



**JOÃO ANTÔNIO SILVA FONTOURA**

**CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL REGIONAL E DE DETALHE DO PLUTON  
ARROIO DO SILVA, ENCRUZILHADA DO SUL, RS**

**PORTO ALEGRE**

**2021**

**JOÃO ANTÔNIO SILVA FONTOURA**

**CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL REGIONAL E DE DETALHE DO PLUTON  
ARROIO DO SILVA, ENCRUZILHADA DO SUL, RS**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Maria de Fátima Bitencourt  
Orientador: Prof. Dr. Jairo Francisco Savian

PORTO ALEGRE

2021

#### CIP - Catalogação na Publicação

Fontoura, João Antônio Silva  
CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL REGIONAL E DE DETALHE DO  
PLUTON ARROIO DO SILVA, ENCRUZILHADA DO SUL, RS / João  
Antônio Silva Fontoura. -- 2021.  
81 f.  
Orientadores: Maria de Fátima Bitencourt, Jairo  
Francisco Savian.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto  
de Geociências, Curso de Geologia, Porto Alegre,  
BR-RS, 2021.

1. posicionamento de corpos plutônicos. 2. geologia  
estrutural. 3. análise estrutural de detalhe. 4.  
estrutura SC magmática. 5. sienitos. I. Bitencourt,  
Maria de Fátima, orient. II. Savian, Jairo Francisco,  
orient. III. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL REGIONAL E DE DETALHE DO PLUTON ARROIO DO SILVA, ENCRUZILHADA DO SUL, RS** elaborado por **João Antônio Silva Fontoura**, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

**Comissão Examinadora:**

---

Prof. Dr. Carlos Augusto Sommer

---

Dra. Cristiane Rivera

---

Prof. Dr. Giuseppe Betino de Toni

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero agradecer à minha família, sem vocês eu não conseguiria ter concluído essa etapa. Um beijo especial em todos meus avôs e minhas avós. Vó Glória, vó Niva e vô Carlos, que já não estão mais aqui, e vô Oswaldo, vó Anne e vô Armando, com quem vou ter a felicidade de comemorar essa conquista. Como dizia minha vó Glória: “O que está na tua cabeça, ninguém te rouba” e com certeza o conhecimento que adquiri nesses anos de Geologia vai me acompanhar para sempre. Pelo apoio incondicional que sempre me deram, mãe, pai Alexandre, pai Ike, mano e Biazinha, sem vocês eu não seria quem eu sou, amo vocês demais!

Agradeço também a todos os integrantes do grupo de pesquisa Magmatismo Sintectônico, do qual faço parte com muito orgulho. Pela dedicação irrestrita, pela atenção e pela capacidade de sempre tirar o nosso melhor, um agradecimento especial a Fátima, que coordena esse grupo como acredito que ninguém conseguiria coordenar, tu és uma inspiração para todos nós, madrinha! Não posso deixar de agradecer com carinho especial também o pessoal do grupo que pegou junto tanto nos campos como na ajuda com a parte escrita deste trabalho, Dioni, Camila, Pezat e Fera, sem vocês o trabalho não teria sido tão prazeroso como foi. Thay, vulgo Thalyta, sem a nossa parceria e a ajuda que tu me deste desde o começo do trabalho, com certeza não estaria chegando nesse momento com a alegria e o orgulho que eu sinto, minha parceira na vida e na Geologia, tu mora no meu coração.

Por fim, mas não menos importante, tenho que agradecer a todos aqueles que fizeram esses anos de geologia serem tão especiais. Ao grupo do TC1, Casagrande, Leo, Pri e Escobar, pela parceria no início da nossa caminhada geológica. Pezat e Chong, grupo do TC3, que foi quando descobri que a geologia é assustadoramente apaixonante. Ao grupo do TC4, Thay, Bruninho, Casagrande e Pezat, pelas risadas infinitas. A inesquecível Faixa 7, Casagrande, Pezat e Bruninho, pelos perrengues, que hoje são lembrados com alegria, pelo conhecimento geológico que nós ganhamos juntos e pela parceria eterna. São tantas pessoas especiais nessa trajetória que é impossível colocar todos aqui, mas quero agradecer a toda a /13.

O último agradecimento é para a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelo ensino de altíssima qualidade e exemplo da importância de termos instituições públicas de qualidade. Viva a UFRGS!

“Vou mostrando como sou  
e vou sendo como posso...”

Novos Baianos

## RESUMO

O Pluton Arroio do Silva (PAS) faz parte do Batólito Pelotas, na porção leste do Escudo Sul-rio-grandense. Compreende uma associação de rochas sieníticas, monzoníticas e dioríticas geradas em ambiente pós-colisional do final do Ciclo Brasileiro no Neoproterozoico. O PAS é intrusivo nas rochas do Complexo Várzea do Capivarita (CVC) e intrudido pelos termos da Suíte Encruzilhada do Sul (SES). Sua expressão em mapa é de quatro corpos aflorantes, porém dados estruturais concordantes sugerem que represente um corpo único em subsuperfície. O levantamento estrutural regional realizado neste trabalho, aliado ao banco de dados pré-existente, indica uma tendência de direção NW-SE da foliação magmática, com alto ângulo de mergulho para três dos quatro corpos aflorantes. O corpo norte é interpretado como megaxenólito ou *roof-pendant* na SES e registra as variações estruturais mais significativas do pluton. A porção oeste do corpo concentra as principais discordâncias de atitudes com relação à trama dominante NW-SE, enquanto a porção leste apresenta maior homogeneidade para as atitudes. Os dados obtidos neste trabalho permitem a proposição de duas hipóteses para o porquê da variação estrutural ser registrada em escala regional somente no corpo norte: (i) o posicionamento da SES promoveu a alteração do padrão NW-SE da foliação no corpo; (ii) a variação de atitudes observadas no corpo norte pode estar obedecendo à mudança de campo tensional interno em locais da câmara. Não são observadas estruturas lineares no PAS. Um afloramento chave foi selecionado para a realização de levantamento estrutural de detalhe. No perfil NE-SW, com aproximadamente 140 m de comprimento, foram selecionados dez pontos para detalhe. As principais estruturas encontradas no perfil foram interpretadas como pares SC magmáticos. A heterogeneidade da ação de cisalhamento da foliação C, que apresenta direção constante NW-SE com alto ângulo de mergulho, resulta em zonas onde a foliação S não está deslocada alternadas a zonas em que a mesma é progressivamente deslocada. Quando não afetada pela foliação C, a foliação S é sub-horizontal e é marcada pelas faces 010 dos cristais de K-feldspato. Conforme é progressivamente deslocada por C, a foliação S forma dobras assimétricas com planos axiais paralelos à foliação C. Com o desenvolvimento deste projeto foi possível estabelecer, através da comparação entre estruturas regionais presentes no CVC e no PAS, que o posicionamento do pluton não aproveitou a geometria de suas rochas encaixantes. Além disso, foi possível concluir que estruturas magmáticas do tipo SC são registradas no pluton, e a foliação C, observada no perfil de detalhe, é paralela à foliação observada nos corpos que não são intrudidos de forma significativa pelos termos da SES. Investigações mais profundas são necessárias para que se atinja o entendimento integral dos processos responsáveis pela geometria interna do pluton. Portanto, os dados apresentados ao longo deste projeto constituirão a base para o estudo posterior de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética.

**Palavras-chave:** posicionamento de corpos plutônicos, geologia estrutural, análise estrutural de detalhe, estrutura SC magmática, sienitos.

## ABSTRACT

The Arroio do Silva Pluton (ASP), located in the eastern portion of the Sul-rio-grandense Shield, is part of the Pelotas Batholith. It comprises an association of syenitic, monzonitic and dioritic rocks generated in a Neoproterozoic post-colisional setting of the Brazilian Cycle. The ASP is intrusive in the Várzea do Capivarita Complex (VCC) and intruded by the Encruzilhada do Sul Suite (ESS) varieties. Its map expression is that of four individualized bodies, but concordant structural data suggests that it represents a single body in subsurface. Together with a pre-existing database, the regional structural analysis conducted in this work indicates a steeply-dipping, NW-striking magmatic foliation in three of the four outcropping areas of the ASP. The north body is interpreted as a megaxenolith or roof-pendant in the ESS and records the most significant structural variations of the pluton. The western portion of the body concentrates the main orientation differences relative to the dominant NW-SE fabric, while regular orientations are found in the eastern part. The dataset obtained in this work leads to the construction of two alternative hypotheses to explain why the large-scale structural variation is registered only in the north body: (i) emplacement of the ESS varieties has caused the re-orientation of the NW-SE pattern of foliation; (ii) the variation of attitudes observed in the north body may be related to changes of internal stress field in parts of the chamber. No linear structure is observed in the APS. A key outcrop was selected to carry out detailed structural studies. Ten points were selected for detail in an approximately 140m-long, NE-SW section. The main structures found along this section were interpreted as magmatic SC structures. Heterogeneous progressive shearing along the NW-striking, subvertical C-foliation causes the generation of alternate zones where the S-foliation is intact and zones where it is progressively displaced. When not affected by C-planes, foliation S is sub-horizontal and marked by aligned 010 faces of K-feldspar crystals. As it is gradually displaced by C, the S-foliation forms asymmetrical folds with axial planes parallel to the C-planes. Comparison between regional structures present in the VCC and APS, as established in this project, indicates that pluton emplacement did not take advantage of the geometry of its host rocks. In addition, it was possible to conclude that SC-type magmatic structures are registered in the pluton and that the C-foliation observed in the detailed section is parallel to the foliation observed in places that are not significantly affected by intrusion of the ESS varieties. Further investigation is necessary in order to understand the processes responsible for the internal geometry of the pluton. Therefore, the results from this project will form the basis for the study of Anisotropy of Magnetic Susceptibility that will be conducted in the near future.

**Key-words:** emplacement of plutonic bodies, structural geology, detailed structural analysis, magmatic SC-structures, syenites.

## LISTA DE FIGURAS

- Fig. 1** – Localização e rodovias de acesso da área de estudo partindo da cidade de Porto Alegre, estado do Rio Grande do Sul, até o município de Encruzilhada do Sul. Mapa elaborado com base em dados vetoriais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). ..... 16
- Fig. 2** – Mapa geológico do Cinturão Dom Feliciano, em destaque, o denominado Bloco Encruzilhada, onde aflora o Pluton Arroio do Silva (Fonte: Modificado de Bitencourt & Nardi, 2000). ..... 21
- Fig. 3** – Mapa geológico da região de Encruzilhada do Sul, onde está localizado o Bloco Encruzilhada. Em vermelho estão destacados os quatro corpos aflorantes do PAS (Fonte: Modificado de Padilha et al., 2019). ..... 23
- Fig. 4** - Processo de amostragem: (a) perfuração realizada com perfuratriz manual com broca diamantada e sistema de arrefecimento/lubrificação acoplado; (b) marca de referência e processo de marcação com arame de cobre (i); (c) Furos em que foram coletados os cilindros, note que cada furo tem uma marcação rente a ele, que serve como referencial; (d) orientação de furo em que foram obtidas a inclinação, o azimute solar e magnético do furo; (e) transferindo o referencial geográfico para o cilindro após sua orientação. .... 35
- Fig. 5** – (a) Mapa geológico esquemático da região de Encruzilhada do Sul onde afloram os quatro corpos do Pluton Arroio do Silva. (b) Polos das foliações magmáticas para as variedades litológicas do Pluton Arroio do Silva; quadrados – quartzo sienitos e monzonitos, triângulos – quartzo monzodioritos, losangos – quartzo dioritos. (c) Polos do bandamento metamórfico do Complexo Várzea do Capivarita (Fonte: Modificado de Padilha et al., 2019). ..... 38
- Fig. 6** - (a) Quartzo sienito com foliação magmática marcada pelo alinhamento dos cristais de K-feldspato e agregados máficos. (b) Quartzo monzodiorito com distribuição aleatória dos cristais de K-feldspato. (c) Porção do quartzo monzodiorito englobada pelo diorito. (d) Rocha granítica de textura equigranular fina no contato entre termo sienítico do PAS e diorito da SES; notar o contato crenulado com o termo diorítico e reto com o sienito..... 41
- Fig. 7** – Mapa geológico esquemático do corpo norte com estereogramas mostrando os polos das estruturas planares medidas (Fonte: Modificado de Padilha et al., 2019). ..... 42

<b>Fig. 8</b> – (a) Quartzo sienito com os fenocristais de K-feldspato alinhados na foliação destacada em tracejado amarelo. (b) Agregados máficos de cristais de hornblenda concordantes com a foliação magmática. ....	44
<b>Fig. 9</b> – Mapa geológico esquemático dos corpos centrais com estereogramas mostrando os polos das estruturas planares medidas (Fonte: Modificado de Padilha et al., 2019). ....	45
<b>Fig. 10</b> – Mapa geológico esquemático do corpo sul com estereogramas mostrando os polos das estruturas planares medidas (Fonte: Modificado de Padilha et al., 2019).....	47
<b>Fig. 11</b> – Croqui em planta com a disposição dos dez pontos em que foi realizado o detalhamento estrutural. Destacados em vermelho os pontos que serão apresentados neste trabalho.....	49
<b>Fig. 12</b> – Ponto JA-04-1 com os planos de cisalhamento C deslocando a foliação S demonstrando cinemática horária.....	51
<b>Fig. 13</b> – Ponto JA-04-2 com a foliação S preservada sendo deslocada progressivamente pela foliação C, gerando um padrão de dobras magmáticas.....	53
<b>Fig. 14</b> – Ponto JA-04-3 com uma porção em que a foliação S está preservada da ação de cisalhamento da foliação C e encontra-se sub-horizontal, sendo marcada pelas faces 010 dos cristais de K-feldspato alinhadas no plano da foliação. A outra porção da rocha tem domínio da foliação C, em que a foliação S é preservada onde a ação de cisalhamento não teve intensidade para paralelizar as estruturas.....	55
<b>Fig. 15</b> – Ponto JA-04-8 onde a foliação S é preservada da ação de C, sendo marcada pelas faces 010 dos cristais de K-feldspato alinhadas no plano sub-horizontal da foliação.....	57
<b>Fig. 16</b> – Ponto JA-04-9 onde a foliação C é dominante. Pode ser observado o dique máfico de cinemática dextral com limites difusos que intrude o quartzo sienito porfirítico, cortando a foliação em ângulo e retrabalhando a litologia félsica maciça de textura grossa.....	59

**Fig. 17** - (a) Estereograma com os polos de todas as estruturas planares observadas no perfil de detalhamento estrutural. (b) Estereograma com os polos da foliação S quando essa não é afetada pela foliação C. (c) Estereograma com polos da foliação S quando essa está sendo afetada pela foliação C, nota-se que os planos S afetados por C têm suas direções variando entre os quatro quadrantes. (d) Estereograma com polos da foliação C, indicando coerência estrutural de direção NW-SE com alto ângulo de mergulho para os planos. .... 61

**Fig. 18** – Representação esquemática mostrando como o grau de continuidade entre estruturas da rocha encaixante e estruturas no corpo plutônico indicam causas prováveis para geração de tramas magmáticas. As representações mostram câmaras magmáticas circulares e padrões estruturais simplificados, que podem ser vistos como três membros finais de classificação. Após o grau de continuidade (primeira linha) ser confirmado com relação à temporalidade das estruturas entre as rochas encaixantes e as estruturas magmáticas, ele pode ser utilizado juntamente com informações sobre o caráter da trama interna, se magmática ou subsolidus (segunda linha) para que causas prováveis sejam determinadas para sua formação (terceira linha) (Fonte: Modificado de Paterson et al., 1998). .... 67

**Fig. 19** – Diagramas equiárea de projeção no hemisfério inferior com as principais estruturas de três dos quatro corpos do PAS e das rochas do CVC na região de Encruzilhada do Sul. (a) Estereograma com os polos da foliação magmática no corpo central norte do PAS. (b) Estereograma com os polos da foliação magmática no corpo central sul do PAS. (c) Estereograma com os polos da foliação no corpo sul do PAS. (d) Estereogramas com os polos do bandamento metamórfico ( $S_1$ ) (esquerda) e lineações minerais e de estiramento ( $L_1$ ) (direita) nas rochas do CVC (Fonte: Fig. 19d extraída de Costa, 2018). .... 69

**Fig. 20** – (a) Corte do perfil de detalhamento estrutural com destaque para as zonas onde a foliação C desloca a foliação S. (b) Estereograma com os polos da foliação S quando esta se encontra preservada da ação de C. (c) Estereograma com os polos da foliação S e C; nota-se que quando S é afetada por C tem seus polos plotados sobre um grande círculo, indicando um padrão de dobra para a foliação. (d) Representação 3D do ponto 04-1 com as estruturas C deslocando a foliação S com cinemática dextral. (e) Representação 3D do ponto 04-3 em que uma porção não foi afetada por C, mantendo a estrutura S horizontal, e outra porção em que C desloca os planos S, formando dobras assimétricas em que a foliação C é paralela aos seus planos axiais. .... 72

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 1** – Dados dos cilindros obtidos nos sítios JA-04-2, JA-04-3 e JA-04-4. .... 63

**Tabela 2** – Dados dos cilindros obtidos nos sítios JA-04-5, JA-04-8, JA-04-9 e JA-04-10... 64

## ABREVIATÓES

- ASM – Anisotropia de Susceptibilidade Magnética
- BE – Bloco Encruzilhada
- BSG – Bloco São Gabriel
- BP – Batólito Pelotas
- BT – Bloco Tijucas
- CDF – Cinturão Dom Feliciano
- CCSb – Cinturão de Cisalhamento Sul-brasileiro
- CVC – Complexo Várzea do Capivarita
- ESRg – Escudo Sul-rio-grandense
- FPM – Falha Passo do Marinheiro
- GB – Granito Butiá
- GE – Granito Encruzilhada
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- MSP – Maciço Sienítico Piquiri
- PAS – Pluton Arroio do Silva
- SES – Suíte Encruzilhada do Sul

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	15
1.1	Localização	16
1.2	Caracterização do problema	17
1.3	Premissas e hipóteses	18
1.4	Objetivos e metas	19
1.5	Justificativa	19
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	20
2.1	Contexto geológico regional	20
2.1.1	Batólito Pelotas	21
2.2	Bloco Encruzilhada	22
2.2.1	Complexo Várzea do Capivarita	23
2.2.2	Granito Butiá	25
2.2.3	Maciço Sienítico Piquiri	26
2.2.4	Pluton Arroio do Silva	27
2.2.5	Suíte Encruzilhada do Sul	28
2.3	Tramas magmáticas associadas ao posicionamento de corpos plutônicos	29
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	31
3.1	Pré campo	31
3.1.1	Revisão bibliográfica	31
3.1.2	Planejamento de campo	31
3.2	Campo	32
3.2.1	Levantamento estrutural regional	32
3.2.2	Detalhamento estrutural	32
3.2.3	Coleta de amostras	33
3.2.4	Amostragem para Anisotropia de Susceptibilidade Magnética	33
3.3	Pós campo	36
3.3.1	Vetorização e apresentação gráfica dos dados estruturais	36
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	37
4.1	Caracterização estrutural regional do Pluton Arroio do Silva	37
4.1.1	Corpo norte	39
4.1.2	Corpos centrais	43
4.1.3	Corpo sul	46
4.2	Análise estrutural de detalhe do Pluton Arroio do Silva	48

4.2.1	Representação das estruturas planares do perfil .....	60
<b>4.3</b>	<b>Cilindros coletados para análises de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética.....</b>	<b>62</b>
4.3.1	Dados dos cilindros coletados .....	63
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>65</b>
<b>5.1</b>	<b>Relações geométricas internas do Pluton Arroio do Silva e comparação estrutural com suas rochas encaixantes .....</b>	<b>65</b>
5.1.1	Variações estruturais como evidência de uma história magmática complexa.....	69
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES .....</b>	<b>73</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>75</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Pluton Arroio do Silva (PAS), objeto de estudo deste projeto, trata-se de uma associação de rochas sieníticas-monzoníticas-dioríticas (Padilha *et al.*, 2019). Aflora na porção noroeste do Batólito Pelotas, tem relação intrusiva no Complexo Várzea do Capivarita e é intrudido pela Suíte Encruzilhada do Sul. Sua expressão em mapa é de quatro corpos individualizados, porém a concordância estrutural entre os mesmos sugere que represente um corpo único em subsuperfície (Reis, 2006).

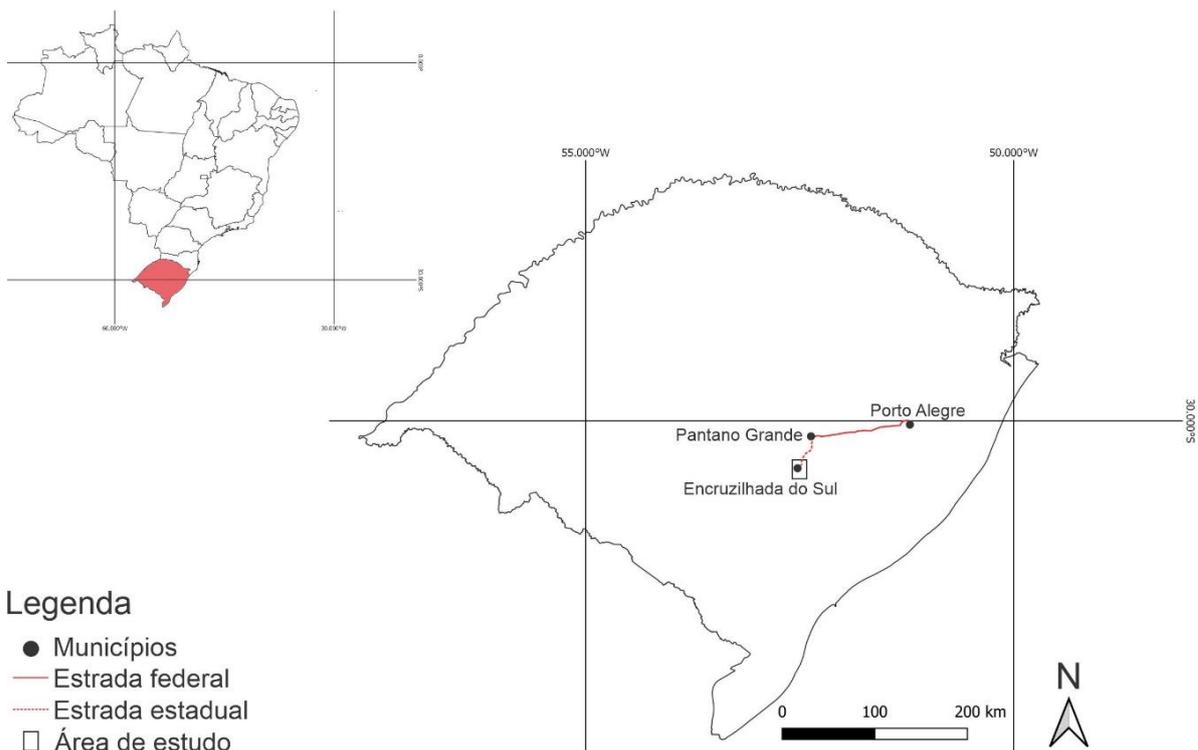
Padilha *et al.* (2019) obtiveram idade de cristalização pelo método U-Pb LA-MC-ICP-MS em zircão de  $578 \pm 4$  Ma para as rochas sieníticas do pluton, indicando que o posicionamento do PAS ocorreu em um período no qual o magmatismo pós-colisional estava estabelecido no sul do Brasil. Os autores propõem pelo menos três pulsos de magmas, provavelmente contemporâneos, para a formação do pluton. Um dos pulsos tem composição lamprofírica e afinidade ultrapotássica, enquanto os outros dois têm afinidade shoshonítica e composições sieníticas e dioríticas. Para os autores o principal processo magmático que leva a ampla variação composicional do PAS é a mistura dos magmas dioríticos e sieníticos, com um menor componente lamprofírico.

Neste projeto serão verificadas as relações geométricas internas do PAS através da análise estrutural em diferentes escalas de observação. A técnica de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética (ASM) seria utilizada como técnica complementar à análise estrutural de campo, visto que correlações entre as tramas magnética e estrutural de corpos rochosos podem ser traçadas. Tal correlação parte de estudos realizados por Nye (1957), que identificou que o alinhamento preferencial de partículas ferromagnéticas poderia ser representado por três eixos de um elipsoide em que estes se equivaleriam a foliação e lineação da rocha.

Devido às imprevisibilidades geradas pela pandemia da Covid-19, as análises de ASM não puderam ser concluídas a tempo de serem apresentadas neste projeto. No entanto, assim que houver a liberação do Laboratório de Paleomagnetismo do IAG/USP, onde serão feitas as análises, os cilindros, que já foram coletados em campo pelo autor, serão enviados. Para tanto, as análises de ASM serão tratadas como um objetivo futuro deste projeto.

## 1.1 Localização

A área de estudo localiza-se na região do município de Encruzilhada do Sul, a aproximadamente 170 km da cidade de Porto Alegre. O deslocamento até a região, saindo de Porto Alegre, se dá pela rodovia BR-290 em sentido oeste. Na entrada da cidade de Pantano Grande vira-se para sul na RS-471 até o município de Encruzilhada do Sul (Fig. 1). A área abrange a porção nordeste da carta topográfica de Encruzilhada do Sul (SH. 22-Y-A-VI-2), noroeste da Delfino (SH. 22-Y-B-IV-1), sudeste da Passo das Canas (SH. 22-Y-A-III-4) e sudoeste da carta Várzea do Capivarita (SH. 22 –YB-I-3).



**Fig. 1** – Localização e rodovias de acesso da área de estudo partindo da cidade de Porto Alegre, estado do Rio Grande do Sul, até o município de Encruzilhada do Sul. Mapa elaborado com base em dados vetoriais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

## 1.2 Caracterização do problema

Em relação à caracterização estrutural, o PAS carece de maiores aprofundamentos. Reis (2006) identifica que as rochas do pluton têm foliação magmática de direção NW-SE, com ângulo de mergulho médio a alto, e não apresentam lineação mineral. A autora propõe que a trama magmática é concordante com a foliação metamórfica de suas encaixantes. No entanto, essa correlação é traçada entre apenas vinte e duas medidas de foliação magmática, realizadas no PAS, e oito medidas de foliação metamórfica no Complexo Várzea do Capivarita (CVC). Apesar de significativos, estes dados não trazem uma proporção estatística confiável para que sejam estabelecidas comparações estruturais entre as litologias.

No trabalho de Padilha *et al.* (2019) foi levantado um maior volume de dados quanto ao comportamento da trama magmática do pluton, trazendo novas perspectivas sobre a dinâmica estrutural do corpo. Os autores corroboram as observações feitas por Reis (2006) quanto às estruturas predominantes no pluton, porém divergem na sua concordância com as estruturas das rochas do CVC.

Como referido em trabalhos anteriores, o PAS tem uma grande variação composicional, cuja relação espacial não é bem definida. Padilha *et al.* (2019) reportam o predomínio de termos quartzo sieníticos-monzoníticos na porção norte do pluton e um gradual aumento da mineralogia máfica em direção a porção sul. Uma investigação estrutural em maior detalhe pode contribuir para o entendimento do que gera a ausência de continuidade na distribuição em mapa das variedades litológicas.

Os trabalhos desenvolvidos no PAS abordam importantes aspectos acerca da sua gênese. Suas principais estruturas demonstram um padrão geométrico interno bem definido. Todavia, a ausência de correlações mais assertivas entre estruturas no pluton e suas encaixantes, de um maior volume de dados estruturais para cada um dos quatro corpos aflorantes, de observações em maior detalhe das variações da trama magmática, definem lacunas de informação a serem preenchidas.

### 1.3 Premissas e hipóteses

Como observado nos trabalhos supracitados, há uma divergência com relação à interpretação dos dados estruturais referentes à relação do PAS com suas encaixantes. Reis (2006) propõe que o posicionamento do pluton é controlado pela geometria das suas rochas encaixantes. Todavia, dados estruturais trazidos em trabalhos recentes não dão suporte a essa análise, indicando que a colocação do PAS não aproveita as estruturas de suas encaixantes (UFRGS, 2010; Costa, 2018; Padilha *et al.*, 2019). Ambas hipóteses, de aproveitamento ou não da geometria das rochas encaixantes, se baseiam na premissa de que a colocação de magmas pode tanto aproveitar estruturas pré-existentes para o seu posicionamento, como também podem cortá-las, sendo reflexo do campo tensional ao qual a área estava submetida, em conjunto com diferenças reológicas e de densidade entre magma e encaixante (Brown, 2013).

É importante salientar que os processos atuantes, e seu reflexo na trama magmática, nos estágios pré-, sin- e pós-formação de câmaras magmáticas, são extremamente variados (Paterson & Tobisch, 1988; Paterson *et al.*, 1989; Paterson & Fowler, 1993; Paterson *et al.*, 1998; Zellmer & Annen, 2008). Logo, uma conclusão definitiva quanto ao posicionamento de corpos plutônicos deve ser sempre abordada com cuidado. Com o mapeamento e descrição de estruturas em escala macroscópica e mesoscópica, espera-se que novos dados serão trazidos e contribuirão para uma melhor caracterização do PAS. Parte-se da premissa de que os trabalhos recentes desenvolvidos na região de Encruzilhada do Sul (*e.g.* UFRGS, 2010; Costa, 2018; Padilha *et al.*, 2019), aliados aos dados obtidos neste projeto, permitirão que comparações entre estruturas regionais do CVC e do PAS sejam estabelecidas. Será tratada como hipótese para o presente trabalho que o posicionamento do pluton não tem relação com a geometria de suas encaixantes.

## 1.4 Objetivos e metas

O presente projeto tem como objetivo principal verificar como se comportam as relações geométricas internas dos quatro corpos aflorantes do PAS. Para tanto, são estabelecidas as metas:

- (i) Obtenção de dados estruturais nos quatro corpos aflorantes, afim de caracterizar a dinâmica estrutural regional do pluton.
- (ii) Realização de levantamento estrutural de detalhe, para que possam ser estabelecidas relações estruturais em mais de uma escala de observação.

Como foi trazido anteriormente, análises de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética eram um dos objetivos iniciais deste trabalho. Visto que os cilindros foram coletados e serão analisados em uma próxima etapa, será deixada como meta futura:

- (i) Obtenção da trama magnética representativa e caracterização da mineralogia magnética do PAS.

## 1.5 Justificativa

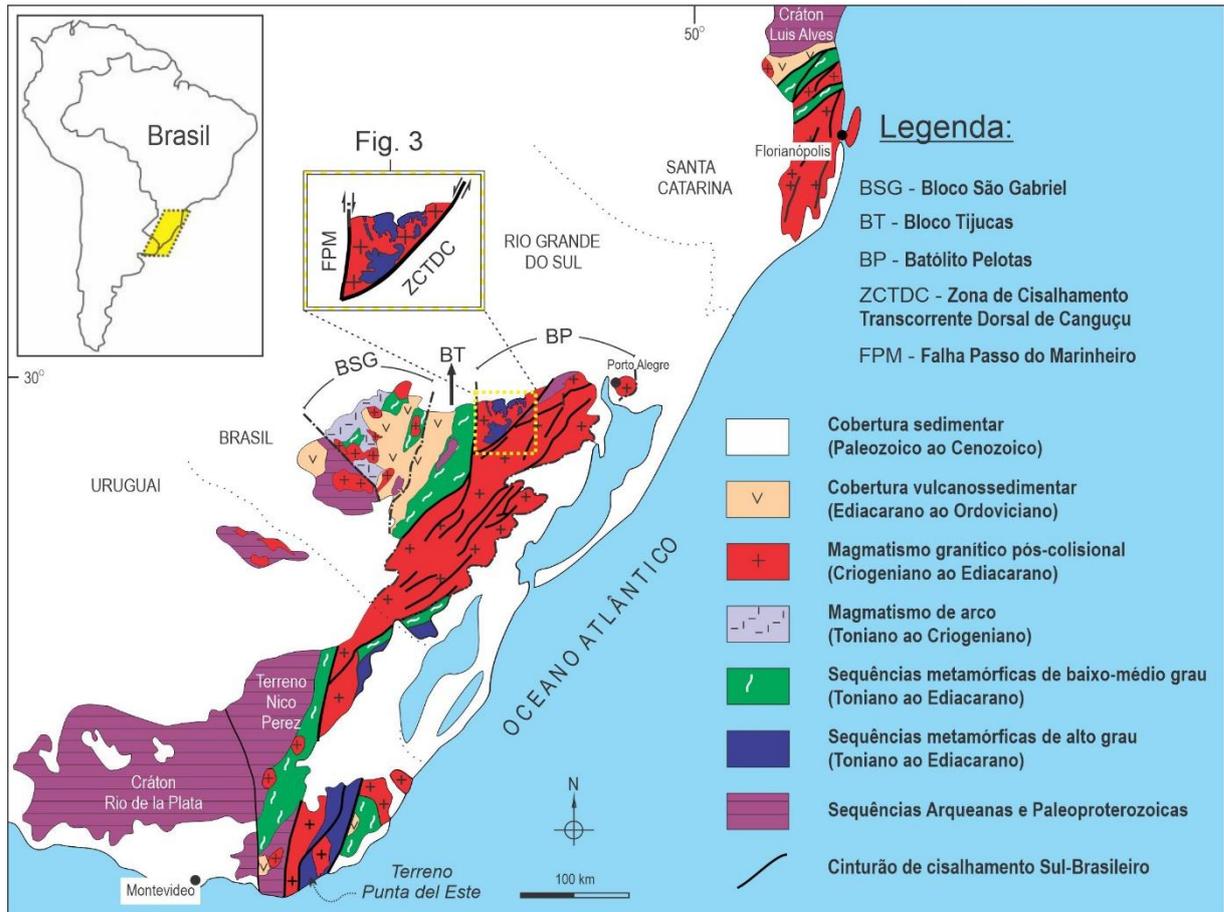
Desde a primeira proposta para o posicionamento do PAS, trabalhos desenvolvidos na região de Encruzilhada do Sul trouxeram uma maior profundidade no entendimento das estruturas presentes nas rochas encaixantes do pluton (e.g. Martil, 2007; UFRGS, 2010; Bom *et al.*, 2014; Costa, 2018; Gomes, 2018). Logo, um trabalho voltado a geologia estrutural do corpo não só trará novos dados, como também proporcionará que comparações possam ser estabelecidas entre as litoestruturas da área.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Contexto geológico regional

A Província Mantiqueira representa a orogenia Neoproterozoica resultante da amalgamação da porção oeste do supercontinente Gondwana (Almeida *et al.*, 2000). Seu segmento sul é representado pelo Escudo Sul-rio-grandense (ESRg), em conjunto com as áreas de escudo em Santa Catarina e Uruguai (Fig. 2). Na porção oeste do ESRg, são encontradas rochas de idade Paleoproterozoica a Arqueana. Apesar de existirem divergências quanto a sua interpretação genética, alguns autores relacionam essas rochas ao Terreno Nico Perez (Oyhantçabal *et al.*, 2011; Phillip *et al.*, 2016). As demais litologias do ESRg constituem os principais registros da orogenia Neoproterozoica do chamado ciclo Brasileiro/Pan-Africano e fazem parte de uma fração do Cinturão Dom Feliciano (CDF).

O CDF, no Rio Grande do Sul (RS), é dividido de oeste a leste em três unidades geotectônicas, sendo elas: Bloco São Gabriel (BSG), Bloco Tijucas (BT) e Batólito Pelotas (BP) (Fernandes *et al.*, 1995; Hartmann *et al.*, 2007a). No BSG são encontradas associações de rochas de caráter juvenil. Para Phillip *et al.* (2018), o bloco é composto por remanescentes de um complexo ofiolítico e dois arcos magmáticos, gerados entre 770-680 Ma. O BT é formado por rochas metamórficas supracrustais de baixo a médio grau (Jost & Bitencourt, 1980). O BP é constituído, majoritariamente, por rochas plutônicas pós-colisionais (Phillip *et al.*, 2002).



**Fig. 2** – Mapa geológico do Cinturão Dom Feliciano, em destaque, o denominado Bloco Encruzilhada, onde aflora o Pluton Arroio do Silva (*Fonte: Modificado de Bitencourt & Nardi, 2000*).

### 2.1.1 Batólito Pelotas

A ascensão e o posicionamento de corpos plutônicos no domínio granítico do CDF, que se estende de Santa Catarina ao Uruguai, ocorreram principalmente através de uma descontinuidade de escala litosférica chamada de Cinturão de Cisalhamento Sul-brasileiro (CCSb - Bitencourt & Nardi, 2000). O CCSb é formado por diversas zonas de cisalhamento dúcteis anastomosadas de direção predominantemente NE-SW. Os mesmos autores propõem que a colocação de corpos plutônicos ocorreu tanto dentro de zonas de alta deformação como fora delas.

Neste contexto, o Batólito Pelotas (BP - Fragoso Cesar *et al.*, 1986) representa o domínio granítico do CDF no estado do RS. O BP se situa na porção leste do ESRg, e possui uma extensão de direção NE-SW com cerca de 400 km e largura entre 80 km e 120 km (Phillip, 1998). O domínio é limitado a oeste em quase toda sua extensão

pela Zona de Cisalhamento Transcorrente Dorsal de Canguçu (ZCTDC), uma zona de cisalhamento de direção NE-SW com cinemática sinistral (Fernandes *et al.*, 1992).

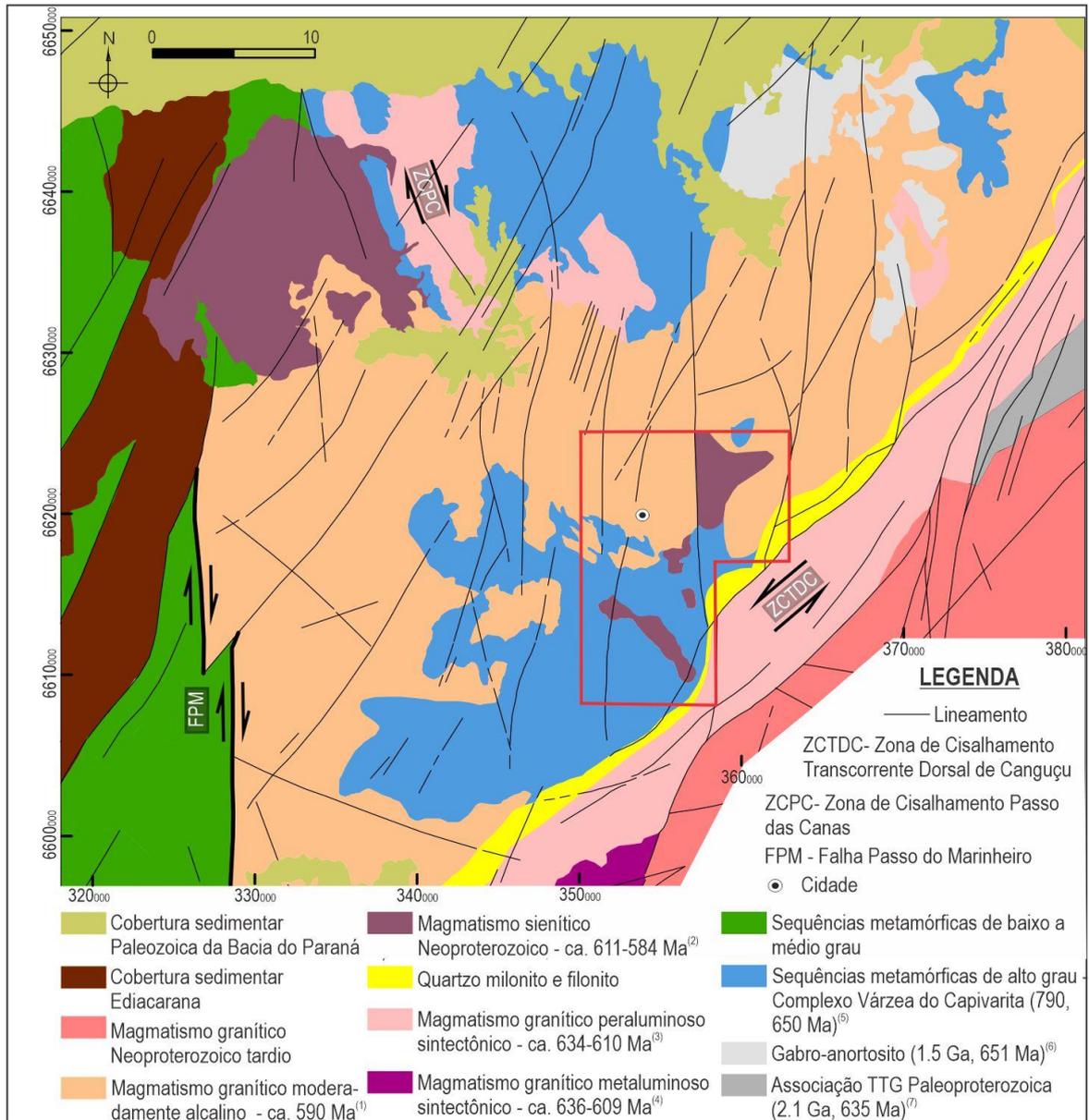
O BP foi definido por Fragoso Cesar *et al.* (1986), como um complexo plutônio multintrusivo e polifásico com evolução relacionada à adição de distintos processos tectônicos. É estimada uma duração de 70 Ma para o magmatismo que gerou o BP (Bitencourt & Nardi, 2000).

Seis suítes graníticas foram descritas para este domínio, sendo elas: Suíte Pinheiro Machado, Suíte Erval, Suíte Viamão, Suíte Encruzilhada do Sul, Suíte Cordilheira, Suíte Dom Feliciano, e uma suíte sienítica: Suíte Piquiri (Phillip, 1998; Phillip & Machado, 2001). Rochas metamórficas são encontradas em todas suítes do BP e são interpretadas como septos de embasamento (Phillip *et al.*, 2002a).

## 2.2 Bloco Encruzilhada

Na região de Encruzilhada do Sul, extremo noroeste do BP, está localizado o Bloco Encruzilhada (BE). O BE é limitado a leste pela ZCTDC e a oeste pela Falha Passo do Marinheiro (Fig. 3), uma falha de direção N-S com cinemática dextral (Jost & Hartmann, 1984). Esta área é definida por alguns autores como um bloco não pertencente ao BP (Hartmann *et al.*, 2016). Os autores propõem essa hipótese através da análise de dados aerogeofísicos de campo magnético total, em que são constatadas mais semelhanças entre o Bloco Tijucas (BT) e o BE em comparação ao BP. Através de traçados preliminares de lineamentos no BE, De Toni (2016) também observa similaridades maiores com o BT.

O BE é constituído majoritariamente por um extenso magmatismo Neoproterozoico, o qual é intrusivo em rochas metamórficas de fácies granulito. Seu embasamento é formado por rochas metamórficas e ígneas representadas pelo Anortosito Capivarita e pelo Complexo Várzea do Capivarita. A sequência estratigráfica do bloco é dada pelo magmatismo sintectônico do Granito Butiá e tem como seus membros estratigráficos finais o Maciço Sienítico Piquiri, o Pluton Arroio do Silva e a Suíte Encruzilhada do Sul, unidades que têm seu posicionamento associado a campos tensionais transtrativo e extensional. (Jacobs *et al.*, 2018; Padilha *et al.*, 2019; Rivera, 2019).



**Fig. 3** – Mapa geológico da região de Encruzilhada do Sul, onde está localizado o Bloco Encruzilhada. Em vermelho estão destacados os quatro corpos aflorantes do PAS (*Fonte: Modificado de Padilha et al., 2019*).

### 2.2.1 Complexo Várzea do Capivarita

O Complexo Várzea do Capivarita (CVC) aflora em duas áreas de maior expressividade, sendo uma delas na região de Encruzilhada do Sul, e está situado a oeste da ZCTDC, onde é observado um predomínio de rochas graníticas Neoproterozoicas (Martil, 2016). As rochas metamórficas do CVC são predominantemente paragneisses pelíticos e calci-silicáticos, com ortogneisses

subordinados, de fácies granulito. Injeções sieníticas sintectônicas ocorrem intercaladas com as litologias metamórficas do complexo (De Toni *et al.*, 2016).

O metamorfismo de fácies granulito do CVC foi datado em  $648 \pm 5$  Ma (U - Pb SHRIMP em zircão – Martil, 2016). Para as rochas ígneas do complexo foram obtidas idade de cristalização de  $642 \pm 10$  Ma (LA - ICP - MS zircão - Bitencourt *et al.*, 2011). As idades obtidas corroboram o caráter sintectônico das intrusões sieníticas com o metamorfismo de fácies granulito, interpretado como o evento colisional.

São descritas duas fases deformacionais ( $D_1$  e  $D_2$ ) para o CVC.  $D_1$  registra um regime tectônico de cavalgamento, tendo seu bandamento ( $S_1$ ) sub-horizontal com direção NNW e lineação de estiramento ( $L_{x1}$ ) com alta obliquidade.  $D_2$  é caracterizada por um bandamento ( $S_2$ ) sub-vertical de direção NNW e lineação de estiramento ( $L_{x2}$ ) de baixa obliquidade, indicando que sua gênese é decorrente da atividade progressiva de uma zona de cisalhamento oblíqua/transpressiva com cinemática dextral (Martil, 2016).

Na região a norte de Encruzilhada do Sul, na Folha Passo das Canas, ocorre o Sienito Arroio das Palmas (SAP). O SAP tem uma relação intrusiva sintectônica a deformação e ao metamorfismo de alto grau no CVC, tem textura porfirítica com fenocristais de K-feldspato branco, de até 2 cm, uma matriz rica em minerais máficos de textura média composta de biotita e clinopiroxênio. Anfibólio e quartzo intersticial ocorrem secundariamente (De Toni *et al.*, 2016).

Trabalhos realizados na região de Encruzilhada do Sul, Folha Encruzilhada do Sul, apontam para um predomínio de estruturas geradas por  $D_1$ . UFRGS (2010) descreve três domínios estruturais representantes de uma grande dobra sinforme com eixo de caimento para SW na área. É também individualizado um quarto domínio próximo a ZCTDC que os autores interpretam como estruturas que foram rotacionadas pela zona de cisalhamento. Bom *et al.* (2014) também interpreta as estruturas da área como relacionadas ao evento  $D_1$ . Todavia, os autores propõem a separação de dobras de menor escala para área, com eixos caindo para SW na porção mais a sul do CVC, e N a NE na região próxima a cidade de Encruzilhada do Sul. Costa (2018) corrobora a interpretação de uma grande dobra sinforme com eixo de caimento SW feita por UFRGS (2010).

### 2.2.2 Granito Butiá

Localizado na porção noroeste do Bloco Encruzilhada, o Granito Butiá (GB) é um biotita-muscovita-silimanita leucogranito foliado (Niessing *et al.*, 2008a). O GB é um corpo alongado de direção NNW-SSE com aproximadamente 65 km<sup>2</sup> sendo intrusivo no CVC. Lyra *et al.* (2018) descrevem a foliação de direção NNW-SSE e alto ângulo de mergulho no GB como sendo paralela ao bandamento gnáissico do CVC e interpretam que sua colocação é sincrônica à fase de deformação transcorrente (D<sub>2</sub>) descrita por Martil (2016) para o complexo. Bitencourt *et al.* (2015a) determinaram idade de cristalização de ca. 629 Ma através de análises por U-Pb ID-TIMS em monazita, o que é coerente com o período de atividade da zona de cisalhamento descrita para a área.

Pares SC de cinemática dextral são identificados ao longo do corpo (Lyra *et al.*, 2018). Os mesmos autores descrevem um caráter mais penetrativo dos planos C nas bordas do corpo com a formação de zonas centimétricas a métricas de alta deformação, onde localmente se desenvolve foliação milonítica. No centro da intrusão os autores descrevem uma diminuição da foliação com os planos S se tornando a estrutura predominante.

Através da técnica de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética (ASM), Lyra *et al.* (2018) definiram que as tramas estrutural e magnética do GB são concordantes. Os autores descrevem zonas de cisalhamento puro e simples para a colocação do corpo. Lineações magnéticas com ângulo de caimento moderado a alto aliado a elipsoides magnéticos fortemente oblatos marcam as zonas de cisalhamento puro. Para as zonas de cisalhamento simples foram identificadas lineações magnéticas paralelas à direção do corpo e com baixo ângulo de caimento. Para os autores, o posicionamento do GB foi dado por uma zona de cisalhamento NNW-SSE dextral, a qual é interpretada como um par conjugado da ZCTDC.

### 2.2.3 Maciço Sienítico Piquiri

Tessari & Picada (1966) foram os primeiros autores a definirem esta unidade, adotando a nomenclatura de Sienito Gnáissico Piquiri devido a considerarem sua estrutura de fluxo um bandamento gnáissico. O corpo foi redefinido como Sienito Piquiri (Jost *et al.*, 1985) e estabelecido como Maciço Sienítico Piquiri (MSP) por Vieira *et al.* (1989).

Sbaraini (2012) através de dados de ASM demonstrou que o MSP apresenta variações claras em sua trama magnética, corroboradas pela trama estrutural, para as diferentes variedades composicionais do corpo, levantando a hipótese de que o maciço poderia se tratar de um corpo multi-intrusivo. O caráter multi-intrusivo do MSP foi definido e caracterizado por Rivera (2019), que estabeleceu três pulsos para o maciço, definidos através de sua dinâmica estrutural e afinidade litológica. A autora obteve idade de cristalização em zircão através de análises em LA-MC-ICP-MS de  $609,3 \pm 1,5$  Ma para o pulso 1,  $603,4 \pm 3,9$  Ma para o pulso 2 e  $588,8 \pm 3,1$  e  $584,2 \pm 1,8$  Ma para o pulso 3.

O primeiro pulso tem composição predominantemente sienítica com alto teor de máficos, textura equigranular fina a muito fina, com tendência porfirítica dada por fenocristais esparsos de K-feldspato. O segundo pulso são sienitos de textura média a grossa com  $M'$  entre 5 e 15. No pulso três, predominam quartzo sienitos de textura heterogranular média/grossa, sendo sua mineralogia máfica de anfibólio e, eventualmente, biotita ( $M'$  entre 2 e 8).

Para Rivera (2019) uma das hipóteses para o posicionamento do MSP é a de ele tenha se dado através de uma zona de cisalhamento transtrativa de direção NNW-SSE. A autora também propõe que a intrusão do pulso três tenha ocorrido através de regiões profundas de falha, após o término da atividade da zona de cisalhamento, marcando o início do estágio de cratonização do BE. Cardoso (2019), através de um trabalho geofísico de modelamento gravimétrico no MSP, constatou que as maiores profundidades do corpo estão em sua porção leste. Esse dado corrobora a hipótese de Rivera (2019), pois é na porção leste do MSP que está localizada a zona de cisalhamento apontada como responsável pelo posicionamento do corpo.

#### 2.2.4 Pluton Arroio do Silva

O Pluton Arroio do Silva (PAS) tem sua expressão em mapa como quatro corpos individualizados, todavia dados estruturais concordantes entre os corpos apontam para uma continuidade do pluton em subsuperfície (Reis, 2006; Padilha *et al.*, 2019). O corpo norte do PAS é interpretado como um megaxenólito ou *roof-pendant* nos termos da Suíte Encruzilhada do Sul (SES), enquanto os outros três corpos a sul apresentam em mapa uma relação intrusiva no CVC.

Originalmente, a unidade foi definida por UFRGS (1992) como Suíte Intrusiva Arroio do Silva. Foram descritos como rochas de textura equigranular média, com termos tendendo a porfíricos, em que alguns deles apresentavam foliação magmática. Vasquez (1997) adota informalmente a nomenclatura de Sienito Arroio do Silva e associa a unidade a Suíte Intrusiva Encruzilhada do Sul. A denominação de Sienito Arroio do Silva é interpretada por Reis (2006) como não representativa, visto que a variação litológica no corpo é muito expressiva, e sugere a denominação de Sienitóides Arroio do Silva (SAS). Padilha *et al.* (2019) renomeiam os SAS para Pluton Arroio do Silva (PAS), devido a evidências de interação entre líquidos comagmáticos e de fontes distintas para a gênese do pluton.

Padilha *et al.* (2019) definem três variedades principais no corpo: uma quartzo sienítica a monzonítica, com textura média a grossa (qMS), uma quartzo monzonítica a monzodiorítica, com textura média a grossa (qMd) e uma quartzo diorítica, com textura média a fina (qD). O principal marcador na variação composicional entre os termos, além da variação no conteúdo de cristais de K-feldspato e plagioclásio, é o aumento progressivo no conteúdo de biotita de qMS para qD. Os termos qMS e qD são interpretados como polos composicionais, em que sua mistura gerou o termo híbrido qMd. Todas as variedades litológicas do pluton têm trama planar bem definida de direção NW-SE, porém não apresentam trama linear.

Tessari & Picada (1966) propuseram a primeira designação estratigráfica do PAS, agrupando as litologias do pluton ao MSP, chamado à época de Sienito Gnáissico Piquiri. Bitencourt *et al.* (1993) corroboram o agrupamento das duas unidades. No entanto, a separação de 30 km dos corpos por um extenso magmatismo granítico faz com que a adoção de um nome para a associação de rochas localizada

próxima a região de Encruzilhada do Sul seja a mais correta do ponto de vista estratigráfico.

Philipp *et al.* (2002) através de datação Pb-Pb em zircão, obteve o valor de  $612 \pm 3$  Ma para a cristalização do PAS, e  $611 \pm 3$  Ma para a cristalização do MSP, levando os autores a englobarem as unidades em uma única suíte, a qual foi denominada de Suíte Piquiri. Reis (2006) revisa e discute as relações estratigráficas entre as unidades e corrobora sua junção na denominada Suíte Piquiri. Padilha *et al.* (2019) obtiveram idade de cristalização pelo método U-Pb LA-MC-ICP-MS em zircão de  $578 \pm 4$  Ma para o termo qMS do pluton, apontando para uma relação temporal com o pulso 3 descrito por Rivera (2019) para o MSP. Além de próximos temporalmente, dados geoquímicos semelhantes entre variedades do PAS e do MSP, indicam que a correlação feita por Philipp *et al.* (2002) é coerente. Os dados geocronológicos e geoquímicos obtidos tanto para o PAS como para o MSP sugerem uma importante contribuição mantélica no estágio pós-colisional em um período extensional do Ciclo Brasileiro/Pan-Africano.

#### 2.2.5 Suíte Encruzilhada do Sul

Tessari & Picada (1966) foram os primeiros autores a definirem as variações composicionais e texturais presentes na unidade, nomeando-a de Complexo Granítico Encruzilhada. Todavia, a definição de complexo não é a mais adequada, na medida que as rochas plutônicas da unidade podem ser individualizadas e distinguidas das rochas metamórficas encaixantes. A nomenclatura Suíte Intrusiva Encruzilhada do Sul foi proposta por Soliani Jr (1986) e Issler & Pires (1989), visando uma definição mais compatível para a unidade litodêmica. Trabalhos recentes adotam a nomenclatura de Suíte Encruzilhada do Sul (SES - Jacobs *et al.*, 2018), visto que o termo “intrusiva” se torna redundante dado que a unidade é composta somente de corpos plutônicos.

A SES ocorre na porção noroeste do BP e tem sua forma alongada na direção N30°E, com cerca de 55 km de comprimento e 35 km de largura (Jacobs *et al.*, 2018). O Granito Encruzilhada (GE) é a principal unidade da suíte, sendo dividido em dois plutons por Vasquez (1997). O autor caracteriza também duas fácies petrográficas para o GE, sendo elas fácies monzogranito porfirítico e fácies sienogranito equigranular. Não são observadas estruturas de fluxo significativas nas variedades

composicionais e texturais do GE. Jacobs *et al.* (2018) não corroboram a divisão feita por Vasquez (1997) de dois plutons para o GE, classificando-o como um maciço, com quatro fácies, que vão de porfirítica a equigranular. Corpos dioríticos e enclaves máficos microgranulares contemporâneos ao GE, além de granitoides híbridos, também fazem parte da SES (Jacobs *et al.*, 2018). Os autores propõem que a geração, a ascensão e o posicionamento da SES foram controlados pela reativação com cinemática extensional da ZCTDC.

### **2.3 Tramas magmáticas associadas ao posicionamento de corpos plutônicos**

A análise estrutural é uma importante ferramenta na investigação das tensões a que qualquer corpo rochoso tenha sido submetido. O entendimento de estruturas com base no seu padrão geométrico, sua distribuição e sua formação, permitem a caracterização e interpretação de diversos eventos geológicos. Essas feições geológicas são comumente separadas em dois grupos: primárias e secundárias. São consideradas primárias àquelas relacionadas ao momento de formação da rocha, estruturas de fluxo em corpos ígneos e estratificação em rochas sedimentares, por exemplo. Estruturas secundárias estão relacionadas à deformação de estruturas primárias, como dobras, falhas ou estruturas metamórficas (Fossen, 2012).

A interpretação de estruturas magmáticas em corpos plutônicos tem sido tema de debate há muitos anos. Compreender as forças motrizes responsáveis pela geração de tramas magmáticas envolve uma série de análises nas mais diversas escalas e mesmo assim pode levar a conclusões enganosas (Paterson *et al.*, 1998). Habitualmente, são estabelecidas relações diretas entre estruturas magmáticas e a ascensão e posicionamento de corpos plutônicos. Essa relação, apesar de verdadeira, não deve ser tomada como uma ligação direta.

Adota-se a classificação de pré-tectônico, sintectônico e pós-tectônico para plutons, indicando uma relação de temporalidade entre a intrusão e a deformação regional atuante (Paterson & Tobisch, 1988). Apesar de problemática, devido a variações na interpretação dos termos “pré”, “sin” e “pós”, essa classificação é muito utilizada na descrição de plutons. Corpos pré-tectônicos são àqueles em que a deformação registrada é posterior a sua cristalização. Unidades referidas como

sintectônicas têm seu posicionamento e cristalização concomitantes com o evento deformacional, e.g. Sienitos Arroio das Palmas e Granito Butiá (De Toni *et al.*, 2016; Lyra *et al.*, 2018). Para corpos pós-tectônicos é considerado que o posicionamento e a cristalização ocorreram posteriormente à deformação regional.

Dentro da classificação de pós-tectônico são estabelecidos dois modelos de posicionamento para plutons, sendo eles forçado e passivo. O posicionamento forçado é marcado pelo desenvolvimento de foliação penetrativa na rocha encaixante, sendo essa aproximadamente paralela aos contatos do pluton. No posicionamento passivo não há deformações significativas relacionadas ao posicionamento do corpo nas suas rochas encaixantes. Além disso, é comum que os contatos do pluton cortem em ângulo as estruturas regionais das litologias encaixantes (Paterson & Tobisch, 1988).

O posicionamento de corpos plutônicos é muitas vezes associado a extensão local ou regional de níveis crustais rasos a médios. Tais modelos trazem em si um conceito empírico de que é preciso estender as rochas encaixantes para acomodar o magma ascendente. Todavia, diversos trabalhos sugerem que não há razões para que o posicionamento de magmas seja favorecido por esforços extensionais em detrimento de esforços contracionais (e.g. Paterson & Fowler, 1993; Bitencourt & Nardi, 2000). Em adição a análises regionais, parâmetros como a distribuição de tamanho dos cristais, conteúdo de voláteis e a reologia do magma, podem oferecer uma visão mais detalhada de como operam os processos de ascensão e posicionamento de rochas plutônicas (Zellmer & Annen, 2008).

Paterson *et al.* (1998) sugerem que para a interpretação correta de trajetórias de deslocamento, a partir da configuração final de uma trama magmática, é necessário que se estabeleçam relações entre fluxo, tensão e comportamento das partículas. Os mesmos autores também apontam que a identificação do momento de formação da trama é primordial para o entendimento estrutural de um corpo ígneo, visto que tramas magmáticas não marcam variações tensionais com precisão e comumente registram somente os incrementos finais de tensão aos quais o magma foi submetido. Logo, muitas vezes as estruturas geradas no momento de ascensão ou mesmo de posicionamento de plutons são apagadas pelas tensões finais aplicadas no corpo.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Pré campo

##### 3.1.1 Revisão bibliográfica

O entendimento geológico da área do projeto é de fundamental importância para que se aliem os objetivos propostos com suas implicações geológicas. Para tanto, foram realizadas leituras de artigos, dissertações, teses e publicações relacionadas à área de estudo (Fragoso Cesar *et al.*, 1986; Bitencourt & Nardi, 2000; Phillip *et al.*, 2002; Reis, 2006; UFRGS, 2010; Sbaraini, 2012; Bom *et al.*, 2014; De Toni *et al.*, 2016; Martil, 2016; Lyra *et al.*, 2018; Costa, 2018; Gomes, 2018; Rivera, 2019; Cardoso, 2019; Padilha *et al.*, 2019). É importante salientar que a etapa de revisão bibliográfica se estendeu ao longo de todo o projeto e foi colocada junto a etapa “Pré campo” por ter sido desenvolvida desde o começo do trabalho.

##### 3.1.2 Planejamento de campo

Para esta etapa foram utilizados como base trabalhos desenvolvidos no PAS (e.g. Reis, 2006; Padilha *et al.*, 2019) aliados a compilações de cadernetas de campo de projetos desenvolvidos na área. Em um primeiro momento, esses dados serviram como base para identificação de afloramentos representativos, grau de alteração dos mesmos e sua dispersão geográfica. A análise desses dados permitiu que um afloramento-chave fosse selecionado para realização de levantamento estrutural de detalhe, com objetivo de aprofundar o entendimento das variações estruturais em diversas escalas no pluton.

Foram utilizadas imagens de satélite (*Google Earth*) para prospecção de novos afloramentos. As imagens obtidas permitiram que a distribuição dos pontos prospectados abrangesse áreas com carência de dados, além de um aumento na malha de sítios que serão amostrados para as análises de ASM. Em função da

amostragem para ASM ser realizada com uma perfuratriz que necessita de água para sua refrigeração, a identificação dos acessos e disponibilidade de água nos sítios é fundamental para que a etapa de campo não conte com imprevistos.

## 3.2 Campo

### 3.2.1 Levantamento estrutural regional

Uma etapa de campo foi realizada afim de que os afloramentos prospectados na etapa pré-campo fossem verificados. Foram feitos perfis nos quatro corpos aflorantes do PAS, em que foram coletados dados petrográficos e estruturais das variedades litológicas do pluton. Os perfis foram planejados de maneira que áreas com maior carência de dados, principalmente estruturais, fossem priorizadas. A metodologia adotada para descrição envolveu a representação esquemática do afloramento de interesse em escala, para que a distribuição e relação das litologias e/ou estruturas pudesse ser observada. Os dados em campo foram compilados em caderneta de mão e as estruturas foram medidas com uma bússola modelo *Brunton*. Amostras orientadas foram coletadas para análises posteriores em laboratório.

Em conjunto com o levantamento estrutural regional, essa etapa teve como objetivo a verificação e prospecção de sítios para amostragem de ASM. Para esse tipo de amostragem é importante que as rochas estejam *in situ* e o seu grau de alteração seja baixo. Foram testados também os acessos e a disponibilidade de água dos afloramentos, visto que amostragem para essa técnica necessita que a broca utilizada para retirada dos cilindros seja lubrificada e resfriada.

### 3.2.2 Detalhamento estrutural

Um afloramento chave foi selecionado com base em sua complexidade estrutural para a realização de levantamento estrutural de detalhe. Em um perfil NE-

SW, com aproximadamente 140 m de comprimento, foram selecionados dez pontos com boa exposição de rocha para detalhe. Primeiramente, foi feita uma observação geral do afloramento para que se identificassem e se criassem legendas atribuídas às variações litológicas, texturais e estruturais. Em seguida, descrições petrográficas para cada litologia e variação textural foram realizadas e associadas a uma legenda.

Com as observações gerais do perfil estabelecidas, partiu-se para a representação de cada ponto selecionado. Os pontos foram representados em folhas milimetradas A3 em escala 1:12,5. O objetivo dessa etapa do trabalho consiste em detalhar ao máximo as relações de contato entre as principais litologias, feições texturais e variações estruturais. Em conjunto com a representação gráfica do ponto foram tomadas fotos das suas principais feições e estruturas. As medidas estruturais foram feitas com bússolas modelo *Brunton* e *Clar*, e a notação utilizada foi em trama, comumente chamada de “mergulho/sentido de mergulho”. Amostras orientadas foram coletadas ao longo do perfil para análises posteriores em laboratório.

### 3.2.3 Coleta de amostras

A coleta de amostras é fundamental para qualquer trabalho geológico. Um ponto crítico para que os dados de campo possam ser correlacionados e integrados em laboratório é o de que a amostra seja orientada. Nesse procedimento é realizada a coleta simples da amostra, para em seguida recolocá-la na posição original e medir um plano qualquer na mesma. Marca-se na face medida um símbolo que representa a direção e o sentido de mergulho do plano medido.

### 3.2.4 Amostragem para Anisotropia de Susceptibilidade Magnética

Uma perfuratriz portátil da marca *STIHL* foi utilizada para a obtenção de cilindros orientados. A máquina é composta por um motor dois tempos movido à gasolina, onde é acoplada uma broca cilíndrica oca com a extremidade diamantada.

A broca tem diâmetro de 1” e 20 cm de comprimento. Um galão com uma mistura de água e óleo solúvel biodegradável é ligado à perfuratriz através de uma mangueira. A mistura é bombeada até a base da broca com objetivo de lubrificar e resfriar o processo (Fig. 4a).

Primeiramente, foram feitas marcações com 1 cm de profundidade rentes aos locais que foram perfurados para caso o cilindro quebre haja um referencial para seu reposicionamento (Fig. 4c-i). Cada amostra deve ter sua posição espacial registrada através de um orientador (Fig. 4d-i), o qual é composto por uma haste cilíndrica oca, onde acopla-se na extremidade um transferidor, para medição de ângulo da inclinação do furo, uma bússola magnética e uma bússola solar. A bússola solar permite que as medições sejam feitas com precisão mesmo que a magnetização da rocha seja alta. A obtenção desses dados é um dos pontos críticos da técnica, visto que a orientação correta dos espécimes é primordial para que as leituras feitas posteriormente no laboratório sejam corretas.

Quando não há quebra do cilindro durante a perfuração, a haste do orientador é encaixada no furo, sem que se retire o testemunho, e a bússola é nivelada horizontalmente. Após o nivelamento, foram feitas as leituras de medidas magnéticas e solar, em que foi registrado o horário, assim como a inclinação do furo. Uma ranhura na base do orientador foi usada como referência para o registro do azimute de direção do furo. Um fio de cobre foi utilizado nessa ranhura para marcar o cilindro (Fig. 4b-i) afim de que posteriormente essa marcação seja registrada com uma caneta permanente (Fig. 4e) identificando o topo e a base do espécime.

Não é incomum que ocorra a quebra do cilindro durante a perfuração. Nesses casos, registra-se a orientação do furo sem o testemunho. Em seguida, a ranhura na extremidade do orientador é marcada com caneta permanente diretamente na rocha, do lado externo do furo. Então, utilizando a marcação de 1 cm de profundidade feita antes da perfuração final, se reposiciona o testemunho e transfere-se a orientação da ranhura do orientador para o testemunho.



**Fig. 4** - Processo de amostragem: (a) perfuração realizada com perfuratriz manual com broca diamantada e sistema de arrefecimento/lubrificação acoplado; (b) marca de referência e processo de marcação com arame de cobre (i); (c) Furos em que foram coletados os cilindros, note que cada furo tem uma marcação rente a ele, que serve como referencial; (d) orientação de furo em que foram obtidas a inclinação, o azimute solar e magnético do furo; (e) transferindo o referencial geográfico para o cilindro após sua orientação.

### 3.3 Pós campo

#### 3.3.1 Vetorização e apresentação gráfica dos dados estruturais

As atitudes das estruturas apresentadas no trabalho foram geradas através do *software* Stereo32®, nas quais foi adotada uma projeção estereográfica equiárea no hemisfério inferior. O *software* CorelDrawX9® foi utilizado para a vetorização e edição dos estereogramas, além da vetorização de todo o perfil de levantamento estrutural de detalhe.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Caracterização estrutural regional do Pluton Arroio do Silva

Diagramas equiárea de projeção no hemisfério inferior com medidas de estruturas planares foram elaborados para cada um dos quatro corpos aflorantes do PAS. Para um maior nível de detalhe, a área em que aflora o PAS foi subdividida em três partes (Fig. 5). A primeira área foi definida como “corpo norte” e é a ocorrência do PAS de maior extensão, aproximadamente 16 km<sup>2</sup>. A segunda área, chamada de “corpos centrais”, é onde estão as duas menores áreas de exposição do pluton, cada corpo abrangendo aproximadamente 4 km<sup>2</sup> e 1 km<sup>2</sup>. Por fim, a região mais a sul foi estabelecida como “corpo sul”, onde o PAS aflora em uma área aproximada de 8 km<sup>2</sup>.

A divisão das três regiões visa otimizar a caracterização estrutural de cada área aflorante permitindo a observação da distribuição espacial com relação à geometria interna de cada corpo. Foram efetuadas 63 medidas de atitude de estruturas planares para o corpo norte, 61 para os corpos centrais e 32 para o corpo sul. Majoritariamente, essas medidas foram obtidas em trabalhos de campo realizados pelo autor. Um banco de dados pré-existente também foi utilizado de forma complementar para maior aporte de dados.



#### 4.1.1 Corpo norte

As litologias predominantes no corpo norte são quartzo sienitos e quartzo monzonitos, com termos quartzo monzodioríticos subordinados. Apesar de não ser possível uma separação clara em mapa, há um predomínio de rochas quartzo monzodioríticas na porção oeste do corpo. Em dois pontos ocorre o contato entre litologias do PAS e termos básicos da Suíte Encruzilhada do Sul (SES).

Os termos quartzo sieníticos comumente têm textura equigranular média a grossa, porém pontualmente tendem a ser porfiríticos, onde fenocristais de K-feldspato destacam-se da matriz. As principais características dessa variedade são a euedria dos cristais de K-feldspato, a presença de hornblenda como principal mineral máfico e o baixo índice de cor,  $M'$  (6-8).

Nas variedades quartzo monzoníticas é observada somente textura equigranular média a grossa. A variedade é marcada ainda pela euedria dos cristais de K-feldspato, porém há um aumento na quantidade de biotita, que ocorre em agregados máficos de biotita + hornblenda, resultando em um  $M'$  de 10-15.

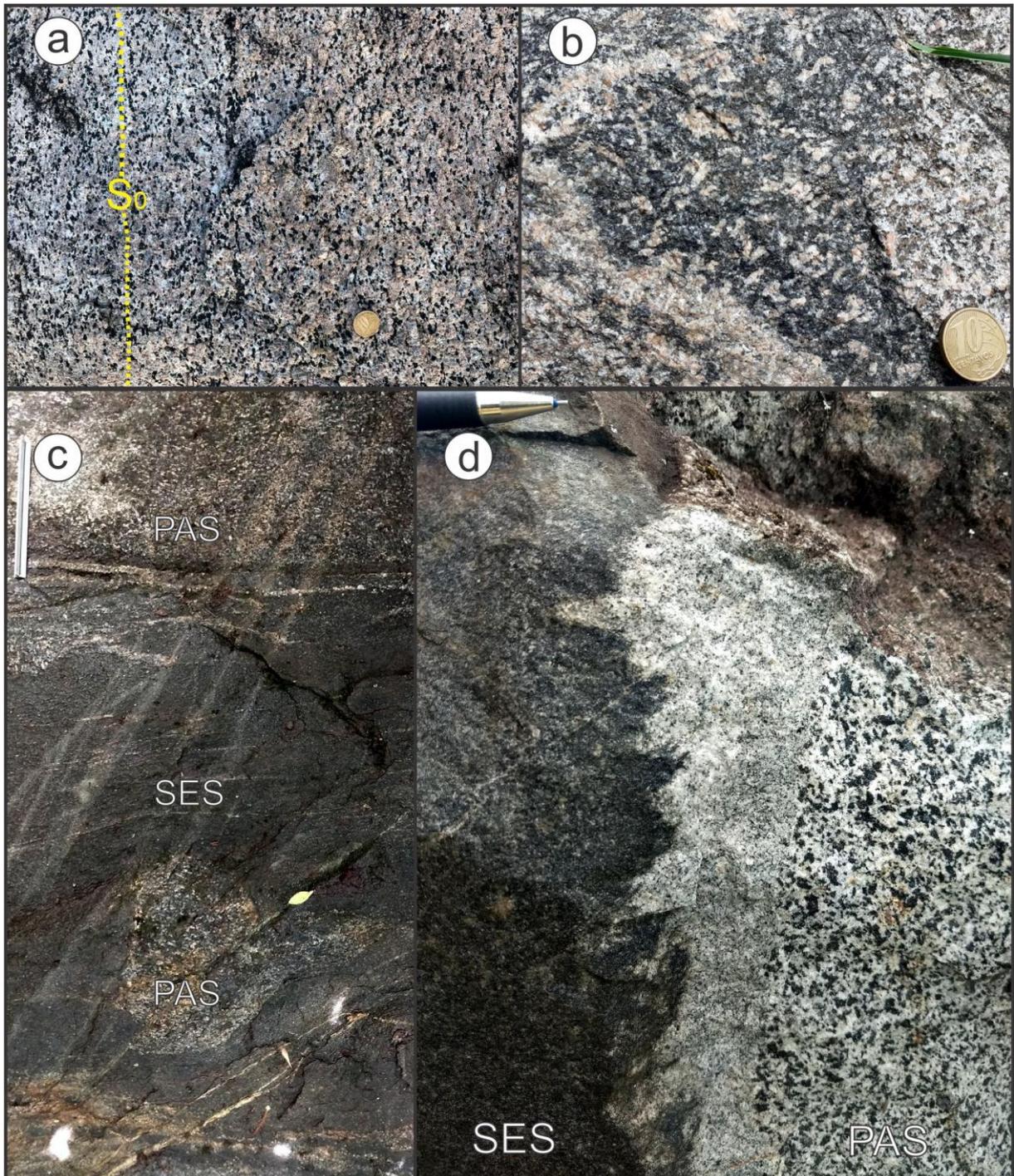
Para os termos quartzo monzodioríticos é constatado predomínio da textura porfirítica, com megacristais de K-feldspato se destacando na matriz rica em minerais máficos. As principais características dessa variedade são o caráter anédrico dos megacristais de K-feldspato e o aumento do conteúdo de biotita, que passa a ser mais abundante que hornblenda. Núcleos de clinopiroxênio em hornblenda, quartzo fumê intersticial e  $M'$  de 15-25 também caracterizam esta variedade.

As rochas dioríticas encontradas na região têm textura equigranular fina a média. A ausência de hornblenda na mineralogia máfica, que é composta somente de biotita, com  $M'$  de 35-40, caracterizam essas ocorrências como sendo da Suíte Encruzilhada do Sul. Diferentemente das rochas do PAS, a mineralogia máfica não forma agregados e o quartzo intersticial ocorre em quantidades traço.

Em todas as litologias descritas há uma foliação magmática bem desenvolvida. Nos termos sieníticos e monzoníticos, a foliação é marcada pelo alinhamento de forma dos cristais euédricos de K-feldspato e ressaltada pelos agregados máficos, que comumente formam agregados alongados no plano da foliação (Fig. 6a). Localmente os sienitos tendem a desenvolver um bandamento paralelo à foliação principal que é marcado pela diferença de tamanho nos cristais de K-feldspato. Essas bandas

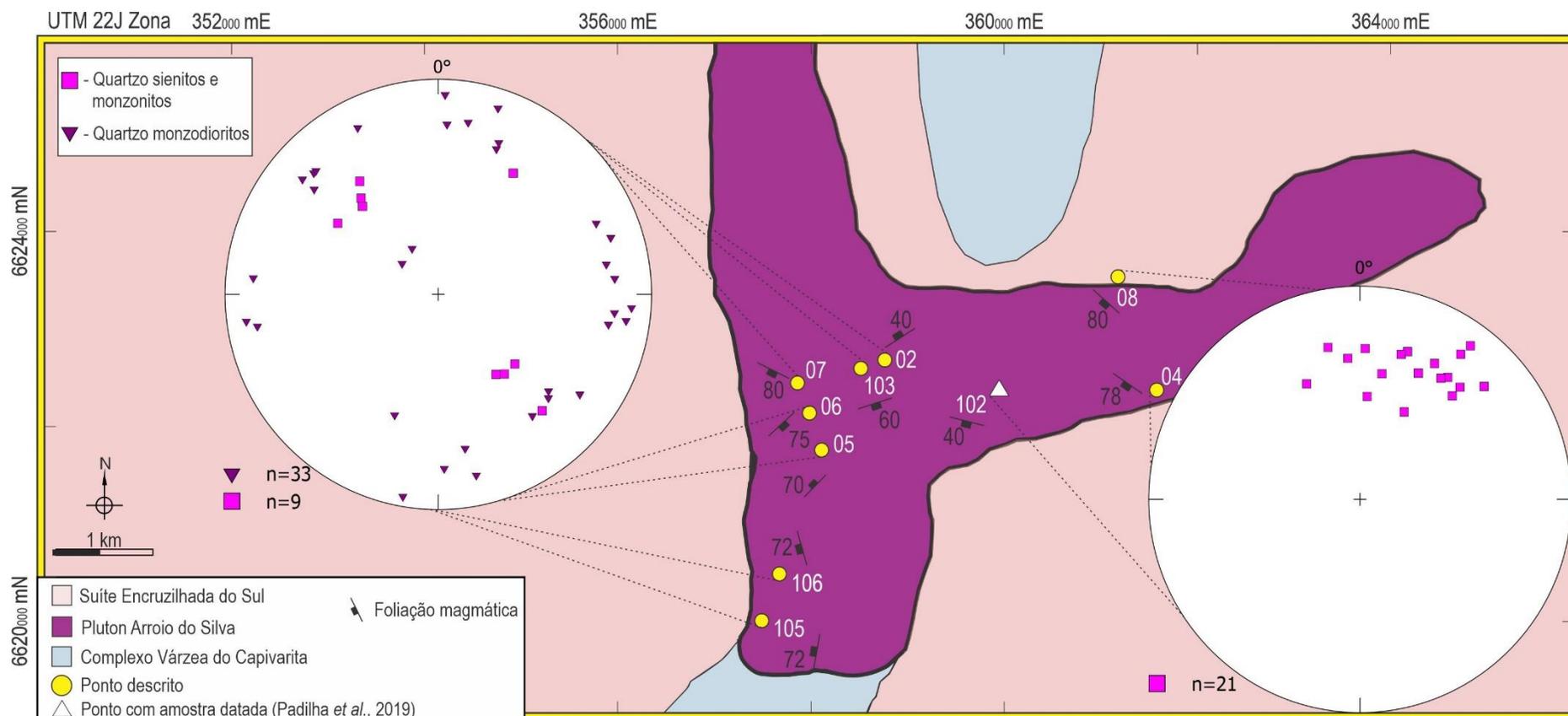
irregulares de espessura centimétrica têm limites difusos e sua continuidade se estende em no máximo um metro. Em um ponto foi observada uma zona de cisalhamento de espessura centimétrica cortando obliquamente a foliação principal. As composições monzodioríticas têm sua trama magmática marcada principalmente pelos agregados máficos alinhados nos planos da foliação. Nestas variedades, os cristais de K-feldspato mostram uma orientação preferencial fraca (Fig. 6b). Os dioritos observados na região têm foliação marcada pelo alinhamento de forma dos cristais de plagioclásio e biotita. Nos pontos em que foram observadas interações das litologias do PAS com os dioritos da SES pode-se constatar uma foliação concordante entre as unidades. O contato entre as rochas é difuso e localmente o diorito engloba parte do monzodiorito (Fig. 6c), não sendo observada a relação contrária. Comumente uma rocha de textura equigranular fina com quartzo facetado e cristais de biotita disseminados ocorre entre o termo básico do SES e o sienito do PAS. O contato dessa litologia com o diorito é crenulado, indicativo de baixa diferença na viscosidade, ao passo que com o sienito, apesar de difuso, torna-se aproximadamente reto (Fig. 6d). Essas características apontam para que a rocha seja o termo granítico da SES.

A orientação da trama magmática observada no corpo norte é variável. As direções medidas estão dispostas nos quatro quadrantes possíveis, e os ângulos de mergulho variam de sub-horizontais a sub-verticais. Todos os termos registram essa grande variação, não sendo possível a individualização de uma litologia em que a variação esteja concentrada (Fig. 7).



**Fig. 6** - (a) Quartzo sienito com foliação magmática marcada pelo alinhamento dos cristais de K-feldspato e agregados máficos. (b) Quartzo monzodiorito com distribuição aleatória dos cristais de K-feldspato. (c) Porção do quartzo monzodiorito englobada pelo diorito. (d) Rocha granítica de textura equigranular fina no contato entre termo sienítico do PAS e diorito da SES; notar o contato crenulado com o termo diorítico e reto com o sienito.

Quando observada a distribuição dos pontos e suas respectivas medidas, constata-se que as maiores variações estão concentradas na porção oeste do corpo. A parte leste registra uma maior homogeneidade na direção da foliação magmática, que varia de E-W a NW-SE, mantendo comumente ângulo de mergulho médio a alto.



**Fig. 7** – Mapa geológico esquemático do corpo norte com estereogramas mostrando os polos das estruturas planares medidas (Fonte: Modificado de Padilha et al., 2019).

#### 4.1.2      Corpos centrais

Os dois corpos centrais do PAS têm rochas de composição predominantemente quartzo sienítica e quartzo monzonítica. Localmente, são observadas feições de assimilação do PAS pela SES. O corpo central norte é intrusivo no CVC e em sua porção norte é intrudido pela SES. O corpo central sul não faz contato em mapa com as rochas do SES e é intrusivo nas litologias do CVC.

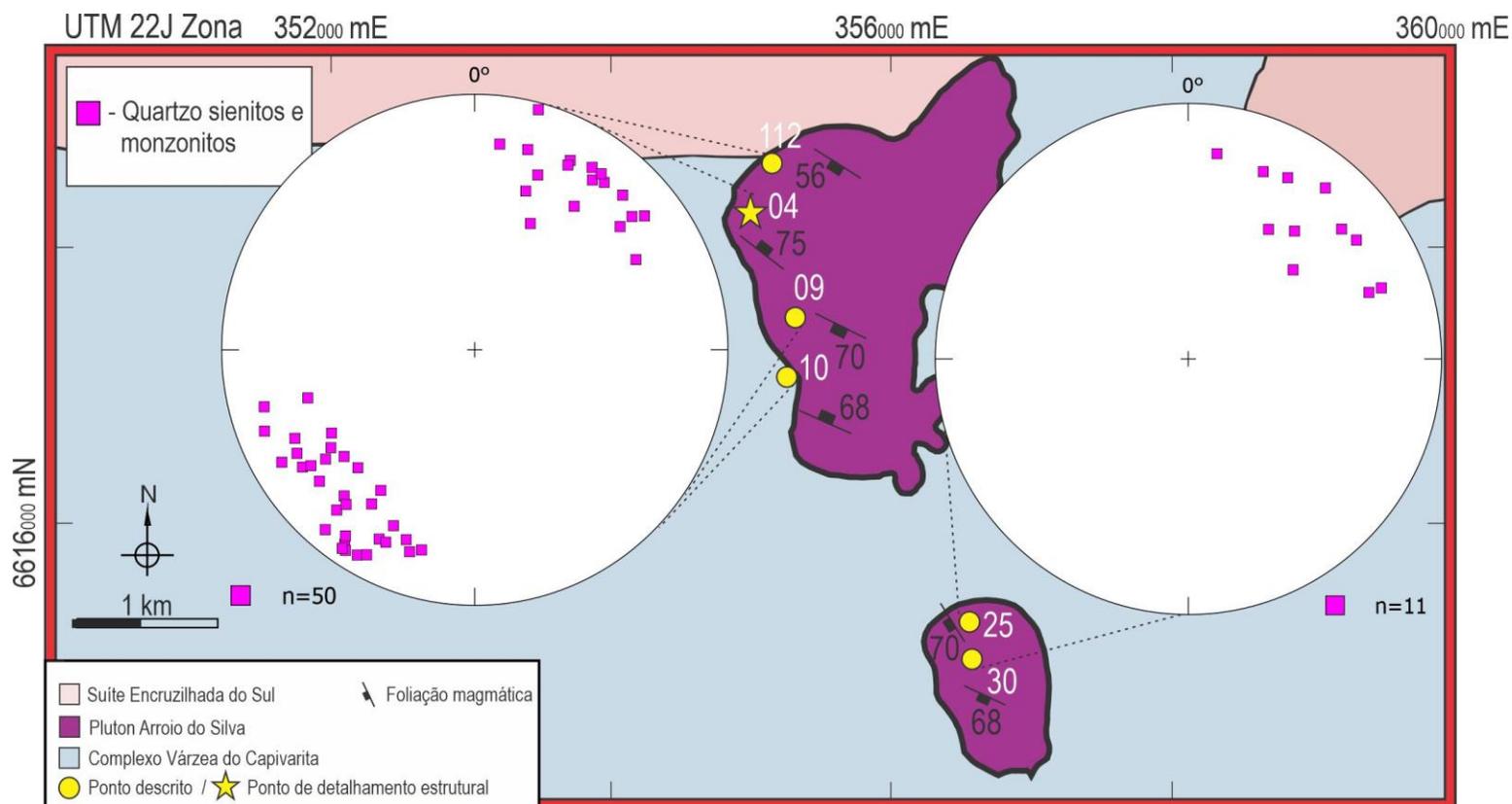
Para estes corpos, os termos quartzo sieníticos apresentam texturas equigranular média a grossa e porfirítica nas mesmas proporções. Quando porfiríticos, são marcados por fenocristais euédricos de K-feldspato de até 2,5 cm, com matriz composta de agregados máficos de hornblenda, piroxênio, biotita em menor proporção, e quartzo intersticial. Os fenocristais de K-feldspato comumente têm zonação interna, observada pela diferença de cor do núcleo para as bordas, sendo o seu núcleo sempre mais escuro que as bordas. Não são observadas variações composicionais importantes apesar das variações texturais. Ambas mantêm as características na euedria dos cristais de K-feldspato, hornblenda como principal mineral máfico e  $M'$  de 6-8. Os termos quartzo monzoníticos são equigranulares médios a grossos e mantêm as mesmas características observadas no corpo norte quanto à euedria do K-feldspato e um aumento da mineralogia máfica, marcada principalmente pela biotita, com  $M'$  de 10-15.

A foliação magmática tanto para os quartzo sienitos como para os quartzo monzonitos é marcada pelo cristais euédricos de K-feldspato, que se alinham no plano da foliação, e pelos agregados máficos, os quais se distribuem alongados juntos à foliação (Fig. 8a). Nos sienitos porfiríticos é comum que agregados máficos de textura equigranular média, compostos de cristais euédricos de hornblenda, formem bandas centimétricas alongadas concordantes à foliação (Fig. 8b).



**Fig. 8** – (a) Quartzo sienito com os fenocristais de K-feldspato alinhados na foliação destacada em tracejado amarelo. (b) Agregados máficos de cristais de hornblenda concordantes com a foliação magmática.

Nos dois corpos centrais observa-se concordância de direção NW-SE para a trama magmática, com ângulos de mergulho que variam de médios a altos (Fig. 9). Essas medidas representam as estruturas dominantes nos dois corpos e condizem com o padrão estrutural geral observado no pluton. No entanto, variações na trama magmática podem ser observadas em menor escala. Será apresentado na sequência do trabalho um perfil de detalhe estrutural em que são representadas as variações estruturais observadas apenas em escala local.



**Fig. 9** – Mapa geológico esquemático dos corpos centrais com estereogramas mostrando os polos das estruturas planares medidas (Fonte: Modificado de Padilha *et al.*, 2019).

#### 4.1.3 Corpo sul

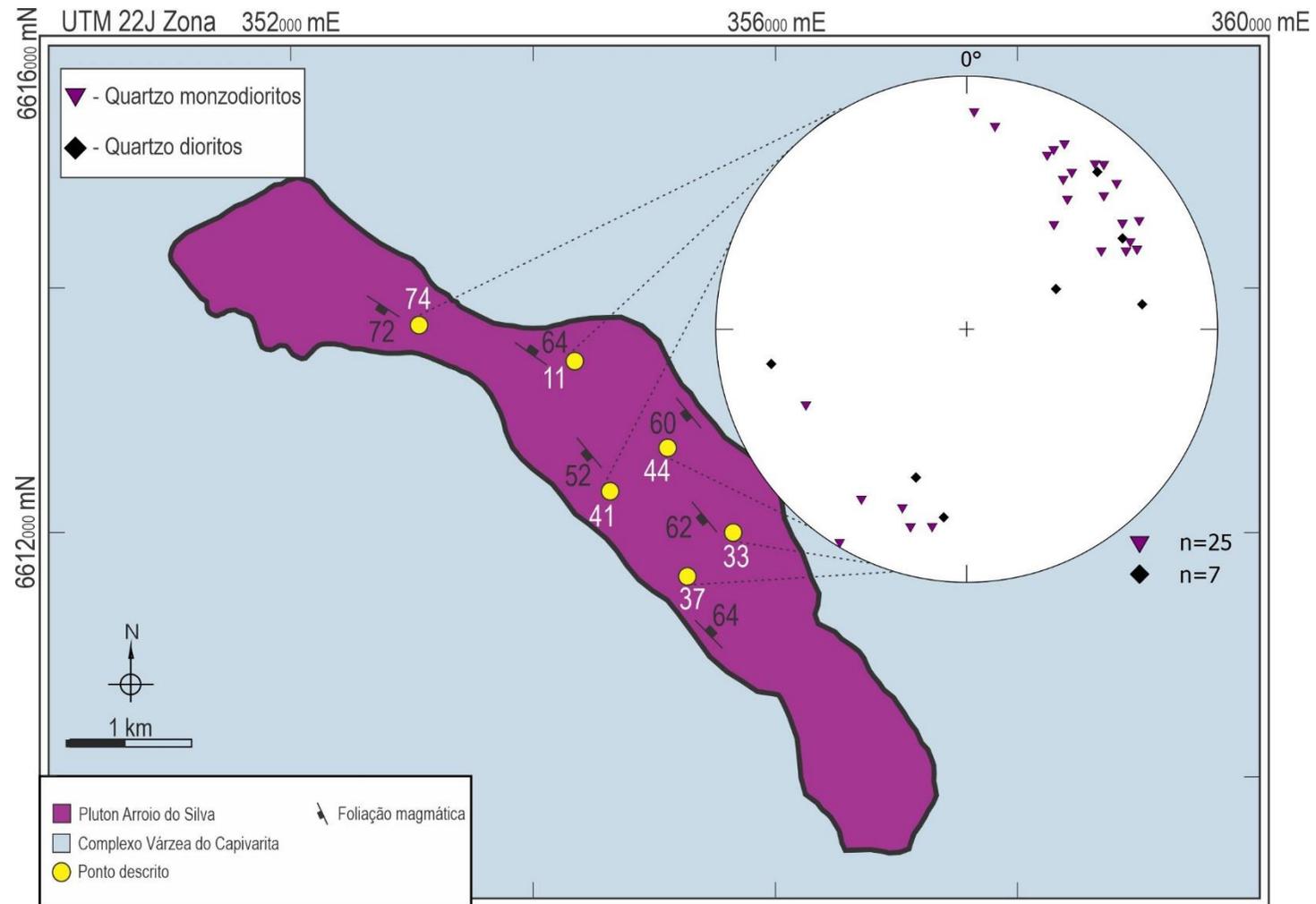
No corpo sul do PAS há um predomínio de rochas de composição quartzo monzodioríticas com rochas quartzo dioríticas subordinadas. O corpo é intrusivo no CVC, não fazendo contato em mapa com a SES. Localmente é observado metamorfismo de contato marcado pelo desenvolvimento de silimanita com hábito radial nos gnaisses pelíticos do CVC.

Nesse corpo, as litologias quartzo monzodioríticas têm geralmente textura equigranular fina a média, porém são constatadas pontualmente termos cuja textura tende a porfirítica. Neste caso, os fenocristais são de plagioclásio com até 0,3 cm em matriz máfica composta por agregados de biotita, com hornblenda subordinada. O elevado conteúdo de biotita, que resulta em  $M'$  de 20-25, e quartzo fumê intersticial, também caracterizam essa variedade.

Os termos quartzo dioríticos têm textura equigranular fina a média. Cristais euédricos de plagioclásio, aliados ao aumento do conteúdo de biotita, em comparação aos quartzo monzodioritos, com a ocorrência de hornblenda tornando-se mais rara, além de um  $M'$  de 30, caracterizam essa variedade.

Tanto os termos quartzo monzodioríticos como os quartzo dioríticos têm foliação magmática bem definida. Nos quartzo monzodioritos, a trama é marcada principalmente pelos agregados máficos, que se dispõem alinhados no plano da foliação, juntamente com o alinhamento de forma dos cristais de plagioclásio. Os quartzo dioritos têm trama marcada pelo forte alinhamento de forma dos cristais de plagioclásio, a qual é ressaltada pelos agregados de biotita, com hornblenda subordinada.

No corpo sul, assim como nos corpos centrais, observa-se concordância de direção NW-SE para a foliação magmática. Os ângulos de mergulho são predominantemente médios a altos, porém se comparados aos dos corpos centrais, apresentam uma maior variabilidade (Fig. 10). Constata-se que os corpos do PAS que não são intrudidos de forma significativa pela SES, mantêm a coerência estrutural da foliação magmática, com leves variações no seu ângulo de mergulho.



**Fig. 10** – Mapa geológico esquemático do corpo sul com estereogramas mostrando os polos das estruturas planares medidas (*Fonte: Modificado de Padilha et al., 2019*).

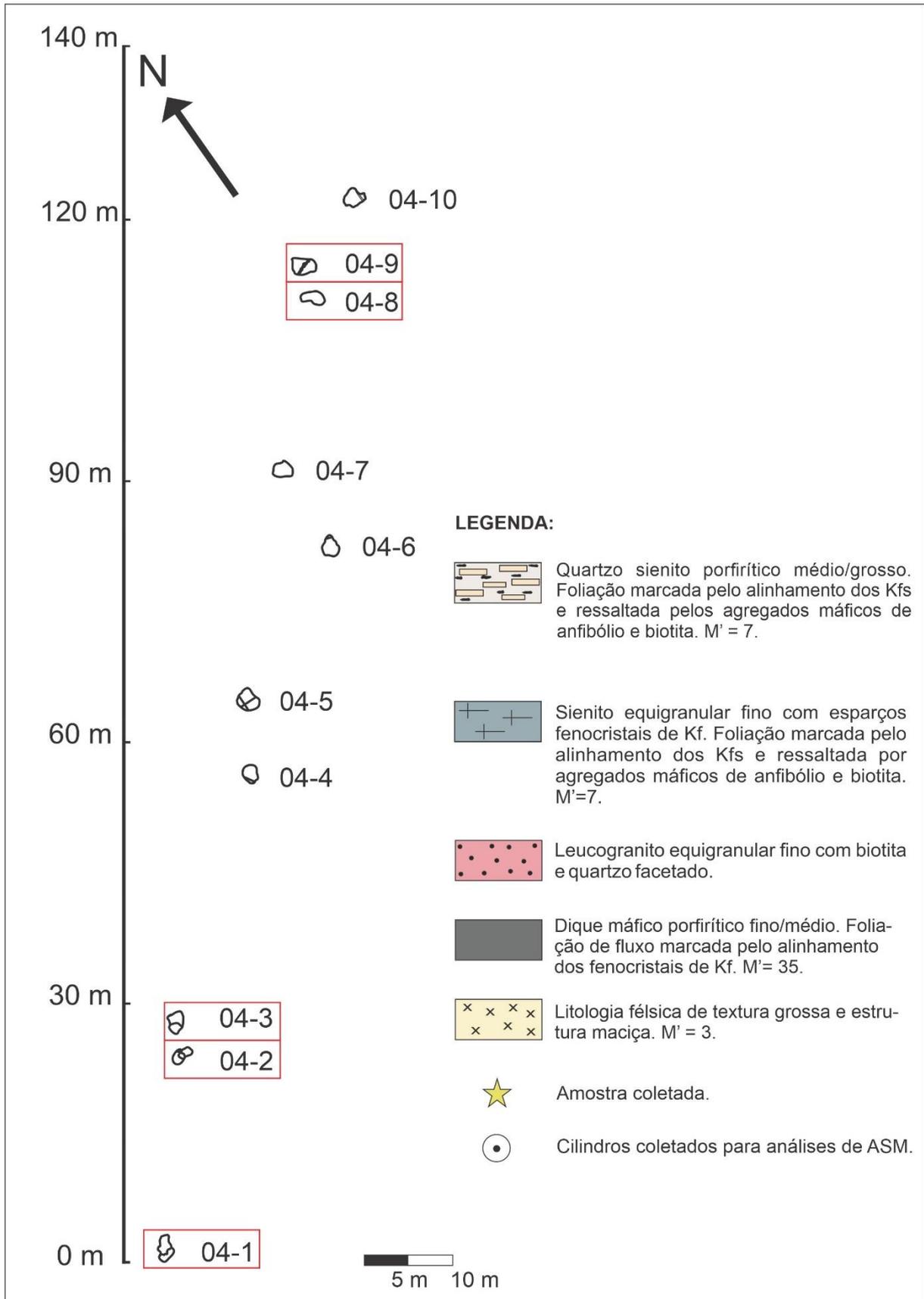
## 4.2 Análise estrutural de detalhe do Pluton Arroio do Silva

Em complemento às análises regionais, um afloramento chave foi selecionado no corpo central norte para a realização de levantamento estrutural de detalhe. No perfil NE-SW, com aproximadamente 140 m de comprimento, foram selecionados dez pontos para detalhe (Fig. 11).

O termo quartzo sienítico do PAS é o dominante no afloramento. Injeções de leucogranito equigranular fino, possivelmente relacionadas à SES, também foram observadas, além da ocorrência localizada de corpos máficos intrusivos nas litologias félsicas do PAS.

Os sienitos do perfil são predominantemente porfiríticos, porém pontualmente têm textura equigranular média a grossa. Os termos porfiríticos são marcados por fenocristais de K-feldspato de até 2,5 cm, e matriz composta de agregados máficos de hornblenda, piroxênio, biotita em menor proporção, e quartzo intersticial. Em dois pontos constatou-se a intrusão de outra variedade sienítica de textura equigranular fina a média nos termos dominantes do perfil.

Dos dez pontos selecionados para detalhe, cinco que congregam as estruturas e litologias mais representativas do perfil, serão aqui apresentados. Ao final desta seção, diagramas equiárea de projeção no hemisfério inferior com todas as medidas planares realizadas no perfil serão expostos para visualização do comportamento das estruturas observadas.



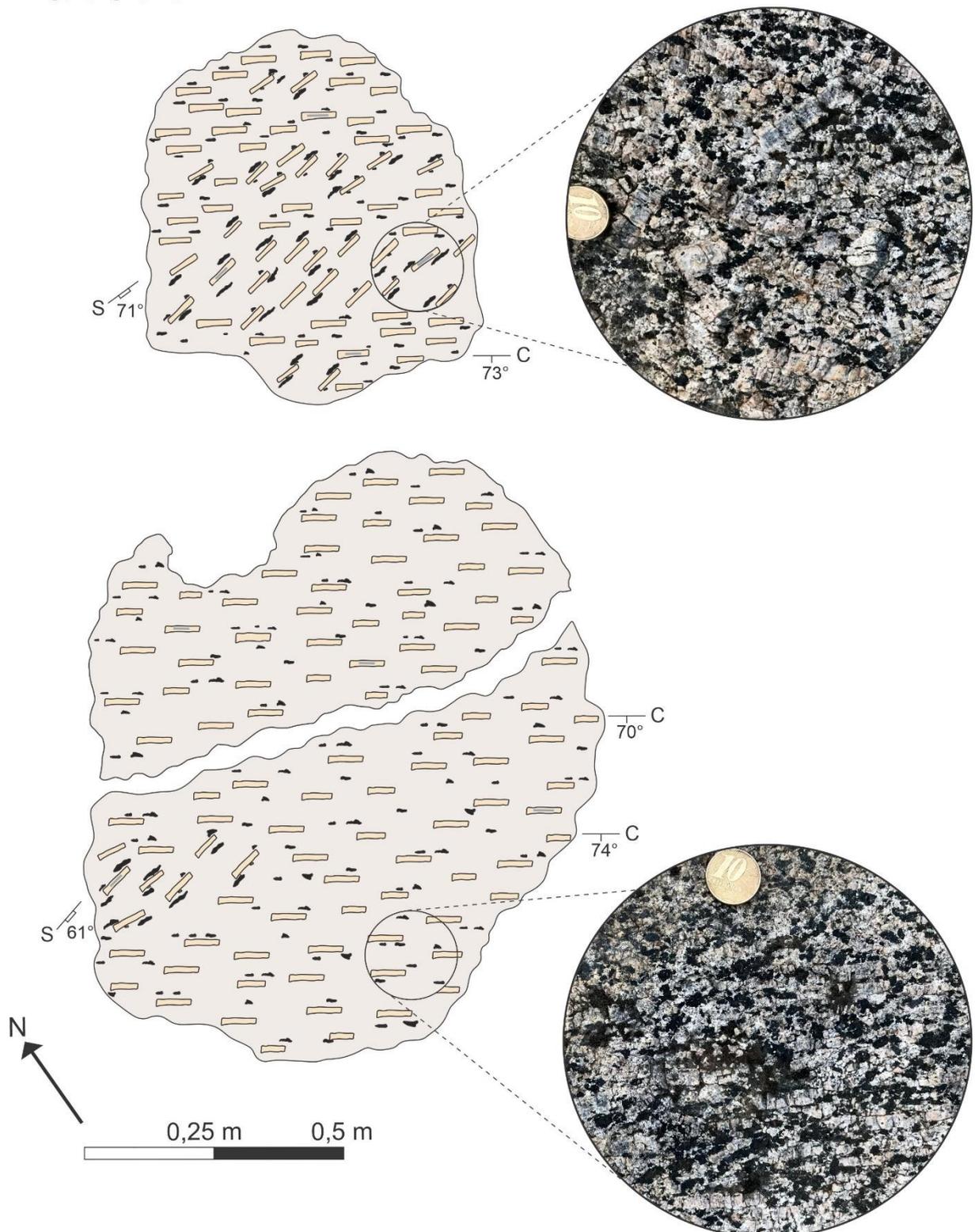
**Fig. 11** – Croqui em planta com a disposição dos dez pontos em que foi realizado o detalhamento estrutural. Destacados em vermelho os pontos que serão apresentados neste trabalho.

O termo quartzo sienítico porfirítico é a única variedade litológica no ponto JA-04-1. Foram descritas duas foliações magmáticas para o ponto, sendo ambas as estruturas marcadas pelo alinhamento de forma dos fenocristais euédricos de K-feldspato, e ressaltadas pelos agregados máficos, que se dispõem alongados juntos à foliação. A diferença nas foliações é dada pelas suas atitudes e pela evidência de movimento em uma das estruturas, que desloca a outra. A foliação predominante no ponto é a que apresenta movimento, enquanto a foliação que é deslocada é preservada em áreas restritas, indicando que o cisalhamento nessas porções não foi o suficiente para paralelizar as estruturas (Fig. 12). Com base na relação de contemporaneidade das foliações e na observação de que uma é deslocada pela outra, as estruturas podem ser interpretadas como um par SC magmático. Os planos C são os que mostram evidência de cisalhamento e deslocam os planos S.

Apesar de acompanharem tanto os planos S como os planos C, os agregados máficos, quando analisados em maior detalhe, demonstram uma tendência de maior alinhamento ao longo dos planos S. Esta observação decorre da variação na forma em que os agregados máficos são percebidos nos dois planos. Quando paralelos a S, eles se tornam mais alongados e aparentam ser maiores, quando paralelos a C, perdem a continuidade e tendem a diminuir de tamanho. A explicação provável para essa variação é a de que o ângulo em que o plano de exposição intercepta essas duas estruturas altera a forma com que os agregados máficos ficam expostos. Pontualmente os cristais de K-feldspato têm zonação interna marcada pela variação de cor do núcleo, mais escuro, para as bordas, mais claras, com limites nítidos.

Os planos C têm uma direção bem definida NW-SE com alto ângulo de mergulho para SW. Já os planos S apresentam direções que variam de E-W a ENE-WSW com alto ângulo de mergulho para S e SSE. A cinemática dos pares SC, demonstrada pela rotação dos cristais de K-feldspato alinhados aos planos S, é dextral.

JA-04-1



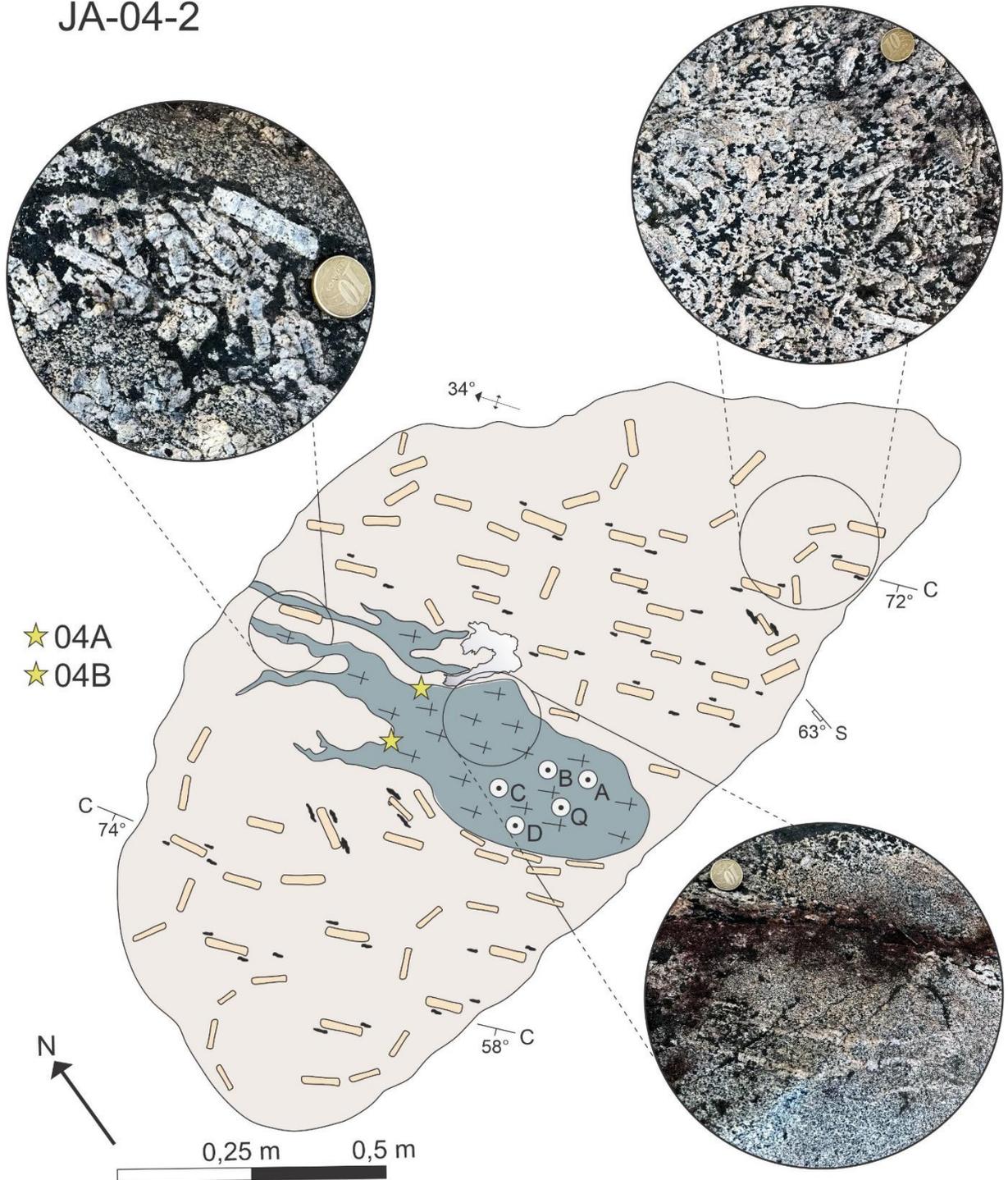
**Fig. 12** – Ponto JA-04-1 com os planos de cisalhamento C deslocando a foliação S demonstrando cinemática horária.

No ponto JA-04-2 são identificadas três litologias distintas. O termo quartzo sienítico porfirítico, dominante no ponto, o termo quartzo sienítico de textura equigranular fina a média e um enclave máfico, composto de cristais de hornblenda e biotita euédricos (Fig. 13). No termo quartzo sienítico foram identificadas duas foliações, as quais são marcadas pelo alinhamento de forma dos fenocristais euédricos de K-feldspato, e ressaltadas pelos agregados máficos. Novamente foi observada a relação de movimento entre as estruturas, em que uma desloca a outra, levando à interpretação de que os dois planos representam um par SC magmático.

Os planos C, diferentemente do ponto JA-04-1, não são dominantes em relação aos planos S, porém mantêm direção constante NW-SE com alto ângulo de mergulho para SW. A foliação S é preservada em toda a exposição do ponto e varia progressivamente em sua orientação. Nas porções em que é menos afetada pela foliação C tem atitudes que variam com sentido de mergulho para NE, N e NW, formando um padrão de dobra para as estruturas. As dobras magmáticas formadas pela foliação S são abertas com eixo de baixo caimento para WNW e plano-axial sub-vertical de direção NW-SE. Observa-se que o plano axial das dobras é paralelo a foliação C.

O sienito equigranular fino a médio intrude o quartzo sienito porfirítico paralelamente à foliação C, onde pode ser observado um contato bem definido entre as litologias. Fenocristais do sienito porfirítico são encontrados em meio ao sienito equigranular, assim como porções do sienito equigranular ocorrem nos interstícios do sienito porfirítico. A foliação no quartzo sienito fino não é bem desenvolvida, porém é possível identificá-la através do alinhamento dos cristais de K-feldspato em conjunto com cristais de hornblenda e biotita, que tendem a não formar agregados, como tipicamente ocorrem nos termos sieníticos do PAS. A foliação nessa litologia é paralela aos planos C e tem alto ângulo de mergulho.

JA-04-2

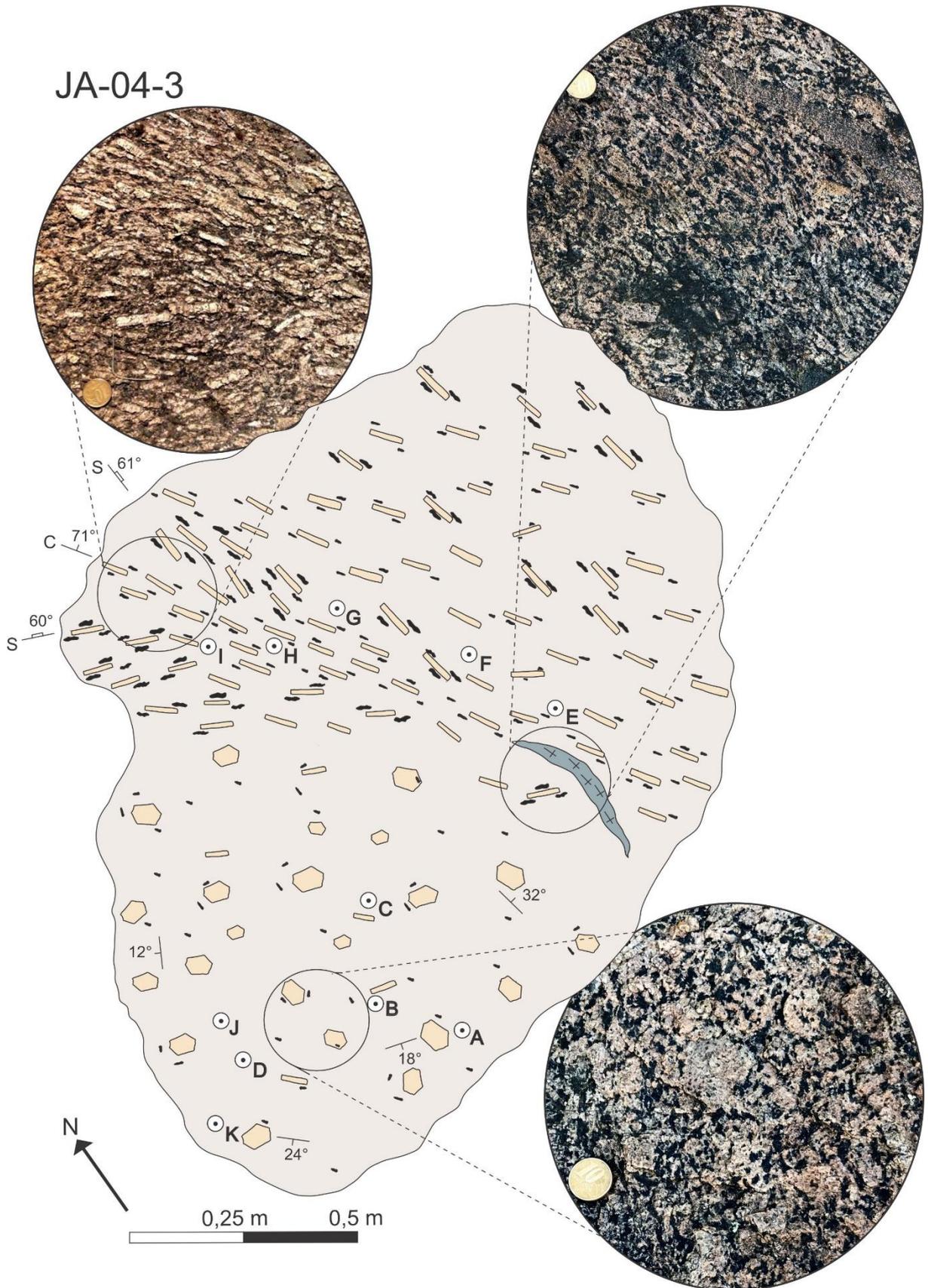


**Fig. 13** – Ponto JA-04-2 com a foliação S preservada sendo deslocada progressivamente pela foliação C, gerando um padrão de dobras magmáticas.

No ponto JA-04-3 foram descritas duas litologias, sendo elas os termos quartzo sienítico porfirítico e o quartzo sienítico equigranular fino a médio. O quartzo sienito equigranular ocorre como uma intrusão de 40 cm de comprimento por 2 cm de espessura em meio ao sienito porfirítico. As estruturas predominantes no ponto são novamente pares SC magmáticos. Neste ponto foi possível uma clara distinção de zonas em que a foliação C é predominante e desloca as estruturas S e uma zona em que a foliação S não é afetada pelo cisalhamento, sendo preservada completamente da ação de C (Fig. 14).

A foliação S quando não afetada por C tem as faces cristalográficas 010 dos cristais de K-feldspato marcando o plano da foliação, que é sub-horizontal. Nessa porção do afloramento o corte observado é paralelo ao plano XY da foliação, o que leva a uma percepção de que a textura da rocha seja mais grossa. No entanto, isso é uma decorrência da exposição dessa face cristalográfica que marca a foliação, onde estão as maiores dimensões dos cristais de K-feldspato. Os agregados máficos observados na foliação S sub-horizontal são arredondados e têm um comportamento que tende a oblato.

Onde a foliação C passa a ser dominante é possível identificar zonas em que o cisalhamento foi mais intenso e zonas em que ainda há estruturas S preservadas que não foram paralelizadas a C. Como foi observado ao longo do perfil, ambas as estruturas são marcadas pelo alinhamento de forma dos fenocristais euédricos de K-feldspato, e ressaltadas pelos agregados máficos. A foliação C mantém a coerência de direção NW-SE com alto ângulo de mergulho, agora com sentido NE, e por vezes separa a foliação S em zonas que de um lado da estrutura de cisalhamento apresentam rotação horária e do outro rotação anti-horária. A foliação S tem direções que variam de WNW-ESE com alto ângulo de mergulho para NNE, a N-S com alto ângulo de mergulho para E. Apesar de variar, a cinemática predominante no ponto entre os pares SC é anti-horária. A intrusão do quartzo sienito equigranular é paralela à foliação C e tem contato bem definido com a encaixante.

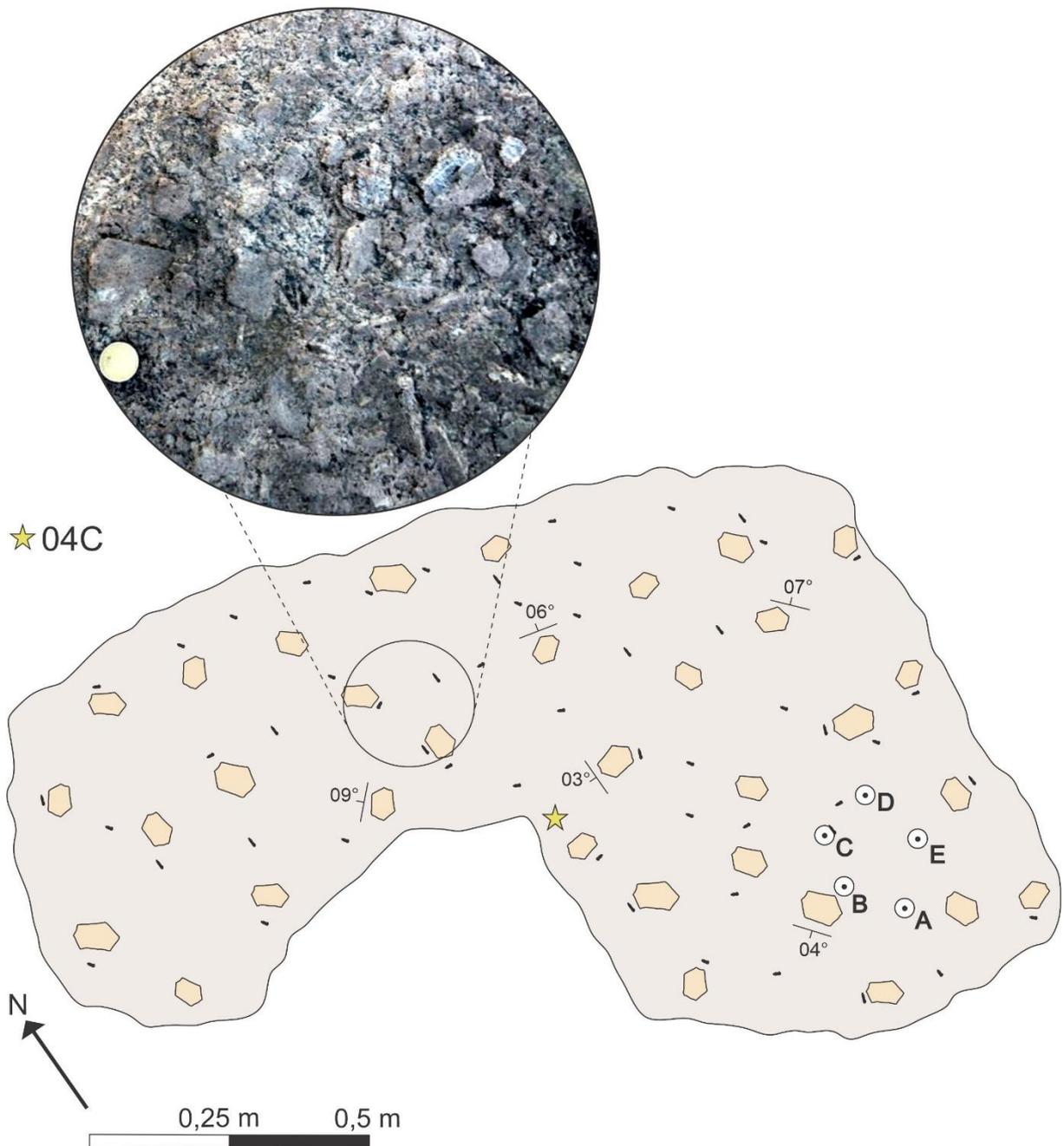


**Fig. 14** – Ponto JA-04-3 com uma porção em que a foliação S está preservada da ação de cisalhamento da foliação C e encontra-se sub-horizontal, sendo marcada pelas faces 010 dos cristais de K-feldspato alinhadas no plano da foliação. A outra porção da rocha tem domínio da foliação C, em que a foliação S é preservada onde a ação de cisalhamento não teve intensidade para paralelizar as estruturas.

O termo quartzo sienítico de textura porfirítica é a única variedade litológica no ponto JA-04-8. Não são observadas variedades quanto à geometria das estruturas presentes no ponto. Assim como em parte do ponto JA-04-3, a foliação S está preservada da ação de C e é sub-horizontal (Fig. 15). Os planos de foliação são marcados pelas faces cristalográficas 010 dos cristais de K-feldspato e se comparados aos planos medidos no JA-04-3 têm ângulo de mergulho ainda mais horizontalizados.

Por ser o ponto com maior exposição da estrutura S preservada da ação de C, características distintas aos pontos anteriores tornam-se mais evidentes. A morfologia dos agregados máficos quando observados paralelos ao plano da foliação passa a ser mais arredondada e não alongada, como comumente estão nas foliações subverticais. Essa observação é acompanhada da percepção de uma textura mais grossa dos cristais de K-feldspato, que é reflexo do corte paralelo ao plano XY da foliação. Onde a ação de C não é observada, como visto no ponto JA-04-3, o comportamento dos agregados máficos tende a oblato.

JA-04-8

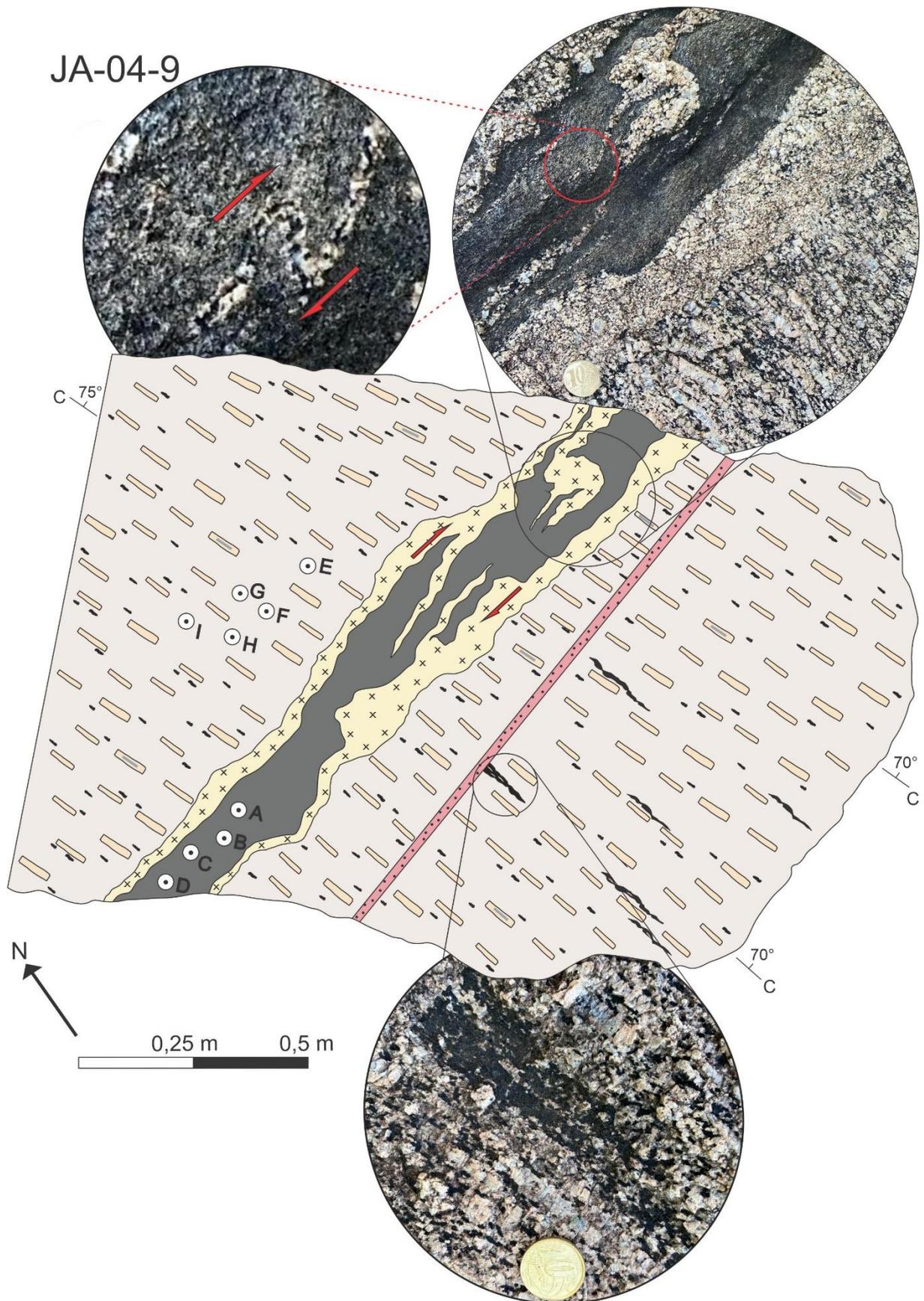


**Fig. 15** – Ponto JA-04-8 onde a foliação S é preservada da ação de C, sendo marcada pelas faces 010 dos cristais de K-feldspato alinhadas no plano sub-horizontal da foliação.

No ponto JA-04-9 foram descritas quatro litologias distintas. O quartzo sienito porfirítico, observado ao longo de quase todos os pontos do perfil, é a rocha principal do ponto. Duas litologias, de composição máfica e félsica, se intercalam e se dispõem alongadas na direção NE-SW, cortando a foliação da encaixante em alto ângulo. A rocha máfica tende a porfirítica com fenocristais de K-feldspato de até 0,2 cm de comprimento marcando a foliação, que é paralela aos contatos da intrusão, em uma matriz fina composta por hornblenda e biotita. A litologia félsica é maciça e tem textura equigranular média a grossa. A quarta litologia é leucogranítica e intrude o quartzo sienito, com contatos retos, cortando a foliação em alto ângulo (Fig. 16).

Neste ponto a foliação C é dominante, em que pontualmente são observados cristais de K-feldspato ainda não paralelizados à estrutura principal. A foliação é marcada pelo alinhamento de forma dos fenocristais euédricos de K-feldspato, e ressaltadas pelos agregados máficos, que se dispõem alongados juntos à foliação. Os planos C têm direção NW-SE e ângulo de mergulho subvertical com sentido NE. Agregados máficos de textura equigranular média e compostos de cristais euédricos de hornblenda, se dispõem alongados paralelamente à foliação. Como observado no ponto JA-04-1, alguns cristais de K-feldspato têm zonação interna, com núcleos mais escuros e bordas mais claras.

O corpo tabular de composição máfica tem limites irregulares com a litologia félsica maciça. Ambas as litologias se desagregam uma na outra tornando-se fios finos e alongados. Essas feições indicativas de interações em estado fluido são ressaltadas pelo retrabalhamento de porções da rocha félsica pela rocha máfica e pela presença de cristais de K-feldspato da litologia félsica no interior da intrusão máfica. A foliação do dique máfico é paralela aos seus contatos e contorna uma porção retrabalhada da rocha félsica maciça, indicando uma cinemática dextral para a intrusão. Fios desagregados da rocha félsica em meio a intrusão máfica formam dobras milimétricas com vergência para NE, corroborando a cinemática dextral para a intrusão. O contato difuso entre a litologia félsica e a encaixante sugere que esta resulta dos líquidos finais do quartzo sienito porfirítico que migraram para zonas de menor pressão com a entrada do dique máfico.

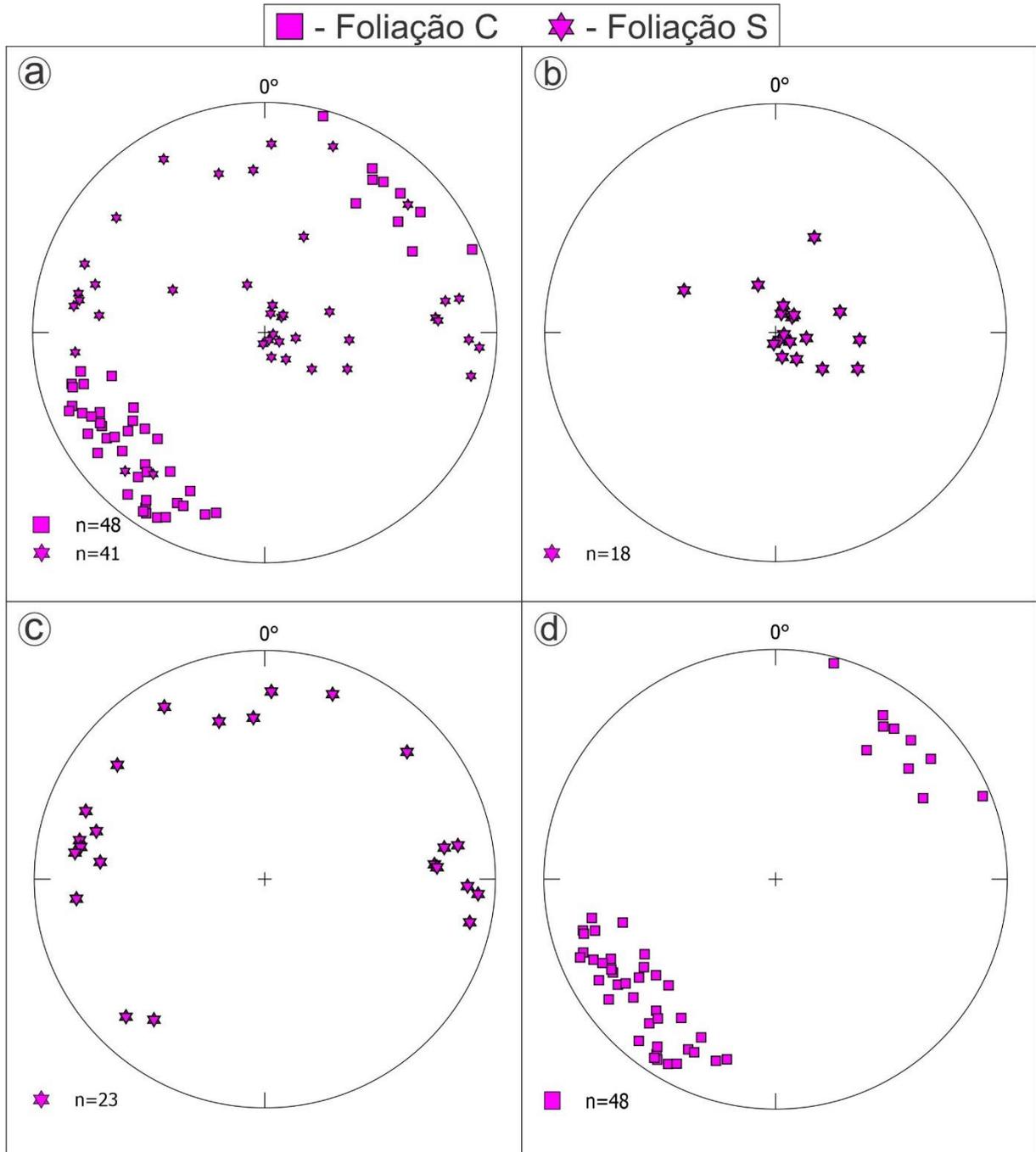


**Fig. 16** – Ponto JA-04-9 onde a foliação C é dominante. Pode ser observado o dique máfico de cinemática dextral com limites difusos que intrude o quartzo sienito porfirítico, cortando a foliação em ângulo e retrabalhando a litologia félsica maciça de textura grossa.

#### 4.2.1 Representação das estruturas planares do perfil

Ao longo do perfil foram observadas duas estruturas dominantes, as quais foram interpretadas como um par SC magmático. Essa interpretação tem como base a constatação de que uma das estruturas se comporta como um plano de cisalhamento, que desloca a estrutura planar anterior de uma dada forma. A foliação S apresenta geometria muito variável, enquanto a foliação C mantém coerência estrutural ao longo de todo o perfil (Fig. 17a). A cinemática predominante no perfil entre os pares SC é anti-horária, porém localmente foi observada cinemática horária entre os planos. A variação de movimento, ora sinistral, ora dextral, pode estar relacionada com o posicionamento em que os cristais estavam antes de serem deslocados pelo plano de cisalhamento. Logo, apesar de a cinemática predominante ser anti-horária, não é possível caracterizar de forma definitiva o sentido de movimento entre planos.

A foliação S tem atitudes distintas quando é preservada da ação de C e quando é afetada pela estrutura. Nas porções do perfil em que se manteve preservada, as atitudes para a foliação são sub-horizontais com discretas variações no ângulo de mergulho (Fig. 17b). Já nas zonas em que a ação de C foi mais ativa a foliação S tem atitudes que variam de direção nos quatro quadrantes do diagrama, com ângulo de mergulho sub-vertical (Fig. 17c). A estrutura dominante no perfil, a foliação C, mantém clara coerência estrutural de direção NW-SE com ângulo de mergulho sub-vertical predominantemente para o quadrante nordeste (Fig. 17d).



**Fig. 17** - (a) Estereograma com os polos de todas as estruturas planares observadas no perfil de detalhamento estrutural. (b) Estereograma com os polos da foliação S quando essa não é afetada pela foliação C. (c) Estereograma com polos da foliação S quando essa está sendo afetada pela foliação C, nota-se que os planos S afetados por C têm suas direções variando entre os quatro quadrantes. (d) Estereograma com polos da foliação C, indicando coerência estrutural de direção NW-SE com alto ângulo de mergulho para os planos.

### **4.3 Cilindros coletados para análises de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética**

No local onde foi realizado o levantamento estrutural de detalhe, foram coletados cilindros orientados que serão futuramente analisados para obtenção de dados magnéticos. Em sete, dos dez pontos detalhados, foram estabelecidos os sítios para a amostragem, com o objetivo de que as litologias e variações estruturais de interesse possam ser analisadas através da técnica de ASM para obtenção de uma trama magnética representativa.

Ao todo foram coletados quarenta e três cilindros orientados, dos quais quatro foram separados para confecção de lâminas petrográficas e moagem, visando ao estudo da sua mineralogia magnética. Foi usado como critério a abrangência das variedades litológicas e estruturais observadas no perfil para esta separação. A partir dos trinta e nove cilindros, estima-se que aproximadamente 146 espécimes serão obtidos para determinação da trama magnética por ASM.

## 4.3.1 Dados dos cilindros coletados

**Tabela 1** – Dados dos cilindros obtidos nos sítios JA-04-2, JA-04-3 e JA-04-4.

Coord	30°33'34,5"	52°30'44,7"										
Data	01/12/2020	01/12/2020	01/12/2020	01/12/2020								
Sítio	JA 04 02A	JA 04 02B	JA 04 02C	JA 04 02D								
Az Solar	216°	268°	--	250°								
Az Magnético	125°	168°	190°	151°								
Hora	10:52	11:03	--	11:08								
Dep	03°	10°	11°	08°								
//												
Coord	30°33'34,3"	52°30'44,7"										
Data	01/12/2020	01/12/2020	01/12/2020	01/12/2020	01/12/2020	01/12/2020	01/12/2020	01/12/2020	01/12/2020	01/12/2020	19/02/2021	19/02/2021
Sítio	JA 04 03A	JA 04 03B	JA 04 03C	JA 04 03D	JA 04 03E	JA 04 03F	JA 04 03G	JA 04 03H	JA 04 03I	JA 04 03J	JA 04 03K	
Az Solar	234°	191°	306°	357°	313°	327°	007°	040°	023°	358°	004°	
Az Magnético	004°	323°	074°	126°	076°	088°	130°	166°	154°	098°	104°	
Hora	13:30	13:33	13:23	13:35	13:40	13:44	13:48	13:59	14:05	18:11	18:14	
Dep	01°	04°	04°	19°	04°	09°	04°	11°	13°	11°	12°	
//												
Coord	30°33'33,8"	52°30'43,9"										
Data	01/12/2020	01/12/2020	19/02/2021	19/02/2021	19/02/2021	19/02/2021	19/02/2021					
Sítio	JA 04 04A	JA 04 04B	JA 04 04C	JA 04 04D	JA 04 04E	JA 04 04F	JA 04 04G					
Az Solar	048°	077°	287°	280°	320°	268°	294°					
Az Magnético	141°	172°	181°	175°	200°	154°	182°					
Hora	17:22	17:26	11:03	11:14	11:48	11:25	11:29					
Dep	05°	06°	07°	05°	00°	06°	11°					

**Tabela 2** – Dados dos cilindros obtidos nos sítios JA-04-5, JA-04-8, JA-04-9 e JA-04-10.

Coord	30°33'33,4"	52°30'44"							
Data	19/02/2021	19/02/2021	19/02/2021	19/02/2021					
Sítio	JA 04 05A	JA 04 05B	JA 04 05C	JA 04 05D					
Az Solar	314°	307°	280°	351°					
Az Magnético	115°	107°	070°	144°					
Hora	13:46	13:51	13:59	14:05					
Dep	06°	06°	05°	04°					
Coord	30°33'32,1"	52°30'42,8"							
Data	19/02/2021	19/02/2021	19/02/2021	19/02/2021	19/02/2021				
Sítio	JA 04 08A	JA 04 08B	JA 04 08C	JA 04 08D	JA 04 08E				
Az Solar	339°	326°	346°	340°	010°				
Az Magnético	120°	107°	125°	117°	143°				
Hora	14:28	14:34	14:40	14:46	14:54				
Dep	09°	14°	10°	09°	13°				
Coord	30°33'32"	52°30'43"							
Data	19/02/2021	19/02/2021	19/02/2021	19/02/2021	19/02/2021	19/02/2021	19/02/2021	19/02/2021	19/02/2021
Sítio	JA 04 09A	JA 04 09B	JA 04 9C	JA 04 09D	JA 04 09E	JA 04 09F	JA 04 09G	JA 04 09H	JA 04 09I
Az Solar	326°	315°	325°	301°	352°	326°	300°	254°	288°
Az Magnético	078°	068°	076°	051°	103°	075°	048°	004°	038°
Hora	16:53	17:07	17:11	17:16	17:20	17:23	17:26	17:40	17:37
Dep	10°	12°	12°	13°	02°	05°	04°	06°	04°
Coord	30°33'31,8"	52°30'42,1"							
Data	19/02/2021	19/02/2021	19/02/2021						
Sítio	JA 04 10A	JA 04 10B	JA 04 10 C						
Az Solar	--	--	--						
Az Magnético	301°	293°	297°						
Hora	--	--	--						
Dep	06°	07°	06°						

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1 Relações geométricas internas do Pluton Arroio do Silva e comparação estrutural com suas rochas encaixantes

A ampliação dos dados estruturais em cada um dos quatro corpos aflorantes do PAS permitiu que relações espaciais entre as estruturas presentes em cada corpo fossem caracterizadas detalhadamente. As análises estruturais feitas em trabalhos anteriores (e.g. Reis, 2006 e Padilha *et al.*, 2019) não contavam com o aporte de dados necessários para que interpretações bem fundamentadas fossem propostas para o comportamento da geometria interna do pluton. Com base nas observações feitas em diferentes escalas neste projeto, a compreensão da dinâmica estrutural do PAS evoluiu, permitindo abrir uma nova perspectiva para a evolução do pluton.

A geometria interna do PAS, quando analisada regionalmente, tem coerência de direção NW-SE com ângulo de mergulho médio a alto para sua foliação em três dos quatro corpos aflorantes. Na porção norte do pluton, no entanto, essa coerência não é mantida nas estruturas observadas, apresentando as variações mais significativas quanto da trama magmática. Como observado por Reis (2006) e Padilha *et al.* (2019), esse corpo é interpretado como um megaxenólito ou *roof-pendant* nos termos da Suíte Encruzilhada do Sul (SES).

As principais variações estruturais do corpo norte se concentram na região oeste do mesmo, como apresentado na seção de resultados. A foliação da porção leste do corpo também varia em relação às atitudes consideradas dominantes, porém mantêm maior homogeneidade quando comparadas à foliação na região oeste. A constatação de que as variações estruturais não são registradas exclusivamente em uma variedade litológica aponta para que a causa dessa heterogeneidade na trama não seja reflexo de pulsos, os quais poderiam refletir atitudes discordantes da estrutura principal. Estudos mais aprofundados são necessários para uma melhor compreensão do que gera esse comportamento heterogêneo nas estruturas do corpo norte. No entanto, os dados obtidos ao longo deste trabalho permitem que duas hipóteses sejam levantadas para explicar o porquê de esta geometria interna ser discordante da observada nos outros três corpos. A primeira dá conta de que o

posicionamento da SES promoveu a alteração do padrão NW-SE da foliação no corpo norte. Dados de campo apontam para uma pequena diferença de tempo no posicionamento do PAS em relação aos termos da SES, o que corrobora esta hipótese. A segunda é de que tal comportamento é reflexo da dinâmica interna do pluton, que quando observada em maior detalhe, como foi demonstrado no perfil de detalhamento estrutural, apresenta variações da geometria principal. Neste caso, a variação de atitudes observadas no corpo norte pode estar obedecendo à mudança de campo tensional interno em locais da câmara.

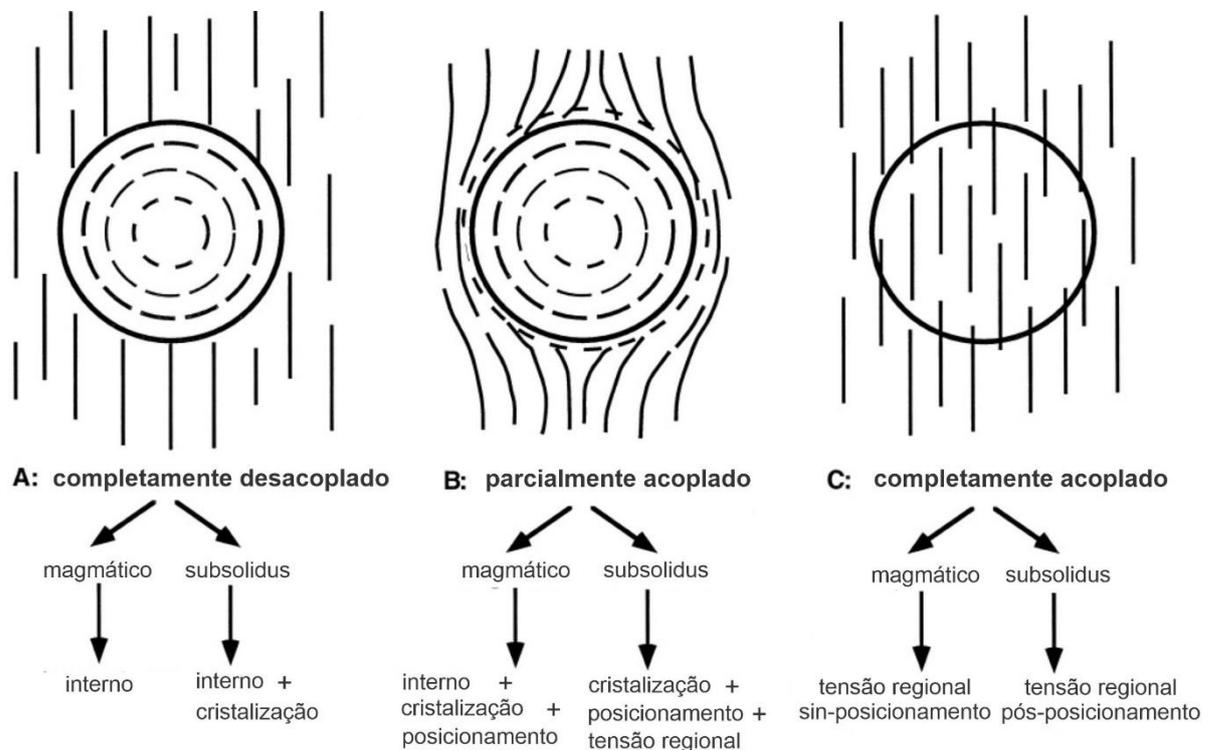
Nos corpos centrais e no corpo sul do PAS, a trama magmática tem orientação constante, com direção NW-SE e ângulo de mergulho médio a alto. Nenhum destes corpos mostra relações de intrusão pelos termos da SES. Segundo Paterson *et al.* (1998), magmas comumente registram os incrementos finais de tensão aplicados ao corpo. Os mesmos autores também propõem que o entendimento estrutural de corpos plutônicos é uma importante ferramenta na interpretação de paleotensões atuantes em cinturões orogênicos. No PAS, diferentemente do que é proposto por Paterson *et al.* (1998), mais de uma foliação magmática é preservada, indicando que a tensão registrada no pluton não é exclusivamente a última à qual ele foi submetido.

Através de análises de campo foi possível estabelecer que a foliação C é a estrutura mais recente registrada no perfil de detalhamento estrutural, refletindo as últimas tensões aplicadas no pluton para aquela região. Ao examinar as atitudes da foliação nos corpos centrais e sul (Fig. 9 e Fig. 10) nota-se coerência com as atitudes obtidas para a foliação C (Fig. 17d). Essa observação indica que a estrutura regional dominante do PAS pode estar relacionada aos planos de cisalhamento descritos no perfil de detalhamento e representa as últimas tensões a que o pluton foi submetido.

Ao abordar relações entre o posicionamento de corpos plutônicos e suas rochas encaixantes, é preciso que as unidades contem com uma boa caracterização estrutural. Paterson *et al.* (1998) propõem a classificação de três tipos de plutons com relação à coerência estrutural entre pluton e encaixante, sendo elas: completamente desacoplado, parcialmente acoplado e completamente acoplado (Fig. 18). São considerados completamente desacoplados aqueles plutons em que a trama magmática corta em ângulo a trama da sua encaixante. Já a classificação de parcialmente acoplados é designada para corpos plutônicos que deformam a rocha encaixante, gerando estruturas penetrativas, durante o seu posicionamento. Por fim,

são considerados completamente acoplados àqueles plutons em que a foliação magmática é contínua com a foliação da encaixante.

A classificação proposta por Paterson *et al.* (1998) sugere uma abordagem que contemple desde estruturas regionais, pluton e encaixante, até tramas magmáticas derivadas exclusivamente de processos internos no pluton. Essa sistemática é interessante, pois permite que interpretações precisas e sem extrapolações possam ser realizadas quanto à geração de tramas em estado magmático ou subsolidus, e faz sua correlação com mecanismos internos ou externos para a formação dessas estruturas.



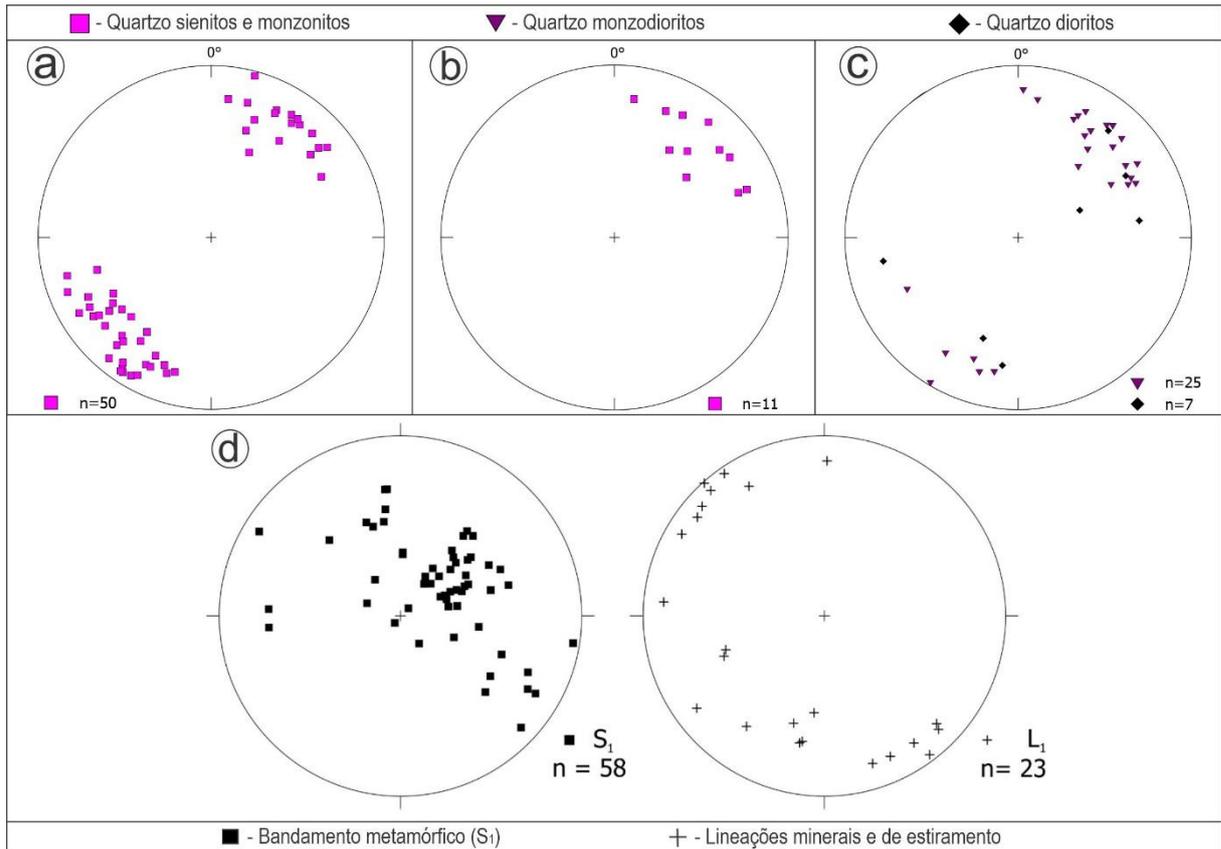
**Fig. 18** – Representação esquemática mostrando como o grau de continuidade entre estruturas da rocha encaixante e estruturas no corpo plutônico indicam causas prováveis para geração de tramas magmáticas. As representações mostram câmaras magmáticas circulares e padrões estruturais simplificados, que podem ser vistos como três membros finais de classificação. Após o grau de continuidade (primeira linha) ser confirmado com relação à temporalidade das estruturas entre as rochas encaixantes e as estruturas magmáticas, ele pode ser utilizado juntamente com informações sobre o caráter da trama interna, se magmática ou subsolidus (segunda linha) para que causas prováveis sejam determinadas para sua formação (terceira linha) (*Fonte: Modificado de Paterson et al., 1998*).

Com a geometria interna dos quatro corpos do PAS definida, comparações podem ser estabelecidas entre estruturas regionais e estruturas internas ao pluton.

Visto que o corpo norte apresenta variações significativas na sua trama magmática, as quais podem ser consequência da intrusão da SES, serão utilizadas medidas estruturais realizadas nos corpos centrais e sul (Fig. 19a, 19b e 19c) para projeção do posicionamento do PAS com relação a suas rochas encaixantes do Complexo Várzea do Capivarita (CVC).

A interpretação das estruturas das rochas do CVC foi retirada de trabalhos conduzidos na região de Encruzilhada do Sul, onde estas litologias são intrudidas pelo PAS. UFRGS (2010) descrevem, nas rochas dessa região, estruturas metamórficas originalmente sub-horizontais com lineações de estiramento de alta obliquidade afetadas por dobramento regional. Os autores interpretam essas estruturas como sendo representativas de uma dobra sinforme com eixo de caimento para SW. Bom *et al.* (2014) descrevem estruturas sub-horizontais com lineação de estiramento do tipo oblíqua a direcional afetadas por dobramento regional. Os autores sugerem que as estruturas podem ser relacionadas a processos deformacionais transpressivos e interpretam quatro dobras de menor escala, com eixos que caem para SW, NE e NNW. No trabalho desenvolvido por Costa (2018) a autora corrobora a interpretação feita por UFRGS (2010) de que as foliações metamórficas das rochas do CVC, na região de Encruzilhada do Sul, representam uma grande dobra sinforme com eixo de caimento para SW (Fig. 19d). Para as correlações entre as tramas do CVC e do PAS, serão utilizadas neste trabalho as interpretações feitas por UFRGS (2010) e Costa (2018).

Com os dados estruturais das rochas do CVC e o levantamento estrutural regional realizado no PAS, é possível constatar que as tramas não têm concordância. O comportamento de direção NW-SE com ângulo de mergulho médio a alto para a foliação magmática do PAS trunca o bandamento metamórfico sub-horizontal dobrado das litologias do CVC em ângulo, indicando que o PAS não aproveitou a geometria da encaixante para se posicionar. Com base nos critérios propostos por Paterson *et al.* (1998), é factível propor que o PAS seja considerado um pluton completamente desacoplado da sua encaixante e suas estruturas magmáticas sejam reflexo de mecanismos internos.



**Fig. 19** – Diagramas equiárea de projeção no hemisfério inferior com as principais estruturas de três dos quatro corpos do PAS e das rochas do CVC na região de Encruzilhada do Sul. (a) Estereograma com os polos da foliação magmática no corpo central norte do PAS. (b) Estereograma com os polos da foliação magmática no corpo central sul do PAS. (c) Estereograma com os polos da foliação no corpo sul do PAS. (d) Estereogramas com os polos do bandamento metamórfico ( $S_1$ ) (esquerda) e lineações minerais e de estiramento ( $L_1$ ) (direita) nas rochas do CVC (*Fonte: Fig. 19d extraída de Costa, 2018*).

### 5.1.1 Variações estruturais como evidência de uma história magmática complexa

O comportamento da trama magmática observado no PAS, quando avaliado em maior detalhe, é complexo. A constatação de estruturas sub-horizontais deslocadas por planos de cisalhamento, como observado no perfil de detalhamento estrutural (Fig. 14), levou à interpretação de que estruturas do tipo SC magmáticas têm influência na geometria interna do pluton. Quando se avaliam os dados estruturais regionais dos corpos centrais e sul em comparação com os de detalhe, percebe-se que a geometria interna dominante dos corpos é concordante com a foliação C observada no perfil de detalhamento. Esta observação aponta para que os planos de

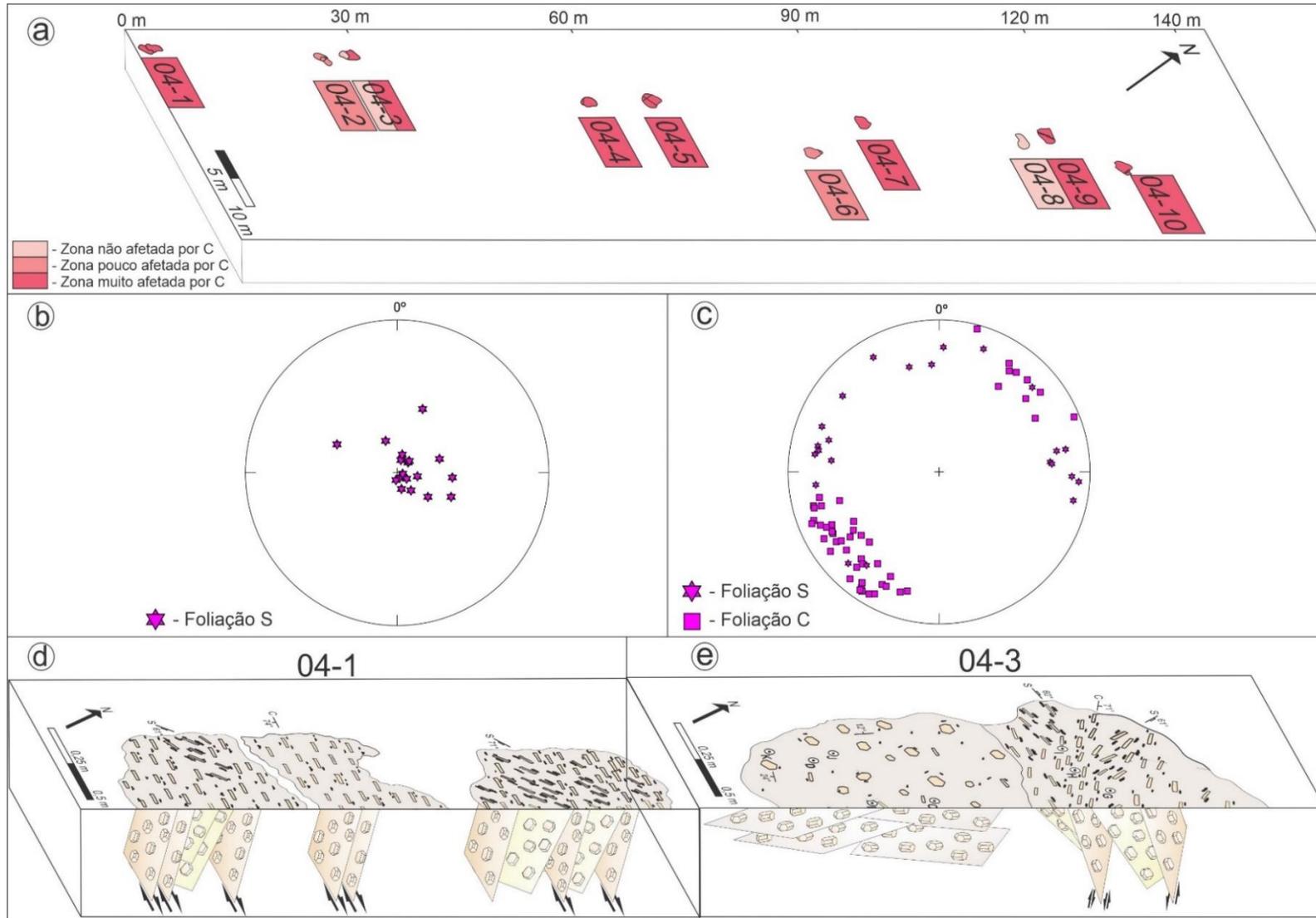
cisalhamento descritos no perfil possivelmente são a estrutura regional dominante no PAS e refletem as últimas tensões aplicadas no pluton.

Ao longo do levantamento de detalhe foi possível individualizar zonas em que a ação dos planos de cisalhamento não foi efetiva (Fig. 20a). Essa observação tem como base as variações de atitude, em que zonas onde a foliação S se mantém sub-horizontal, não apresentando evidência de deslocamento (Fig. 20b), e progressivamente passa a zonas com predomínio de foliação C (Fig. 20c). Nestas porções, os planos S encontram-se deslocados, predominantemente com cinemática sinistral, e têm atitudes que quando observadas no diagrama estão distribuídas sobre um meridiano. Isto leva à interpretação de que a foliação S, quando deslocada, forma dobras assimétricas em que a foliação C é paralela aos seus planos axiais. Por meio de representações esquemáticas em 3D dos pontos detalhados no perfil, é possível projetar o comportamento das estruturas em subsuperfície (Fig. 20d e Fig. 20e). Os cortes discutidos nas figuras podem servir como ponto de partida para prever como se comporta a geometria interna do PAS em escala regional.

A constatação de que tanto a foliação C como a foliação S são morfologicamente similares faz com que sua distinção seja difícil, sendo possível apenas quando as duas estruturas são observadas juntas. Essa característica é uma das observações que levaram à hipótese de que a variação estrutural registrada no corpo norte seja reflexo da dinâmica interna do pluton. Sob essa hipótese as medidas realizadas no corpo norte estariam associadas à foliação S, que pela ausência de relação com planos de cisalhamento não foi identificada em campo. Logo, as variações da foliação no corpo norte podem estar associadas a locais em que a ação do cisalhamento não foi efetiva, preservando a foliação S sub-horizontal ou a deslocando, de maneira que as atitudes obtidas seriam reflexo dessa variação.

Padilha *et al.* (2019) identificam a presença comum de quartzo intersticial com subgrãos em padrão tabuleiro de xadrez em todas as variedades do pluton. Este padrão é característico de deformação em alta temperatura, compatível com as temperaturas de corpos graníticos próximo à da solidus. Paterson *et al.* (1998) propõem que estruturas do tipo SC magmáticas ocorrem quando a rocha tem porcentagem de fase líquida entre 40 e 10, mas mais comumente ocorrem entre 20% e 10%. Tal observação indica que o arcabouço da câmara magmática pode acomodar tensões que geram estruturas SC com quantidades significativas de fase fluída. Sob essa ótica, as estruturas descritas para o PAS provavelmente foram geradas na

presença de fase fluída em proporções consideráveis, pois as tensões foram suficientes para deslocar os cristais sem deformá-los substancialmente. A evidência de deformação em alta temperatura e de fase fluída abundante na geração das estruturas SC magmáticas aponta para que a deformação acomodada pelos cristais esteja associada aos movimentos de cisalhamento entre as foliações do PAS.



**Fig. 20** – (a) Corte do perfil de detalhamento estrutural com destaque para as zonas onde a foliação C desloca a foliação S. (b) Estereograma com os polos da foliação S quando esta se encontra preservada da ação de C. (c) Estereograma com os polos da foliação S e C; nota-se que quando S é afetada por C tem seus polos plotados sobre um grande círculo, indicando um padrão de dobra para a foliação. (d) Representação 3D do ponto 04-1 com as estruturas C deslocando a foliação S com cinemática destal. (e) Representação 3D do ponto 04-3 em que uma porção não foi afetada por C, mantendo a estrutura S horizontal, e outra porção em que C desloca os planos S, formando dobras assimétricas em que a foliação C é paralela aos seus planos axiais.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

A partir das análises de campo em diferentes escalas foi estabelecida uma caracterização completa para os quatro corpos que compõem o PAS, bem como para suas variedades litológicas. No entanto, a constatação de uma dinâmica estrutural complexa demonstra que investigações mais profundas ainda são necessárias para que se atinja o entendimento integral dos processos responsáveis pela geometria interna do pluton. Com base no estudo desenvolvido, concluiu-se que:

- (i) O posicionamento do PAS não aproveitou a geometria das suas rochas encaixantes.
- (ii) Três corpos do PAS apresentam orientação constante de direção NW-SE com ângulo de mergulho médio a alto para a foliação magmática.
- (iii) O corpo norte do PAS registra variações significativas na sua trama magmática, as quais podem ser resultado da intrusão da SES, ou reflexo da dinâmica interna do pluton.
- (iv) Estruturas magmáticas do tipo SC são registradas no PAS, em que a foliação C, observada no perfil de detalhe, é paralela à foliação observada nos corpos que não são intrudidos de forma significativa pelos termos da SES.

Com base nas conclusões obtidas novas perguntas naturalmente ganham forma. Em trabalhos científicos muitas vezes os principais resultados derivam dos questionamentos que são levantados pelo trabalho, e não necessariamente dos seus resultados em si. A partir disso, os dados trazidos ao longo deste projeto permitiram uma caracterização estrutural completa do PAS abrindo novos questionamentos acerca dos processos que resultaram em uma dinâmica estrutural complexa para o pluton. Serão deixadas indicadas como itens as perguntas que ainda precisam ser respondidas com relação ao comportamento estrutural do pluton.

- (i) Qual é o significado do cisalhamento que gerou as estruturas C?
- (ii) Qual a escala do cisalhamento no PAS? É uma dinâmica local, em que a estrutura C reflete a canalização de fluxo entre blocos rígidos? Ou é reflexo de uma dinâmica interna do corpo como um todo?
- (iii) Quais seriam as possibilidades de diferença temporal entre as estruturas S e as C?
- (iv) Os quatro corpos do PAS representam diferentes níveis da câmara magmática? As variações estruturais podem estar associadas a diferentes níveis da câmara?

O estudo de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética (ASM), que será realizado em uma próxima etapa pelo autor, terá como objetivo investigar as variações estruturais tanto em escala regional como em escala local do PAS. A obtenção de uma trama magnética será fundamental para que comparações possam ser estabelecidas com relação à trama estrutural do pluton. Dados vetoriais quanto à trama magnética permitirão que prováveis direções de fluxo sejam projetadas, bem como possíveis trajetórias de deslocamento entre as estruturas S e C. Dados escalares como parâmetro de forma e grau de anisotropia irão possibilitar que elipsoides magnéticos sejam caracterizados e quantificados para as variedades litológicas e estruturais do PAS. Em conjunto, será feita a caracterização da mineralogia magnética do pluton através da obtenção de curvas de histerese, curvas termomagnéticas e curvas de aquisição de magnetização remanente.

Como foi trazido no trabalho, cilindros orientados foram coletados no perfil de detalhamento estrutural e serão analisados para que as variações estruturais constatadas no perfil possam ser comparadas a sua trama magnética. Em conjunto, serão feitas saídas de campo para nova coleta de cilindros, afim de que uma trama magnética representativa do pluton como um todo possa ser obtida. Os dados obtidos serão comparados com os resultados trazidos neste projeto e auxiliarão na compreensão de questionamentos que permanecem em aberto quanto a dinâmica estrutural do PAS.

## REFERÊNCIAS

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

Bitencourt, M.F., Gastal, M. C. P., Kirchheim, R. E., Costa, K. B. & Toledo, F. A. L. 1993. Reavaliação preliminar das relações estratigráficas do Complexo Granítico Encruzilhada (CGE), RS. *In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DEL NEOPROTEROZÓICO-CAMBRICO DE LA CUENCA DEL PLATA*, i., La Paloma-Minas, Boletim de Resumos Extendidos, 2(34): 6.

Bitencourt, M.F. & Nardi, L.V.S. 2000. Tectonic setting and sources of magmatism related to the Southern Brazilian Shear Belt. *Revista Brasileira de Geociências*, 30: 184-187.

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, p. 21.

Bitencourt, M. F., Nardi, L. V. S., Florisbal, L. M. & Heaman, L. M. 2015a. Geology, geochronology and petrogenesis of a Neoproterozoic, syntectonic sillimanite-muscovite-biotite granite from southernmost Brazil. *In: 8th HUTTON SYMPOSIUM ON GRANITES AND RELATED ROCKS*, Florianópolis. Book of Abstracts, p. 179-179.

Bom, F.M., Phillipp, R.P. & Zvirtes, G. 2014. Evolução metamórfica e estrutural do Complexo Várzea do Capivarita, Cinturão Dom Feliciano, Encruzilhada do Sul, RS. *Pesquisas em Geociências*, 41(2): 131-153. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Brown, M. 2013. Granite: From genesis to emplacement. *Geological Society of America Bulletin*, 125(7-8): 1079-1113.

Cardoso, V. S. 2019. *Modelagem Geológica do Maciço Sienítico Piquiri com Base em Dados Geofísicos*. Porto Alegre, 74p. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Costa, E. O. 2018. *Geotermobarometria e estrutura dos paragnaisses pelíticos do Complexo Várzea do Capivarita na região de Encruzilhada do Sul, RS*. Porto Alegre, 90p. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

De Toni, G.B., Bitencourt, M.F. & Nardi, L.V.S. 2016. 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 facie conditions. *Journal of Structural Geology*, 91: 88-101.

De Toni, G. B. 2016. *Relações espaço-tempo e o registro geológico em ambientes transpressivos*. Porto Alegre, 97p. Qualificação de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Fernandes, L. A. D., Tommasi, A. & Porcher, C. C. 1992. Deformation patterns in the Southern Brazilian branch of the Dom Feliciano Belt: a reappraisal. *Journal of South American Earth Sciences*, 5(1): 77-96.

Fernandes, L. A. D., Menegat, 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.

Fossen, H. & Andrade, F. R. D. de. 2012. *Geologia Estrutural*. São Paulo, Oficina de Textos, 584p.

Fragoso Cesar A. R. S., Figueiredo M. C. H., Solani Jr. E. & Faccini U.F. 1986. O Batólito Pelotas (Proterozoico Superior/Eo-Paleozoico) no Escudo do Rio Grande do Sul. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 34., 1986, Goiânia, SBG, *Anais*, v. 1, p. 1322-1343.

Gomes, E. M. 2018. *Injeções leucograníticas sintectônicas oriundas da fusão parcial dos paragnaisses do Complexo Várzea do Capivarita na Folha Encruzilhada do Sul, RS*. Porto Alegre, 72p. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

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. (Ed.). 50 anos de Geologia: Instituto de Geociências. Contribuições. Comunicação e Identidade*. Porto Alegre, p. 97-123.

Hartmann, L. A., Lopes, W. R. & Savian, J. F. 2016. Integrated evaluation of the geology, aerogammaspectrometry and aeromagnetometry of the Sul-rio-grandense Shield, southernmost Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 88(1): 75-92.

Issler, R. S. & Pires, J. L. 1989. Granito a duas micas na Placa Sul-Americana: Território Brasileiro. *In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO*, 4., Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: SBG, 1990. *Acta Geológica Leopoldensia*, São Leopoldo, v. 13, n. 30, p. 93-116.

Jacobs, M. G., Philipp, R. P., Koester, E. & Nardi, L. V. S. 2018. Magmatismo máfico associado ao Granito Encruzilhada do Sul, RS: implicações para a geração do magmatismo granítico pós-colisional do Cinturão Dom Feliciano. *Pesquisas em Geociências*, 46, e0665.

Jost, H. & Bitencourt, M. F. 1980. Estratigrafia e tectônica de uma fração da Faixa de Dobramentos Tijucas no Rio Grande do Sul. *Acta Geológica Leopoldensia*, 4(7): 27-60. São Leopoldo, RS, Brasil.

Jost, H. & Hartmann, L. A. 1984. Província Mantiqueira - Setor Meridional. *In: Almeida, F. F.M. & Hasui, Y. (Ed.). O Pre-Cambriano do Brasil*. São Paulo, Edgard Blucher, p. 345-368.

Jost, H., Brod, J. A., Holz, M., Kuhn, A., Flor, M. A. D., Kronbauer, A. & Dillemburg, S. 1985. Geologia estrutural, petrografia e petrologia do Sienito Piquiri (Proterozoico Superior), Rio Grande do Sul. *In: II SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA*. Florianópolis, SBG, *Anais*, p. 63-81.

Lyra, D. S., Savian, J. F., Bitencourt, M. F., Trindade, R. I. F. & Tomé, C. R. 2018. AMS fabrics and emplacement model of Butiá Granite, an Ediacaran syntectonic peraluminous granite from southernmost Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. 88: 25-41.

Martil, M. M. D. 2007. *Relações de intrusão do Maciço Sienítico Piquiri, RS com suas Encaixantes*. Porto Alegre, 63p. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Martil, M. M. D., 2016. *O magmatismo de arco continental pré-colisional (790 Ma) e a reconstituição espaço-temporal do regime transpressivo (650 Ma) no Complexo Várzea do Capivarita, Sul da Província Mantiqueira*. Porto Alegre, 167p. Tese de doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Niessing, M. 2008a. *Geology and stratigraphic definition of the Butiá Granite: a sillimanite-bearing syntectonic leucogranite from Sul-rio-grandense Shield*. Munique, 104p. Master's thesis, Technische Universität München.

Nye, J. F. 1957. *Physical properties of crystals*. Oxford University Press, 322p.

Oyhantçabal, P., Siegesmund, S. & Wemmer, K. 2011. The Río de la Plata Craton: a review of units, boundaries, ages and isotopic signature. *International Journal of Earth Sciences*, 100(2-3): 201–220.

Padilha, D. F., Bitencourt, M. F., Nardi, L.V. S., Florisbal, L. M., Reis, C., Geraldés, M. & Almeida, B. S. 2019. Sources and settings of Ediacaran post-collisional syenite-monzonite-diorite shoshonitic magmatism from southernmost Brazil. *Lithos*, 344-345, 482-503.

Paterson, S. R. & Tobisch, O. T. 1988. Using pluton ages to date regional deformations: Problems with commonly used criteria. *Geology*, 16(12): 1108.

Paterson, S. R., Vernon, R. H. & Tobisch, O. T. 1989. A review of criteria for the identification of magmatic and tectonic foliations in granitoids. *Journal of Structural Geology*, 11(3): 349–363.

Paterson, S. R. & Fowler, Jr, T. K. 1993. Extensional pluton-emplacement models: Do they work for large plutonic complexes? *Geology*, 21(9): 781.

Paterson, S. R., Fowler, T. K., Schmidt, K. L., Yoshinobu, A. S., Yuan, E. S. & Miller, R. B. 1998. Interpreting magmatic fabric patterns in plutons. *Lithos*, 44(1-2): 53–82.

Phillip, R. P. 1998. *A evolução geológica e tectônica do Batólito Pelotas no Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, 255p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Phillip, R. P. & Machado, R. 2001. Estratigrafia e significado tectônico das suítes graníticas do Batólito Pelotas no Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 31: 257-266.

Phillip, R. P., Machado, R., Nardi, L. V. S. & Lafon, J. M. 2002. O magmatismo granítico Neoproterozoico do Batólito Pelotas no sul do Brasil: novos dados e revisão da geocronologia regional. *Revista Brasileira de Geociências*, 32(2): 277-290.

Phillip, R. P. & Machado, R. 2002a. Ocorrência e significado dos septos do embasamento encontrados nas Suítes Graníticas do Batólito Pelotas, RS, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 29(1): 43-57.

Phillip, R. P., Pimentel, M. M. & Chemale Jr, F. 2016. Tectonic evolution of the Dom Feliciano Belt in southern Brazil: Geological relationships and U-Pb geochronology. *Brazilian Journal of Geology*, 46: 83-104.

Philipp, R. P., Pimentel, M. M. & Basei, M. A. S. 2018. The Tectonic Evolution of the São Gabriel Terrane, Dom Feliciano Belt, Southern Brazil: The Closure of the Charrua Ocean. *In: S. Siegesmund et al. (Ed.). Geology of Southwest Gondwana, Regional Geology Reviews*. Springer, Cham, p. 243-265.

Reis, C. 2006. *Os Sienitoides Arroio do Silva: caracterização estrutural, petrográfica e geoquímica*. Porto Alegre, 76p. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Rivera, C. B. 2019. *Construção do Maciço Sienítico Piquiri (609 a 583 Ma) por colocação sucessiva de pulsos de magma ultrapotássico e shoshonítico sob extensão no escudo Sul-rio-grandense*. Porto Alegre, 213p. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Sbaraini, S. 2012. *Dados de anisotropia de susceptibilidade magnética na modelagem tridimensional do Maciço Sienítico Piquiri*. Porto Alegre, 54p. Monografia de Conclusão de Curso, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Soliani, Jr., E. 1986. *Os dados geocronológicos do Escudo Sul-rio-grandense e suas implicações de ordem geotectônica*. Porto Alegre, 425p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Tessari, R. I. & Picada, R. S. 1966. Geologia da Quadrícula de Encruzilhada do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil. *Boletim da Divisão de Fomento à Produção Mineral, DNPM*. nº124, p. 147.

UFRGS. 1992. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. *Mapeamento geológico 1:25.000 de partes das folhas de Encruzilhada do Sul SH-22-Y-A-VI-2 (MI-2997/2) e Delfino SH. 22-Y-B-IV-1 (MI-2998/1), RS*. Porto Alegre, UFRGS, 1 vol., 2 mapas, Trabalho de Graduação do Curso de Geologia, Instituto de Geociências.

UFRGS. 2010. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. *Mapeamento geológico 1:25.000 de parte das folhas Encruzilhada do Sul SH-22-Y-A-VI-2 (MI-2997/2) e Passo das Canas SH22-Y-A-III-4 (MI-2984/4), RS.* Porto Alegre, UFRGS, vol. 1, 2 mapas, Curso de Geologia, Instituto de Geociências.

Vasquez, M.L. 1997. *Evolução Petrogenética dos granitos da Suíte Encruzilhada do Sul, RS.* Porto Alegre, 195p. Dissertação de Mestrado em Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Vieira, Jr. N., Fernandes, L.A.D., Koester, E. & Scherer, C.S. 1989. Enclaves microgranulares do Maciço de Piquiri – RS. *Acta Geológica Leopoldensia*, 29(12): 185-206.

Zellmer, G. F. & Annen, C. 2008. An introduction to magma dynamics. *In: Annen, C. & Zellmer, G. F. (Ed.). Dynamics of Crustal Magma Transfer, Storage and Differentiation.* Geological Society, London, Special Publications, v. 304, p. 1–13.