN 1518-2398.
- Menegon, L., Pennacchioni, G., Stünitz, H., 2006. Nucleation and growth of myrmekite during ductile shear deformation in metagranites. *Journal of Metamorphic Geology*, 24, 553-568.
- Menegon, L., Pennacchioni, G., Spiess, R., 2008. Dissolution-precipitation creep of K-feldspar in mid-crustal mylonites. *Journal of Structural Geology*, 30, 565-579.
- Michel-Lévy, A., 1875. De quelques caractères microscopiques des roches anciennes acides, considérés dans leurs relations avec l'âge des éruptions. *Soc. Géol. De France Bull.* 3rd, 3, 199-236.

- Mukai, H., Austrheim, H., Putnis, C.V., Putnis, A., 2014. Textural evolution of Plagioclase Feldspar across a shear zone: Implications for Deformation Mechanism and Rock Strength. *Journal of Petrology*, 55, 1457-1477.
- Nardi, L.V.S., 2011. Propriedades emergentes, sistemas e evolução no mundo mineral. Monografia de curso de especialização. Pontifícia Universidade Católica, Porto Alegre, 51p.
- Neves, S.P., Vauchez, A., Arcanjo, C.J., 1996. Shear-zone controlled magma emplacement or magma-assisted nucleation of shear-zones? Insights from northeast Brazil. *Tectonophysics*, 262, 349-364.
- Niessing, M.; Bitencourt, M.F.; Kruhl, J.H. & Vlach, S.R.F. 2011. Sillimanite-bearing, S-type granite from post-collisional environment in southern Brazil. In: Seventh Hutton Symposium on Granites and Related Rocks, Avila, Spain, July 4-9 2011. Abstracts Book, Universidad de Salamanca, Avila p. 109.
- Ortoleva, P.J., 1994. Geochemical self-organization. Oxford University Press, New York.
- Paterson, S.R., Tobisch, O., T., Vernon, R.H., 1989. Criteria for establishing the relative timing of pluton emplacement and regional deformation. *Geology*, 17, 475-476.
- Phillips, E. R., 1974. Myrmekite – one hundred years later. *Lithos*, 7, 181-194.
- Putnis, A., Austrheim, H., 2010. Fluid-induced processes: metasomatism and metamorphism. *Geofluids*, 10, 254-269.
- Schwantke, A., 1909. Die beimischung von Ca in Kalifeldspat und die Myrmekitbildung. *Zentralblatt für Geologie und Palaontologie*, 311-316.
- Shippley, T.F., Tikoff, B., Ormand, C., Manduca, C., 2013. Structural Geology practice and learning, from the perspective of cognitive science. *Journal of Structural Geology*, 54, 72-84.
- Simpson, C., Wintsch R.P., 1989. Evidence for deformation-induced K-feldspar replacement by myrmekite. *Journal of Metamorphic Geology*, 7, 261-275.
- Smith, J.V., Brown, W.L., 1988. Feldspar Minerals (2nd ed.), vol. 1. Springer-verlag, Heidelberg.
- Soustelle, V., Tommasi, A., Demouchy, S., Ionov, D.A., 2010. Deformation and Fluid-Rock Interaction in the Supra-subduction Mantle: Microstructures and Water

Contents in Peridotite Xenoliths from the Avacha Volcano, Kamchatka. *Journal of Petrology*, 51, 363-394.

Stern, R.J., 2007. When and how did Plate Tectonics begin? Theoretical and empirical considerations. *Chinese Science Bulletin*, 52, 578-591.

Tsurumi, J., Hosonuma, H., Kanagawa, K., 2003. Strain localization due to a positive feedback of deformation and myrmekite-forming reaction in granite and aplite mylonites along the Hatagawa Shear Zone of NE Japan. *Journal of Structural Geology*, 25, 557-574.

UFRGS 2008. *Mapeamento Geológico 1:25 000 de parte das folhas Passo das Canas SH22-Y-A-III-4 (MI2984/4) e Capané SH 22-Y-A-III-3 (MI2984/3), RS*. Porto Alegre. 1 vol., 2 mapas. Curso de Geologia. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Wintsch, R.P., Yi K., 2002. Dissolution and replacement creep: a significant deformation mechanism in mid-crustal rocks. *Journal of Structural Geology*, 24, 1179-1193.

Vernon, R.H., 1991. Questions about myrmekite in deformed rocks. *Journal of Structural Geology*, 13, 979-985.

ANEXO A

Assunto Submission Confirmation

Remetente Journal of Structural Geology <editor@mail-jsg.org>

Para <gdetoni@ufrgs.br>, <jepetostoned@gmail.com>

Data 2015-01-28 16:47

Original Research Article

Dear Mr. Giuseppe Betino De Toni,

Your submission entitled "Strain partitioning into dry and wet zones and the formation of Ca-rich myrmekite in syntectonic syenites: a case for melt-assisted dissolution-replacement creep under granulite facies conditions" has been received by the Journal of Structural Geology.

You may check on the progress of your paper by logging on to the Elsevier Editorial System as an author. The URL is <http://ees.elsevier.com/sg/>.

Your username is: gdetoni@ufrgs.br

If you need to retrieve password details, please go to:

http://ees.elsevier.com/SG/automail_query.asp

Your manuscript will be given a reference number once an Editor has been assigned.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,

Elsevier Editorial System
Journal of Structural Geology

ANEXO B


AGU FALL MEETING
San Francisco | 15–19 December 2014

Strain Partitioning into Dry and Wet Zones, and the Formation of Calcic Myrmekites in Syntectonic Syenites During High-T Crystallization/Deformation

Giuseppe Betino De Toni, Maria de Fatima Bitencourt and Lauro V. S. Nardi, UFRGS Federal University of Rio Grande du Sul, Rio Grande, Brazil

Abstract:

Myrmekites are fine intergrowths of (generally Na-rich) plagioclase and vermicular quartz developed on K-feldspar. The myrmekite-forming reaction is intimately related to deformation as it results in volume decrease and finer grain size, thus enhancing plastic behaviour. In south Brazil, myrmekites are described in 642 Ma syntectonic syenites intrusive in a ca. 650 Ma collisional thrust pile comprised of granulite-facies gneisses. Syenites are porphyritic or fine-grained equigranular, with biotite, clinopyroxene (Cpx) and amphibole as mafic phases. They are variably deformed, and disposed in alternating m- to cm-thick layers. Within low-strain zones, well-developed magmatic foliation and lineation are marked by shape alignment of K-feldspar (Kf) and mafic minerals. Subgrains and recrystallized grains (ca. 0.5 mm) are common features at the border of Kf megacrysts, developed to different degrees. In highly deformed sites, the strain softening promoted by the inflow of late-magmatic fluids has led to deformation partitioning into wet and dry zones, where different end-products are formed from a single syenite protolith. Within the dry zones, high-T recrystallization is abundant in both Kf and Cpx, but primary mineralogy is preserved. Within the wet zones the rock contains biotite and minor amphibole, but no Cpx. Kf megacrysts are progressively invaded by myrmekite (An_{38-43}) mantles, especially along foliation-parallel faces. In their pressure shadows, 5mm-sized, subhedral plagioclase crystals (An_{44-48}) containing irregular quartz inclusions are interpreted as crystallized from Ca-enriched, late-magmatic fluids which have destabilized Cpx. Large plagioclase crystals and myrmekite aggregates are further recrystallized, and the process has eventually led to the formation of plagioclase-rich rocks restricted to m-thick bands. Deformation partitioning into dry and wet zones, and the fact that myrmekites are restricted to the latter demonstrate that fluids are the necessary triggering factor to promote mineral changes. Pervasive myrmekite formation as a consequence of deformation coupled with late-magmatic fluid flow in syntectonic environments may contribute significantly to deformation partitioning and strain softening in the lower continental crust.

 Back to: [Ductile Deformation in the Lithosphere: Fabrics, Rheology, and Physical Properties | Posters](#)

 SEARCH KEYWORDS

 SEARCH SESSIONS

 SEARCH CONVENER/AUTHOR NAME

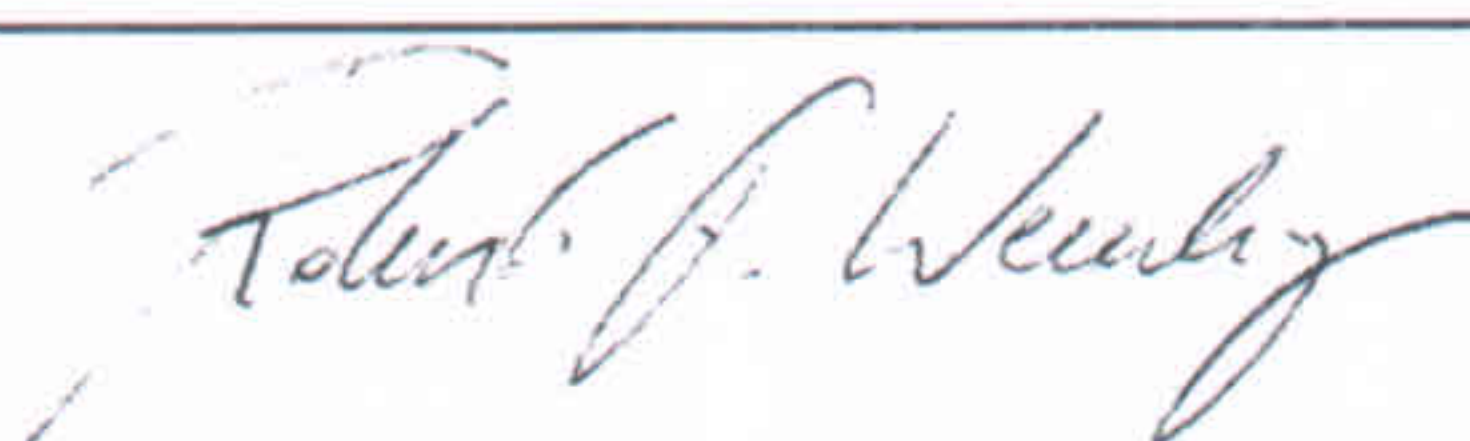
 LOGIN

[AGU.org](#) | [About AGU](#) | [About the AGU Fall Meeting](#) | [AGU Meetings](#) | [FAQs](#) | [Sitemap](#) | © 2014 American Geophysical Union. All Rights Reserved.

AGU galvanizes a community of Earth and space scientists that collaboratively advances and communicates science and its power to ensure a sustainable future.

ANEXO I
Título da Dissertação/Tese:
“MIRMEQUITIZAÇÃO PENETRATIVA E A PARTIÇÃO DA DEFORMAÇÃO EM SIENITOS SINTECTÔNICOS: CRISTALIZAÇÃO-DEFORMAÇÃO DO SIENITO ARROIO DAS PALMAS SOB CONDIÇÕES DE FÁCIES GRANULITO EM REGIME TRANSPRESSIVO”
Área de Concentração: GEOQUÍMICA
Autor: GIUSEPPE BETINO DE TONI
Orientadora: Profa. Dra. Maria de Fátima Aparecida Saraiva Bitencourt
Examinador: Prof. Dr. Roberto Weinberg
Data: 11 Fevereiro 2015
Conceito: Excelente
PARECER:
<p>Esta tese é o resultado de uma pesquisa microestrutural detalhada em sienitos. O candidato demonstra excelente nível técnico e capacidade de observação e análise, assim como de escrever os resultados sucinta e claramente tanto em português como inglês. Na minha avaliação esta é uma tese excelente e o candidato deve ser parabenizado.</p> <p>A tese me impressionou muito, mais do que nada pela capacidade demonstrada pelo candidato de observação em detalhe e de interpretações claras e precisas. No meu parecer os resultados tem um nível excelente, ao par com os melhores artigos internacionais publicados no assunto. Não tenho dúvida que o artigo em inglês submetido ao Journal of Structural Geology será publicado. Além do ótimo nível técnico o artigo está muito bem escrito tanto em termos de clareza de estilo e gramática, e nisto também o candidato merece os parabéns.</p> <p>A interpretação dos resultados é madura e bem baseada nos dados, e define um feedback interessante entre a entrada de líquidos magmáticos ricos em água que gera disequilíbrio dos minerais existentes que reagem entre si para gerar novas minerais com novas microestruturas. O processo reduz o volume da rocha permitindo a entrada de mais líquidos magmáticos dando continuidade ao processo. A minha única crítica à parte científica é que seria interessante discutir interpretações alternativas: quais outros processos poderiam explicar as características das rochas? Eu me pergunto também se o processo de adição de líquidos magmáticos em parte da rocha (a “wet high strain zone”) não teria causado mudanças mensuráveis na composição química da rocha?</p> <p>O texto em inglês, apesar de muito bem escrito, necessita de uma retrabalhada para que a mensagem se torne mais acessível. A adição de uma figura final resumindo os resultados ajudaria.</p> <p>Congratulo o candidato por uma tese excelente e um trabalho bem feito.</p>

Assinatura:



Data: 11 Fevereiro 2015

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

ANEXO I
Título da Dissertação/Tese:
“MIRMEQUITIZAÇÃO PENETRATIVA E A PARTIÇÃO DA DEFORMAÇÃO EM SIENITOS SINTECTÔNICOS: CRISTALIZAÇÃO-DEFORMAÇÃO DO SIENITO ARROIO DAS PALMAS SOB CONDIÇÕES DE FÁCIES GRANULITO EM REGIME TRANSPRESSIVO”
Área de Concentração: GEOQUÍMICA
Autor: GIUSEPPE BETINO DE TONI
Orientadora: Profa. Dra. Maria de Fátima Aparecida Saraiva Bitencourt
Examinador: Dr. Luiz Fernando Grafulha Morales
Data: 09/02/2015
Conceito: A (Excelente)
PARECER:
<p>O trabalho de Mestrado apresentado pelo aluno Giuseppe de Toni apresenta os resultados de um estudo detalhado sobre os processos relacionados a mirmequitização de feldspatos em sienitos cristalizados e deformados em condições de fácies granulito que afloram na porção central-norte do Escudo Sul-Riograndense. Diferentemente da maioria das dissertações de mestrado (e teses de doutorado) publicadas no Brasil, o trabalho de pesquisa do aluno De Toni apresenta resultados relacionados a “processos”, e não limitados a geologia regional ou local de uma determinada região, como geralmente ocorria até alguns anos atrás. Devido a esse fato, tanto a dissertação, quanto o artigo submetido ao Journal of Structural Geology terão uma abrangência bem maior do que os resultados normalmente provenientes de estudos locais de “evolução tectônica” não desmerecendo os mesmos, já que esses são de suma importância para estudos de detalhe como o aqui apresentado. A dissertação é bem escrita, com alguns erros de digitação (principalmente na parte em inglês) e as conclusões são baseadas em dados sólidos coletados desde a escala de mapeamento em macro e meso escala, como as observações microscópicas. Existem contudo alguns detalhes que podem ser levados em consideração com o objetivo de facilitar a leitura do artigo.</p> <p>(1) Minha primeira sugestão é que os autores separem claramente “descrição” e “interpretação”. Em toda parte central da tese (o artigo), interpretações ocorrem logo após as descrições em muitas partes. Como existem muitas partes descritivas, como microestruturas das rochas encaixantes, microestruturas dos milonitos secos, etc... no meio do texto o leitor já fica perdido sobre o que foi dito anteriormente. Então é melhor só descrever detalhadamente em um primeiro momento, e depois, na discussão, puxar algumas coisas importantes das descrições para ajudar nas interpretações.</p> <p>(2) Além disso, o autor menciona que fez imagens de microscopia de varredura, mas nenhuma imagem é apresentada. Certamente algumas dessas imagens mostram as variações composicionais mencionadas durante o texto, então não seria interessante utiliza-las, juntamente com as imagens óticas?</p>

(3) Existe um aumento de ~50% nos clinopiroxênios entre a rocha não-deformada e os "milonitos secos", além de um decréscimo de ~35% em albita, e isso não poderia ser melhor discutido no artigo, ou mesmo na dissertação, no caso da possibilidade das revisões serem incorporadas

(4) Tanto os filmes finos de albita quanto as evidências de recristalização por rotação de subgrãos não são claras nas fotos (Pg. 33). Eu sugiro fotos com maior detalhe onde essas microestruturas apareçam melhor. Além disso, o porfiroclasto de feldspato na Fig. 8a não possui aparentemente subgrãos. Minha pergunta é – como o autor definiu que o mecanismo de recristalização é esse? Além disso uma foto mostrando o bandamento descontínuo resultante da recristalização completa dos feldspatos poderia ser adicionada. As evidências de recristalização por rotação de subgrãos dos clinopiroxênios também não é evidente pelas imagens apresentadas;

(5) Eu sugiro que o autor evite ao máximo o uso de abreviaturas, principalmente para minerais, e só utilize as mesmas quando realmente for necessário, pois o uso em excesso faz o texto ficar complicado de ler;

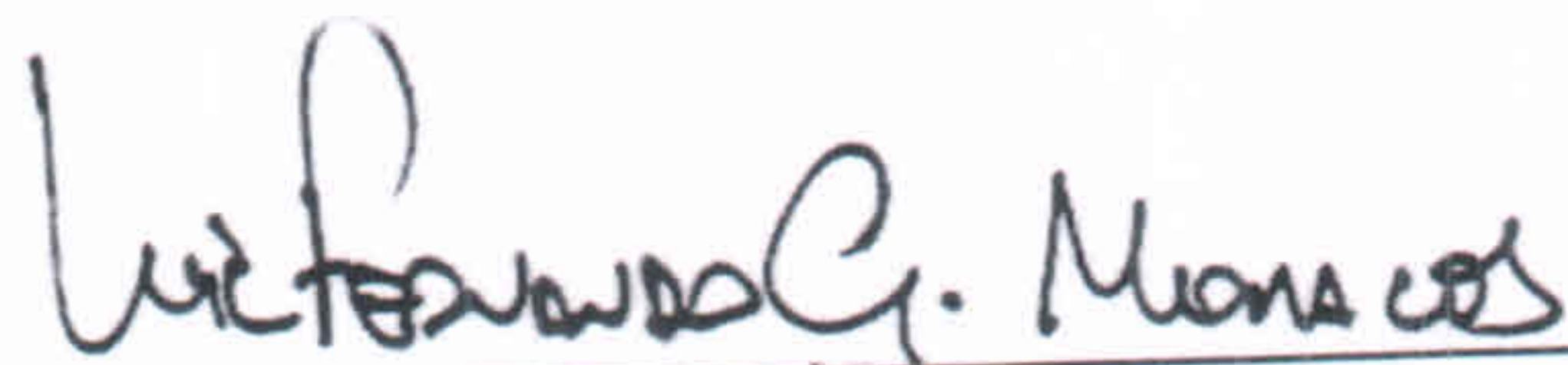
(6) Alguns dos artigos citados no texto como sendo "referência" (e.g. Phillips, 1974) certamente são antigos demais e não contém toda a literatura atual em relação ao desenvolvimento de mirmequitos. Certamente os artigos de Menegon et al. (2006, 2008) ou Yugushi and Nishiyama (2008 – Lithos) devem conter artigos mais modernos sobre o desenvolvimento dessas microestruturas. Além disso, algumas referências não são exatamente correctas (e.g. Passchier & Trouw 2005 para recristalização dinâmica. O autor deve citar dentro do possível os trabalhos originais. Também existem algumas referências que parecem estar faltando, como na parte da discussão na pag. 39 (The more sodic composition of the myrmekite...)). Eu escreveria diretamente as reações de transformação as quais o autor se refere;

(7) Em algumas partes, o autor parece ficar em dúvida se os dados que ele possui representam determinado fato ou não. Na mesma pag. 39, o autor escreve "The K ions expected to have been released during partial dissolution or replacement of k-feldspars could have been used to form second-generation of biotite". Minha pergunta é: afinal, os ions foram usados ou não, e que evidencias a favor ou contra tu tens? Esse tipo de problema de "semântica" se repete mais algumas vezes no texto

(8) Apesar de informativo, o título é um pouco longo demais, e eu cortaria toda a parte depois dos "dois pontos",

Assinatura:

Data: 09/02/2015



Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

ANEXO I	
Título da Dissertação/Tese:	
MIRMEQUITIZAÇÃO PENETRATIVA E A PARTICIPAÇÃO DA DEFORMAÇÃO EM SIENITOS SINTECTÔNICOS: CRISTALIZAÇÃO-DEFORMAÇÃO DO SIENITO ARROIO DAS PALMAS SOB CONDIÇÕES DE FÁCIES GRANULITO EM REGIME TRANSGRESSIVO	
Área de Concentração: Geoquímica	
Autor: GIUSEPPE BETINO DE TONI	
Orientador: Profa. Dra. Maria de Fátima Aparecida Saraiva Bitencourt	
Examinador: Prof. Dr. Ruy Paulo Philipp (UFRGS)	
Data: 12/02/2015	
Conceito: A (EXCELENTE)	
PARECER:	
<p>O mestrado apresentado é de excelente qualidade e representa uma importante contribuição para o conhecimento da estratigrafia do pré-cambriano do RS e para a compreensão da história evolutiva do Cinturão Dom Feliciano. A investigação envolveu um detalhado mapeamento geológico, desvendando as complexas relações estratigráficas que envolvem as rochas metamórficas de alto grau e corpos ígneos sin-tectônicos. Os resultados inéditos mostram uma grande contribuição para o entendimento das condições de posicionamento de corpos ígneos plutônicos sin-tectônicos e o desenvolvimento de microestruturas de alta temperatura. A pesquisa envolveu a integração de diversas ferramentas petrológicas, incluindo o mapeamento geológico de detalhe, geologia estrutural, análise petrográfica, microestruturas e química-Mineral. Nestas condições específicas, o posicionamento ocorre sob ação de um campo de deformação regional. As rochas de composição quartzo-feldspática não apresentam composição adequada para a geração de paragêneses metamórficas diagnósticas, dependendo desta forma da identificação de microestruturas. Nesta dissertação são investigadas as condições de geração de texturas mirmequíticas associadas com processos metamórficos-deformacionais que ocorrem associados a zonas de cisalhamento dúcteis sob condições de alta temperatura. As investigações demonstraram através da correlação entre as microestruturas identificadas e a composição química dos novos cristais metamórficos de plagioclásio associados a cristalização e geração das texturas mirmequíticas estudadas.</p> <p>Os resultados são significativos e demonstram o controle das condições reológicas na efetivação de processos de participação da deformação. O autor reuniu evidências e critérios de identificação de microestruturas de alta temperatura e desenvolveu um modelo que sugere a participação da fusão parcial associada a dissolução em condições de alta ductibilidade.</p> <p>O autor segue uma linha de orientação que contribui de modo sistemático para incrementar o conhecimento petrológico em corpos sin-tectônicos.</p>	

O texto está muito bem escrito com raros erros gramaticais e preenche plenamente todos os requisitos formais de uma dissertação. As referências utilizadas representam importantes trabalhos relacionados ao tema e ao contexto geológico regional, agregando importantes considerações sobre a petrologia do corpo estudado. Além dos dados gerados, a dissertação apresenta uma ampla revisão histórica sobre as condições de formação da textura mirmequítica inserindo o tema principal para o leitor.

Ainda são pontos de muito destaque nesta pesquisa o detalhado trabalho de campo e a riqueza das ilustrações, que ficariam ainda mais significativas se fossem apresentadas em cores para o leitor.

O tema abordado é de suma importância para o incremento da petrologia de corpos sin-tectônicos e contribui de forma brilhante com a caracterização de estruturas e microestruturas inéditas geradas sob condições de alta temperatura e elevada ductibilidade.

No intuito de contribuir como leitor e crítico do texto gostaria de colocar algumas observações para reflexão do autor que podem tornar o texto ainda mais claro e objetivo.

1) O contexto geotectônico poderia apresentar de modo clássico os elementos que definem o quadro regional, estabelecendo as relações espaciais e os limites gerais do Craton RLP e os principais componentes do Cinturão Dom Feliciano. Estes conceitos são adotados de forma geral pelos pesquisadores nacionais e internacionais e permanecem tão concêntricos quanto a Província Mantiqueira, que apesar de ser um termo estrutural classificatório de cunho geral e geográfico, ainda é adotado por todos. A figura 1 poderia incorporar novas informações geológicas e geotectônicas apresentadas em inúmeros trabalhos regionais publicados sobre a região sul do Brasil e Uruguai nos últimos anos. A legenda desta figura descreve domínios geotectônicos, entretanto, a descrição da legendas incorpora elementos composicionais e petrológicos. Estas elucidaciones são importantes para contextualizar o leitor com relação a geologia regional brasileira. Atualmente, há um consenso entre os principais pesquisadores nacionais que o Ciclo Brasileiro é composto por pelo menos três distintos orógenos Neoproterozóicos, definidos pela caracterização de três eventos orogênicos, com geração de rochas metamórficas e magmáticas associadas nos períodos entre 800-750 Ma, 650-630 Ma e 570-540 Ma (Figueiredo et al. 1996, Boletim IG-USP; Babinski et al. 1996; Heilbron et al., 2004, Pre-Cambrian, Silva et al. 2005-Pre-Cambrian; Pimentel et al. 2011-JSAES, Brito Neves & Fuck, 2014, JSAES, Brito Neves et al. 2014-Brazilian Journal of Geology, entre outros).

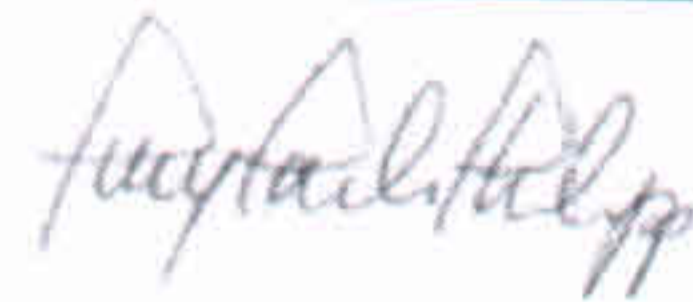
2) A idade do metamorfismo colisional obtida em rochas de alto grau da Várzea do Capivarita também foi objeto do estudo de outros pesquisadores, cujos resultados foram publicados nos trabalhos de Bom (2011, TEMÁTICO), Chemale Jr. et al. (2011- Pre-cambrian Research), Bom et al. (2013-SNET, Cong. Uruguai, Camozatto et al. 2013 (SNET) e deveriam ser citados para aumentar a credibilidade das idade do pico metamorfismo orogênico do Cinturão Dom Feliciano.

3) Um fator pouco aproveitado nas discussões da evolução da deformação e do metamorfismo que afetaram o corpo sienítico, são as condições de pressão litostática do metamorfismo orogênico. As condições de pressão litostática estabelecidas por geotermobarometria de pseudo-seções para os gnais pelíticos do Complexo Várzea do Capivarita indicaram pressões entre 8 e 10 Kb, sugerindo condições compatíveis com aquelas encontradas na base da crosta, em profundidades de cerca de 30 a 35 km (Philipp et al. 2014- Journal of South American Earth Sciences).

Espero que estes breves comentários possam promover reflexões. Entretanto, o resultado do trabalho é excelente e contribuirá muito para o avanço da geologia regional e certamente alcançara discussões internacionais pelo nível da discussão proposta, pela dedicação do pesquisador ao tema e pelo ineditismo dos resultados.

O autor e sua orientadora proporcionaram uma investigação de pesquisa de grande importância do ponto de vista prático, de inserção na área da petrologia, geologia estrutural e geotectônica regional, além de contribuir muito positivamente na formação de recursos humanos especializados.

Assinatura:



Data: 12/02/2015

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno: