

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE VORTICIDADE PARA A QUANTIFICAÇÃO E
DETERMINAÇÃO DA CINEMÁTICA DA ZONA DE CISALHAMENTO ALÉM PARAÍBA**

GUILHERME MUNIZ CARITA LOPES

Orientador: Prof. Dr. Marcos Egydio da Silva

MONOGRAFIA DO TRABALHO DE FORMATURA
(TF 23/26)

SÃO PAULO
2023

AGRADECIMENTOS

Esse presente trabalho não estaria aqui se não fosse pelos professores Mário Campos, Ginaldo Campanha e Marcos Egydio. Agradeço ao Mário por ter me cedido as amostras, permitindo que eu tivesse uma base de dados mais densa. Ao Ginaldo pela ajuda com conceitos, utilização do software SPO e a disponibilidade em um dos momentos que mais necessitei de apoio com o TF. Ao Egydio, por sempre estar presente, pelo empenho em entender um tema desconhecido e pelo companheirismo durante esse ano.

Sou grato aos meus amigos da geologia, que guardarei com muito carinho memórias por todos esses seis anos da minha vida. Ao Ícaro, Xoppz (William), Magmar (Pedro), Gina (Karina) e Catatau (Nathalia). Ao time todo de League of Legends do IGC, por me darem motivação em um dos períodos mais difíceis da minha vida, Jota (João), Suspiro (Lucas), Cid (Eduardo), Boga (Rafael) e Merilo (Murilo). A esse último, apesar de recente em minha vida, devo um agradecimento em particular, por sempre me fazer rir dos motivos mais idiotas e compartilhar o mesmo neurônio que eu.

À minha família um muito obrigado: a minha mãe (Thais) pelo suporte financeiro, ao meu irmão (Gláucio) que serve de inspiração ao encarar as dificuldades da vida sempre com bom humor e ao meu falecido pai (Wilson), que faz falta a cada segundo, que descanse em paz.

Devo, também, um agradecimento especial à minha sogra (Marisa), alguém tão bom que muitas vezes chego a pensar se é real o que essa mulher faz para conseguir ajudar a todos que ela ama, sem nem exigir um agradecimento em troca. Uma das pessoas que devo gratidão eterna, além de conceber o amor da minha vida (Mariana), me ajudou incontáveis vezes durante a pandemia, para você sogrinha, um muito obrigado!

Por fim, mas a mais importante, Mariana, minha melhor amiga, a mãe dos gatos mais fofos do mundo, minha companheira e a quem os incontáveis elogios na língua portuguesa são insuficientes. Sem você eu não estaria aqui, não teria conquistado nem metade do que a vida está me proporcionando atualmente, te ofereço a minha alma e todo o amor que existe dentro de mim, o mínimo que você merece, lava you!

RESUMO

A Zona de Cisalhamento Além Paraíba (ZCAP) apresenta uma boa caracterização geológica, sobretudo acerca da sua geometria, tectônica e metamorfismo. Entretanto, se tratando da natureza do cisalhamento da ZCAP, observa-se que esse é tradicionalmente descrito de maneira qualitativa, sem quantificações diretas. Nesse sentido, o presente trabalho tem como principal objetivo aplicar métodos de vorticidade em milonitos e ultramilonitos constituintes da ZCAP, permitindo, assim, uma análise quantitativa do cisalhamento. Acerca das amostras macroscópicas foram realizados a vetorização dos porfiroclastos sem cauda e foram gerados dados através do software SPO, algo por volta de trezentos porfiroclastos contabilizados. Já as amostras microscópicas foram realizadas nos porfiroclastos com cauda, totalizando cento e quatro porfiroclastos analisados. Os métodos de análise escolhidos foram: PAR, PHD, RP Wallis, RP Passchier e RGN, previamente elucidados por Xypolias (2010). A comparação das magnitudes e a confiabilidade dos resultados é essencial para entender as limitações de cada método aplicado, principalmente em zonas de cisalhamentos com predomínio de cisalhamento puro, em relação ao cisalhamento simples, como é o caso da ZCAP. Os métodos PHD e RP Passchier, para porfiroclastos sem caudas, apresentaram resultados incoerentes, considerando o cisalhamento da ZCAP. Já os métodos RGN, RP Wallis, RP Passchier, para porfiroclastos com cauda, e PAR apresentaram resultados satisfatórios. Todos os números de vorticidade (W_m) obtidos nesses métodos foram inferiores a 0,3, apresentando erros toleráveis e pequenas variações entre si, sendo a maior 0,26 e a menor 0,14 no método RP Wallis para porfiroclastos sem cauda e com cauda, respectivamente. Sendo assim, os dados obtidos confirmam a natureza de um cisalhamento puro a sub-simples para a ZCAP, descritos previamente na literatura.

Palavras-chaves: ZCAP; cisalhamento; vorticidade; porfiroclastos

ABSTRACT

The Além Paraíba Shear Zone (APSZ) is geological well characterized, especially in terms of its geometry, tectonics and metamorphism. However, when it comes to the nature of the shear in the APSZ, it has traditionally been described qualitatively, without direct quantification. The main objective of this study is to apply vorticity methods to the millonites and ultramylonites that make up the APSZ, thus enabling a quantitative analysis of the shear. Regarding the macroscopic samples, the tailless porphyroclasts were vectorized and the data generated using the SPO software, totaling around three hundred porphyroclasts. Microscopic samples were taken of the tailed porphyroclasts, totaling one hundred and four porphyroclasts analyzed. The analysis methods chosen were PAR, PHD, RP Wallis, RP Passchier and RGN, previously elucidated by Xypolias (2010). Comparing the magnitudes and reliability of the results is essential to understand the limitations of each method applied, especially in shear zones with a predominance of pure shear in relation to simple shear, as is the case with the APSZ. The PHD and RP Passchier methods, for tailless porphyroclasts, showed inconsistent results, considering the shear of the APSZ. On the other hand, the RGN, RP Wallis, RP Passchier, for tailed porphyroclasts, and PAR showed satisfactory results. All the vorticity numbers (W_m) obtained in these methods were less than 0.3, with tolerable errors and small variations between them, the largest being 0.26 and the smallest 0.14 in the RP Wallis method for tailless and tailed porphyroclasts, respectively. Thus, the data obtained confirms the nature of pure to sub-simple shear for the APSZ, as previously described in the literature.

Keywords: APSZ; shear; vorticity; porphyroclasts.

Sumário

1.	INTRODUÇÃO.....	6
2.	METAS E OBJETIVOS	7
3.	FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA	8
3.1.	Tipos de porfiroclastos.....	8
3.2.	Métodos de análise de vorticidade.....	9
3.3.	Contexto geológico regional	14
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	16
5.	RESULTADOS OBTIDOS	17
5.1.	Resultados Esperados.....	17
5.2.	Resultados Obtidos	17
5.2.1.	RP Wallis.....	18
5.2.2.	RP Passchier.....	26
5.2.3.	Método PAR	28
5.2.4.	Método PHD	29
5.2.5.	Método RGN.....	29
6.	INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	30
7.	CONCLUSÕES.....	33
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35
	ANEXOS.....	37

1. INTRODUÇÃO

A Zona de Cisalhamento Além Paraíba (ZCAP) tem sido amplamente estudada, seja para o entendimento da cinemática que ocorreu no final do ciclo Pan-Africano-Brasiliano Neoproterozoico na porção ocidental do Gondwana, ou até mesmo para os estudos petrográficos e mineralógicos de milonitos de alto grau. A ZCAP, se encontra na porção central do Cinturão Ribeira, formado pela colisão oblíqua entre o Cráton São Francisco (CSF), a porção oeste do Cráton do Congo, Rio de La Plata e outros blocos menores (Giraldo et al., 2019).

Ademais, assim como a Província Mantiqueira de maneira geral, a ZCAP apresenta sequências de empurrões e dobramentos concomitantes ao cisalhamento, caracterizando um histórico transpressional de cavalgamento em direção às margens cratônicas adjacentes (Giraldo et al., 2019)

Métodos de vorticidade foram primeiramente utilizados em milonitos naturalmente deformados por Passchier (1987) e o conceito proposto anteriormente em Passchier (1986). Desde então, especialmente após os anos dois mil, essas análises começaram a ser mais utilizadas para a determinação da cinemática na geologia estrutural como um todo (Xypolias, 2010). Vorticidade, de maneira ampla, se trata da rotação de algum elemento, no caso, cristais de minerais que foram submetidos a algum regime de esforço e podem apresentar recristalização e sombra de deformação (porfiroclastos), em um campo que permite o fluxo desse elemento.

Em outros termos, a vorticidade pode ser definida como a rotação do vetor velocidade em um fluido, ou seja, a taxa de variação da velocidade angular por unidade de tempo. A vorticidade é uma grandeza vetorial e é comumente expressa em termos do vetor vorticidade, que é perpendicular ao plano de rotação do fluido. De acordo com Allmendigner et al. (2012, p. 200) “É uma medida da deformação rotacional de uma rocha, e é usada para avaliar a orientação e a magnitude da deformação durante processos de deformação crustal.”

Os porfiroclastos podem ser classificados, dentro da geologia estrutural e metamórfica, de acordo com: a forma, a mineralogia, a textura e a origem. No entanto, para a aplicação de métodos de vorticidade na ZCAP, a classificação principal que será levada em conta é aquela que correlaciona o eixo cristalográfico do cristal com a foliação principal, em que é possível observar, em alguns casos, a “cauda” do cristal, que permite tirar a informação se houve e o quanto houve de rotação.

Essa classificação, descrita em Passchier e Trouw (2005), divide os porfiroclastos em três conjuntos: porfiroclastos do tipo phi (ϕ) possuem um eixo C e dois eixos A iguais em comprimento; porfiroclastos do tipo delta (δ), apresentam dois eixos A e um eixo C iguais em comprimento; e porfiroclastos do tipo sigma (σ) com três eixos A de igual comprimento. Vale ressaltar que essa classificação é cristalográfica e geométrica, em que o eixo A é aquele de

maior simetria e os eixos C são os de menores simetria. Esses três tipos de porfiroclastos visualizados para a determinação da rotação da estrutura geológica local (Passchier e Trouw, 2005).

O porfiroclastos do tipo ϕ remete a falta completa de rotação, relacionado, principalmente a compressão e ao cisalhamento puro. O tipo σ remete a rotação e ao cisalhamento simples. O tipo δ também remete a rotação, ao cisalhamento simples, porém, diferentemente do tipo σ , a velocidade de rotação do cristal é maior do que a de recristalização das bordas, podendo indicar uma quantificação da rotação.

Porfiroclastos, sobretudo no contexto de análises de vorticidade, geralmente aparecem em conjunto com as análises de *strain*, que são responsáveis por mensurar e quantificar a deformação dos elementos. Dessa maneira, *strain* e vorticidade partem de pressupostos diferentes, mas complementares, sobretudo no estudo de deformação das rochas naturais e, ambos, podem ser representados nos círculos de mohr de força (Passchier e Urai, 1988). Análises de *strain* consideram que, tanto a matriz quanto os cristais, são subjugados ao esforço e se deformam juntos. Nas análises de vorticidade, a matriz permanece estática, enquanto os cristais se deformam e rotacionam (Robin e Cruden, 1994).

Portanto, as análises de vorticidade são aquelas que utilizam de manipulações gráficas e numéricas da população de porfiroclastos, seja eles quais forem. Sabe-se que a litologia predominante da ZCAP, na porção estudada, são os milonitos de alto grau derivados de ortognasses, paragnaisses e granulitos maficos, associados a corpos graníticos (Giraldo et al., 2019), por isso, espera-se encontrar uma grande população de fenocristais de feldspato e piroxênio classificados como porfiroclastos, sendo assim, bons indicadores cinemáticos.

A importância deste presente trabalho é contemplar e entender em qual contexto as análises de vorticidades abordadas podem se mostrar eficazes para a determinação de uma medida de quantificação de deformação (o número de vorticidade, W_m , relacionada à rotação) em um meio dúctil. Ou seja, evidenciar e colocar a prova se essa metodologia traz resultados condizentes com o que já se tem na literatura, no caso, a ZCAP, que é, essencialmente, dextral, cisalhamento puro a sub-simples e domínios ocasionalmente sinistrais. Além disso, se possível, levantar a hipótese de qual delas seria a mais eficiente com o menor número de amostras.

2. METAS E OBJETIVOS

RP, RGN, PAR, PHD, Rxz/β , Rxz/δ , δ/β e CVA são os principais métodos de vorticidade utilizados nos estudos das zonas de cisalhamento. Com isso, será possível entender qual desses métodos encaixam para zonas de cisalhamento como a ZCAP, testando a utilização, eficácia e acurácia dos métodos em um regime transpressional com uma predominância do cisalhamento puro em relação ao simples, como indica a literatura. Tendo em vista que todos esses métodos de vorticidade levam em conta a rotação dos porfiroclastos, o principal objetivo

desse trabalho circunda em determinar e filtrar o método com melhor resposta para uma menor densidade de população de porfiroclastos do tipo sigma e delta, já que assim poderia ser extrapolado para o Cinturão Ribeira de maneira mais abrangente futuramente.

No entanto, é válido ressaltar que, se tratando de zonas de cisalhamento com deformação natural, o número de vorticidade (W_m) dificilmente representará uma deformação por cisalhamento puro por completo ($W_m = 0$) e um cisalhamento simples por completo ($W_m = 1$), ainda mais com uma densidade maior do número de amostras.

3. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Tipos de porfiroclastos

A classificação dos tipos de porfiroclastos com cauda, phi, delta e sigma, como elucidados anteriormente, foram propostos, inicialmente, no contexto de cinemática da deformação, por Simpson (1986) e Passchier (1994). O sistema do clasto δ é caracterizado por caudas finas e opostas que cruzam um plano referencial, no caso o plano de cisalhamento. O sistema de clasto σ é composto por caudas mais grossas e opostas próximas ao porfiroclasto que se estendem ao longo do plano de cisalhamento. O sistema do clasto ϕ é por vezes descrito como porfiroclasto "pelado" e não possui caudas ao redor (Zhang e Fossen, 2020). A representação gráfica dos sistemas de clasto citados pode ser visto abaixo na Figura 1.

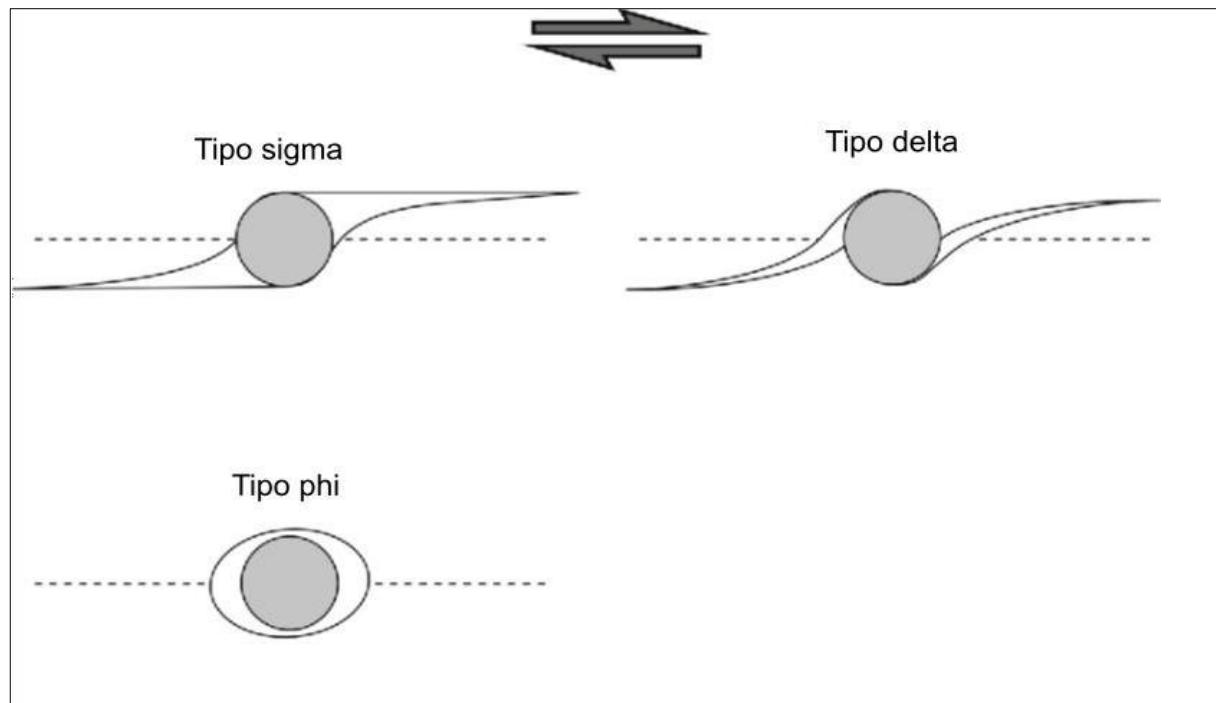


Figura 1 – Tipos de porfiroclastos (modificado de Fossen e Zhang, 2020)

3.2. Métodos de análise de vorticidade

Xypolias (2010) cita as análises RP (*rigid porphyroblast*), R_{xz}/δ , R_{xz}/β , δ/β e PAR (*porphyroblast aspect ratio*) e PHD (*porphyroblast hyperbolic distribution*). Essas análises são as que serão utilizadas e testadas, justamente por serem recomendadas em uma zona de cisalhamento. Ainda segundo Xypolias (2010, p.1), “Os métodos são comparados com base nas incertezas e na capacidade do registro de tensões. Eles são discutidos nos termos de como eles podem conter informações sobre a variação de fluxo temporal e espacial em uma zona de cisalhamento”.

Passchier e Trouw (2005) também discutem as vantagens e desvantagens desses e de outros métodos, além de exemplificá-los e explicá-los. A análise R_{xz}/δ baseia-se na medição das direções de extensão máxima dos porfiroclastos em relação ao plano de cisalhamento. Essa medida é representada pelo ângulo delta (δ), Figura 2, que é definido como o ângulo entre o plano de cisalhamento e a direção preferencial da lineação de estiramento. Justamente por utilizar o ângulo δ , essa medida vai evidenciar uma deformação mais posterior, em que já há recristalização das bordas dos grãos de quartzo, com o número de vorticidade é definido por:

$$Wm = \text{sen}(2\delta) * (R_{xz} + 1) / (R_{xyz} - 1) \quad (\text{Eq. 1})$$

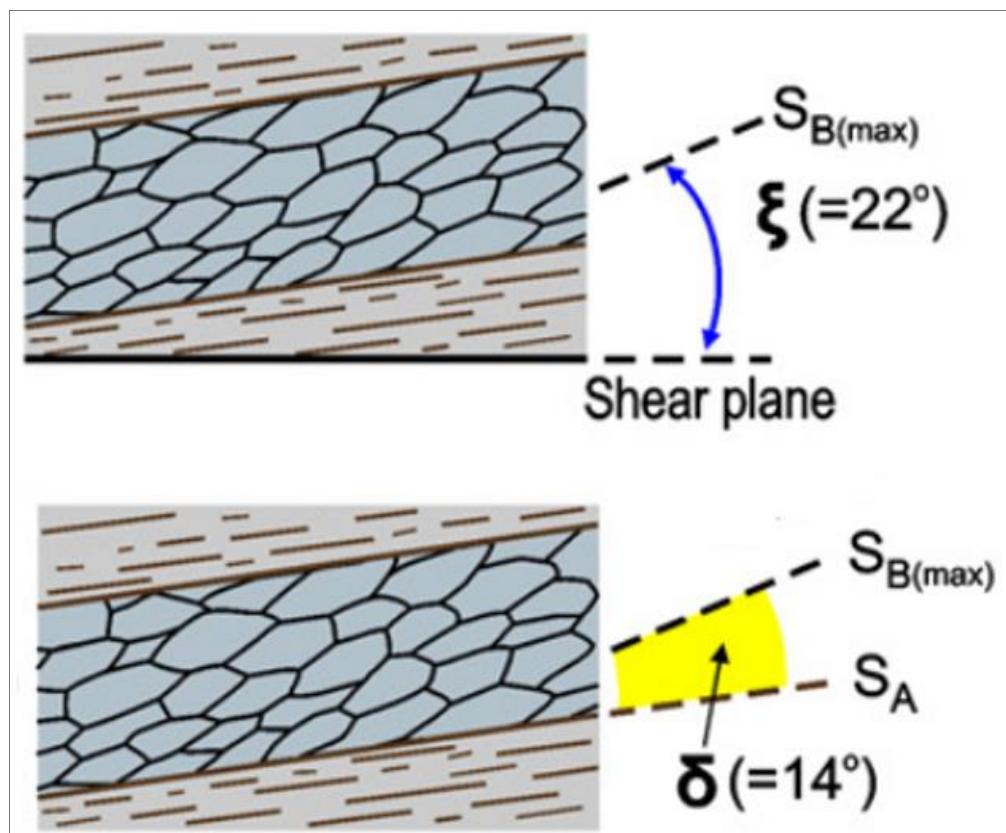


Figura 2 – Definição do ângulo delta (modificado de Xypolias, 2010)

R_{xz}/β é semelhante ao método R_{xz}/δ , mas baseia-se na medição do ângulo beta (β), Figura 3, que é definido como o ângulo entre o plano da foliação principal e o plano de cisalhamento, no caso dos eixos C de quartzo. Muitas vezes também é descrita como R_{xz}/θ , em que θ seria o ângulo entre as bandas C e o plano de cisalhamento, o número de vorticidade é definido por:

$$W_m = \cos(\operatorname{tg}^{-1}(1 - R_{xz} * \operatorname{tg}^2(\beta))) \text{ (Eq. 2)}$$

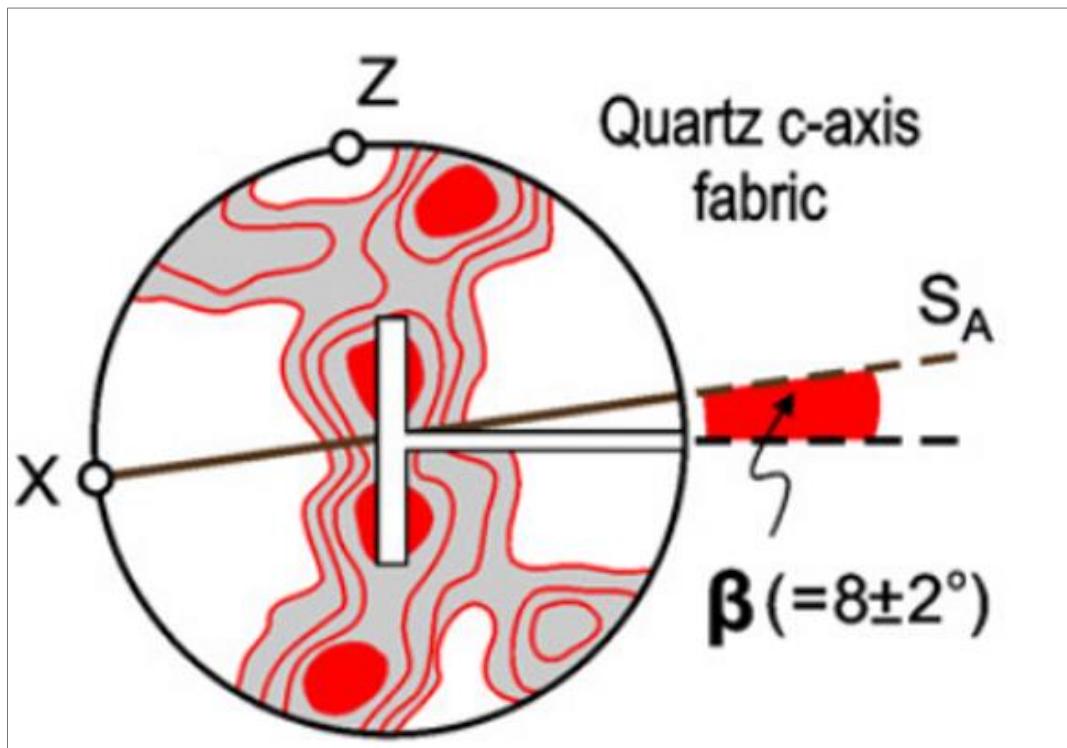


Figura 3 – Definição do ângulo beta (modificado de Xypolias, 2010)

δ/β combina os dois métodos anteriores, usando as medidas de δ e β para calcular a vorticidade. Plotando o ângulo δ na ordenada e β na abscissa, o número de vorticidade é definido por:

$$W_m = \operatorname{sen}^2(\delta + \beta) \text{ (Eq. 3)}$$

PAR (Figura 4) é um método, primariamente, utilizado e descrito por Passchier (1987). Nesse estudo, o PAR é definido plotando o *shape factor*: $B = (R^2 - 1)/(R^2 + 1)$, em que o R seria o *aspect ratio*, ou o que conhecemos por elongação, eixo maior/eixo menor em relação ao ângulo φ , ângulo entre o eixo maior do porfiroclasto e o plano de foliação. A partir disso é possível determinar o W_m , o número de vorticidade, que é a quantificação principal da rotação, onde:

$$\varphi = 0,5 * \operatorname{sen}^{-1} (W_m/B) * ((1 - W_m^2)^{1/2} - (B^2 - W_m^2)^{1/2}) \text{ (Eq. 4)}$$

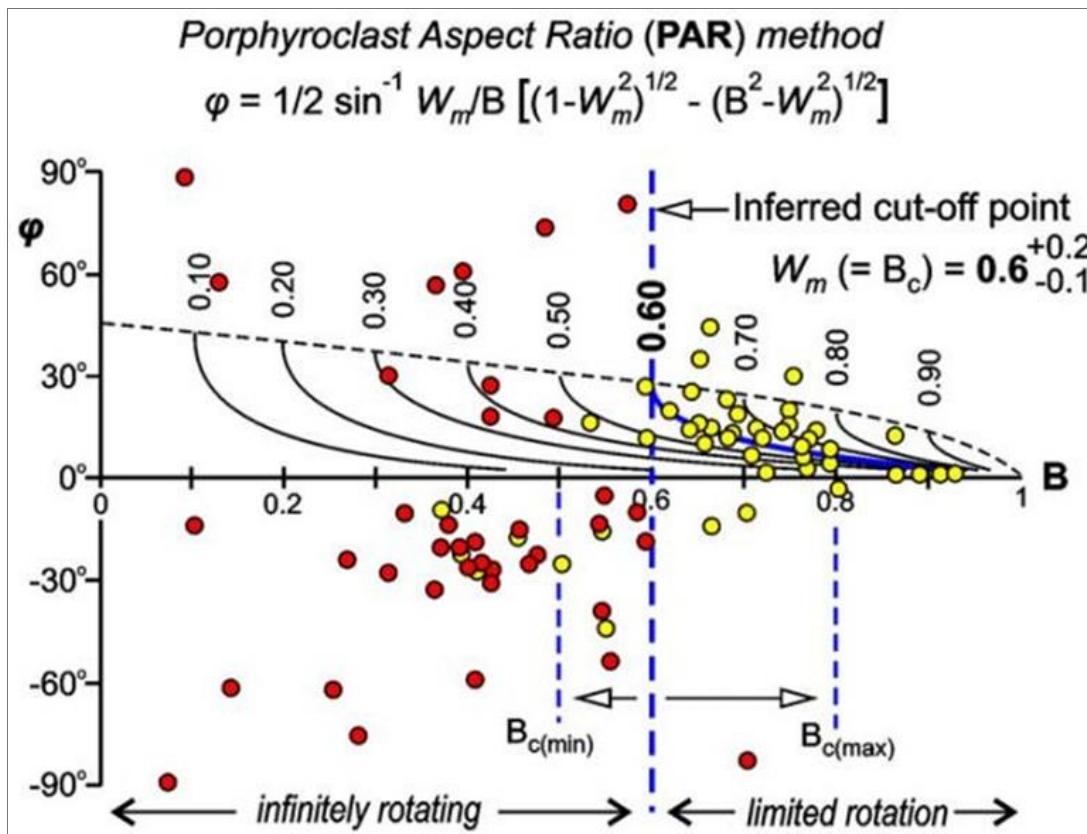


Figura 4 – Representação gráfica do método PAR (Xypolias, 2010)

PHD utiliza os mesmos parâmetros que o método PAR, ao invés do B (*shape factor*) o *aspect ratio*, R , é plotado em coordenadas polares relacionada com o ângulo φ (Figura 5). Esse método foi, primeiramente, introduzido por Simpson e De Paor, em 1997, no estudo “*Practical analysis of general shear zones using the porphyroblast hyperbolic distribution method: an example from the Scandinavian Caledonides*”. Nesse método, o W_m é estabelecido de maneira quase que prática, em que uma curva hiperbólica é estipulada arbitrariamente de acordo com a distribuição de porfiroclastos *back-rotated*, ou seja, aqueles que rotacionam contrários ao sentido de cisalhamento. Esse agrupamento, na projeção polar, vai gerar um ângulo de abertura da hipérbole, em que o W_m é o cosseno desse ângulo (α):

$$W_m = \cos(\alpha) \quad (\text{Eq. 5})$$

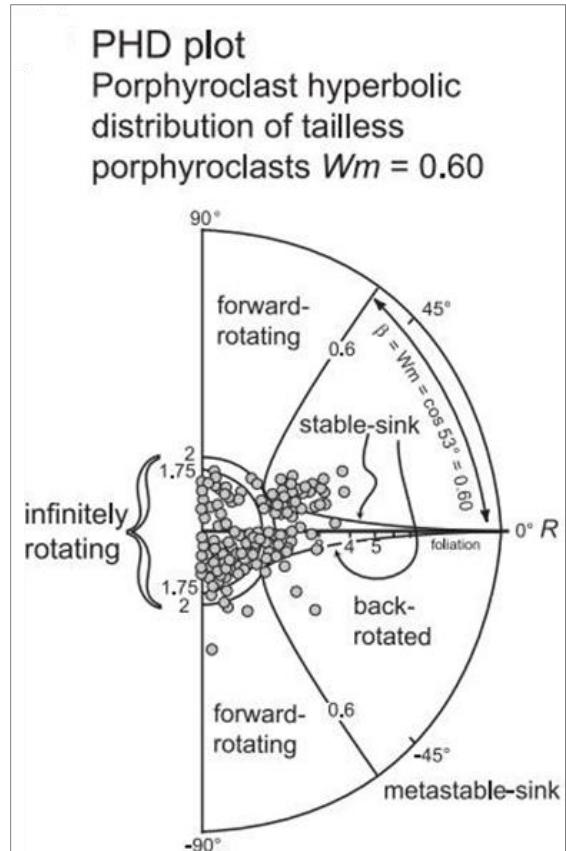


Figura 5 – Representação gráfica do método PHD (retirado de Jiessup, 2007)

RP (*Rigid Porphyroclasts Rotation*), o método de porfiroclastos rígidos, foi o mais utilizado antes dos anos dois mil e em literatura nacional, como em Sartori (2012). Passchier e Simpson (1986) já citavam que os porfiroclastos podem ser usadas como indicadores cinemáticos. Ele consiste em vetorizar os cristais, por meio de algum software, ou extrair os parâmetros individualmente e estabelecer uma direção preferencial da foliação. A partir disso, há um cálculo do número de vorticidade, W_m , realizado pela equação de Passchier (Eq. 6). Depois disso, os dados são usualmente representados em dois gráficos distintos, o gráfico do tipo Passchier e do tipo Wallis (Figura 6).

$$W_m = (Rc^2 + 1)/(Rc^2 - 1) \quad (\text{Eq. 6})$$

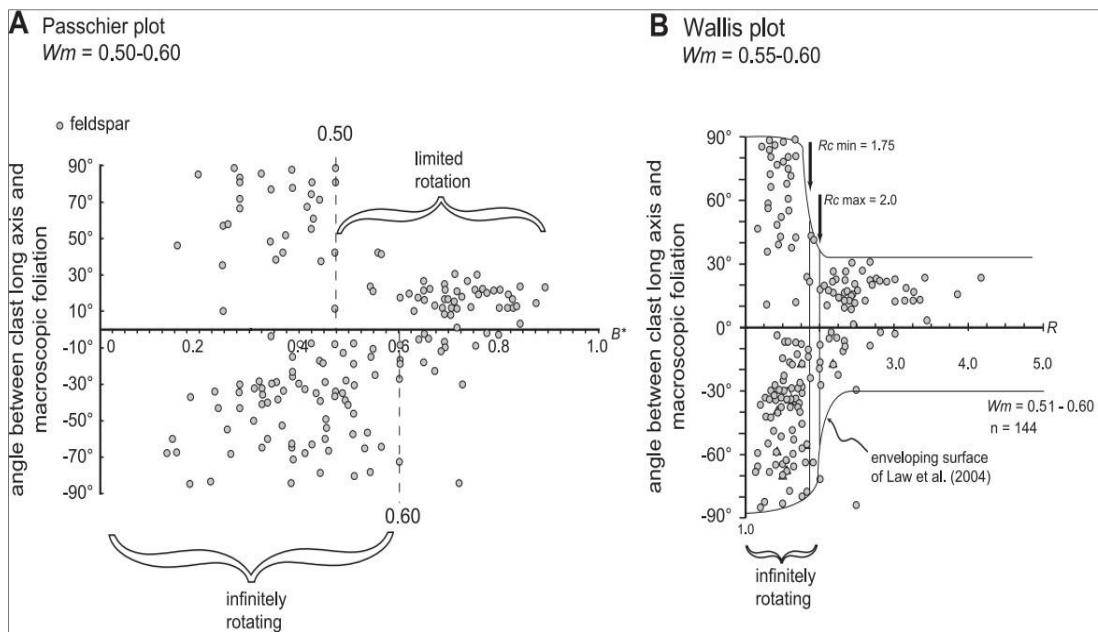


Figura 6 – Representação gráfica do tipo Passchier (A) e do tipo Wallis (B) (extraído de Jiessup 2007)

RGN (*Rigid Grain Net*), como descrito em Jiessup (2007), é uma representação gráfica que tenta mostrar que, por meio de curvas hiperbólicas, os dados de W_m , obtidos de diferentes métodos, podem ter suas representações gráficas padronizadas, além de diminuir a ambiguidade entre os dados de diferentes métodos, que podem mostrar números consideravelmente distintos para métodos diferentes em um mesmo local, principalmente se tratando das representações gráficas do método PHD e como uma alternativa para o gráfico do tipo Passchier e PAR.

CVA (*Crystallographic vorticity axis*) foi descrita em Michels et al. (2015). Essa técnica consiste na medida dos eixos cristalográficos do quartzo deformado e não deformado por meio do EBSD (*Electron backscatter diffraction*) (Figura 7), a partir do mesmo referencial. Assim, sem ter que depender dos outros referenciais como a foliação principal, tamanho dos eixos de deformação e direção do cisalhamento, é possível extrair a quantificação da vorticidade (W_m).

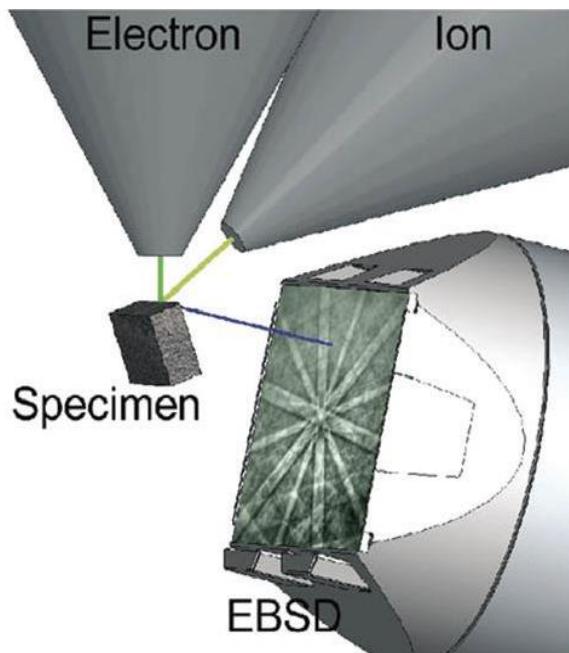


Figura 7 – Funcionamento do EBSD

3.3. Contexto geológico regional

Tratando-se da região de estudo, a ZCAP, é importante entender o histórico dos estudos, não só desse local, mas também da porção central da Província Mantiqueira de maneira geral. Primeiramente, a cinemática de uma zona de cisalhamento raramente é o objeto principal de algum estudo. Ela acaba sendo determinada por observações de indicadores cinemáticos em lâmina e campo, não sendo necessário aprofundar e ter uma vasta amostragem para isso.

Assim, a grande densidade de estudos acaba circundando, a geometria, a evolução tectônica e o metamorfismo. Giraldo et al. (2019) descrevem que, a partir de novos dados geotérmicos e geobarométricos (Figura 8), as condições específicas de pico metamórfico em granitoides sin-tectônicos permitiu averiguar temperaturas entre $562 \pm 38^\circ\text{C}$ e $714 \pm 23^\circ\text{C}$ e pressões entre $7,1 \pm 0,8$ Kbar e $4,3 \pm 1,1$ Kbar.

Além disso, datações de zircão U-Pb, por LA-ICPMS, losangos (Figura 8), foram realizadas em três amostras: um ortognaisse milonitizado de $583,6 \pm 7,1$ Ma; um paragnaisse milonitizado de $591,5 \pm 6,1$ Ma; e um veio pegmatítico que corta os milonitos de $597,7 \pm 9,4$ Ma. Esses novos resultados permitem afirmar que o pico metamórfico ocorreu entre 595 e 590 Ma, chegando a atingir condições de fácie anfíbolito, sendo reativada entre 580 e 535 Ma, já que é possível observar granitos de 535 Ma, que foram deformados por conta da ZCAP (Giraldo et al., 2019).

Ribeiro et al. (2019) discutem sobre granitos intensamente deformados contendo uma assembleia mineral de: quartzo \pm oligoclásio \pm feldspato potássico \pm biotita \pm muscovita \pm rutile

\pm magnetita. A ocorrência de magnetita juntamente à biotita nesses granitos torna-se um indicador do grau metamórfico durante a deformação, ocorrendo em torno de ~ 520 °C e ~ 4 Kbar.

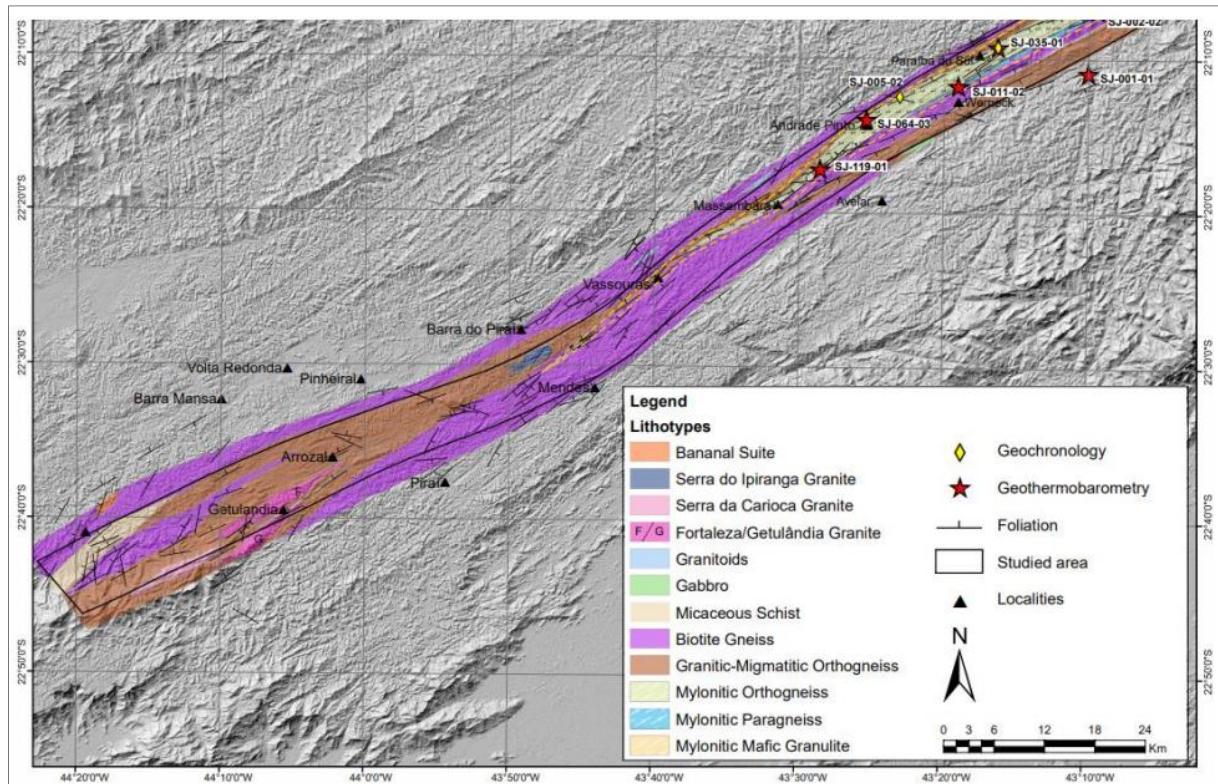


Figura 8 – Localização das análises geocronológicas, geotérmicas e barométricas no mapa de litotipos da ZCAP (retirado de Giraldo et al. 2019)

A deformação do quartzo é acomodada por *dislocation creep*, ocorrendo a rotação dos grãos e o registro de algumas migrações de borda, chegando a uma taxa de deformação de 10^{-13} a 10^{-12} s $^{-1}$. Junto às análises CPOs do quartzo, foi possível afirmar que a Zona de Cisalhamento Taxaquaral (ZCT) foi desenvolvida sob condições moderadas a altas de deformação, em um regime transpressional com predominância do cisalhamento simples em relação ao puro (Ribeiro et al., 2019).

Egydio-Silva e Mainprice (1999), ao estudarem a deformação da ZCAP, desenvolveram um método que correlaciona a direção cristalográfica preferencial do plagioclásio com a possível orientação dos eixos de estresse. Foi demonstrado que sigma 1 (σ_1) pode ser paralelo a bissetriz entre as maclas dos plagioclásios de milonitos de alto grau naturalmente deformados. Esse método indicou uma predominância do σ_1 ser perpendicular a foliação, ao longo da zona de cisalhamento, acompanhando a sua geometria.

Tratando-se do Cinturão Ribeira, em geral, Faleiros et al. (2022), realizaram um trabalho em que, por meio de uma abordagem diversa, procuraram compreender as escalas termais e deformacionais de uma zona de cisalhamento dúctil. A área de estudo, em relação à ZCAP, é localizada na porção mais a sudoeste do Cinturão Ribeira (Fig. 7), e, ali, foram

realizadas coleta de dados geofísicos e estruturais. Dentre os dados estruturais, se destaca os dados de microestruturas, entre eles, as análises de RP e δ/β .

Algumas das técnicas citadas, como o CVA, o PHD e CPO, foram utilizadas na Zona de Cisalhamento Idaho (ICS), na Cordilheira Montanhosa a oeste dos EUA. Giorgis et al. (2017) demonstraram o predomínio de cisalhamento puro na ICS, nessa zona transpressional e dextral, bem como diversos subdomínios ao longo dela, principalmente pela medida dos ângulos α , do método PHD.

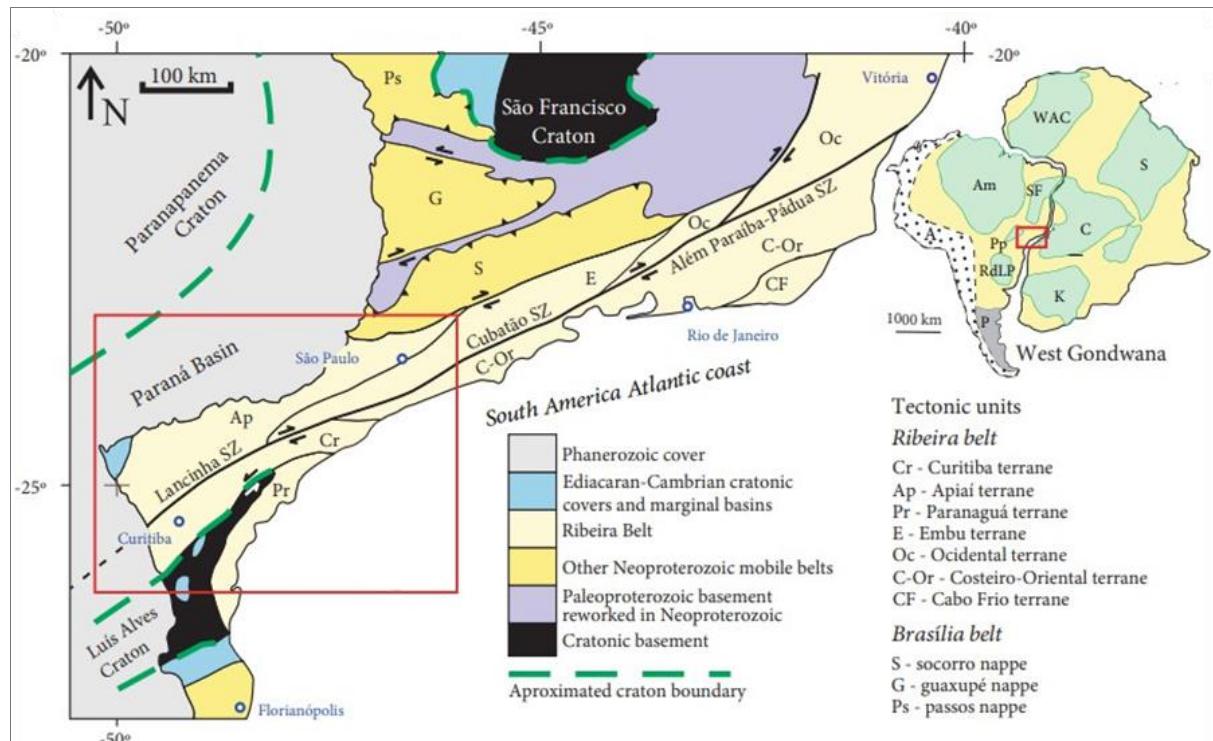


Figura 9 – Localização da área de estudo de Faleiros et al. (2022)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Tendo em vista que este trabalho consiste em testar a efetividade das análises listadas por Xypolias (2010), os materiais e métodos utilizados foram: i) separação de amostras; ii) corte das amostras no plano XZ; iii) separação das amostras que foram para laminação; iv) classificação das amostras macroscópicas cortadas; v) vetorização dos cristais, *inkscape*; vi) cálculo do número de vorticidade, software SPO; vii) cálculo, no Excel, do método RP do tipo Wallis e Passchier (a partir dos parâmetros obtidos nas análises); viii) análise das lâminas; ix) cálculo do R, do ângulo ϕ e do B, sendo os eixos e foliação principal medidos individualmente (Figura 11); x) e a geração de gráficos através da ferramenta *Origin*, PAR, PHD, RP do tipo Wallis, RP do tipo Passchier e RGN.

5. RESULTADOS OBTIDOS

5.1. Resultados Esperados

Os resultados obtidos neste projeto estarão atrelados diretamente a quantidade de amostras obtidas dos porfiroclastos vetorizados. É previsível que cada método indique tendências e comportamentos diferentes de acordo com o agrupamento de cluster de pontos de cada análise.

Espera-se que RP, PAR, PHD, Rxz/β e Rxz/δ possam apresentar resultados semelhantes, tendo em vista que, para todos eles, o tamanho do eixo maior e menor é levado em conta. No caso do PHD, os resultados permitem agrupar diferentes setores de acordo com a população de porfiroclastos *back-rotateds* e diferentes ângulos α estipulados, assim como Giorgio et al. (2017) analisaram na zona de cisalhamento Idaho. Já a metodologia δ/β pode ser bem diferente das demais, já que não leva em conta os eixos de deformação dos cristais, como foi feito em Faleiros et al. (2022).

Já no caso do método CVA, pela falta de disponibilidade do EBSD e, principalmente, pela prioridade dada aos outros métodos, não será realizada essa análise.

5.2. Resultados Obtidos

Como descrito no relatório parcial, a primeira etapa do trabalho, aliada a formação de conhecimento sobre o assunto, foi acerca de amostras macroscópicas e a descrição dos macrocristais dos ultramilonitos da ZCAP (Figura 10). Essa primeira parte consistiu na separação das amostras, coletadas por outros trabalhos, a vetorização de grande parte dos cristais visíveis a olho nu, a utilização do software SPO e a construção de dois principais gráficos, o método RP do tipo Wallis e Passchier.

Já na segunda parte do trabalho, o enfoque se tornou os porfiroclastos com cauda, cristais de lâminas confeccionadas de amostras (Figura 12) e as amostras fornecidas pelo professor Mário Campos (Figura 21). Esses porfiroclastos foram analisados em sua totalidade em microscopia, em que se estabeleceu a foliação principal e, posteriormente, realizada a medição dos eixos e o ângulo φ através da ferramenta *inkscape*.

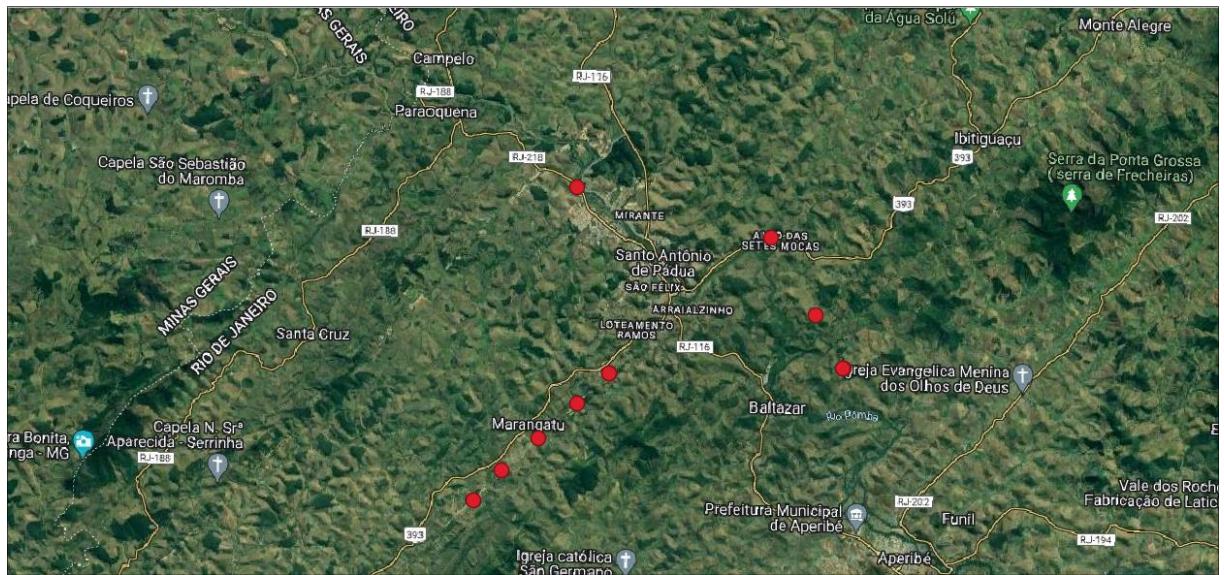


Figura 10 – Imagem de localização de alguns dos pontos das amostras coletadas (círculos vermelhos), próximo ao município Santo Antônio de Pádua

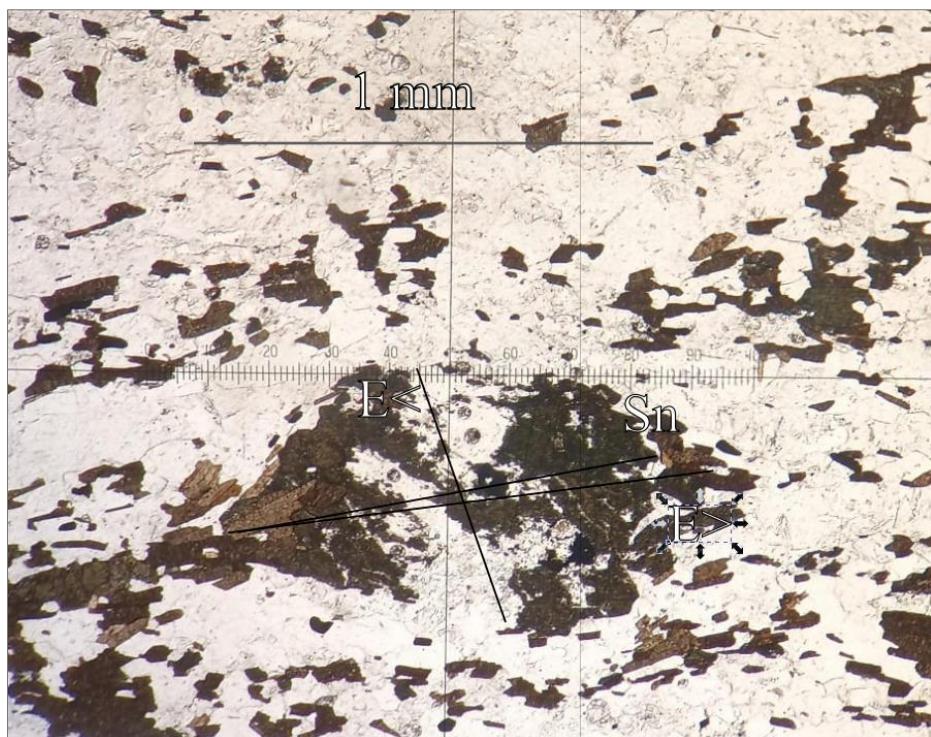


Figura 11 – Exemplo do processo de medição individual de cristais realizado na ferramenta *inkscape*

5.2.1. RP Wallis

Durante o processo de separação de amostras deu-se preferência para as amostras de composição granítica, já que, dentre as disponíveis da região, eram as que mais apresentavam macrocristais de feldspato e alguns de piroxênios (Figura 12).

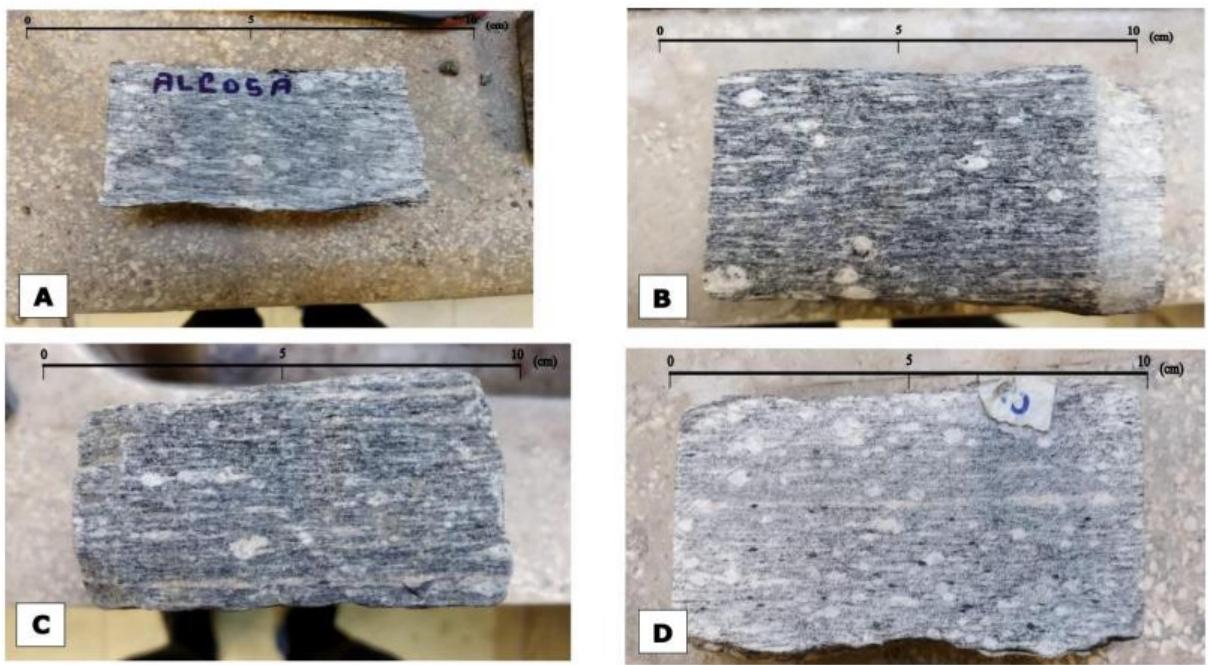


Figura 12 - Algumas das amostras escolhidas para a realização de RP Wallis e Passchier, em cristais sem cauda.

O software SPO, fornece dados valiosos, do tamanho dos eixos e o ângulo médio entre o eixo maior e a foliação estipulada, sendo imprescindível na geração do número de vorticidade de outros métodos. Por isso, selecionou-se seis amostras, que foram vetorizadas e transformadas em elipses (Figura 13).

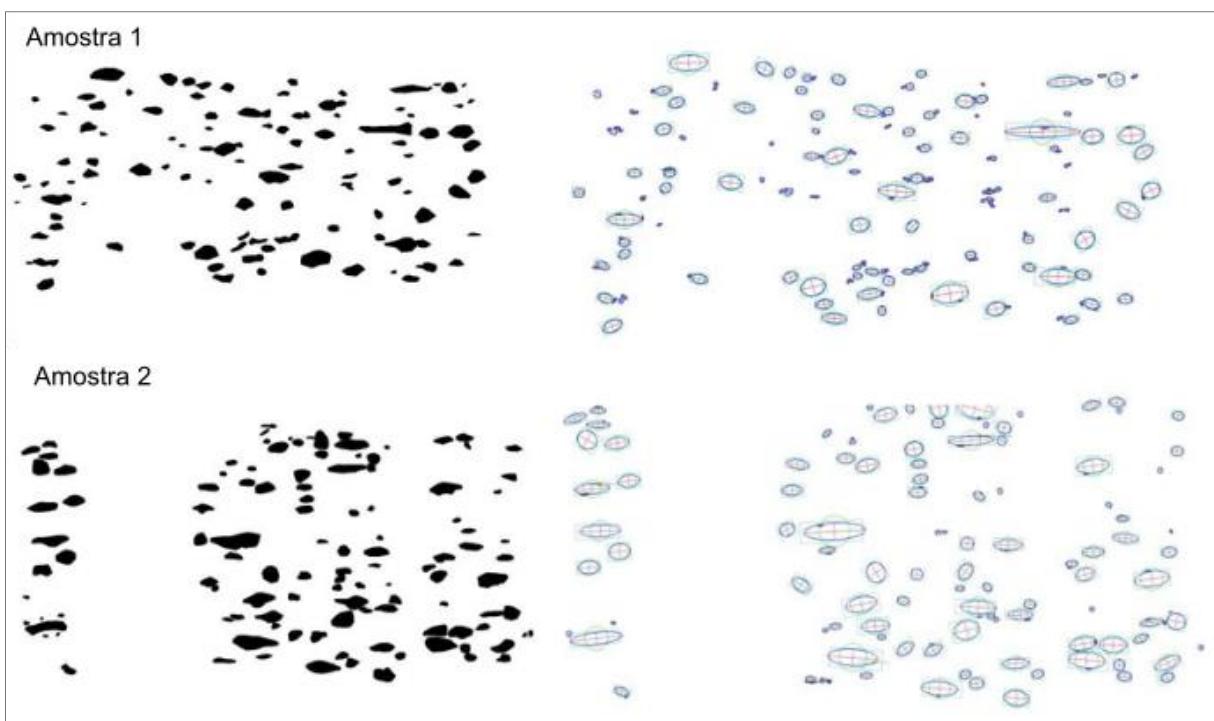
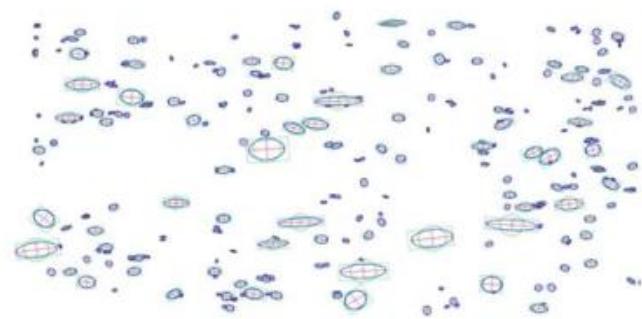
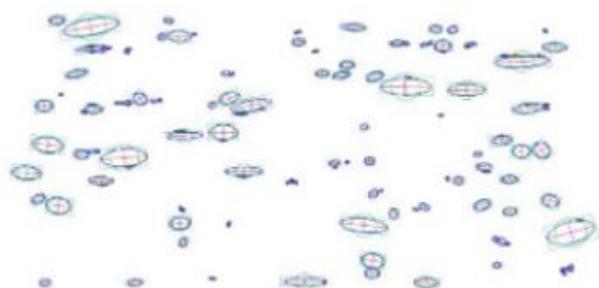


Figura 13 – Amostras 1 e 2 vetorizadas e suas respectivas elipses (SPO).

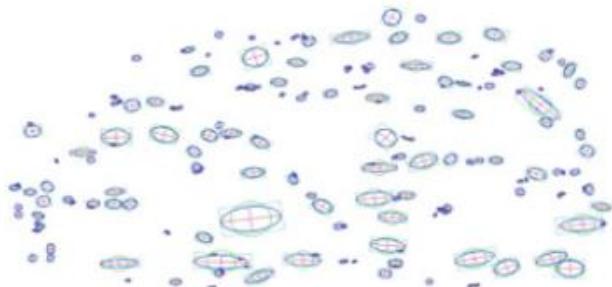
Amostra 3



Amostra 4



Amostra 5



Amostra 6

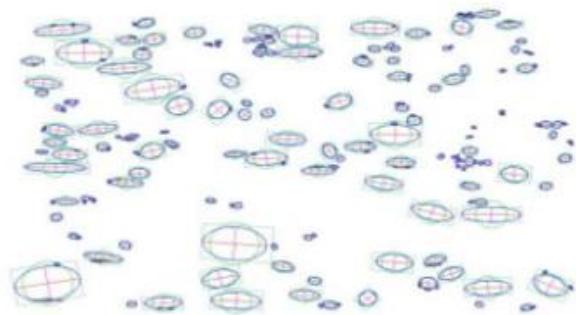


Figura 13 – Amostras 3, 4, 5 e 6 vetorizadas e suas respectivas elipses (SPO).

Os gráficos RP do tipo Wallis gerados para essas seis amostras estão apresentados a seguir (Figuras 14 – 19).

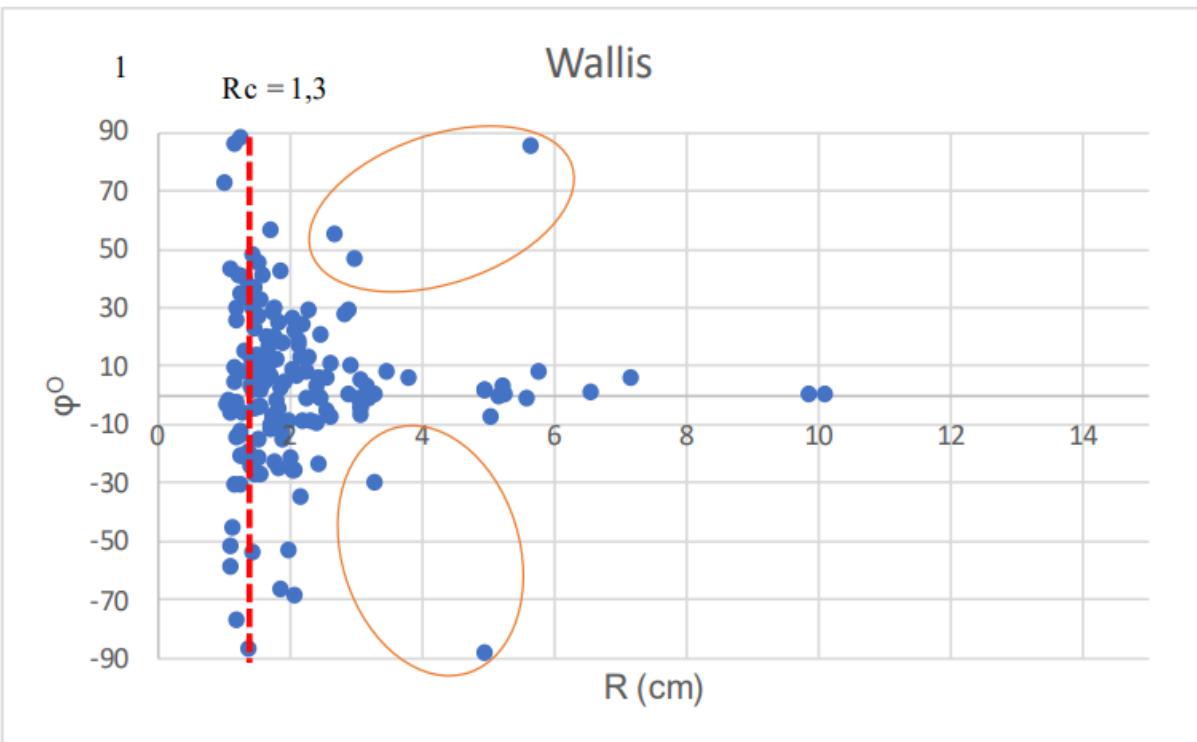


Figura 14 – Gráfico RP do tipo Wallis para amostra 1, ângulo φ nas ordenadas e R nas abscissas, e um valor de R_c interpretado a partir da concentração dos pontos das amostras. Elipses laranjas foram os pontos desconsiderados para a interpretação do R_c .

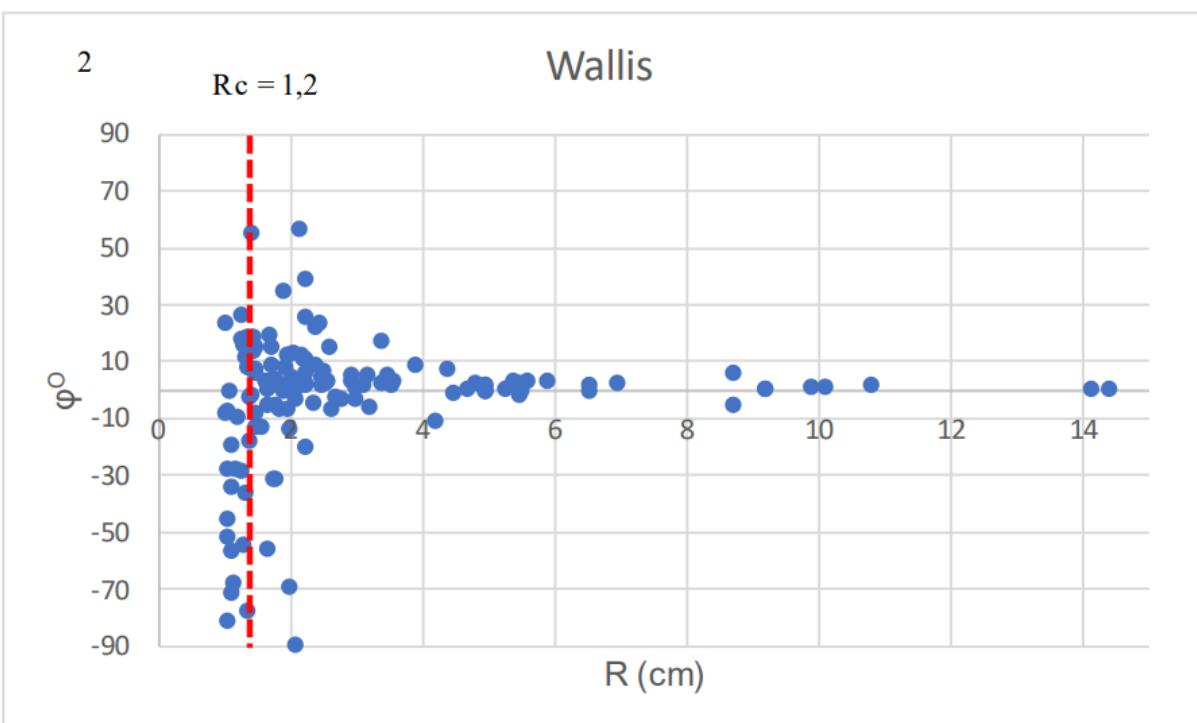


Figura 15 – Gráfico RP do tipo Wallis para amostra 2, ângulo φ nas ordenadas e R nas abscissas, e um valor de R_c interpretado a partir da concentração dos pontos das amostras.

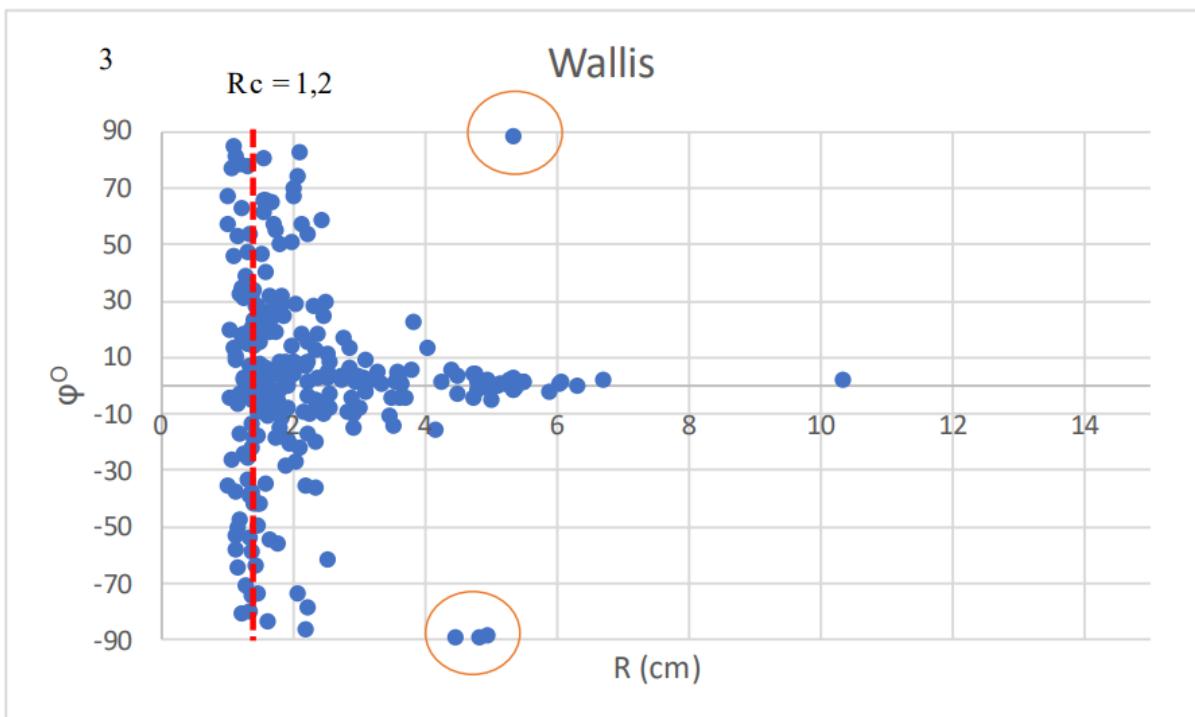


Figura 16 – Gráfico RP do tipo Wallis para amostra 3, ângulo φ nas ordenadas e R nas abscissas, e um valor de R_c interpretado a partir da concentração dos pontos das amostras. Elipses laranjas foram os pontos desconsiderados para a interpretação do R_c .

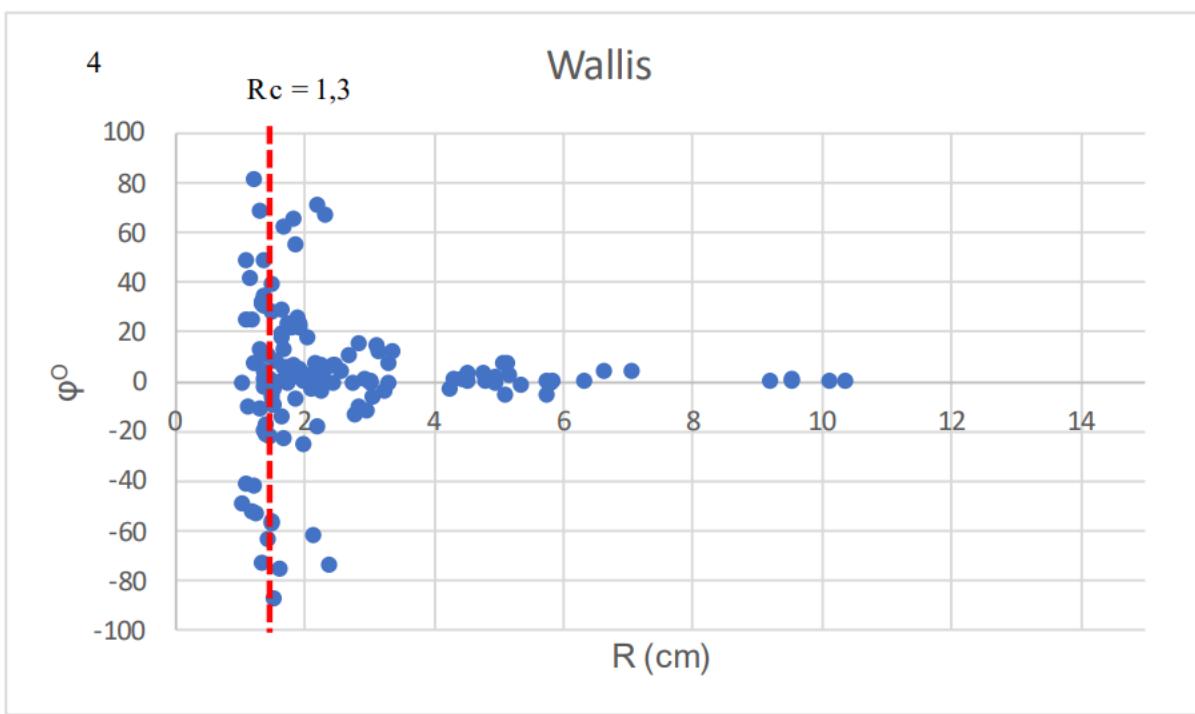


Figura 17 – Gráfico RP do tipo Wallis para amostra 4, ângulo φ nas ordenadas e R nas abscissas, e um valor de R_c interpretado a partir da concentração dos pontos das amostras.

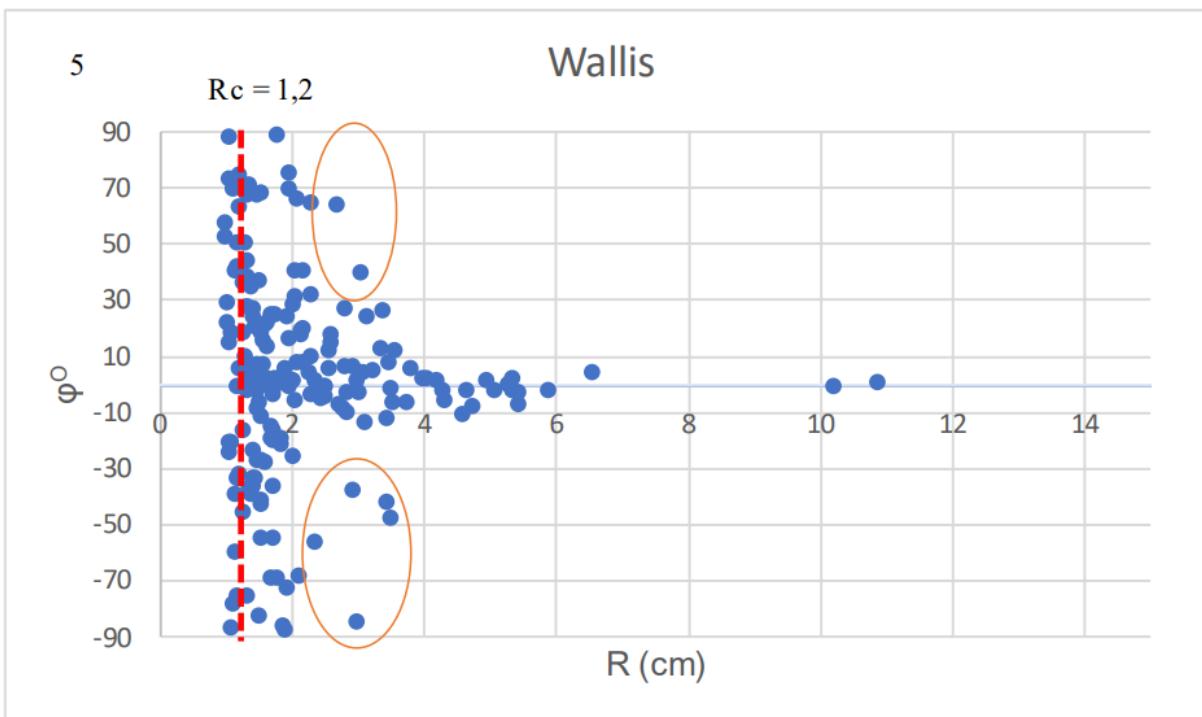


Figura 18 – Gráfico RP do tipo Wallis para amostra 5, ângulo φ nas ordenadas e R nas abscissas, e um valor de R_c interpretado a partir da concentração dos pontos das amostras. Elipses laranjas foram os pontos desconsiderados para a interpretação do R_c .

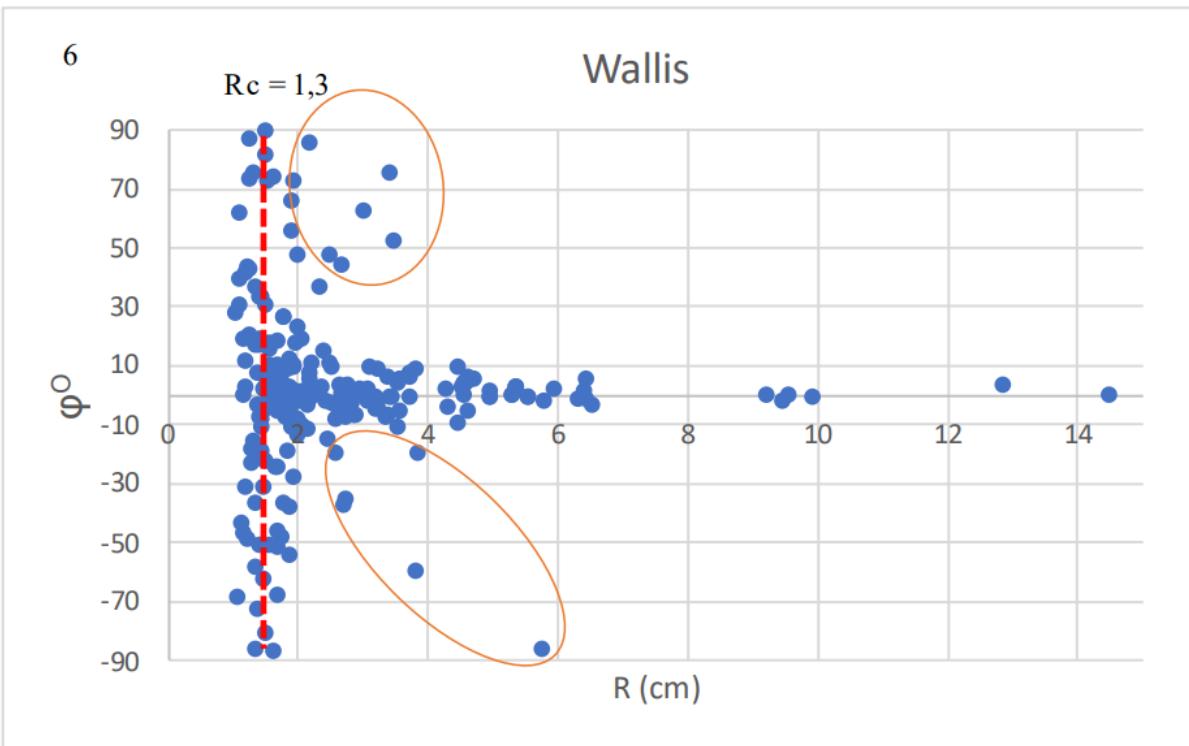


Figura 19 – Gráfico RP do tipo Wallis para amostra 6, ângulo φ nas ordenadas e R nas abscissas, e um valor de R_c interpretado a partir da concentração dos pontos das amostras. Elipses laranjas foram os pontos desconsiderados para a interpretação de R_c .

Os valores de *aspect ratio* crítico que aparecem entre essas seis amostras é de 1,2 a 1,3, ou seja:

$$W_M^{RP} = (1,2^2 - 1)/(1,2^2 + 1) \sim (1,3^2 - 1)/(1,3^2 + 1) = 0,18 \sim 0,26$$

Os resultados do método RP, através da representação do gráfico de Wallis, foram condizentes com o que se espera da ZCAP, um regime transpressional, onde o cisalhamento puro atua mais intensamente que o simples.

Dentro de todos os gráficos confeccionados (Figura 14 – Figura 19), é importante salientar que, devido ao fato de que parte considerável das imagens vetorizadas serem cristais muito pequenos de piroxênio, menos de um centímetro em escala real, tendem a representarem ângulos φ altos (devido a uma imprecisão do tamanho e, principalmente, na posição dos eixos) e R medianos, por isso, essas amostras, quando visualizadas graficamente, elipses laranjas, foram desconsideradas ao levar em conta o ponto crítico (R_c).

Agora, já se tratando da segunda parte do trabalho, também foram realizadas análises RP do tipo Wallis com os porfiroclastos de cauda. Por se tratar de uma densidade menor de pontos, as medições foram realizadas individualmente, com uma variação menor entre os ângulos, algo por volta de $\pm 40^\circ$. (Figura 20).

Considerando o *aspect ratio* crítico de 1,15, então:

$$W_M^{RP} = (1,15^2 - 1)/(1,15^2 + 1) = 0,14$$

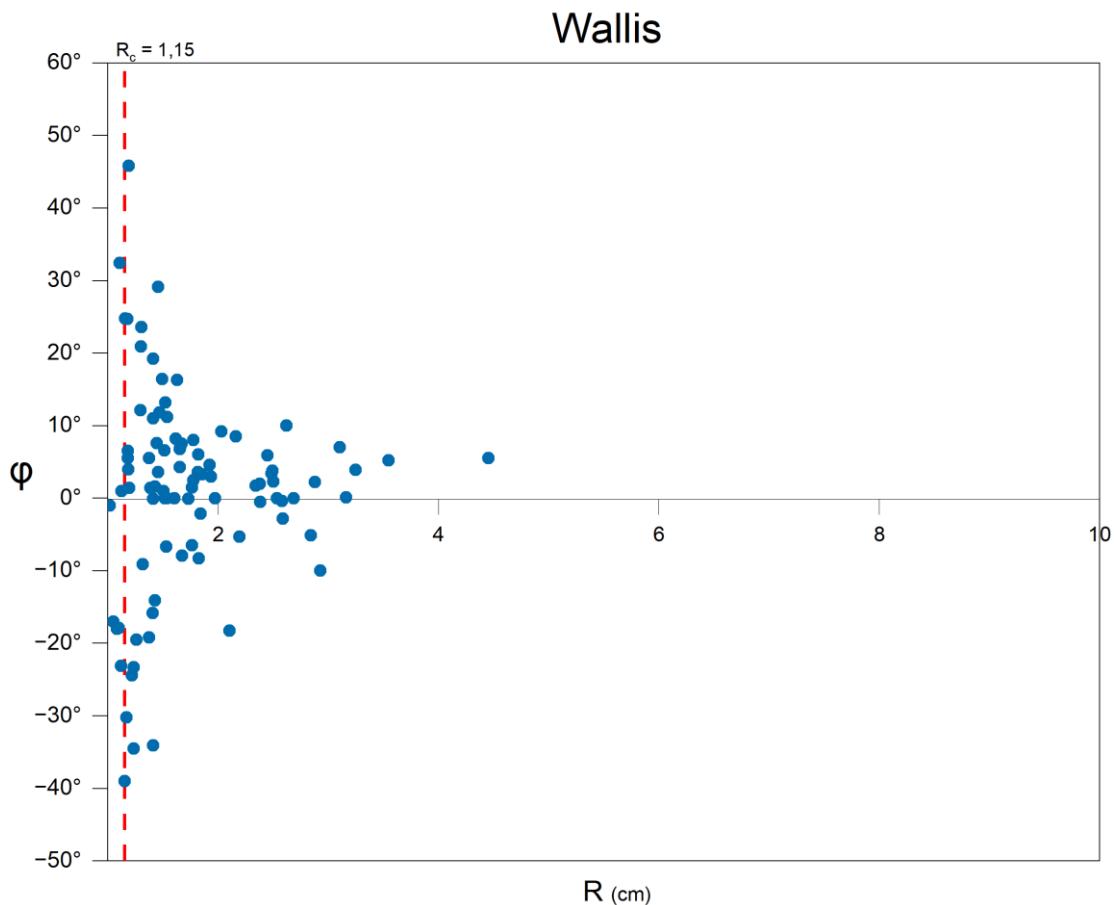


Figura 20– Gráfico RP do tipo Wallis para amostras de porfiroclastos com cauda, ângulo ϕ nas ordenadas e R nas abscissas, e um valor de R_c interpretado a partir da concentração dos pontos das amostras.

Como dito, as análises das lâminas e as medições dos eixos e ângulos (ϕ), foram realizadas individualmente, resultando em 104 porfiroclastos de 20 lâminas diferentes. A Tabela 1 apresenta os parâmetros geométricos de seis cristais, os quais estão exemplificados na Figura 21. O Anexo I contém os de todos os porfiroclastos analisados em lâmina.

Tabela 1 – Parâmetros geométricos de seis porfiroclastos analisados

Lâmina	Eixo menor (e<)	Eixo maior (e>)	R (e>/e<)	Ângulo ϕ	B
Alp – 05B	48,2	66,88	1,386	1,4	0,315
Sap – 6a	73,1	179	2,449	5,9	0,714
Pd-17d2	99,7	267,8	2,686	0	0,757
Alp – 01	35,6	51,9	1,458	3,6	0,360
Sap – 100	65,9	109	1,654	6,8	0,465
Sap – 103B	200	231	1,155	24,8	0,143

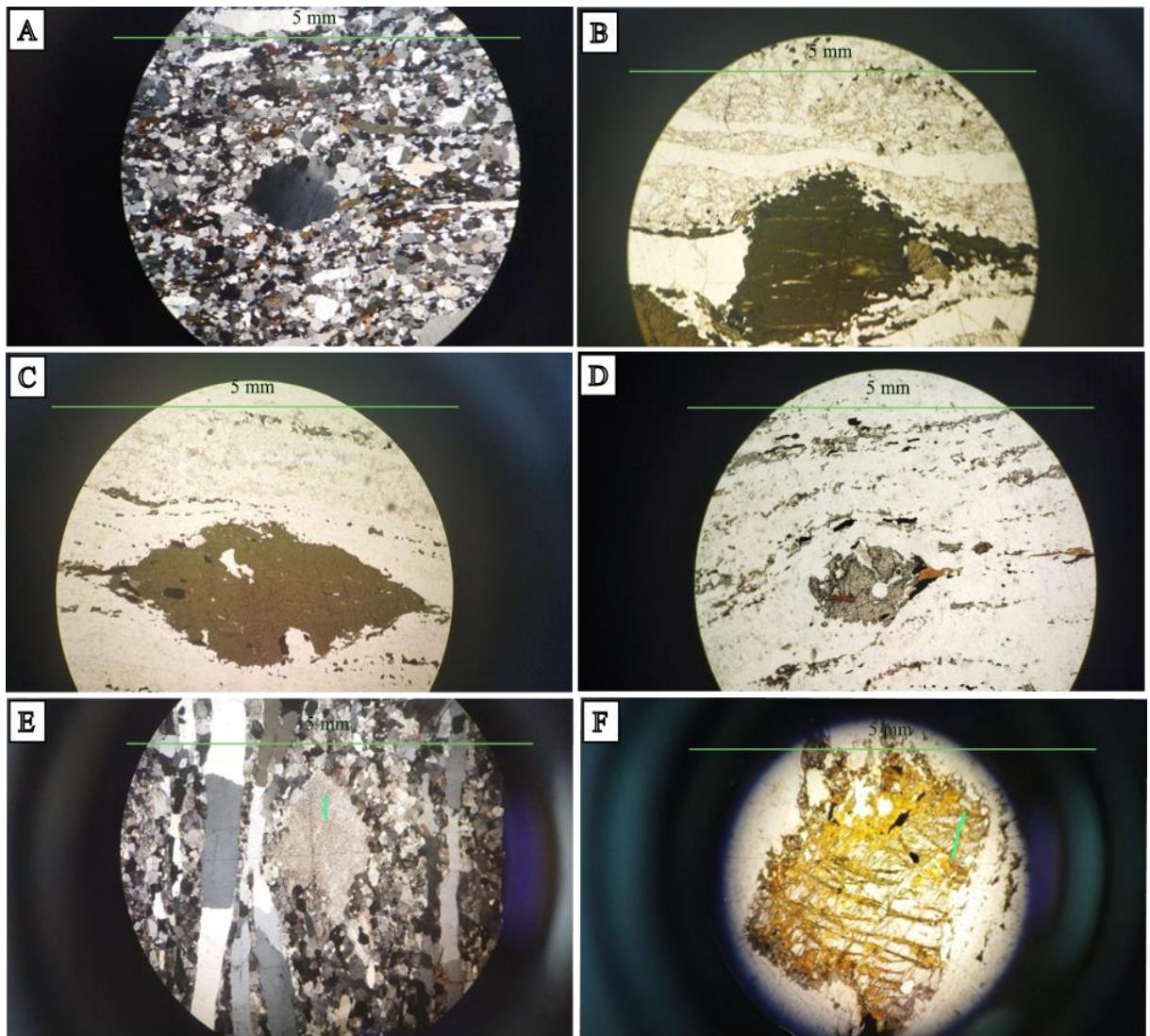


Figura 21– Amostras dos porfiroclastos com cauda em lâmina: A) ALP-05 B; B) Sap-6A; C) PD-17D2; D) ALP-01; E) SAP-100; F) SAP-103B

5.2.2. RP Passchier

Além disso, se tratando dos mesmos dados, foi possível realizar o gráfico do tipo Passchier (Figura 22). Observa-se que a variação dos ângulos se comporta como no gráfico RP do tipo Wallis (Figura 20), tendo uma escala vertical consideravelmente distinta ao se comparar com a Figura 19. Quanto à vorticidade, W_M^{RP} , é em torno de 0,155, variando entre 0,17 e 0,14, determinada pelo *shape factor* crítico, B_c .

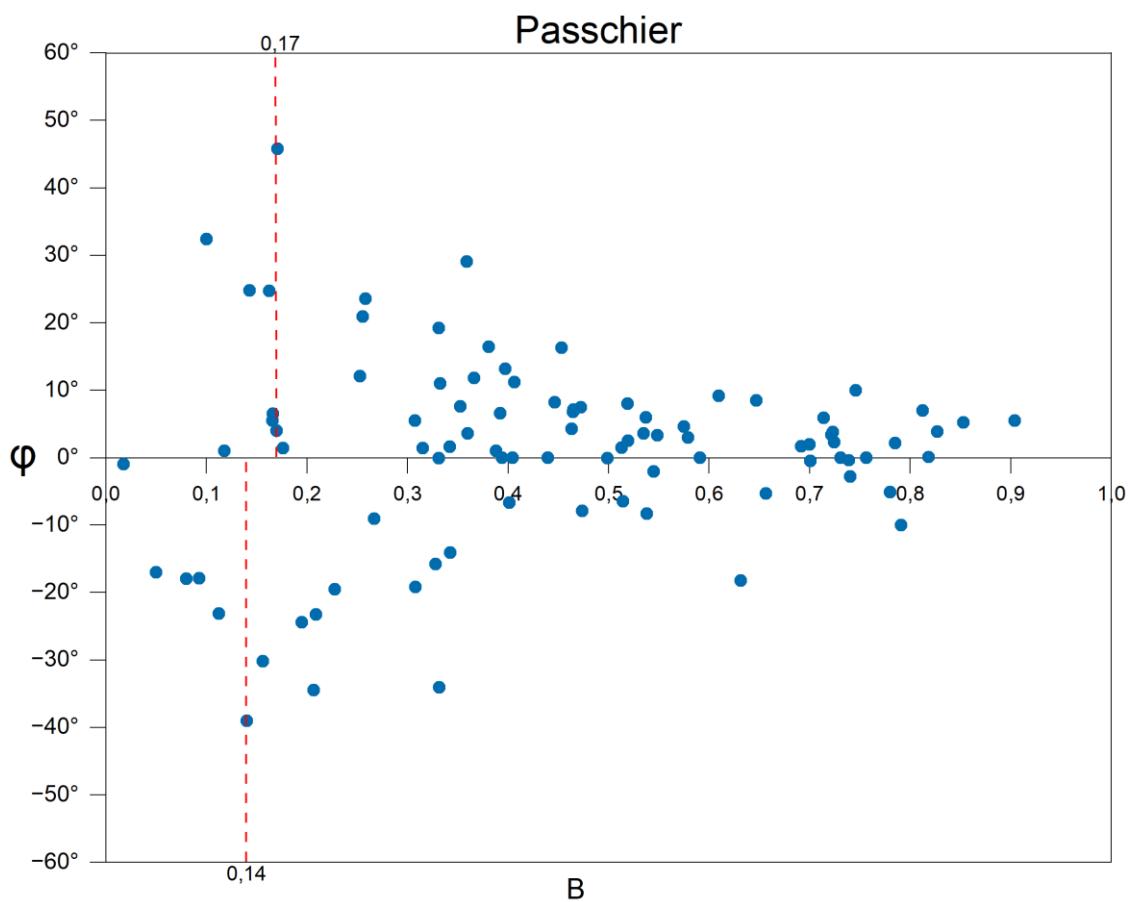


Figura 22 – Gráfico RP do tipo Passchier dos porfiroclastos com cauda, ângulo φ nas ordenadas e B nas abscissas, e um valor de B_c , interpretado a partir da concentração dos pontos das amostras.

Foi realizada também a tentativa de fazer o gráfico RP do tipo Passchier para os porfiroclastos sem cauda (Figura 23), resultando em uma vorticidade $W_m = B_c = 0,83$

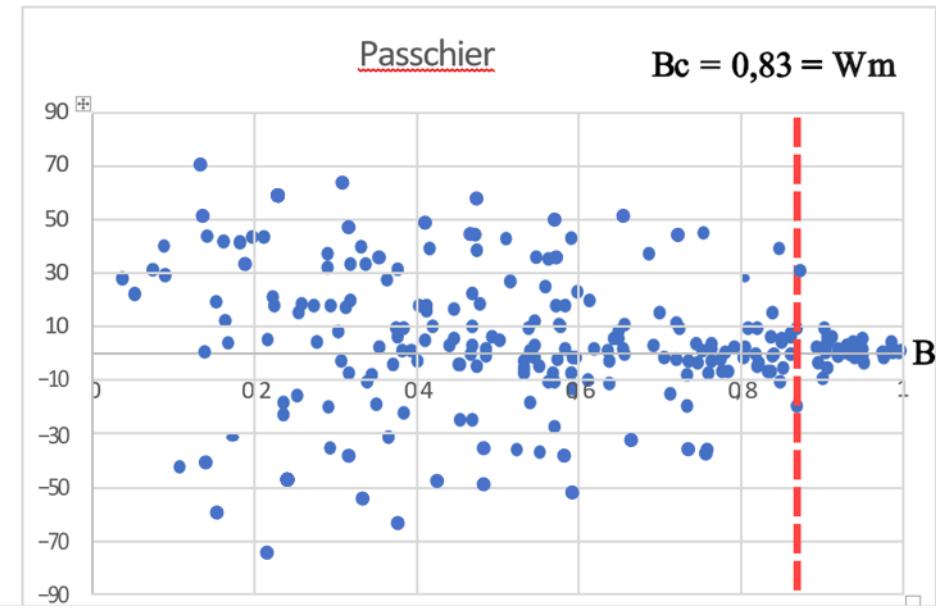


Figura 23 – Gráfico RP do tipo Passchier dos porfiroclastos sem cauda, ângulo φ nas ordenadas e B nas abscissas, e um valor de B_c , interpretado a partir da concentração dos pontos das amostras.

5.2.3. Método PAR

Assim como o método RP, do tipo Passchier, o método PAR, é ideal para a utilização em porfiroclastos com cauda, ou seja, tende a indicar números imprecisos e muito maiores do que no método de representação gráfica Wallis quando não utilizados para esses casos. Essa justificativa vale-se para os dois, já que utilizam os mesmos parâmetros.

Dessa maneira, confeccionou-se o gráfico apresentado na Figura 24, em que, assim como RP Passchier, expressa o valor do número de vorticidade pelo B crítico, ponto em que, a partir dali, há uma queda observável dos valores de φ , sendo nesse caso, expresso em um intervalo de precisão de casas decimais. Então podemos observar um $W_M^{PAR} = 0,2 \pm 0,1$.

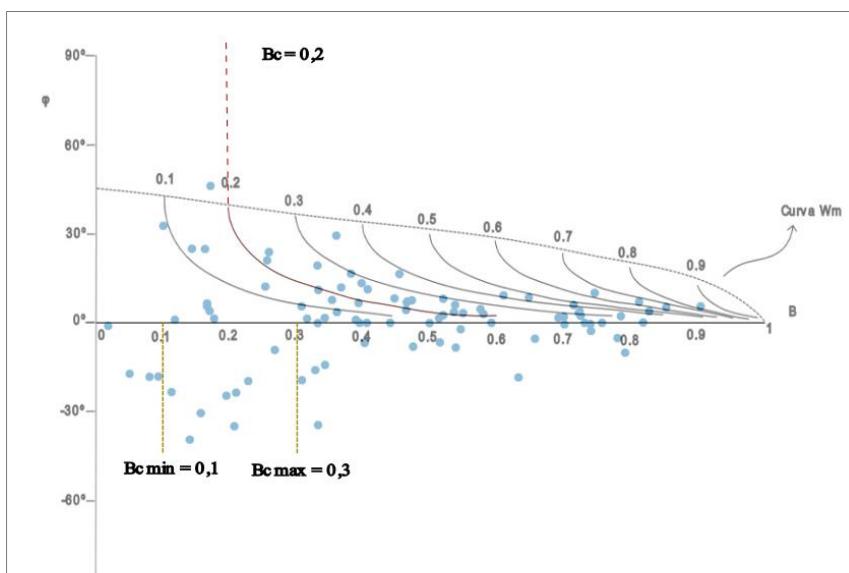


Figura 24 - Gráfico PAR dos porfiroclastos com cauda, ângulo φ nas ordenadas e B nas abscissas, e um valor de B_c , interpretado a partir da concentração dos pontos das amostras, B_c interpretado a partir das curvas hiperbólicas.

5.2.4. Método PHD

O método PHD, assim como explicado na fundamentação teórica, é uma análise em que o φ é expresso de forma polar em relação ao R, em que o W_m é medido através do cosseno do ângulo β , que é a abertura da curva estabelecida dos porfiroclastos de rotação inversa. Na Figura 25 está apresentado o gráfico PHD para os dados estudados. W_m pode ser obtido por:

$$W_m^{\text{PHD}} = \cos(16^\circ) = 0,95$$

Com base no resultado, assim como o gráfico RP do tipo Passchier para porfiroclastos sem cauda, o PHD não se tornou um método plausível.

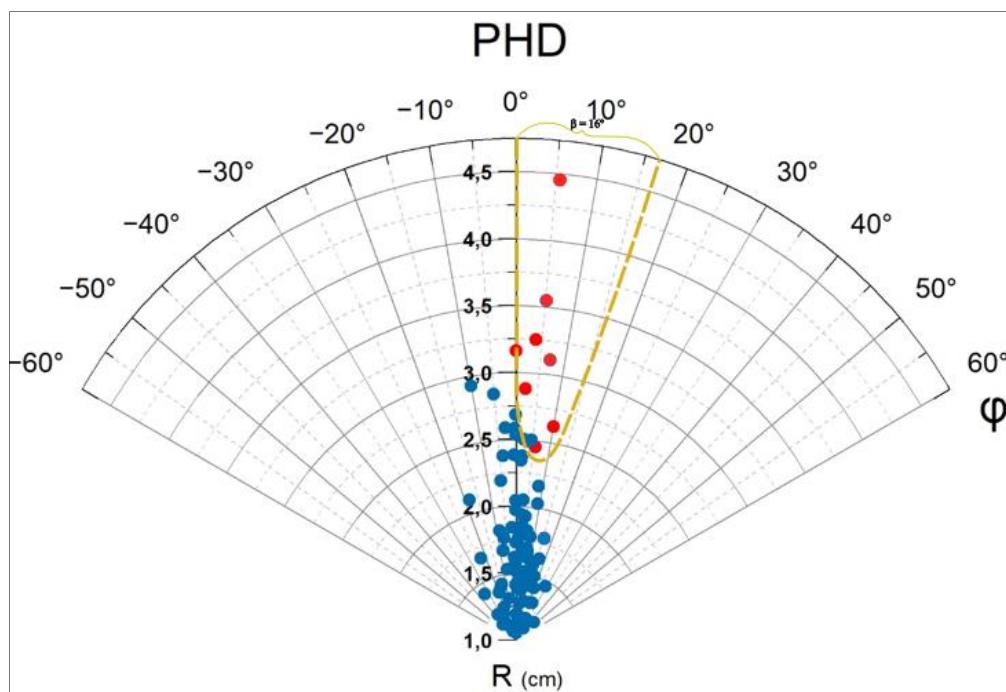


Figura 25 – Gráfico PHD dos porfiroclastos com cauda. Os porfiroclastos de rotação inversa correspondem aos pontos em vermelho.

5.2.5. Método RGN

O método RGN, como dito em Jisseup (2007), é uma padronização que visa diminuir a ambiguidade entre os métodos RP, tanto Passchier quanto Wallis, PHD e PAR. A Figura 26 mostra os dados obtidos. Com base no gráfico, observa-se que $W_m^{\text{RGN}} = 0,175$.

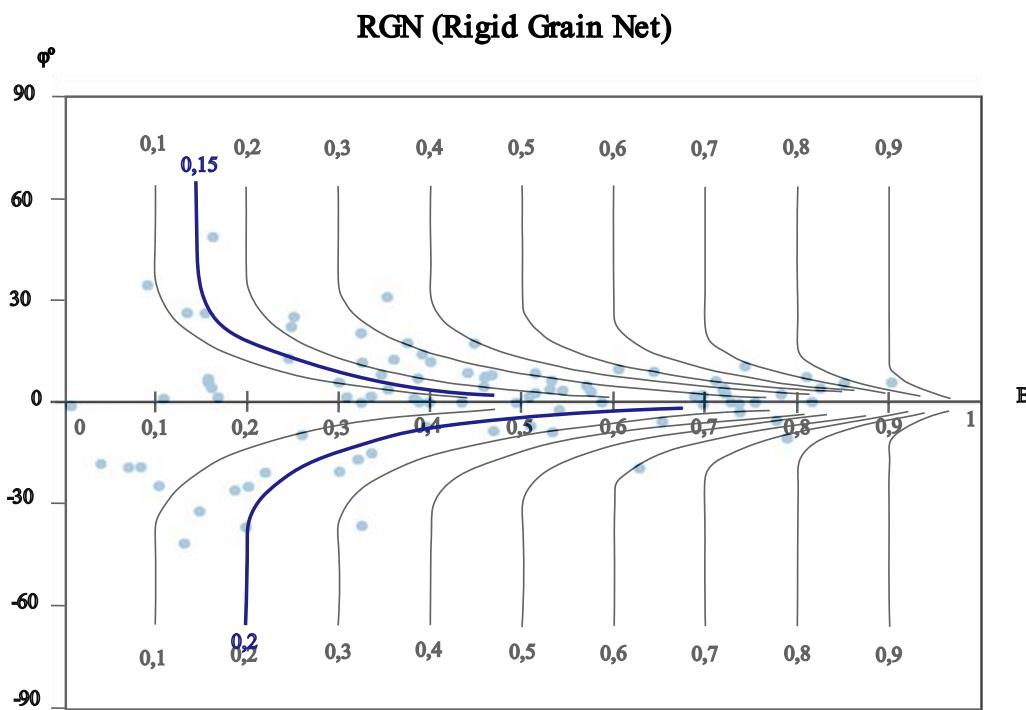


Figura 26 – Gráfico RGN dos porfiroclastos com cauda, ângulo ϕ nas ordenadas e B nas abscissas, e um valor de B_c , interpretado a partir da concentração dos pontos das amostras, B_c interpretado a partir das curvas hiperbólicas.

6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Assim como em Xypolias (2010), estabelecer uma comparação entre os principais métodos de vorticidade vigentes foi um dos intuitos desse presente trabalho. Além de compreender os limites e as nuances se tratando de uma zona de cisalhamento como a de Além Paraíba, em que, como mostrado pela literatura, há um predomínio do cisalhamento puro em relação ao simples, sendo, como definido por Giraldo et al. (2019), puro a sub-simples.

Dessa maneira, os dados gerados apresentam características individuais e válidas a serem discutidas. Primeiramente, as análises realizadas foram RP do tipo Wallis e uma tentativa de realizar RP do tipo Passchier, ambas realizadas nos cristais, observados macroscopicamente de porfiroclastos sem cauda, de amostras como as da Figura 12. As do tipo Wallis, (Figura 14 – 19), resultaram em um $W_M^{RP} = 0,18 \sim 0,26$, condizente com a definição. Já a tentativa do tipo Passchier se mostrou falha $W_M^{RP} = 0,83$.

Essa tentativa falha se deve principalmente pois quando analisamos porfiroclastos sem cauda, ainda mais em regimes como o da ZCAP, chegando a graus metamórficos mais altos, comportamento dúctil e, além disso, a falta de indicadores cinemáticos mais plausíveis, já que o que temos hoje da ZCAP, é somente a raiz da estrutura de flor positiva, predominando, ainda mais, o registro geológico de cisalhamento puro, concluímos que esses grãos são alongados (com altos valores de R e consequentemente de B) e com pouca rotação (ϕ mais

baixos), que é o oposto do que para que RP do tipo Passchier, e os outros métodos que usam B como parâmetro, foram desenvolvidos.

Porfiroclastos com cauda são mais esféricos, apresentam um registro mais claro de rotação e ainda com maior φ . Por isso, ao utilizar cristais alongados sem cauda em uma representação gráfica cuja normalização de 0 é uma esfera perfeita, esses cristais vão resultar em valores altos, chegando próximos ao limite de 1, em alguns casos, e, como o valor de W_m é o B_c (B crítico), o gráfico, (Figura 23), é completamente inválido nesse caso.

Já na segunda parte do trabalho, como já foi dito, realizaram os mesmos e, também outros métodos com base nos dados obtidos em lâminas de porfiroclastos com cauda. Dessa vez, do tipo Wallis, $W_M^{RP} = 0,14$, resultando em um valor menor do que o anterior, mas ainda coerente, Figura 20.

Posteriormente, com os mesmos dados, o método do tipo Passchier, dessa vez, resultou em $W_M^{RP} = 0,155$, mostrando-se um dado completamente diferente daquele feito na primeira parte. Essa grande diferença, se deve principalmente, pela natureza dos dados, um dado, descrito na literatura como porfiroclastos sem cauda, e o outro, porfiroclastos com cauda. Ou seja, mesmo se tratando de dados gerados a partir das mesmas rochas, uma simples seleção de cristais, a partir de uma perspectiva distinta, representa dados opostos.

Isso se justifica porque esses cristais são bem diferentes um dos outros, os sem cauda possuem ângulos de rotação, φ , bem maiores, chegando a próximos de 90° e valores de R por volta de 12. Enquanto isso, nos porfiroclastos com cauda, os ângulos de rotação chegam, no máximo, a 44° e um R de 4,4. Somente isso não sustenta a diferença nos dados, o principal, na verdade, é a forma que os dados estão distribuídos, no segundo caso, os valores de φ maiores são mais escassos e se concentram no início, em R menores, porfiroclastos mais arredondados, de R até 1,5, enquanto no primeiro caso, os maiores valores de φ , se concentram até valores de R = 6, isso modifica a distribuição dos dados quando utilizamos a normalização de R (B), levando a interpretação do B crítico a valores muito altos. Portanto, gerando a interpretação de um número de vorticidade maior do que os demais medidos.

Os dados de PHD, apresentaram o ângulo de abertura do agrupamento dos porfiroclastos de rotação inversa, α , de 16° , resultando em um $W_M^{PHD} = 0,95$. Esse resultado, assim como o RP do tipo Passchier de $W_M^{RP} = 0,83$, apresenta problemas. De início, o pressuposto assumido para considerar os dados como de rotação inversa é inconsistente. Esse pressuposto se baseia em uma zona de cisalhamento dextral e, consequentemente, uma presunção, não necessariamente correta, de que a lâmina analisada também possui esse comportamento. Para entender o sentido do cisalhamento, e extrapolar para a lâmina, é necessário fazer um estudo de campo e identificar os indicadores cinemáticos próximos a coleta de amostras.

Além disso, existe uma questão da natureza das amostras, ao se comparar a Figura 5 com a Figura 25, claramente há uma diferença com o agrupamento, enquanto no gráfico de Jisseup (2007), há abaixo de $R = 2$, um comportamento mais esparsado, tendo diversos pontos representando ângulos de 0° a 90° . Esse padrão é denominado de porfiroclastos de rotação "infinita", não sendo observado na Figura 25.

Sendo assim, o gráfico PHD pode não ser ideal para zonas de cisalhamento com porfiroclastos de baixa rotação, ou a amostragem não foi a mais qualificada para esse tipo de análise com gráficos polares. É válido ressaltar que não são duas hipóteses excludentes.

Tanto o método PAR, quanto o método RGN, são plotados com os mesmos parâmetros, φ° nas ordenadas e B nas abscissas. Isso posto, ambos são interpretações gráficas a partir das curvas de cada um. O PAR, é tido como o momento em que o B_c interpretado ultrapassa a curva de W_m , $W_M^{PAR} = 0,2 \pm 0,1$.

O método RGN, da mesma forma, possui linhas de mesma curvatura do que de PAR, no entanto, sem a curva de W_m , sendo o B_c estipulado graficamente, com uma precisão de 0,05. $W_M^{RGN} = 0,175$. Por fim, os dados de R_{rx}/β , R_{xz}/σ e σ/β não foram possíveis de obter. O ângulo β , nesse caso, é determinado pelo plano de cisalhamento em relação a foliação principal determinada pelos dados de eixo C de quartzo. Não se fez esse tipo de análise nas amostras, mas é possível observar que elas foram realizadas em Cavalcante et al. (2018) para ZCAP. No entanto, por se tratar de amostras diferentes, não é possível extrair os dados β° , mas é possível estipular a direção da vorticidade, como mostrado em Passchier et al. (1983). Já o ângulo δ (Figura 3) não foi possível de se identificar em nenhuma das amostras, por não possuírem lineação de estiramento.

7. CONCLUSÕES

Com tudo isso posto, é possível realizar uma comparação entre os resultados de números de vorticidade distintos, com base na classificação da Figura 27 e sabendo, a partir da literatura, que na ZCAP predomina cisalhamento puro a sub-simples. Sendo assim, um número de vorticidade, estimado, de no máximo de 0,3 seria, ainda, coerente com o conhecimento prévio.

O RP do tipo Wallis foi de $0,18 \sim 0,26 W_m$ para os porfiroclastos sem cauda e de $0,14 W_m$ para os porfiroclastos com cauda, tendo em vista que os porfiroclastos sem cauda representam uma maior densidade de dados, possivelmente, o RP do tipo Wallis para porfiroclastos sem cauda possui mais confiabilidade, entre eles.

Entre PAR e RGN, ambos gráficos a partir do mesmo parâmetro, como dito em Jisseup et al. (2007), RGN tem, como intuito principal, diminuir a ambiguidade entre os métodos do tipo PAR, PHD, RP do tipo Wallis e RP do tipo Passchier. Sendo assim, dentre os citados inicialmente, o valor de $W_m = 0,175$ de RGN possui maior acurácia que $W_M = 0,2^{\pm 0,1}$ de PAR, até mesmo pelo erro atribuído.

Por fim, esse estudo não é completamente decisivo sobre a eficácia dos métodos já citados, principalmente acerca do método PHD, como explicado na discussão. Alguns métodos como CVA, R_{xz}/β , R_{xz}/δ e δ/β que não foram contemplados tornam conclusivo que essa variedade é benéfica e, no momento, imprescindível para as determinações do número de vorticidade. Isso pois, as análises das mesmas rochas, algumas vezes com os mesmos parâmetros e mesmos porfiroclastos apresentam números diversos, portanto, essas análises, ainda não realizadas, podem corroborar ou mostrar uma outra tendência de cisalhamento da ZCAP.

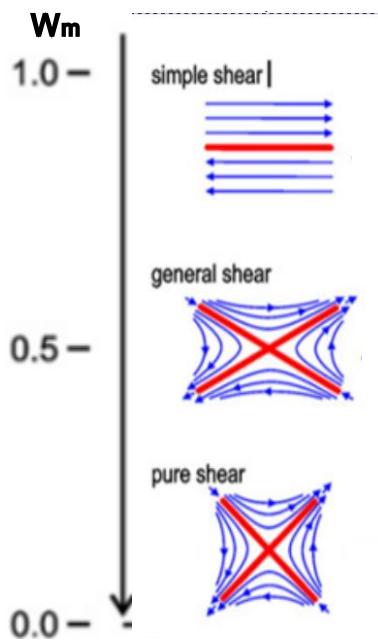


Figura 27: Tipos de cisalhamento em relação ao número de vorticidade, W_m , modificado de Xypollias (2010).

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allmendinger, R.W., Cardozo, N., Fisher, D., 2012, Structural Geology Algorithms: Vectors and Tensors in Structural Geology: New York, Cambridge University Press, 304 p.
- Cavalcante, C., Lagoeiro, L., Fossen, H., Egydio-Silva, M., Morales, L.F.G., Conte, T., 2018, Temperature constraints on microfabric patterns in quartzofeldspathic mylonites, Ribeira belt (SE Brazil): *Journal of Structure Geology*, v. 115, p. 243-262, doi: 10.1016/j.jsg.2018.07.013
- Egydio-Silva, M., Mainprice, D., 1999, Determination of stress directions from plagioclase fabrics in high grade deformed rocks (Além Paraíba shear zone, Ribeira fold belt, southeastern Brazil): *Journal of Structural Geology*, v. 21 (12), p. 1751-1771, doi: 10.1016/S0191-8141(99)00121-2
- Faleiros, F. M., Ribeiro, B. V., Campanha, G. A. C., Cawood, P. A., Cabrita, D. I. G., Yogi, M. T.A. G., Milani, L. A., Lemos-Santos, D. V., Almeida, V. V., Rodrigues, S. W. O., Malta, I. S., Forero-Ortega, A. J., 2022, Strain Partitioning along Terrane Bounding and Intraterrane Shear Zones: Constraints from a Long-Lived Transpressional System in West Gondwana (Ribeira Belt, Brazil): *Lithosphere (GeoScienceWorld)*, v. 2021 (special 6), doi: <https://doi.org/10.2113/2022/2103213>
- Giorgis, S., Michels, Z., Dair, L., Braudy, N., Tikoff, B., 2017, Kinematic and vorticity analyses of the western Idaho shear zone, USA: *Lithosphere (GeoScienceWorld)*, v. 9, n. 2, p. 223- 234, doi:10.1130/L518.1.
- Giraldo, S.J., Trouw, R.A.J., Duffles, P., Costa, R.V., Mejia, M.I., Marimon, R.M., 2019, Structural analysis combined with new geothermobarometric and geochronological results of the Além Paraíba shear zone, between Três Rios and Bananal, Ribeira Orogen, SE Brazil: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 90, p. 118-136, doi: 10.1016/j.jsames.2018.11.018.
- Jiessup, M.J., Law, R.D., Frassi, C., 2007, The Rigid Grain Net (RGN): An alternative method for estimating mean kinematic vorticity number (W_m): *Journal of Structural Geology*, v. 29, p. 411-421
- Launeau, P., Bouchez, J.L., Benn, K., 1990, Shape Preferred Orientation of Object Populations: automatic analysis of digitized images: *Tectonophysics*, v. 180, p. 201- 211.
- Michels, Z., Kruckenberg, S., Davis, J.R., Tikoff, B., 2015, Determining vorticity axes from grain-scale dispersion of crystallographic orientations: *Geology*, v. 43, n. 9, p. 803-806, doi: 10.1130/G36868.1.
- Passchier C.W., 1983, The reliability of asymmetric c-axis fabrics of quartz to determine sense of vorticity: *Tectonophysics*, v. 99, n.1., p. 9-18, doi: 10.1016/0040-1951(83)90166-X.
- Passchier, C.W., Simpson, C., 1986, Porphyroclasts systems as kinematic indicators: *Journal of Structural Geology*, v. 8, n. 8, p. 679-690.

- Passchier, C.W., 1987, Stable positions of rigid objects in non-coaxial flow – a study in vorticity analysis: *Journal of Structural Geology*, v. 9, n. 5/6, p. 831-834.
- Passchier C.W., 1994, Mixing in flow perturbations: a model for development of mantled porphyroblast in mylonites: *Journal of Structural Geology*, v. 16, n. 5, p. 733-736.
- Passchier, C.W., Trouw, R.A.J., 2018, *Microtectonics* (2 Ed.): Berlim, Springer-Verlag, 366 p.
- Ribeiro, B.V., Faleiros, F.M., Campanha, G.A.C., Lagoeiro, L., Weinberg, R.F., Hunter, N.J.R., 2019, Kinematics, nature of deformation and tectonic setting of the Taxaquara Shear Zone, a major transpressional zone of the Ribeira Belt (SE Brazil): *Tectonophysics*, v. 751, p. 83- 108, doi: 10.1016/j.tecto.2018.12.025.
- Robin, P.Y.F., Cruden, A.R., 1994, Strain and vorticity patterns in ideally ductile transpressional zones: *Journal of Structural Geology*, v. 16, no. 4, p. 447-466.
- Sartori, J. E., 2012, Análise de Vorticidade da Zona de Cisalhamento Caucaia, [Dissertação de Mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, doi: 10.11606/D.44.2012.tde-22012015-142136.
- Simpson, C., 1986, Determination of Movement Sense in Mylonites: *Journal of Geological Education*, v. 34(4), p. 246-261, doi: 10.5408/0022-1368-34.4.246.
- Simpson, C., De paor, D., 1997, Practical analysis of general shear zones using the porphyroblast hyperbolic distribution method: an example from the Scandinavian Caledonides, in Sengupta, A., ed., *Evolution of Geological Structures in Micro- to Macro- scales*: Dordrecht, Springer, p. 169-184, doi: 10.1007/978-94-011-5870-1_10.
- Xypolias, P., 2010, Vorticity analysis in shear zone: A review of methods and applications: *Journal of Structural Geology*, v. 32, p. 2072-2092.
- Zhang, Q., Fossen, H., 2020, The dilemma of asymmetric porphyroblast systems and sense of shear: *Journal of Structural Geology*, v. 130, 103893, doi: 10.1016/j.jsg.2019.103893.

ANEXOS

Anexo I – Tabela dos parâmetros geométricos dos porfiroclastos com cauda analisados em lâmina

Lâmina	Eixo menor (e<)	Eixo maior (e>)	R (e>/e<)	Ângulo φ	B
Sap - 103B	200	231	1,155	24,8	0,14311115
Sap - 103B	71,1	117,7	1,655414909	7,1	0,46529762
Sap - 103A	221	261,3	1,182352941	5,5	0,1659572
Sap - 103A	47,6	65,4	1,37394958	5,5	0,30741626
Sap - 103A	31	51,2	1,651612903	4,3	0,46349415
Sap - 103A	105,7	125,6	1,188268685	45,8	0,17080658
Sap - 103A	96,3	106,5	1,105919003	32,4	0,10033789
Sap - 103A	40,5	73,8	1,822222222	6	0,53708995
Pd - 17d4	27,7	69,1	2,494584838	3,8	0,72310496
Pd - 17d4	21	25,9	1,233333333	-34,5	0,20669899
Pd - 17d4	22,2	31,7	1,427927928	1,6	0,34188405
Sap - 7b	27,6	45	1,630434783	16,3	0,45330061
Sap - 100	65,9	109	1,654021244	6,8	0,46463747
Sap - 100	72,2	102	1,412742382	11	0,33240784
Pd - 17d5	71	103,4	1,456338028	29,1	0,35916342
Pd - 17d5	66	74,3	1,125757576	1	0,11790525
Pd - 17d5	61,9	109,1	1,762520194	1,5	0,51296457
Pd - 17d5	55,5	92,7	1,67027027	7,5	0,47226805
Pd - 17	77,9	93,1	1,195121951	1,4	0,17638413
Pd - 17d5	100,1	253,7	2,534465534	0	0,73058587
Sp 16 -6	27,4	48,7	1,777372263	8	0,5191212
Pd - 17d2	99,7	267,8	2,686058175	0	0,7565402
Sp 16 -6	28,4	45,9	1,616197183	8,2	0,44630445
Sp 16 -6	27,1	85,7	3,162361624	0,1	0,8181906
Sp 16 -6	25,9	74,6	2,88030888	2,2	0,78485785
Sp 16 -6	10,6	37,6	3,547169811	5,2	0,85275077
Sap - 6a	73,1	179	2,44870041	5,9	0,71412782
Sap - 6a	100,3	141,6	1,411764706	-34,1	0,33179191
Pd . 1	27,4	32,4	1,182481752	6,5	0,16606314
Sap . 13	112,4	279,6	2,487544484	3,4	0,72175375
Sap . 13	33	147	4,454545455	5,5	0,90404441
Pd . 1	150,6	153,3	1,017928287	-1	0,0177676
Sap . 12 B	77,4	95,7	1,236434109	-23,3	0,20910144
Sap . 12 B	92,6	108,4	1,17062635	-30,2	0,15624846
Sap . 12 B	70,4	74	1,051136364	-17	0,04983052
Sap . 12 B	75,6	92,1	1,218253968	-24,4	0,19489328
Sap . 12 B	72	82,9	1,151388889	-39	0,14004252
Sap . 12 B	62,4	94	1,506410256	1	0,38824298
Sap . 7cb	177,7	284,9	1,603263928	0	0,43984734
Sap . 7cb	72,4	224,9	3,106353591	7	0,81219657
Sap . 7cb	84	92,2	1,097619048	-17,9	0,0928749

Sap . 7cb	148,8	192,7	1,295026882	12,1	0,25292144
Sap . 12 A	85,2	92,3	1,083333333	-18	0,0798722
Sap . 12 A	57,7	68	1,178509532	24,7	0,16278924
Sap . 12 A	107,5	185,9	1,729302326	-0,1	0,49880798
Pd . 17b2	153,8	280,6	1,824447334	-8,3	0,53795771
Sap . 7c	94,6	269	2,843551797	-5,1	0,77987597
Sap . 7c	126,6	278	2,195892575	-5,3	0,65647215
Sap . 7c	69,4	106,6	1,536023055	0	0,40464971
Sap . 7c	39,3	115,1	2,928753181	-10	0,79117931
Pd . 18-1	35,4	82,9	2,34180791	1,7	0,69155149
Pd . 17b3	255,8	428,1	1,673573104	-7,9	0,47380149
Pd . 17a	76,8	192,2	2,502604167	2,3	0,72463274
Pd . 20	31,9	56,7	1,777429467	2,5	0,51914471
Pd . 20	189,7	290,3	1,530311017	-6,7	0,40152942
Alp-06B	54,5	81,4	1,493577982	16,42	0,38095352
Alp-06B	62,4	115	1,842948718	-2,1	0,54508855
Alp-06B	50,7	98,2	1,936883629	3	0,5790819
Alp-06B	25,22	60,12	2,383822363	-0,5	0,7007157
Alp-05 D3	65,1	125,3	1,924731183	4,6	0,57488326
Alp-05 D3	39,7	102,5	2,58186398	-0,4	0,73910848
Alp-05 D3	41,3	86,9	2,104116223	-18,27	0,63149298
Alp-05 D3	76	134,2	1,765789474	-6,5	0,51432881
Alp-05 D3	41	106,1	2,587804878	-2,8	0,74014953
Alp-05 D3	53,8	81,9	1,522304833	13,2	0,39712041
Alp-05 D2	51,6	78,1	1,513565891	6,6	0,39226014
Alp-05 D2	33	71,3	2,160606061	8,5	0,64715545
Alp-05 D2	32,5	64,1	1,972307692	0	0,59100185
Alp-05 D2	55,3	78	1,410488246	19,2	0,33098668
Alp-05 D2	57,2	80,4	1,405594406	-15,8	0,32788825
Alp-05 D2	44,3	63,3	1,428893905	-14,1	0,34248113
Alp-05 D2	58,3	108	1,852487136	3,3	0,54870679
Alp-05 B	48,2	66,8	1,385892116	1,4	0,31523194
Alp-05 B	46,5	94,4	2,030107527	9,2	0,60947695
Alp-05 B	71,9	80,5	1,11961057	-23,1	0,11250264
Alp-05 B	123,9	156,2	1,260694108	-19,5	0,22760527
Alp-03 emel	28,4	92,3	3,25	3,9	0,82702703
Alp-03 emel	51,1	133,9	2,62035225	10	0,74574911
Alp-03 emel	39,6	94,2	2,378787879	2	0,69963799
Alp-03 emel	52,9	81,4	1,538752363	11,2	0,40613325
Alp-03 emel	28,1	36,6	1,302491103	23,6	0,25829314
Alp-03 emel	59,7	78,5	1,314907873	-9,1	0,26712617
Alp-01	42	63,7	1,516666667	0	0,3939904
Alp-01	16,4	21,3	1,298780488	20,9	0,25562859
Alp-01	35,6	51,9	1,457865169	3,6	0,36007594
Alp-01	100	181,7	1,817	3,6	0,53504473
Alp-05A	50,8	74,6	1,468503937	11,8	0,36638759
Alp-05A	77,5	92	1,187096774	4	0,16984848
Alp-05A	109,3	154,2	1,410795974	-0,1	0,33118091
Alp-05A	46,2	63,5	1,374458874	-19,2	0,30775181
Alp-05A	57	82,4	1,445614035	7,6	0,3527089

Alp-05B	31	63,3	2,041935484	0	0,61311543
Alp-05B	187,6	468,7	2,498400853	4,6	0,72383346
Alp-05B	144,5	233,8	1,61799308	-1	0,44719337
Alp-05B	162,8	257,3	1,58046683	0	0,42822434
Alp-05D1	35,6	56,2	1,578651685	13	0,42728546
Alp-05D1	47,7	79,3	1,662473795	-23,2	0,46862484
Alp-05D1	42,55	101,3	2,380728555	-4	0,70005407
Alp-05D1	24,9	51	2,048192771	3	0,61502138
Alp-05D1	72,2	129,1	1,788088643	15,6	0,52349878
Alp-05D1	47,52	79,5	1,672979798	-8,1	0,47352646
Alp-05D1	164,4	278,4	1,693430657	6,6	0,4828978
Alp-05D1	157,2	200,5	1,275445293	5,5	0,23860594