

Universidade de São Paulo

Instituto de Geociências

**Regimes deformacionais, fluxo de fluidos e gênese de veios de quartzo
auríferos de Ivaporunduva, Faixa Ribeira Meridional**

Aluno: Luiz Eduardo Faria Coura Filho

Orientador: Prof. Dr. Frederico Meira Faleiros

Co-orientador: Prof. Dr. Rafael Rodrigues de Assis

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA

(TF:2020/15)

São Paulo

2020

Dedico esse trabalho à minha família, Coura e Avancini

“A vida é curta demais para se contentar com palavras.

E, difícil demais para dispensá-las.”

(André Comte Sponville)

Agradecimentos

Esse relatório é fruto de esforço e dedicação direto e indireto de amigos, família, professores e instituições, e por esse motivo gostaria de mostrar a minha gratidão a estes.

Gostaria de agradecer primeiramente à minha irmã Nena que apesar das dificuldades tentou sempre dar seu máximo e me apoiar nos momentos que eu precisei. Fomos sempre cuidando um do outro e isso que eu mais sou grato a ela.

Aos meus queridos pais Luiz Coura e Daniela Avancini meu eterno agradecimento. Ao meu pai por todo apoio sentimental e com os melhores conselhos que precisei, você é mais que um pai é meu amigo que sempre posso contar. À minha mãe por sempre estar disponível a ajudar mesmo quando ocupada, você sempre se desdobra por nós.

Maria Luisa, a onça que conheci em meio ao curso e que desejo levar para a vida toda, de todos os achados do curso você foi o maior.

Nestes anos que se passaram tive a certeza de que não poderia ter melhores famílias. A união dos Coura foi algo que sempre me impressionou, e nesse ano de perdas em que a Maria, nossa matriarca, partiu, pude ter certeza de que os valores da família ficarão marcados em mim. A intensidade dos Avancini, em todo almoço que nos encontrávamos, é uma das melhores partes das minhas memórias. Um carinho especial aos meu avós Marli, Xande, Sálvio e Gilse, vocês sempre me inspiram.

Gostaria de agradecer aos meus amigos da turma 59 que eu fiz não somente no curso de geologia, como também para a vida: Toddy, Waze, Bibifa, Kiwi, Nit, Sizu, Miss, Rico, Trevas, Dino, Faixca e Cana Brava. Vocês aqueceram meu coração todo dia, seja em casa, na geo, sempre estando de braços abertos. Muito obrigado!

Aos meus pupilos da 60 que tanto monitorei e que guardarei junto comigo, principalmente aqueles que se abriram não somente para perguntas, mas também para amizade. Obrigado ao Berne, Mogli, Pepeu, Pakita, Jonas e outros tantos.

Minha gratidão a todos do Pedra no Rim o melhor time de handebol da USP sem dúvidas, pude conhecer um pouco da enfermagem e amizade com vocês principalmente a Dessa e Brasil. Caio fizemos um grande trabalho e você é uma pessoa que me espelho demais.

Obrigado ao meu orientador Frederico que possibilitou muitos momentos de aprendizado, seja em campo, laboratório ou em sala, sempre disposto a me auxiliar. Também agradeço ao meu coorientador Assis que sempre que possível esteve disponível.

À FAPESP, pelo financiamento da pesquisa e bolsa de iniciação científica processo nº 2019/11839-8.

Sumário

RESUMO	5
ABSTRACT.....	6
2. INTRODUÇÃO	7
3. METAS E OBJETIVOS.....	10
4. TRABALHOS PRÉVIOS	11
4.1 Contexto Geológico (reler)	11
4.2 Bases teóricas de origem das fraturas	12
4.3. Conceitos gerais dos dados de geofísica.....	14
4.5 Base teórica de Inclusões fluidas	16
5. MATERIAIS E MÉTODOS	17
5.1. Pesquisa bibliográfica (modificar).....	17
5.2. Atividades de campo	17
5.3. Petrografia	18
5.4. Análise das inclusões fluidas.....	18
6. RESULTADOS OBTIDOS.....	20
6.1. Análises de aerogamaespectrometria.....	20
6.2. Análises de aeromagnetometria.....	21
6.3. Análises estruturais e de campo.....	25
6.4 Petrografia das rochas encaixantes	28
6.5 Metamorfismo	29
6.5.1 Metamorfismo das rochas sedimentares	29
6.5.2 Metamorfismo das rochas calciosilicática.....	30
Recristalização do quartzo, microtectônica.....	31
6.6 Petrografia dos veios.....	33
6.7 Análises microtermométricas	35
7. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÕES	39
7.1 Análises aerogeofísicas e suas implicações	39
7.2 Análise estrutural e implicações geotectônicas	41
7.3. Metamorfismo e sua trajetória P-T-t	41
7.4 Percolação de fluido e alteração hidrotermal	43
8. CONCLUSÕES	44
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

RESUMO

A Faixa Ribeira Meridional é recortada por uma densa rede de zonas de cisalhamento entrelaçadas de carácter predominante destral. Ocorre um alto potencial metalogenético, formado por depósitos minerais filoníticos, como a Serra do Cavalo Magro, Mina Morro do Ouro e os depósitos Piririca e Ivaporunduva. Dentre esses, os depósitos minerais Piririca e Ivaporunduva apresentam um forte controle estrutural por duas zonas de cisalhamento homônimas, compartimentando a região que apresenta corpos de minério, Formação Piririca, e as adjacentes com ausência destes. Análises aerogeofísicas apontam anomalias magnéticas na Zona de Cisalhamento Ivaporunduva e em corpos metabásicos da Formação Piririca em detrimento da Zona de Cisalhamento Piririca. Em campo ocorrem 3 famílias de veios em que sua configuração espacial indica ao mínimo dois regimes de esforços distintos. Paragêneses metamórficas de rochas metassedimentares, calcissilicáticas e os mecanismos de recristalização dos grãos de quartzo indicam um metamorfismo na fácie xisto verde intermediário, zona da biotita. Os veios analisados apresentam crescimento ataxial de textura blocada e de composição variável, em que há predominância de veios de quartzo, com veios de carbonato subordinados ocorrendo próximos às encaixantes de composições carbonáticas. A circulação de fluidos na região permitiu alteração hidrotermal do tipo cloritização, sendo que tal alteração é majoritariamente confinada na parte externa dos veios ricos em quartzo e calcita e em menor quantidade de forma disseminada na encaixante. Veios de quartzo no depósito Ivaporunduva são dominados por uma associação de inclusões fluidas aquocarbônicas primárias, bifásicas, com graus de preenchimento variados, indicando aprisionamento em sistema heterogêneo. Essas inclusões apresentam salinidades entre 7,5 e 13 % peso NaCl_{eq} e homogeneização total entre 248 e 330 °C para o estado gasoso. Subordinadamente ocorrem inclusões carbônicas monofásicas primárias e em trilhas, além de raras inclusões aquosas isoladas. O cruzamento de isócoras de inclusões fluidas aquocarbônicas e carbônicas primárias indica condições de aprisionamento de 240–300 °C e 0,8–1,2 kbar. A união desses dados com dados metamórficos das rochas encaixantes possibilitou estabelecer uma trajetória de retrometamorfismo durante episódios de exumação das rochas. As inclusões fluidas contêm características típicas de um fluido percolante em depósito de ouro orogênico de outras regiões do mundo.

ABSTRACT

The south part of Ribeira Belt is cut by a dense network of interlocking shear zones predominantly of dextral kinematics. A high metallogenetic potential occurs, formed by phyllitic mineral deposits, such as the Serra do Cavalo Magro, the Morro do Ouro mine and the Piririca and Ivaporunduva deposits. Among these, the Piririca and Ivaporunduva mineral deposits have strong structural controls through two homonymous shear zones, compartmentalizing a region presenting ore bodies, the Piririca Formation, and the ore-absent adjacent areas. Aerogeophysical analyzes show magnetic anomalies in the Ivaporunduva Shear Zone and in metabasic bodies from the Piririca Formation in detriment of the Piririca Shear Zone. Three families of veins occur in the field, in which their spatial configuration requires at least two distinct stress regimes. Metamorphic mineral assemblages of metasedimentary and calc-silicate rocks and mechanisms of dynamic recrystallization of quartz grains indicate greenschist facies, biotite zone metamorphic conditions. Analyzed veins present ataxial growth structures with blocked texture and variable composition, dominating quartz veins, with subordinate carbonate veins when close to carbonate host rocks. The circulation of fluids in the region allowed hydrothermal alteration of chloritization type, such alteration is mostly confined to the external part of veins rich in quartz and calcite and in a lesser amount of disseminated form in the host-rock. Quartz veins from the Ivaporunduva deposit are dominated by an association of primary, two-phase aqueous-carbonic fluid inclusions with variable degrees of fill, indicating trapping of a heterogeneous system. These inclusions present salinities between 7,5 and 13 wt.% NaCl_{eq}. and total homogenization (into the vapor state) between 248 and 330 °C. Primary and secondary trails of one-phase carbonic fluid inclusions subordinately occur, as well as rare isolated aqueous inclusions. The intersection of isochores from primary aqueos-carbonic and carbonic fluid inclusions indicates trapping conditions between 240–300 °C and 0,8–1,2 kbar. The integration of these data with host rock metamorphic data allowed to establish the trajectory of retrometamorphism during exhumation episodes. The fluid inclusions contain typical characteristics of percolating fluids in orogenic gold deposits worldwide.

1. INTRODUÇÃO

Zonas de cisalhamento com alto fluxo de fluidos tipicamente apresentam um comportamento cíclico, com flutuação acoplada dos valores de tensão diferencial e da pressão de fluidos, que se correlacionam aos ciclos de terremotos (Sibson et al., 1975, 1988; Boullier & Robert, 1992; Robert et al., 1995; Cox, 1995; Faleiros et al., 2007, 2014). Neste processo, chamado de “comportamento falha-válvula” (Sibson et al., 1988) ou “bombeamento sísmico” (Sibson et al., 1975), os fluidos apresentam um papel ativo e os veios hidrotermais gerados em decorrência podem ser considerados como traçadores do fluxo de fluidos, que permitem a análise dos efeitos de sobrepressão hidráulica ao longo de falhas antigas exumadas (Robert et al., 1995).

Primeiramente, elevada pressão de fluidos induz a abertura de fissuras extensionais ao redor de uma dada zona de falha em estágios pré-sísmicos. Ruptura sismicamente ativada ao longo da falha principal ocorre quando a pressão de fluidos supera a resistência ao cisalhamento das rochas. Neste momento, a permeabilidade gerada na zona de ruptura causa uma queda abrupta das pressões confinante e de fluidos, e todos os fluidos presentes ao redor migram para dentro da zona de falha aberta, gerando veios paralelos à falha ou à foliação milonítica (e.g., Sibson et al., 1988; Faleiros et al., 2007).

O selamento das fraturas devido à precipitação mineral e formação de veios, destrói a permeabilidade ao longo da zona de falha, permitindo um aumento incremental da tensão diferencial e da pressão de fluidos, iniciando um novo ciclo (e.g. Sibson et al., 1975, 1988).

Neste âmbito, o estudo de inclusões fluidas tem um papel fundamental, pois permite a caracterização da composição e estimativas das condições de pressão e temperatura dos fluidos aprisionados em veios, sendo a única forma direta de se quantificar valores transitórios de pressão de fluidos ao longo de falhas exumadas (e.g. Parry & Bruhn, 1990; Parry et al., 1991; Robert et al., 1995; Henderson & MacCaig, 1996; Dugdale & Hagemann, 2001; Montomoli et al., 2001; Faleiros et al., 2007, 2014).

A precipitação mineral que ocorre neste sistema de bombeamento sísmico decorre devido a saturação de componentes presentes nos fluidos. Essas concentrações de certos componentes são dependentes da rocha encaixante, da qual o fluido percola, e da própria composição deste. Logo, a formação de fraturas e precipitação pode gerar minerais de minério caso as condições forem propícias para a solubilidade desses metais, como concentração do soluto, temperatura, ionicidade da solução, Ph e entre outros. A evidência desses depósitos é importante tanto no âmbito econômico quanto para o entendimento geológico do local.

As relações entre fraturamento hidráulico, preenchimento por precipitação mineral e posterior fraturamento de anisotropias previas (i.e., veios) podem ocorrer dentro de intervalos intersísmicos, os quais possuem durações típicas da ordem de dezenas a centenas de anos. Tais intervalos relacionam-se diretamente com a recorrência de terremotos e, portanto, são

função das interações fluido-rocha. A distribuição de redes interconectadas de veios formados por cimentação mineral em zonas de falha constitui, assim, o registro tectonometamórfico de sucessivos abalos sísmicos nucleados principalmente em profundidades crustais rasas, os quais são controlados essencialmente pelas interações entre cataclase e dissolução por pressão (Gratier & Gueydan, 2007).

O embasamento cristalino da região sudeste do Brasil é recortado por uma densa rede de zonas de cisalhamento entrelaçadas (fig. 1a), predominantemente de movimentação transcorrente destral e natureza dúctil e/ou rúptil-dúctil (e.g., Sadowski, 1991; Campanha & Brito Neves, 2004). Esse sistema de cisalhamento é delimitado por vários tipos de rochas miloníticas e cataclásticas e apresenta grande importância na compartimentação litoestrutural, estratigráfica e tectônica dos cinturões Ribeira e Araçuaí (e.g., Campanha, 2002; Heilbron et al., 2004).

A Faixa Riberia Meridional (Figura 1) apresenta um alto potencial metalogenético associado a zonas de cisalhamento, formado por depósitos minerais filoníticos, como a Serra do Cavalo Magro, Mina Morro do Ouro e os depósitos Piririca e Ivaporunduva. O tema principal deste trabalho foi estudar os regimes deformacionais, metamórficos e de fluxo de fluidos registrados em rochas do Depósito Ivaporunduva, por meio da integração de dados geológicos e estruturais coletados em campo, dados aerogeofísicos, petrografia de veios sintectônicos e rochas encaixantes e microtermometria de inclusões fluidas em veios sintectônicos mineralizados em ouro.

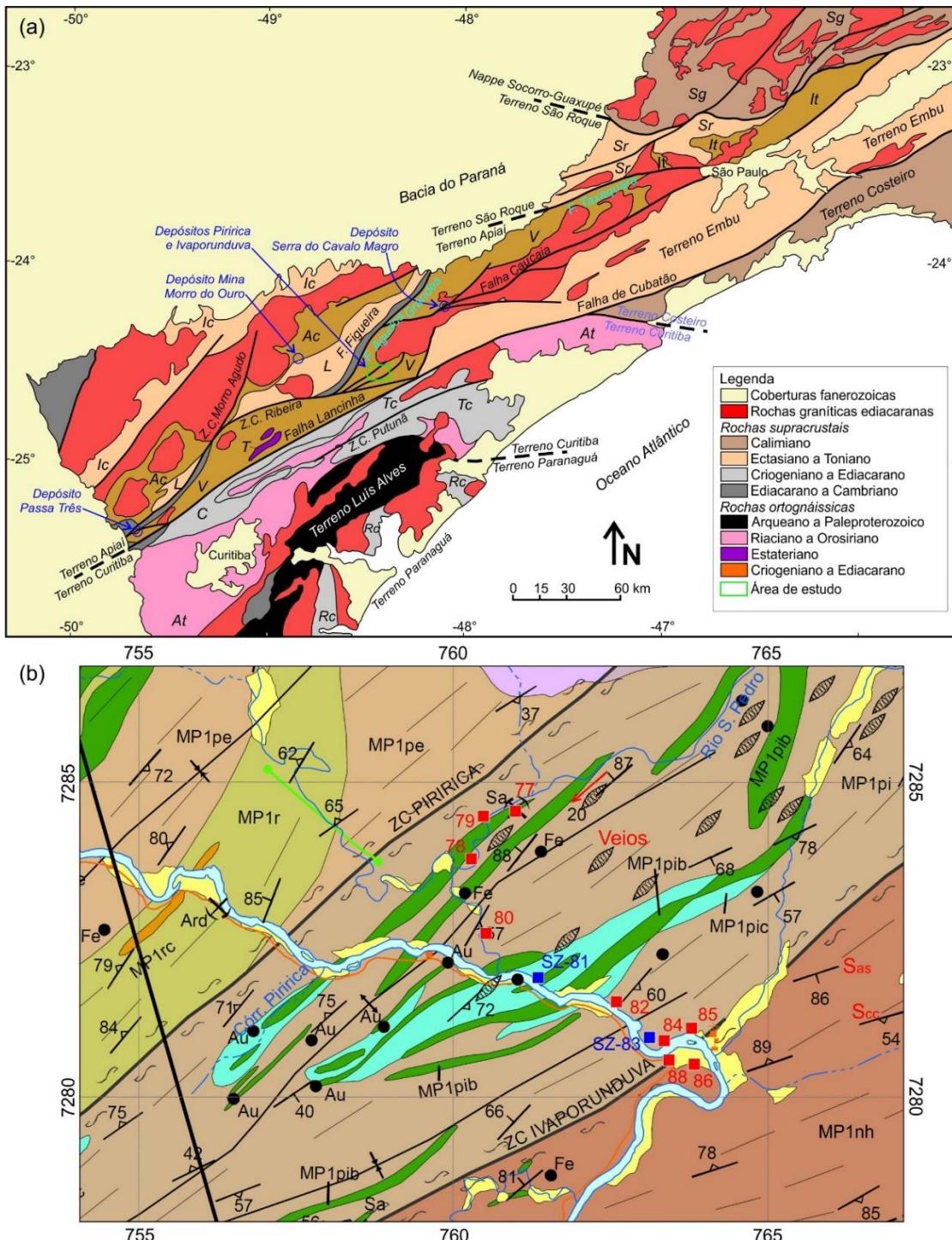


Figura 1. (a) Mapa geológico simplificado das porções sul e central da Faixa Ribeira com a localização da área a ser estudada neste projeto (em verde). Unidades geológicas: Grupo Itaiacoca (Ic), Formação Água Clara (Ac), Gupo Lajeado (L), Grupo Votuverava (V), Grupo São Roque (Sr), Grupo Serra do Itaberaba (It), Nappe Socorro-Guaxupé (Sg), Gnaisse Tigre (T), Formação Capiru (C), Formação Turvo-Cajati (Tc), Formação Rio das Cobras (Rc), Complexo Atuba (At). Modificado de Campanha et al. (2015). (b) Mapa geológico da área de estudo (Faleiros & Pavan, 2013) com afloramentos descritos em campo pelo autor (quadrados em vermelho). Siglas das formações: Nhunguara (MP1nh), Piririca (MP1pi), Ribeirão das Pedras (MP1pe) e Rubuquara (MP1r); subunidades: metabasito (b), filito carbonático (c), metaconglomerado (rc); acamamento sedimentar (Sas), clivagem contínua (Scc).

2. METAS E OBJETIVOS

Este projeto teve como objetivo analisar o fluxo de fluidos ao longo da Formação Piririca e das estruturas limitantes dessa unidade, as zonas de cisalhamento Piririca e Ivaporunduva, conforme áreas especificadas na figura 1, usando uma abordagem que compreende:

- a) Identificação, descrição e coleta de amostras de veios hidrotermais sintectônicos associados a zonas de cisalhamento em campo. Os veios, tanto estéreis quanto mineralizados, foram coletados em contexto estrutural bem definidos, com determinação de suas relações com outras estruturas geológicas (e.g., foliações, lineações, dobras, sistemas de fraturas).
- b) Identificação e descrição de microestruturas e associações de inclusões fluidas presentes em veios hidrotermais, por meio de análises microscópicas em lâminas de seções delgadas usando microscópio óptico.
- c) Microtermometria de inclusões fluidas hospedadas em veios hidrotermais visando determinar as temperaturas de mudanças de fase (e.g., fusão e homogeneização de fases ricas em voláteis, eutético, fusão do gelo e homogeneização total), a composição química e as interações presentes, que permitiram avaliação das características físico-químicas dos fluidos e cálculos de densidades, temperaturas e pressões de aprisionamento.
- d) Integração dos dados e elaboração de um modelo da história térmica e de circulação de fluidos na região do Depósito Ivaporunduva.

3 TRABALHOS PRÉVIOS

3.1 Contexto Geológico

A área a ser estudada localiza-se ao noroeste da folha Eldorado Paulista (SG.22-X-B-VI), mais precisamente na Formação Piririca entre as zonas de cisalhamento Piririca (ZCP) e Ivaporunduva (ZCI), tidas como zonas de cisalhamento subsidiárias da Zona de Cisalhamento Ribeira (Nogueira, 1990; Câmara, 1992; Perrota, 1996).

A Formação Piririca é uma unidade do Grupo Votuverava (e.g., Faleiros & Pavan, 2013), que se caracteriza por uma unidade metassedimentar com filitos, metaconglomerados quartzitos e mármore com lentes de metabasito (e.g., Faleiros & Pavan, 2013). O Grupo Votuverava (1490-1475 Ma, Campanha et al., 2015) apresenta metamorfismo regional do tipo barroviano, com uma série de fácies em rochas metapelíticas que vai de xisto-verde inferior (zonas da clorita e da biotita) nas unidades ao norte da Zona de Cisalhamento Ribeira, incluindo a região do Depósito Ivaporunduva, à fácies anfibolito médio (zona da cianita) ao sul desta estrutura (Faleiros et al., 2010; Yogi et al., 2019). Dados geotermobarométricos obtidos em rochas das zonas da clorita, granada e cianita apresentaram condições de pico metamórfico de 380°C a 660°C e entre 6 e 9 kbar, com trajetórias P-T-t horárias (Faleiros et al., 2010; Yogi et al., 2019).

O Grupo Votuverava encontra-se intensamente deformado por zonas de cisalhamentos distribuídas por uma rede de faixas transcorrentes com rochas miloníticas e cataclásticas (e.g., Faleiros & Pavan, 2013).

Estruturalmente, a Formação Piririca contém acamamento sedimentar S_0 bem marcado de diferença composicional, clivagem S_1 subparalela e lineação de estiramento preferencialmente down-dip associada, e uma clivagem de crenulação S_2 sobreposta (CPRM, 1982; Nogueira, 1990; Faleiros & Pavan, 2013). .

A mineralização aurífera no Depósito Piririca está estruturalmente controlada em veios e associada com sulfetos como pirita, pirrotita, bornita, calcopirita e outros (Nogueira, 1990). Aquém desses componentes estruturalmente controlados, há ferro disseminado na rocha metabásica em forma de magnetita (Nogueira, 1990).

A Zona de Cisalhamento Piririca caracteriza-se por seu alto mergulho e direção NE-SW paralelos à foliação principal (Nogueira, 1990). Tal zona de cisalhamento possui movimentação destral e padrão anastomosado e divide duas unidades de Grupo Votuverava, a Formação Piririca e a Formação Ribeirão das Pedras. A Zona de Cisalhamento Ivaporunduva também apresenta cinemática destral, direção NE-SW e caráter compressivo oblíquo. De acordo com Perrota (1996), diferentemente da Zona de Cisalhamento Piririca, a Zona de Cisalhamento Ivaporunduva contém uma componente de cavalgamento oblíqua, sendo responsável por delimitar as formações Piririca, ao norte, e Nhunguara, ao sul (Figura

1b). Segundo Perrota (2016), ambas zonas de cisalhamento foram formadas a partir das inflexões dúcias da zona de cisalhamento transpressiva, no processo de evolução da Zona de Cisalhamento Ribeira. O metamorfismo da região, segundo a mineralogia identificada nos metapelitos (clorita+ feldspato+ sericita+ quartzo) e nas rochas metabásicas (actinolita+ epidoto+ clorita+ albita), é de fácies xisto verde inferior (Nogueira, 1990). Localmente ocorrem evidências de texturas ígneas preservadas nas rochas metabásicas como plagioclásio de hábito tabular original de textura subofítica e piroxênio com substituição (Nogueira, 1990).

3.2 Bases teóricas de origem das fraturas

A formação das fraturas é um resultado direto da relação entre os esforços que ocorreram na região somada com o litotipo existente. Cada litotipo contém uma envoltória de ruptura própria, onde representa a resistência ao cisalhamento que a rocha pode ser submetida sem ser fraturada. Tal envoltória de ruptura pode ser traçada por diversos modos analíticos, onde os dois mais comuns são de Griffith e o de Mohr,

Equação de acordo com Griffith forma uma parábola, e sua fórmula é mais próximo a realidade quando próximo a origem, onde

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 8T(\sigma_1 + \sigma_3)$$

Onde, σ_1 e σ_3 são respectivamente os esforços compressivos máximo e mínimo em que a rocha foi submetida e T é a resistência à tração uniaxial.

Entretanto, a equação de Coulomb forma uma reta, e ela é mais adequada à realidade quando em estágios mais compressivos,

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg}\varphi$$

Onde,

τ = Resistência ao cisalhamento

c = Coesão

σ = tensão normal ao plano de ruptura

φ = Ângulo de atrito interno

Os esforços em que a rocha está submetida formam um círculo de tensões chamado Círculo de Mohr, no qual sua equação é dada por

$$(S - \sigma n)^2 + \tau^2 = r^2, \text{ onde } S = (\sigma_1 + \sigma_3)/2, \text{ e } r = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$$

Onde,

σn = Tensão normal ao plano de ruptura

τ = Resistência ao cisalhamento

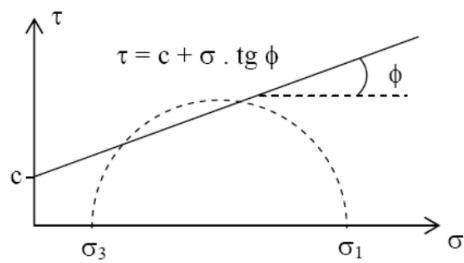


Figura 2. Diagrama de Mohr, passando pela envoltória de ruptura proposta por Mohr

Portanto, para uma envoltória de ruptura que representa melhor a realidade em que ocorre na natureza, somam-se as duas equações, formando, assim, a envoltória de ruptura composta.

Quando o círculo de tensões tangencia a envoltória de ruptura a rocha acaba por se romper criando um plano de fratura. Salienta-se que a importância principal para a ruptura das rochas hospedeiras não é a quantidade de esforço pelo qual a rocha está submetida, mas a diferença dos esforços mínimos e máximos. Para a ocorrência dessa ruptura, geralmente é necessário que fluidos estejam associados junto à rocha hospedeira de veios, pois esses fluidos resultam num aumento na pressão interna. Esse aumento na pressão resulta em um deslocamento do círculo de tensões para a esquerda.

A posição dos esforços máximo e mínimo quando o círculo de tensão tangencia a envoltória de ruptura é importante para entender quais fraturas e que tipos de veios são formados. Quando os esforços máximo e mínimo são aproximadamente iguais e encostam na envoltória de ruptura, os esforços predominantes que ocorrem são tracionais formando brechas tectônicas. Já quando o esforço mínimo se encontra no campo tracional e o máximo no campo compressivo, isso resulta em veios extensinais, no qual o σ_3 é perpendicular às paredes do veio e σ_1 é paralelo ao veio. Os esforços mínimo e máximo, ambos estando no campo compressivo, resultam veios/fraturas de cisalhamento conjugadas.

3.3. Conceitos gerais dos dados de geofísica

A geofísica é uma ferramenta que atinge diversos âmbitos da geologia, neste relatório o enfoque de sua utilização foi em reconhecer a expressão estrutural em macroescala em parte das zonas de cisalhamentos estudadas neste trabalho. É de conhecimento geral que a percolação de fluidos nas rochas encaixantes pode resultar em alterações hidrotermais que podem ser visualizadas e delimitadas através de análises geofísicas como aerogamaespectrometria e aeromagnetometria. A região escolhida para realizar as análises geofísica nas zonas de cisalhamento foi delimitada a fim de não haver interferência da suíte intrusiva de Jacupiranga. Tal corpo intrusivo contém litotipos ricos em magnetita, mascarando o efeito das análises magnetométricas nas das zonas de cisalhamento.

Além das análises geofísicas, o conhecimento do relevo da região é essencial para caracterizar unidades geomorfológicas diferentes como bacias, dobrões, domos, dentre outros, podendo assim distinguir as unidades geológicas. O mapa topográfico foi obtido a partir de imagem de satélite, em digital elevation, a partir do Serviço Geológico Americano (USGS).

Dados de aerogamaespectrometria e da aeromagnetometria foram obtidos por iniciativa do Serviço Geológico do Brasil (CPRM). O aerolevantamento utilizado foi parte do “Projeto 1095-Paraná- Santa Catarina”. Esse aerolevantamento foi realizado com linhas de voos de direção Norte-Sul, com espaçamento de 500 metros entre elas, e tie-lines perpendiculares e espaçadas de 10000 m. A altura nominal de voo foi de 100 metros.

As imagens de aerogamaespectrometria se dividem em dados obtidos diretamente por meio da contagem dos elementos radioativos e a partir da razão entre eles. Dentre as contagens obtidas, há o teor de potássio adquirido através do seu próprio decaimento radioativo. Este elemento apresenta-se em maior concentração em relação aos outros dois, sendo a unidade de medida a porcentagem. O teor de tório é medido através do decaimento radioativo do seu isótopo filho, o tálio, e a concentração deste elemento é muito menor e sua unidade de medida é a parte por milhão. Finalmente, a contagem do Urânio também se obtém através do decaimento de um isótopo filho, o bismuto, e sua concentração na natureza é baixa, sendo sua unidade de medida a parte por milhão (ppm).

Assim que se obtém os dados da contagem de cada um desses elementos radioativos podem ser feitas várias análises. Porém, para ficar mais claro a relação entre esses elementos utiliza-se relações matemáticas das imagens para obter um resultado mais assertivo. Uma dessas relações é o diagrama ternário, no qual se relaciona cada elemento a uma das cores primárias e os somam. Dependendo do teor dos elementos do local, o resultado da soma entre as cores é diferente, onde a presença de todas resulta em branco e ausência de todas, em preto.

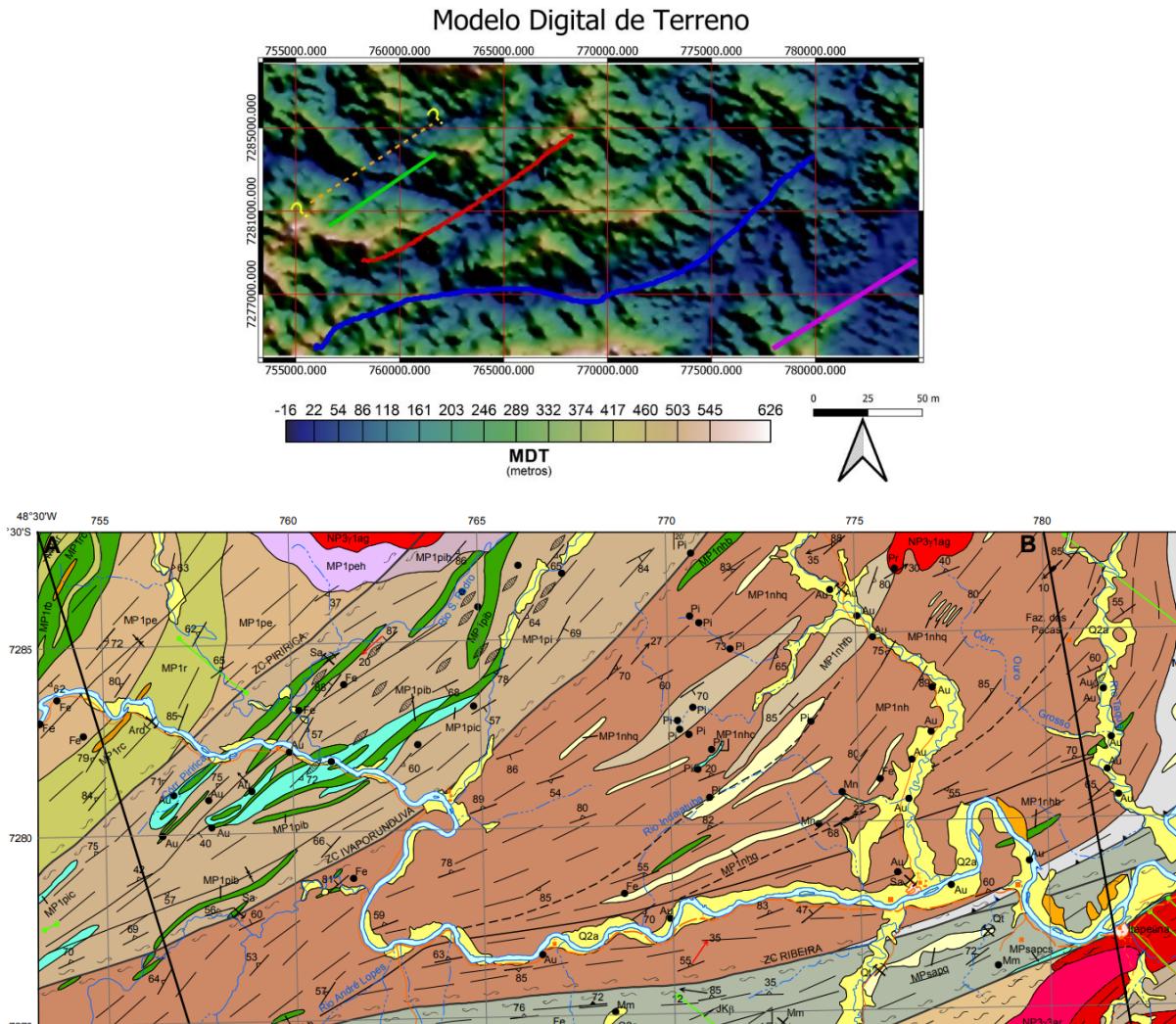


Figura 3. a- Modelo digital de terreno. Em amarelo pontilhado localiza-se a zona de cisalhamento Piririca, em vermelho, a de Ivarporunduva, em verde, um lineamento devido a um corpo metabásico, em azul, um lineamento no meio da Formação Nhunguara, repetindo o formato do contato entre os litotipos e, em roxo, o lineamento que representa a Zona de Cisalhamento Lancinha. b- Mapa geológico da área de estudo (Faleiros & Pavan, 2013). Siglas das formações: Nhunguara (MP1nh), Piririca (MP1pi), Ribeirão das Pedras (MP1pe) e Rubuquara (MP1r); subunidades: metabasito (b), filito carbonático (c), metaconglomerado (rc); acamamento sedimentar (Sas), clivagem contínua (Scc).

O fator F é uma operação matemática no qual se multiplica o teor de potássio com o urânio e se divide pelo tório. Este é um bom resultado para associar alteração hidrotermal, visto que esta é diretamente proporcional à mobilidade dos elementos, na qual o potássio é o mais móvel entre eles e o tório é o menos móvel.

Os dados de campo magnético indicam onde há a maior quantidade de fluxo magnético representado pela unidade nano tesla (nT). Os locais onde ocorrem a maior concentração de materiais magnéticos vão fornecer a maior quantidade de campo magnético representado por uma parte positiva e outra negativa. Além dessa análise, utilizou-se o filtro

TILT, caracterizado por uma derivativa em que se concentra a fase do sinal, ou seja, ele é o arco tangente da razão entre a derivada vertical e o gradiente horizontal total. Isso faz com que sejam ressaltados os lineamentos magnéticos presentes na região e com isso é possível caracterizar estruturas lineares como zonas de cisalhamentos, planos de falhas e fraturas. Tal gradiente horizontal total utilizado no filtro Tilt das análises, pois seus principais atributos são realçar através de máximos e mínimos, respectivamente, as bordas e os centros das fontes (Cordell & Grauch, 1985), visto que ele é uma razão entre as derivadas das anomalias magnéticas pela direção horizontal.

A partir do campo magnético, foi possível realizar a redução ao polo no qual simula-se as anomalias magnéticas como se houvesse apenas um polo, ao invés de dois, como se localizassem no polo magnético, isso faz com que os corpos sejam mais bem delimitados. Se houver um magnetismo remanente na região, ele prejudicará as análises, entretanto, as imagens são de um local sem, ou com pouco, magnetismo remanente, possibilitando a utilização do filtro. As imagens de redução ao polo resultam numa maior possibilidade de visualizar os corpos magnéticos, permitindo que esse filtro possa ser aplicado conjuntamente com outros como TILT e filtro gaussiano.

Sendo este último utilizado para eliminar sinais com frequências mais baixa ou mais alta, no qual retira-se de uma distribuição normal os valores acima ou abaixo do desvio padrão escolhido. Caso a escolha seja um filtro passa-baixa, as ondas de baixa frequência são as que são aplicadas e as de alta são excluídas, resultando em uma suavização das imagens, e visualização regional. Enquanto, caso seja utilizado o filtro passa-alta, as maiores frequências serão mais bem analisadas e as de baixa serão excluídas, resultando em imagens que delimitam corpos menores, mas contendo mais ruídos.

3.5 Base teórica de Inclusões fluidas

As inclusões fluidas são registros de antigos fluxos de fluidos que percolaram na rocha e, consequentemente, uma forma direta de obter dados da exumação da rocha e do tipo de fluido. Logo, os fluidos podem originar de diferentes fontes, como metamórficas, bacinais, meteóricas, magmáticas. E essas diferentes fontes são responsáveis por composições distintas que, se aprisionadas, geram diferenças diretas nas inclusões fluidas (e.g., Roedder, 1984). Inclusões fluidas são descritas e diferenciadas com relação ao modo de ocorrência, forma, cor, tamanho, índice de refração e quantidade de fases identificáveis nas condições normais de pressão e temperatura (e.g., Roedder, 1984).

Tais composições são registradas e separadas em diferentes associações de inclusões fluidas (FIAs). Além da composição dos fluidos, outros fatores podem ser importantes para

diferenciar as FIAs, como elas se dispõem e seus formatos (e.g., Roedder, 1984). As inclusões fluidas podem ser caracterizadas em primárias, secundárias ou pseudosecundárias (e.g., Roedder, 1984). As inclusões fluidas primárias são aquelas que estão geneticamente associadas ao crescimento mineral, podendo estar dispostas ao longo de zonas de crescimento dos minerais (e.g., Roedder, 1984). As inclusões fluidas secundárias são formadas a partir do preenchimento em fraturas ocorridas posteriormente ao crescimento mineral, geralmente formando trilhas onde localizavam-se as fraturas (e.g., Roedder, 1984). As inclusões pseudosecundárias são decorrentes do selamento de fraturas que se desenvolveram durante o crescimento mineral, são trilhas interrompidas por um antigo limite mineral (e.g., Roedder, 1984).

Para que a análise de inclusões fluidas seja realizada, é necessário que esta siga 3 premissas essenciais, também denominadas regras de Roedder (Roedder, 1984; Bodnar, 2003; Goldstein, 2003):

1. A inclusão foi aprisionada em uma fase única e homogênea.
2. A inclusão apresenta evolução isocórica, ou seja, o volume do aprisionamento é um sistema constante.
3. Após o aprisionamento, nada foi adicionado ou removido da inclusão.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Pesquisa bibliográfica

Foi realizada uma ampla leitura de artigos, teses e acervo literário para buscar compreender a geologia regional no contexto litológico, estrutural e tectônico. Além disso, foram consultados trabalhos abordando ocorrência, descrição e interpretação de inclusões fluidas, geometria externa e morfologia interna de veios sintectônicos, processos de falhamento sismicamente ativado e circulação de fluidos em zonas de cisalhamento. Por fim, realizou-se uma vasta pesquisa de depósitos minerais auríferos, com enfoque em gênese do tipo ouro orogenético. O estudo dos materiais e métodos empregados nesse trabalho foram essenciais para a realização e entendimento do projeto.

4.2. Atividades de campo

Foi realizado trabalho de campo para a coleta de dados geológicos e estruturais e amostras de veios sintectônicos e suas encaixantes imediatas, em áreas com contexto geológico, metamórfico e estrutural definido. Realizou-se, ainda, reconhecimentos geológicos

regionais a partir de levantamentos de campo com perfis contínuos e transversais às estruturas, além de levantamentos detalhados, em áreas selecionadas, com amostragem sistemática. A coleta de dados estruturais de foliações, veios sintectônicos, lineações e indicadores cinemáticos envolveu os métodos convencionais (Turner & Weiss, 1963; Hobbs et al., 1976; Ramsay & Huber, 1983, 1987) com identificação e tomada de atitudes, além de coleta de amostras orientadas para análises de inclusões fluidas. Em campo, os veios foram descritos e classificados usando o esquema de classificação sintetizado em Bons et al. (2012).

4.3. Petrografia

A análise petrográfica iniciou-se com a descrição macroscópica dos aspectos estruturais, texturais e compostionais de amostras coletadas em trabalhos de campo e disponíveis de projetos anteriores. As descrições microscópicas foram realizadas com o intuito de caracterizar a composição mineralógica e microestruturas, bem como seleção de amostras para estudos de inclusões fluidas.

4.4. Análise das inclusões fluidas

Este processo se iniciou com a descrição petrográfica e mapeamento detalhado das associações de inclusões fluidas presentes nas amostras de veios sintectônicos selecionadas. Para isso foram confeccionadas seções bipolidas com espessuras entre 100 e 200 µm. O mapeamento petrográfico visou reconhecer associações de inclusões fluidas cujos modos de ocorrência permitiram caracterizá-las como primárias (fluidos aprisionados durante o crescimento mineral), pseudosecondárias (inclusões que são aprisionadas em fraturas durante o crescimento mineral) e secundárias (formados após o crescimento mineral) (e.g., Roedder, 1984; Goldstein, 2003). Isso permitiu estabelecer uma cronologia relativa entre as associações de inclusões fluidas (fig. 4). As inclusões fluidas foram descritas com relação ao modo de ocorrência, forma, cor, tamanho, índice de refração e quantidade de fases identificáveis nas condições normais de pressão e temperatura.

Após a etapa de classificação e descrição petrográfica das inclusões fluidas, dados microtermométricos foram obtidos no Laboratório de Inclusões Fluidas do IGc-USP usando um sistema de resfriamento/aquecimento da marca Linkam com platina modelo THMS600, controlador modelo T94 e sistema de posicionamento digital, acoplados a um microscópio binocular Olympus BX51. O sistema permite registrar mudanças de fase no intervalo entre -190°C e 600°C.

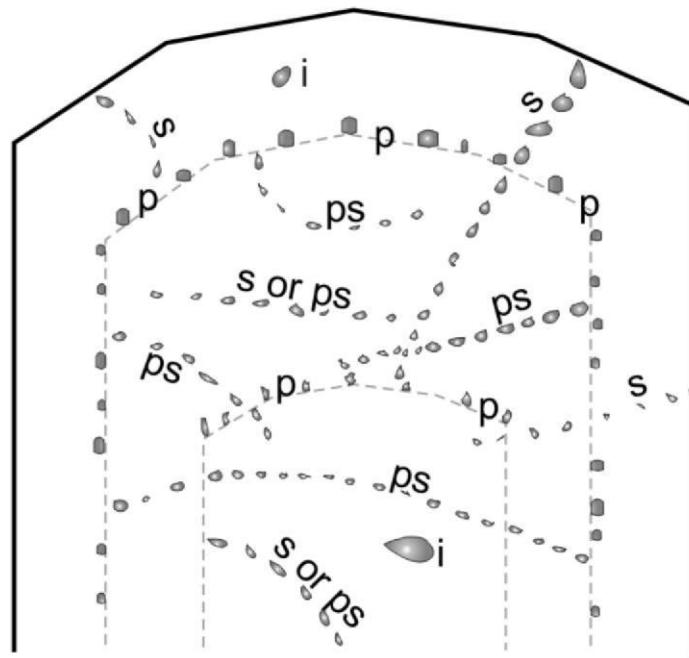


Figura 4. Representação esquemática hipotética de um cristal individual mostrando associações de inclusões fluidas com modos de ocorrência diagnósticos de naturezas primária (p), pseudossecundária (ps), secundária (s) ou indeterminada (i) (Goldstein, 2003).

O tratamento dos dados foi realizado usando os pacotes de programas FLUIDS (Bakker, 1997) e CLATHRATES (Bakker, 2003), aplicando equações de estado para determinar as composições, proporções volumétricas e densidades das inclusões fluidas: Duschek et al., (1990) e Span & Wagner (1996) para densidade das fases carbônicas; Duan et al. (1992) para densidade, salinidade e propriedades totais de inclusões aquocarbônicas; Zhang & Frantz (1987) para propriedades totais, densidade e proporções volumétricas de inclusões aquosas. Os dados foram reduzidos e apresentados usando gráficos binários, objetificando avaliação e interpretação das variações nos valores de mudanças de fase dos fluidos e parâmetros físicoquímicos calculados com base nos dados obtidos, bem como interpretação da história evolutiva dos fluidos.

Condições de pressão e temperatura de aprisionamento das inclusões fluidas foram estimadas usando isócoras calculadas a partir do programa ISOC (Bakker, 2003), com base em equações adequadas para cada tipo de inclusão fluida, tais como as equações de Duan et al. (1992), Bakker (1999) e Zhang & Frantz (1987) para inclusões carbônicas, aquocarbônicas e aquosas, respectivamente.

5. RESULTADOS OBTIDOS

5.1. Análises de aerogamaespectrometria

A escala em que foram obtidas as imagens reflete na resolução, qualidade e na dificuldade da diferenciação entre litotipos e zonas de alteração na região. A Formação Piririca é caracterizada por rochas metavulcanossedimentares, as quais são deformadas e delimitadas por duas zonas de cisalhamento, Piririca (ZCP) e Ivaporunduva (ZCI). Após o limite com a ZCI, o litotipo muda para uma sequência metassedimentar, a Formação Nhunguara, porém ainda contendo lentes de metabasitos (fig. 3b). A ZCP delimita as formações Piririca e a Ribeirão das Pedras, a qual é representada por rochas metassedimentares incluindo arenitos ferruginosos, que podem ser a fonte de ferro para circulação de fluido e podem apresentar sinais magnéticos, caso exista magnetita na unidade. Além disso, como os litotipos são predominantemente de rochas metassedimentares, as imagens resultantes da aerogamaespectrometria apresentam um padrão muito semelhante entre os elementos radioativos, potássio, urânio e chumbo.

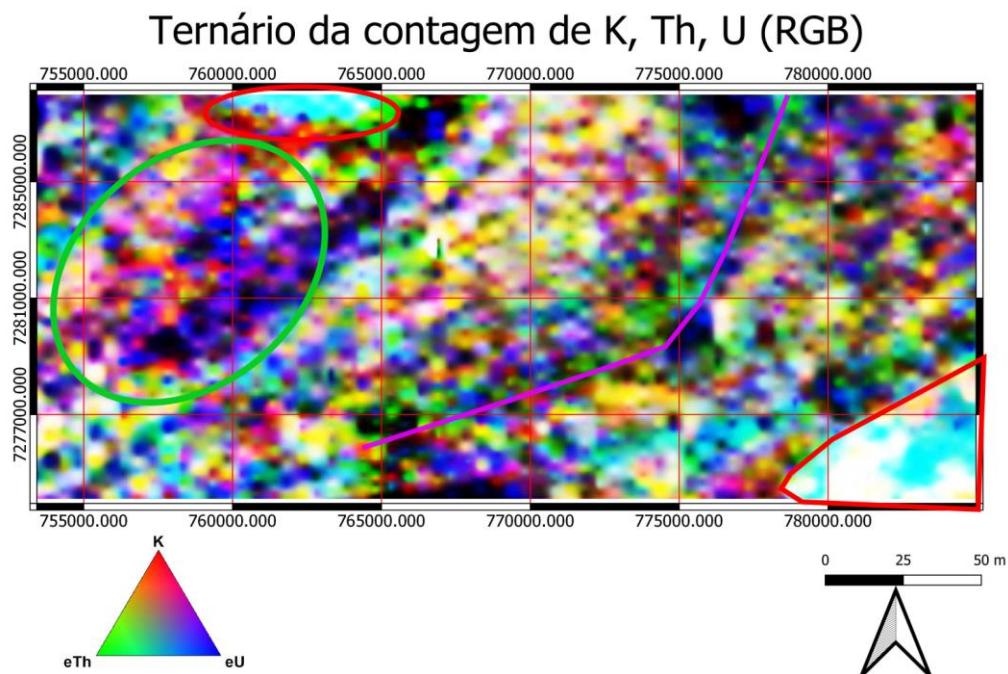


Figura 5. Mapa ternário de potássio, em vermelho: tório, em verde e urânio em azul, onde os circulados em vermelho representam intrusões graníticas, o circulado em verde a Formação Piririca, localização onde foi realizado o perfil em campo, e em roxo uma divisão de alta de tório, dentro da Unidade Nhunguara.

De acordo com a imagem obtida pela composição ternária K-Th-U, a Formação Piririca (circulada em verde na fig. 5) contém alta concentração de urânio e potássio. A alta concentração de potássio corresponde a uma possível alteração hidrotermal potássica associada à mineralização (Hammond et al. 2011). Em complemento, uma vez que o urânio é mobilizado em fluxos de fluidos associados com o ferro (Fuchs et al. 2016), concentrações

altas deste elemento podem ser um indicativo de mineralização na região. Além disso, o limite da Formação Piririca é marcado por duas faixas bem nítidas, à leste, pela Zona de Cisalhamento Ivaporunduva, e à oeste, pela Zona de Cisalhamento Piririca, ambas com alta concentração dos três elementos, com maior teor de urânio dentre eles.

O mapa ternário ainda delimita bem os corpos ígneos da região (delimitados em vermelho na Fig. 5) apresentando alta concentração dos três radioelementos. Tais corpos são: ao norte o Granito Agudos Grandes, e ao sudeste o Biotita Granito Porfirítico Cinza. Também é possível observar um limite não descrito na Formação Nhunguara (alinhado em roxo, Fig. 5), que demonstra um alto teor de tório, o que pode ser oriundo de um litotipo mais psamítico ou de intrusões graníticas mais evoluídas.

5.2. Análises de aeromagnetometria

Devido ao alto controle estrutural existente na região, o filtro TILT (Fig. 6a e b) é importante para delimitar as feições estruturais. Ainda, aplicou-se os filtros Gaussianos de desvio padrão 0,15 passa-baixa, no qual as feições mais regionais são melhor delimitadas (Fig. 6a). Ambas as imagens com filtro TILT ressaltam a Zona de Cisalhamento Piririca sem muita expressão, enquanto a Zona de Cisalhamento Ivaporunduva apresenta uma boa delimitação (em vermelho, Fig. 6a e b). Além disso, ocorre um lineamento forte, que se assemelha ao limite estrutural entre a Sequência Serra das Andorinhas e o Grupo Votuverava (em azul, Fig. 6). Observa-se, também, um forte lineamento NE-SW a sudeste da imagem que representa a mais extensa zona de cisalhamento da Faixa Ribeira Meridional, corresponde à Zona de Cisalhamento Lencinha-Cubatão. Já os dados residuais mostram que em meio à Formação Piririca ocorre um lineamento expressivo que pode estar relacionado com rochas metabásicas ricas em ferro (em verde, Fig. 6a e b).

Observando a geologia local (Fig. 3b) juntamente com as imagens de TILT, é possível compará-las ao Modelo Digital de Terreno (Fig. 3a) e interpretar algumas relações. Dentre essas, a diferença entre as zonas de cisalhamento Piririca e Ivaporunduva chama atenção, uma vez que ambas são vistas em campo. Entretanto, a primeira (em amarelo) não se destaca nem em MDT, nem em TILT. Uma interpretação cabível para o TILT não apresentar estruturas visíveis é uma diferença de fluidos que percolaram na região, no qual a Zona de Cisalhamento Piririca contém menor quantidade de minerais magnéticos e a de Ivaporunduva contém maior quantidade. De acordo com Perrotta (1996), as duas zonas de cisalhamento foram formadas a partir das inflexões dúcveis da zona de cisalhamento transpressiva no processo de evolução da Zona de Cisalhamento Ribeira.

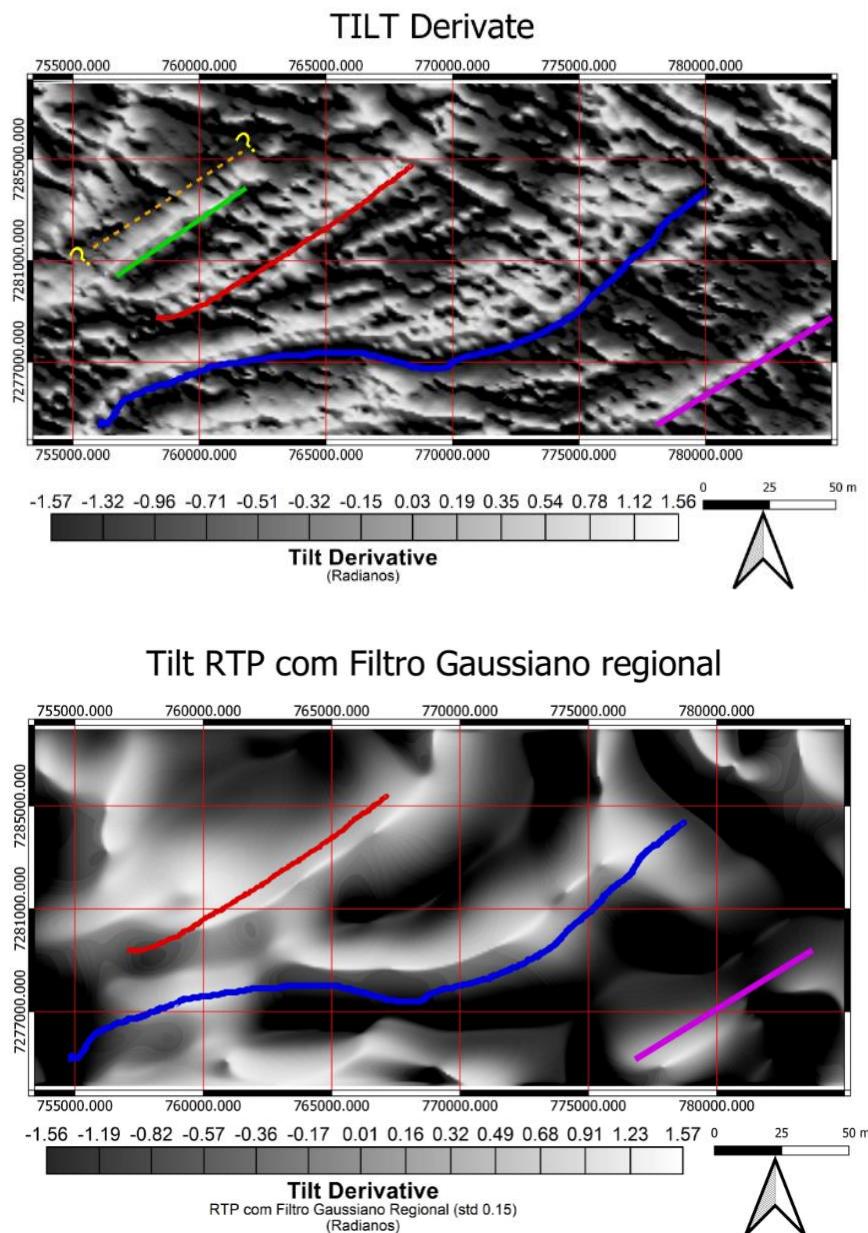


Figura 6 a- Tilt derivate mostrando importantes lineamentos, b- TILT com redução ao polo e Gaussiano com passa-baixo. Em amarelo pontilhado localiza-se a Zona de Cisalhamento Piririca, em vermelho, a de Ivaporunduva, em verde, um lineamento de um corpo metabásico, em azul, um lineamento localizado no meio da Formação Nhunguara repetindo o formato do contato entre os litotipos e, em roxo, o lineamento que representa a Zona de Cisalhamento Lancinha.

Outros dados advindos de aeromagnetismo corroboram com a diferença de mineralização entre as duas zonas de cisalhamento. A partir da imagem de redução ao polo (fig. 7a), a relação entre os lineamentos propostos anteriormente com os corpos de alta magnética é intrínseca. Isso é consequência de anomalias magnéticas existentes nas zonas de cisalhamento e em outros limites estruturais e litológicos, podendo ser resultado do próprio litotipo, dos corpos de metabasitos da Formação Piririca com magnetita singenética, ressaltando que o fluxo de fluidos é condutor de elementos químicos que podem ter sido

responsáveis pela cristalização de magnetita epigenética. A aplicação conjunta com o filtro Gaussiano passa-alta (Fig. 7b) permite delimitar com maior precisão as regiões com alta anomalia magnética. Nota-se, ainda, que a anomalia contendo tendências negativas ao redor das anomalias positivas, é um indicativo de boa redução ao polo.

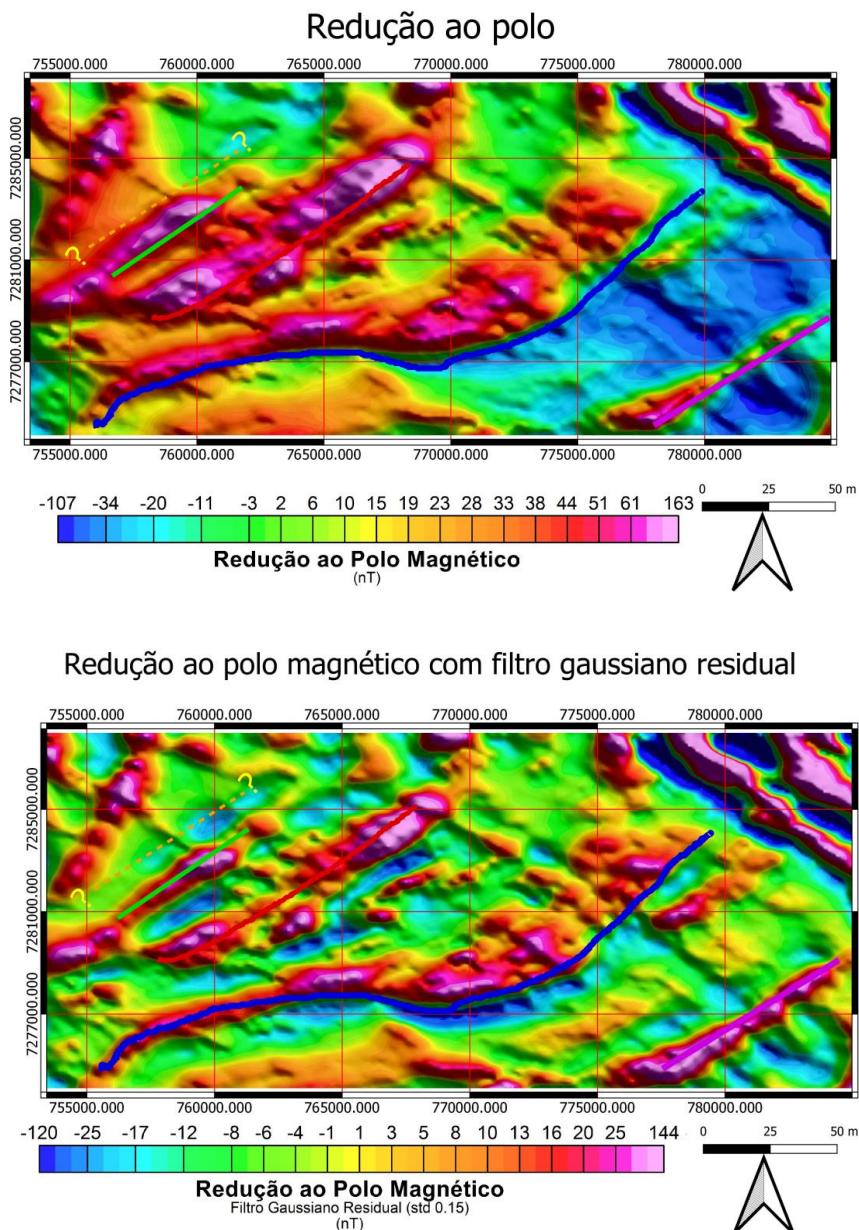


Figura 7 a- Redução ao polo da região estudada, (b) redução ao polo com filtro Gaussiano passa alta, em amarelo pontilhado localiza-se a zona de cisalhamento Piririca, em vermelho a Ivaporunduva, em verde um lineamento de um corpo metabásico em azul um lineamento ocasionado o meio da Formação Nhunguara repetindo o formato do contato entre os litotipos e em roxo o lineamento que representa a Zona de Cisalhamento Lancinha.

Os lineamentos indicados têm potencial para conter mineralização associada, entretanto, como observado na imagem de redução ao polo com o filtro Gaussiano Passa-baixa, há uma região em que se destaca a alta de anomalia magnética (circulada em amarelo Fig. 8a). Esse local, é a região que aflora a Formação Piririca sendo ela com a maior anomalia

magnética, representando um local com maior quantidade de magnetita. Quanto à individualização de cada corpo com anomalia magnética, é possível delimitá-los com base no mapa com sinal analítico. Dentre as anomalias, observou-se dois tipos principais relacionadas à Formação Piririca: uma de formato mais arredondado no meio da unidade (circulada em preto Fig. 8b), e outra mais alongada, de formato elipsoidal (circulada em amarelo Fig. 8b). A primeira é relacionada aos corpos maciços de rochas metabásicas, enquanto a segunda está diretamente relacionada ao contato entre as formações Piririca e Nhunguara, delimitada pela Zona de Cisalhamento Ivaporunduva.

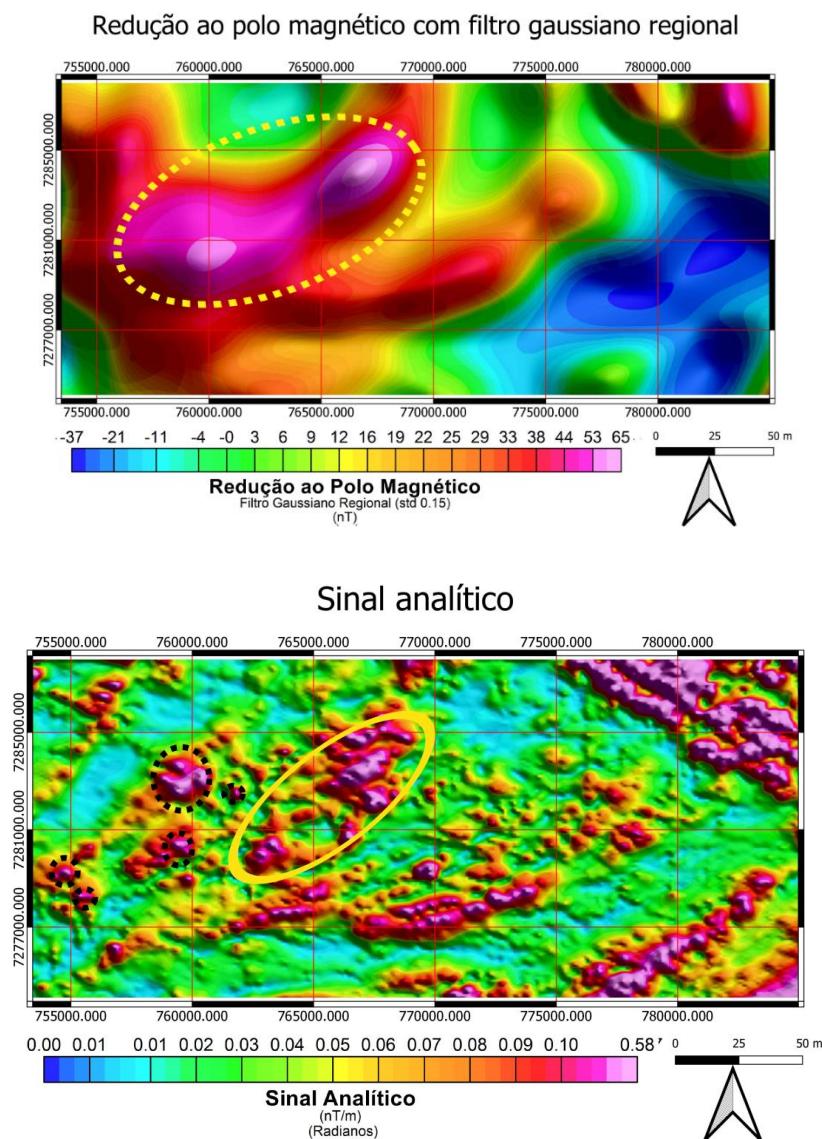


Figura 8 a- Redução ao polo magnético com filtro Gaussiano regional, indicando uma concentração de anomalia magnética na Formação Piririca (pontilhada em amarelo), b- Imagem de sinal analítico com duas características diferentes: uma mais arredondada em preto e outra mais alongada em amarelo.

5.3. Análises estruturais e de campo

Realizou-se em atividade de campo medições de campo quanto a orientação dos veios (45 medições), da foliação principal (27 medições) e da lineação de estiramento (16 medições), a fim de obter um estereograma com orientações estruturais representativas da região.

As foliações coletadas em campo indicam um plano médio, indicado em verde na figura 9, de alto ângulo de mergulho para sudeste, esta foliação é padrão em toda a Formação Piririca. Os veios aferidos em campo conotam a existência de três famílias com orientações distintas.

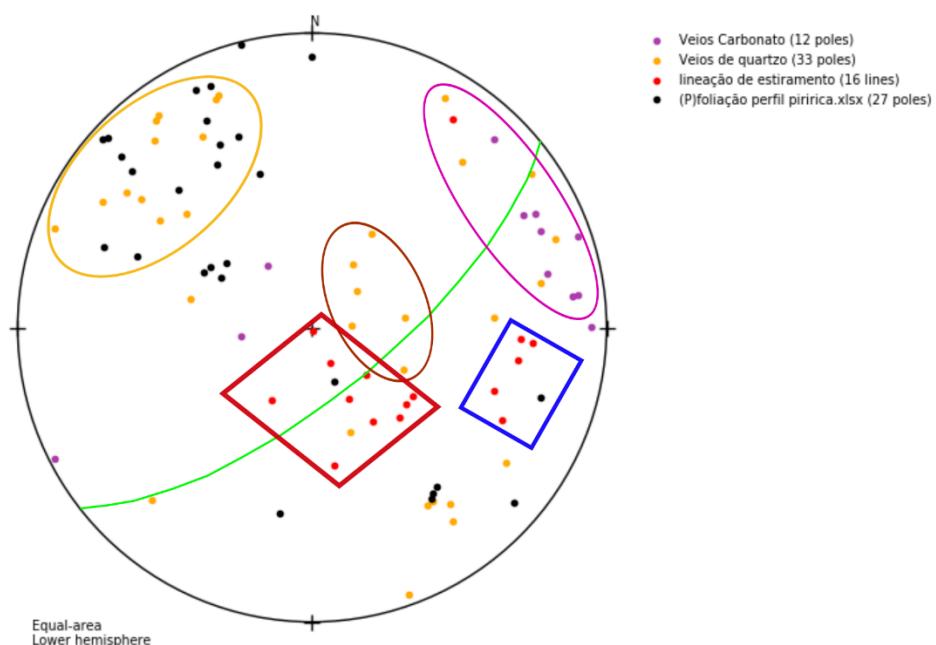


Figura 9- Estereograma obtido através do perfil realizado na Formação Piririca. O plano em verde representa a foliação milonítica média, em vermelho uma concentração de lineações com alto caiamento, e em azul concentração de lineações sub-horizontais. Circulado em amarelo representa a família de veios paralelos à foliação milonítica, em marrom a família de veios sub-horizontais, da qual a maioria das mineralizações ocorrem, em roxo a família de veios quartzíticos e carbonáticos, subverticais e perpendiculares à foliação milonítica.

As foliações contêm aspecto milonítico e sua orientação é similar à das duas zonas de cisalhamento estudadas. Isso confere com uma foliação no perfil integralmente associada à mesma deformação que gerou as zonas de cisalhamento Piririca e Ivaporunduva. Além disso, observa-se que os planos aferidos em campo contêm um mergulho majoritariamente para SE e subordinadamente para NW e estão associados com veios circulados em amarelo na figura 9.

As lineações de estiramento observadas em campo apresentam dois padrões distintos de orientação que estão espacialmente associados a domínios internos da Formação Piririca, onde a lineação é aproximadamente de máximo mergulho (polígono vermelho na Fig. 9), e à

Zona de Cisalhamento Ivaporunduva, onde a lineação é SE/sub-horizontal (retângulo azul na Fig. 9).

Os veios sintectônicos se distinguem em três grupos com orientações distintas (Figs. 9, 10, 11). A família mais abundante é representada por veios de quartzo com orientação NE/subvertical, sendo paralelos à foliação das rochas. Isso indica a existência de veios paralelos às zonas de cisalhamento. Uma segunda família se caracteriza por veios de quartzo e/ou carbonato com orientação NW/subvertical, perpendiculares à foliação principal. A terceira família compreende veios de quartzo com mergulhos sub-horizontais e orientação perpendicular à foliação principal. A primeira família apresenta-se ao longo de todo perfil (pontos 77 a 88, Fig. 1b), e se caracteriza como a mais abundante, enquanto a segunda e terceira ocorrem majoritariamente próximas à zona de cisalhamento Ivaporunduva.

As orientações dos veios indicam variações nos regimes de esforços em que a região esteve submetida. A partir do bloco diagrama na figura 10, assumindo que os veios extensionais NW/subverticais (em roxo na Fig. 10) estão associados ao mesmo evento que gerou a foliação milonítica, é possível inferir que a direção de encurtamento máximo apresenta orientação NW/sub-horizontal, indicando um ângulo de 70-80° em relação ao plano médio da zona de cisalhamento. A orientação NW/subvertical dos veios com textura blocada elongada em posição sub-horizontal é diagnóstica de extensão na direção NE/sub-horizontal. Isto é, um regime transcorrente. Assumindo que os veios extensionais sub-horizontais (em amarelo na Fig. 10) também foram gerados em associação com zona de cisalhamento, a orientação é compatível com encurtamento NW/sub-horizontal. Mas, neste caso, a orientação subvertical apresentada pelos cristais que definem textura blocada elongada são diagnósticos de extensão subvertical. Ou seja, um regime compressional. Variações cíclicas nos regimes de esforços durante a evolução de zonas de cisalhamento sismogênicas, como as variações diagnosticadas pelos veios associados à zona de Cisalhamento Ivaporunduva, são esperadas em decorrência do processo falha-válvula (Sibson et al., 1988).

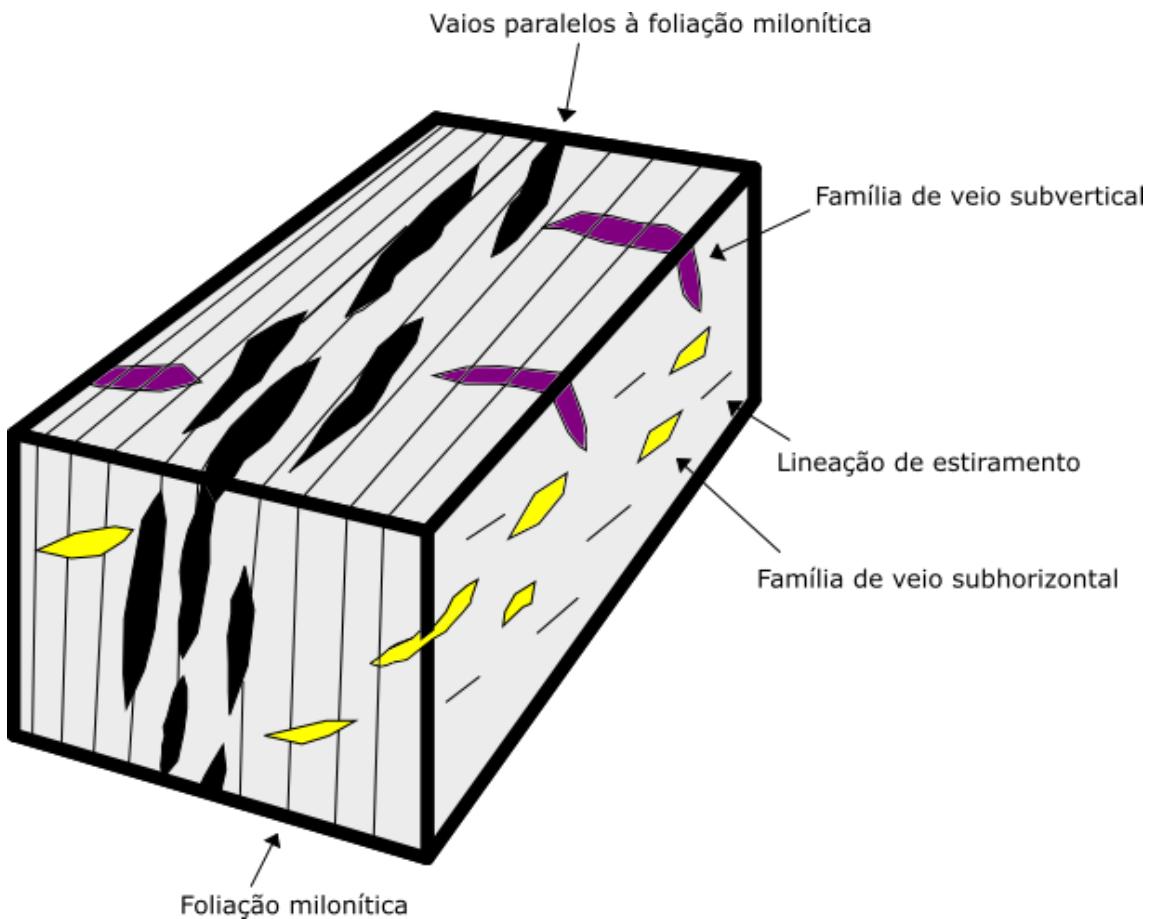


Figura 10. Representação esquemática dos veios e suas relações com a lineação de estiramento e com a foliação milonítica- Próximo à zona de cisalhamento Ivaporunduva.



Figura 11. Família de veios sub-verticais em roxo, cortados por veios sub-horizontais, em amarelo. Observa-se uma movimentação destral nas fraturas posteriores.

Ocorrem veios de coloração verde que foram associados em campo como pseudotaquilitos (Fig. 12) preenchendo falhas rúpteis subsidiárias com espessuras milimétricas a centimétricas. Os veios não se encontram cisalhados, na qual a matriz tem

granulação muito fina e cor preta. Além disso, pseudotaquilitos cortam a foliação milonítica dúctil, sendo paralelos a outras famílias de veios de quartzo de orientação NE/subvertical (Fig. 12).

Outra hipótese para a formação de tais veios de coloração verde é a de veios de clorita gerados a partir de alteração hidrotermal que são esperados em depósitos do tipo lode-gold (Boyle 1955). Esta segunda hipótese torna-se mais provável quando se observa a mesma composição ocorrendo em partes externas a veios de quartzo (indicado em amarelo Fig. 12). Observando-se em detalhe, mesmo veios em que são preponderantes a clorita, apresentam pequenas porções de quartzo em meio aos veios (indicado em azul Fig. 12).



Figura 12. Veio de clorita cortando a foliação milonítica de direção paralela ao veio quartzoso

5.4 Petrografia das rochas encaixantes

As amostras de rochas associadas às zonas de cisalhamento foram classificadas segundo proposta de Sibson (1977), na qual são considerados presença ou ausência de foliação e proporções entre minerais neoformados e porfiroclastos (Fig. 13).

		Trama aleatória	Trama foliada	% matriz
Sem coesão		Brecha de falha (fragm. visíveis > 30%)	?	
		Farinha de rocha ou Gouge (fragm. visíveis < 30%)	?	
Coeso	Vitreo	Pseudotaquilito	?	
	Natureza da matriz. Redução tectônica de grãos domina sobre recristalização	Brecha de moagem (fragm. >0,5 cm)	?	< 10%
		Brecha de moagem fina (fragm. 0,1 a 0,5 cm)		
		Microbrecha de moagem (fragm. < 0,1 cm)		
	Série dos cataclasitos	Protocataclasito	Protomilonito	10 a 50%
	Cataclasito		Milonito	50 a 90%
	Ultra-Cataclasito		Ultramylonito	90 a 100%
	Recristalização pronunciada	?	Blastomylonito	

Figura 13. Tabela com relações de rochas advindas de zonas de falhas, Sibson (1977).

Foram analisadas ao microscópio petrográfico 15 lâminas de amostras da Formação Piririca, incluindo rochas associadas às Zonas de Cisalhamento Piririca e Ivaporunduva. As rochas apresentam predominantemente texturas lepidogranoblástica e granolepidoblástica, podendo predominar lepidoblástica ou granoblástica conforme a proporção de filossilicatos presentes e como são dispostas o bandamento composicional existente na maioria das amostras. Salienta-se a existência de uma foliação milonítica em que predomina uma movimentação destral conforme indicado por vários critérios cinemáticos, incluindo estruturas SC, boudins assimétricos, porfiroclastos com fratura em dominó e crenulações assimétricas. Rochas próximas a zona de cisalhamento Piririca apresentam estrutura macia com microbrechas de moagem associadas, evidenciando processo de deformação rúptil.

5.5 Metamorfismo

Foram analisados em campo e lâminas petrográficas amostras de rochas metapelíticas, metapsamíticas e calcissilicáticas da Formação Piririca.

5.5.1 Metamorfismo de metapelitos e metapsamitos

As rochas siliciclásticas se caracterizam por uma composição que varia em quantidade de quartzo, entre metapelitos e metapsamitos. Além do quartzo, as rochas contêm filossilicatos em orientação preferencial, definindo a foliação milonítica. A pargênese metamórfica dada por quartzo, biotita, muscovita, k-feldspato (detritico/autigênico), plagioclásio e clorita define condições de fácies xisto-verde inferior, zona da clorita. Ocorre

uma segunda zona marcada pela ausência de clorita progressiva, embora ocorram registros de clorita retrometamórfica gerada a partir do consumo de biotita.

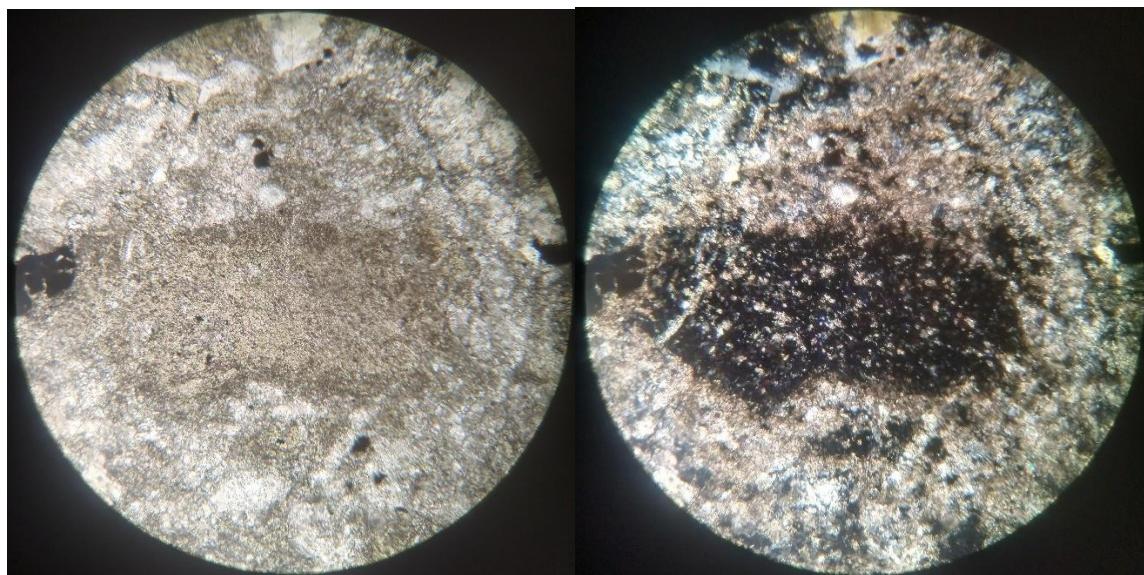


Figura 14 a- Lâmina da amostra SZ-82I com objetiva de 10x com polarizadores descruzados com zonação de tipo clorita de coloração mais clara na parte mais interna e escura na externa. b- Lâmina com polarizadores cruzados em que a parte interna a cor de interferência é extremamente baixa com degrade no contato para uma cor de interferência mais clara.

As paragêneses descritas acima indicam que as rochas da Formação Piririca passaram pela reação *clorita + feldspato potássico → biotita + muscovita + quartzo + H₂O*, enquanto a ausência de granada indica que as rochas não atravessaram a reação *clorita + muscovita → granada + biotita + quartzo + H₂O*. O campo delimitado por essas duas reações sugere temperatura entre 420°C e 550°C para o pico metamórfico da Formação Piririca.

5.5.2 Metamorfismo das rochas calcissilicáticas

As rochas carbonáticas e calcissilicáticas da Formação Piririca são formadas por calcita, dolomita, quartzo e talco. Para análise desta paragênese em diagrama de fase isobárico relacionando a temperatura com a composição da fase fluida (Fig. 16), foi considerado pressão de 5 kbar, segundo estimativas barométricas para rochas de fácies xisto-verde do Grupo Votuverava obtidas por Faleiros et al. (2010). Na figura 16, a paragênese composta por dolomita, calcita, quartzo e talco mostra que a rocha passou pela reação: 3 *Dolomita + 4 Quartzo + H₂O → Talc + 3 Calcita + 3 CO₂*, enquanto a ausência de tremolita indica que a rocha não passou pela reação (2) 5 *Talc + 6 Calcita + 4 Quartzo → 3 Tremolita*

$+ 6 CO_2 + 2 H_2O$, tão pouco a reação (3) $2 Talco + 3 Calcita \rightarrow Tremolita + Dolomita + CO_2 + H_2O$. É possível, então, concluir que o fluido tem no mínimo 40 % de H_2O e que temperatura de metamorfismo é entre 400 a 550 °C, compatível com as condições inferidas para as rochas metapelíticas e metapsamíticas..

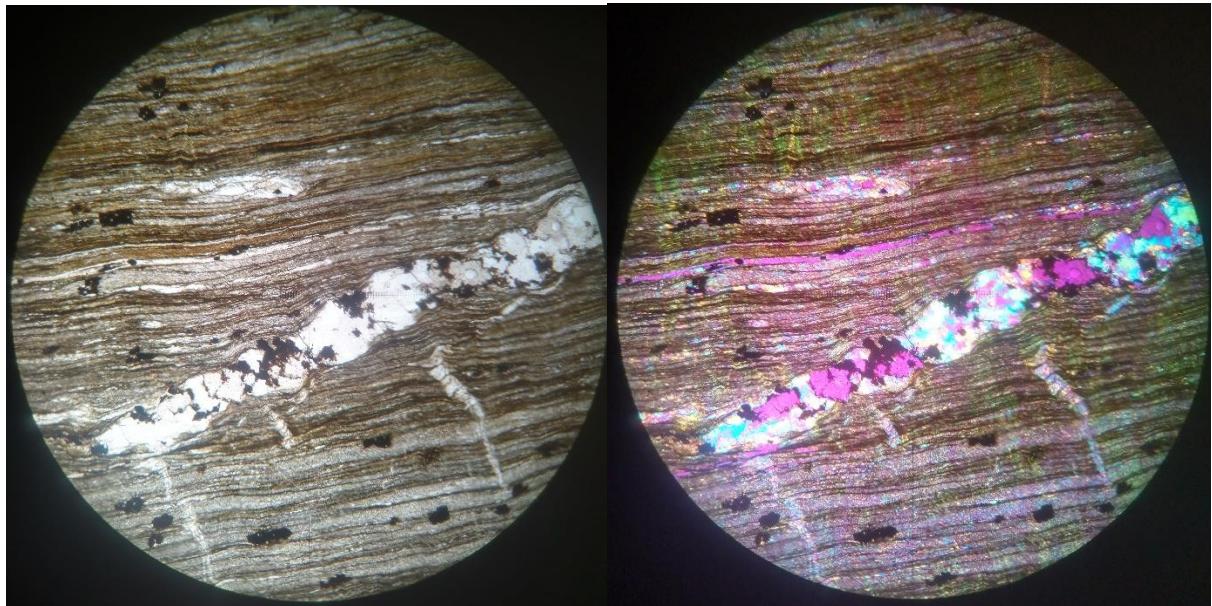


Figura 15 a- Amostra SZ-88A de lente objetiva de 4x com veios de quartzo boudinados e encaixante metassedimentar de composição de quartzo, biotita e sericita. com veios extensionais compatíveis com os esforços formadores da boudinagem b- Amostra com polarizadores cruzados e adicionando compensador de gipso, mostrando boundins assimétricos sinestrais.

5.5.3. *Microtectônica*.

As amostras descritas apresentam agregados de quartzo com evidências microestruturais de deformação intracristalina e recristalização dinâmica quando dispostos na matriz. A presença de porfiroclastos de quartzo com extinção ondulante, bandas e lamelas de deformação e subgrãos e grãos recristalizados de mesmas dimensões (Fig. 17), alta proporção de grãos recristalizados de dimensões entre 40-80 µm, indicam recristalização dominada por mecanismos de rotação se subgrãos (Stipp et al., 2002; Passchier & Trouw, 2005). Assumindo um maior controle da temperatura esse mecanismo sugere temperatura deformacional entre 400 e 500 °C (Stipp et al., 2002; Faleiros et al., 2010).

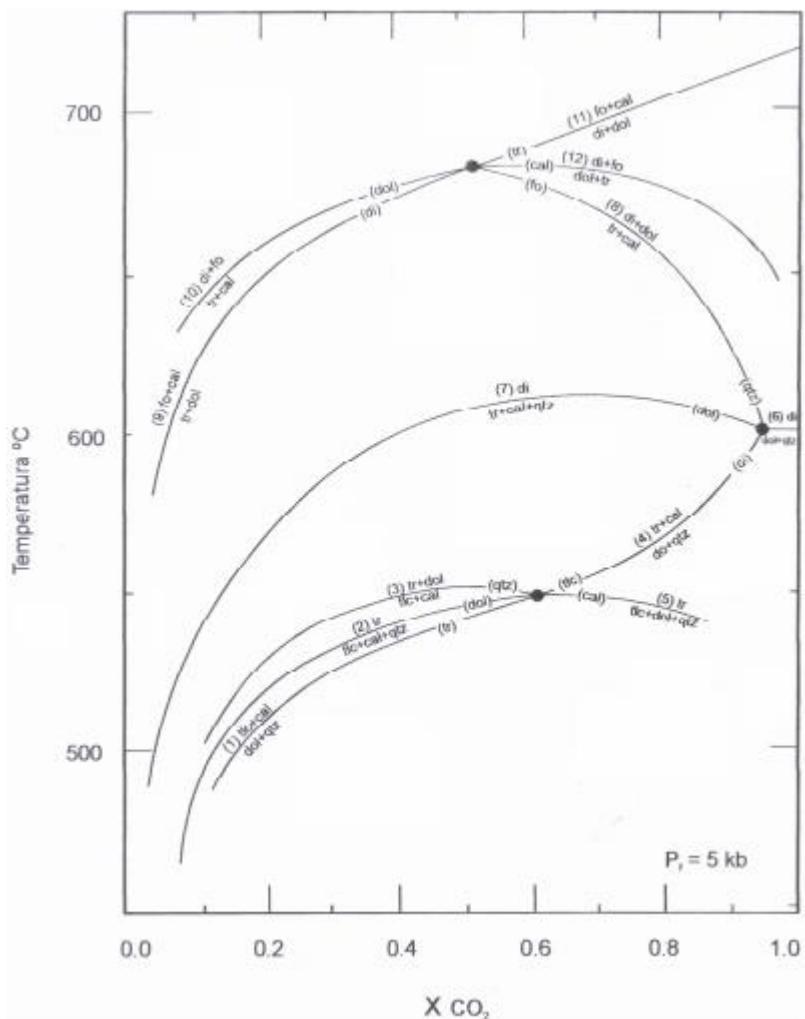


Figura 16 Gráfico Grade petrogenética isobárica T – XCO₂ ($P_f = 5$ kb) para o sistema CMS-CH com fase fluida em excesso. Candia et al (2003), modificado de Winkler (1979). Paragênese indica reação da (1) da curva univariante tremolita ausente.

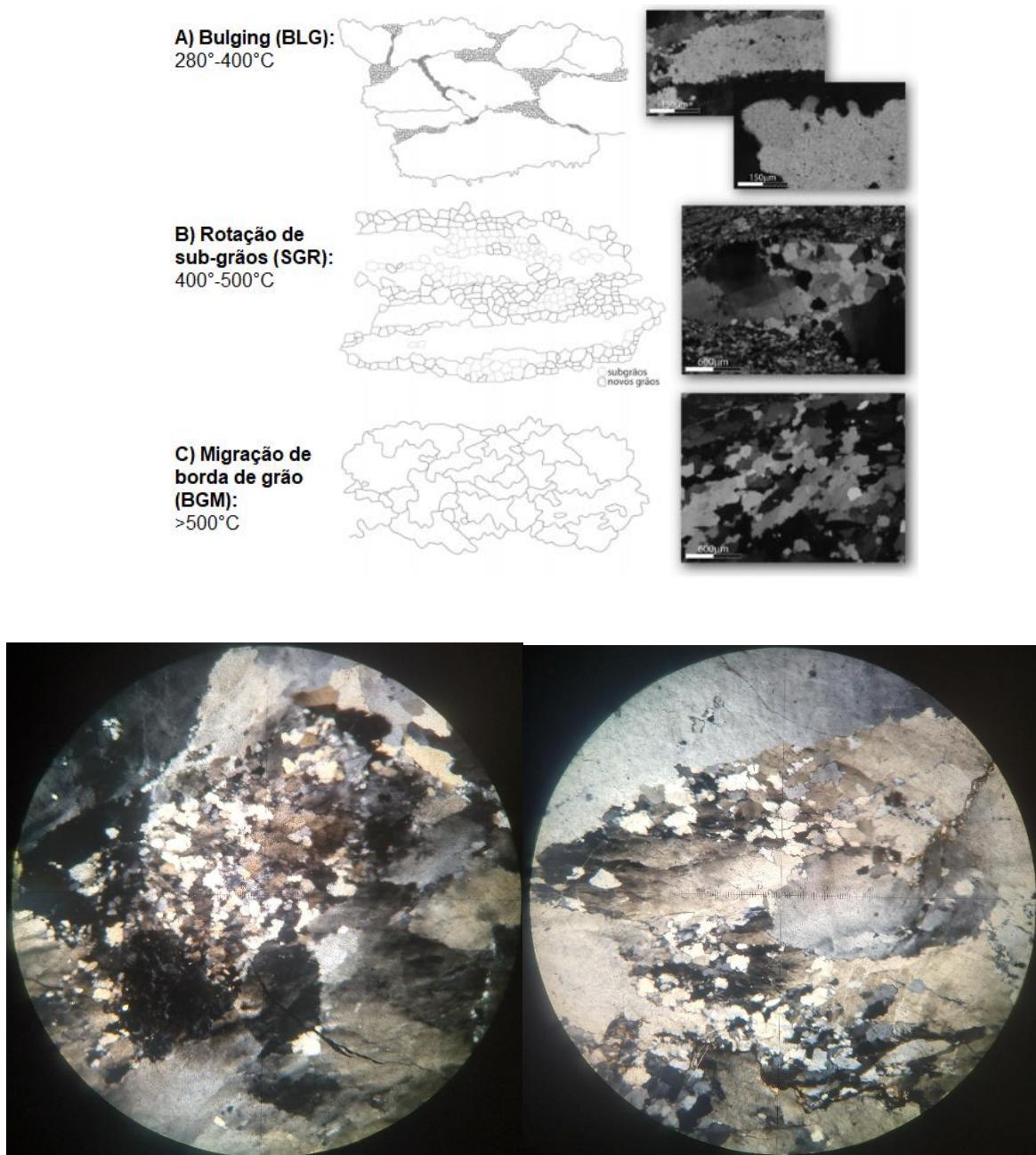


Fig 17. a- Mecanismos de recristalização dinâmica em quartzo (Modificado de Castro, 2007) b- Amostra SZ- 81 com objetiva de 4x com recristalização de quartzo com rotação de subgrão a um início de migração de borda de grão. c- Amostra SZ-80B com objetiva 80B com recristalização de quartzo com textura de rotação de subgrão.

5.6 Petrografia dos veios

Os veios analisados foram distinguidos em sua composição, estrutura e texturas de crescimento dos minerais. Em quesito de composição foi evidenciada 4 tipos de veios, três monominerálicos, respectivamente quartzo, clorita e calcita, e outro de em que há cristalização conjunta desses minerais. Quanto à estrutura os veios podem ser caracterizados como: tabulares, anastomosados, bifurcados e boudinados. O crescimento é majoritariamente ataxial e de textura blocada (e.g., Passchier & Trouw, 2005).

Os veios de quartzo são por vezes boudinados assimetricamente formando uma movimentação sinistral (Fig. 15a), também ocorrem veios de quartzo estirados e falhados. Tais veios ainda se caracterizam por serem os mais abundantes e diversos, sendo encontrados tanto anastomosados como tabulares. Os veios monominerálicos de clorita são encontrados majoritariamente em forma de vênulas de estrutura anastomosada, mas ocorrem também em forma de veios tabulares.

Veios poliminerálicos foram descritos no afloramento SZ82, e são majoritariamente compostos por calcita e quartzo, que são os mesmos minerais mais abundantes nas rochas encaixantes. Tais veios se encontram anastomosados e por vezes bifurcados, e são mais visíveis quando próximos a bandas em que são presentes minerais de alteração amarronzados. Esses veios contêm textura blocada (Fig. 18b), mas sem direção de crescimento preferencial. Finalmente, salienta-se que esses veios estão zonados em que na parte mais interna cristaliza quartzo e calcita/dolomita e na parte mais externa clorita. Tal zonação é típica de alteração hidrotermal de cloritização (Fig. 18a).

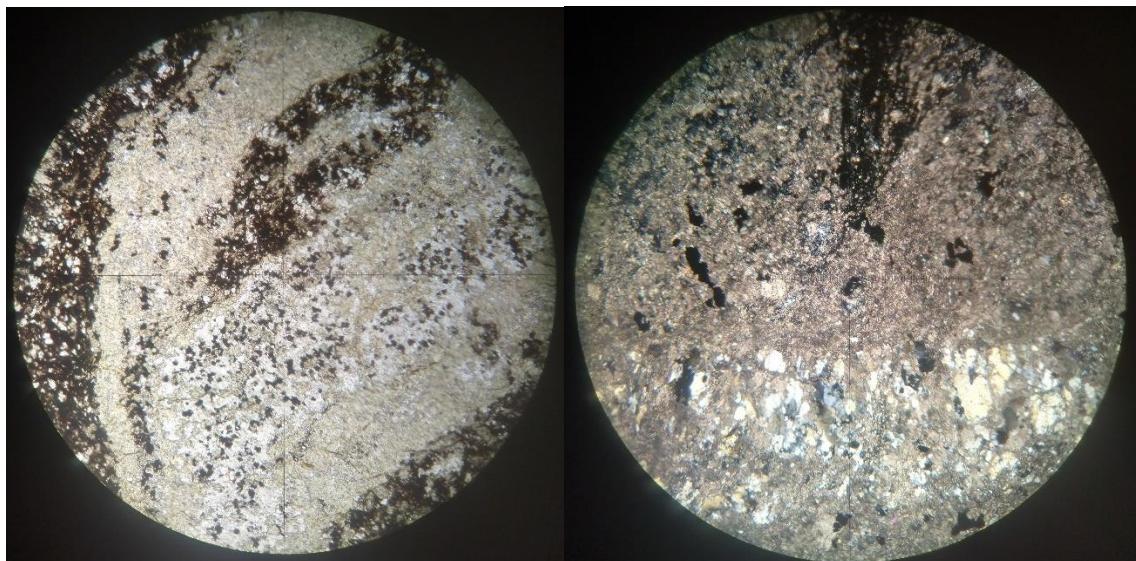


Figura 18 a- Amostra SZ- 82I com veios truncados bifurcados e anastomosados de composição poliminerálicos de quartzo e calcita na parte interna e clorita da externa. Veios estão cortando a encaixante rica em minerais de alteração escurecidos. b- Amostra SZ 82F2 com veio de quartzo de textura blocada e crescimento ataxial. Ambas as imagens com objetiva de 4x.

5.7 Análises microtermométricas

Dados microtermométricos obtidos para uma amostra de veio de quartzo mineralizado (SZ-83) localizado próximo da Zona de Cisalhamento Ivaporunduva (Fig. 1b) são apresentadas na Tabela 1. Na amostra SZ-83 as inclusões primárias são bifásicas de cores claras com formas que variam de ovaladas a irregulares, de tamanho entre 10 e 15 μm e dispersas em toda lâmina (Fig. 19b). Coexistem nessa mesma amostra inclusões secundárias dispostas em forma de trilhas (Fig. 19a), que são monofásicas e com cores que vão de claras a escuras e seus formatos variam entre ovalado, irregular e alongado. As inclusões são pequenas e sub-paralelas a fraturas, apesar de serem predominantemente intragranulares. As inclusões fluidas primárias são dominadas por fluidos aquocarbônicos em que sua proporção entre CO_2 e H_2O varia de 25 a 75% da fase carbônica em temperatura ambiente (25 °C). Apresentam temperaturas de fusão de CO_2 variando de -58,7 a -58,2, temperaturas homogeneização de CO_2 variando de 21,1 °C a 24,4 °C, temperatura de dissociação do clatrato de 6,0 a 9,2 °C, e temperatura de homogeneização total entre 248 e 330 °C (Tabela 1). As inclusões fluidas secundárias são predominantemente carbônicas em que a temperatura de fusão de CO_2 se encontram entre -59,2 e -58,7 °C e temperatura de homogeneização de 19,2 a 27,2 °C. Tais dados das inclusões aquocarbônicas indicam uma composição de alta quantidade de CO_2 e H_2O , próximo de uma proporção 40:60. Quanto as inclusões secundárias seus dados indicam majoritariamente uma composição rica em CO_2 , entretanto, com menores quantidades de outros componentes voláteis, indicado por temperaturas de fusão abaixo do valor do ponto crítico do CO_2 puro, em -56,6 °C.

Foram calculadas isócoras para as inclusões aquocarbônicas primárias (Fig. 20a) que resultam curvas que se cruzam por volta de 290 °C e 1 kbar de pressão. Esse ponto de convergência indica a temperatura e pressão na qual o fluido foi aprisionado e, consequentemente, de cristalização do quartzo hospedeiro. Quando comparado o volume da bolha com a salinidade da inclusão foi possível separar em dois grupos, um com maior volume da bolha e maior salinidade e outro um menor volume da fase gasosa e menor salinidade (Fig. 20b). Isócoras calculadas para inclusões carbônicas representativas são mostradas na (Fig. 20c).

Quando se cruzam as isócoras das inclusões aquocarbônicas com as inclusões carbônicas elas indicam o mesmo ponto de intersecção daquele das aquocarbônicas entre si, num intervalo de 240-300 °C e 0,8-1,2 kbar (Fig. 21). Isso sugere que o aprisionamento das inclusões carbônicas em trilhas secundárias se deu aproximadamente nas mesmas condições de pressão e temperatura das inclusões fluidas primárias.

As inclusões fluidas aquocarbônicas analisadas são típicas de ambientes metamórficos e são características de depósitos de ouro orogenético (Groves et al., 2003; Goldfarb et al., 2005; Béziat et al., 2008).

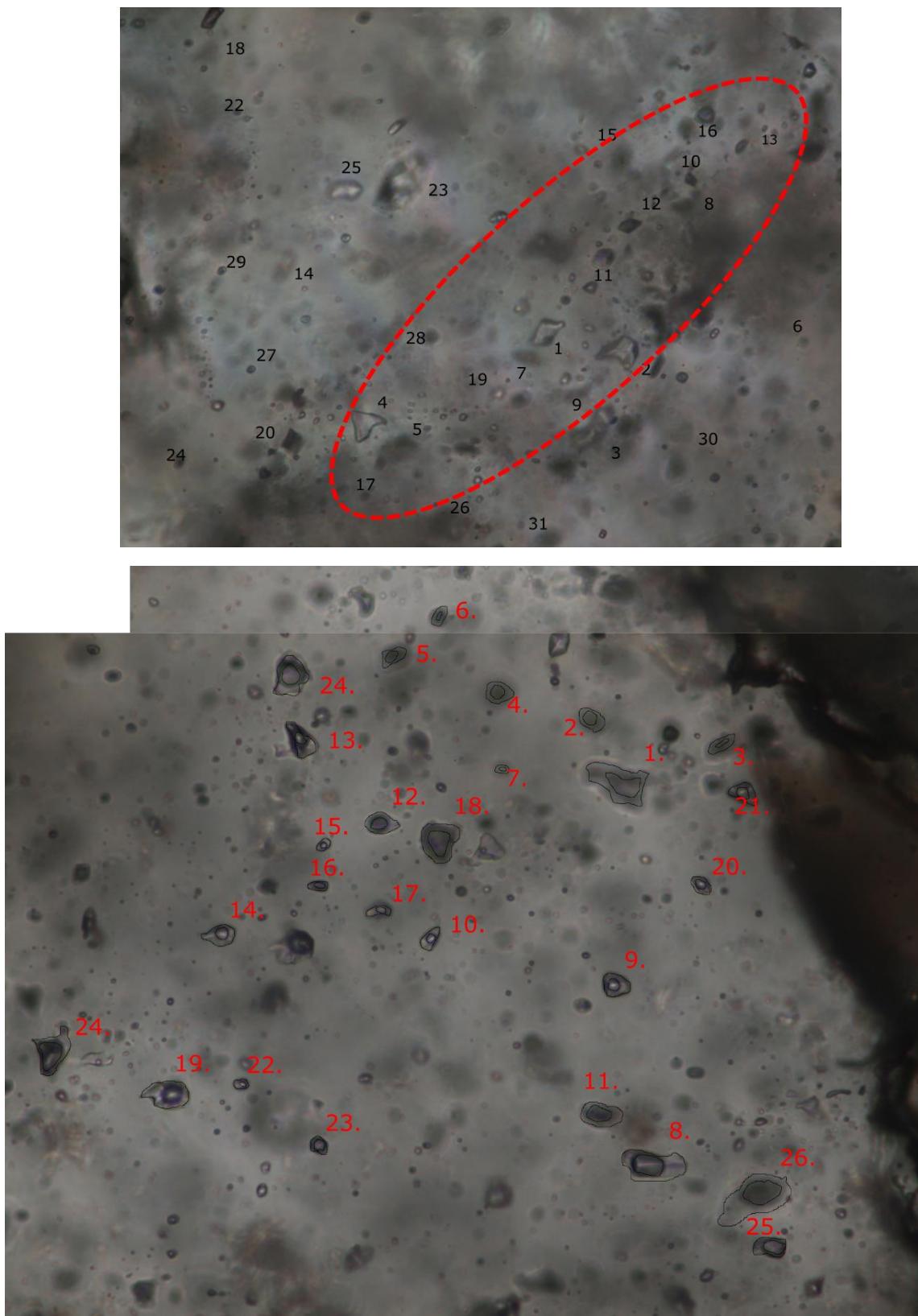


Figura 19 (a) trilha secundária de inclusões carbônicas (b) inclusões primárias aquocarbônicas

Tabela 1. Dados microtermométricos de inclusões aquocarbônica da amostra de veio de quartzo SZ-83B.

Número da inclusão	$T_f\text{CO}_2$ (°C)	$T_h\text{CO}_2$ (°C)	$T_f\text{Cl}$ (°C)	T_h (°C)	T_{crep} (°C)	Volume da bolha (%)	Salinidade (% peso NaCl _{eq.})	Densidade Total (g/cm ³)
01	-58,4	28,3L	8,2		271	45	7,87	0,83
02	-58,3	23,6L	6,9			60		
03	-58,2	22,9L	8,5		225	40	8,40	0,85
04	-58,4	22,8L	6,5		250	70	11,05	0,74
05	-58,3	22,8L	7,4		325	70	11,91	0,74
06	-58,4	23,6L	8,0		330	75	8,20	0,72
07	-58,2	22,2L	6,0			25	12,00	0,89
08	-58,3	23,5L	8,4		239	40	8,86	0,84
09	-58,7	23,1L	8,3			45	7,64	0,83
10	-58,3	22,6L	9,2			40		
11	-58,3	24,9L	8,5		319	50	8,07	0,80
12	-58,4	23,1L	7,4			50	11,49	0,81
13	-58,4	24,7L	7,7			45	8,75	0,86
14	-58,3	23,8L	8,3			50	7,61	0,81
15	-58,3	24,3L	7,8			40	8,55	0,84
16	-58,3	23,5L	7,9			55	8,40	0,79
17	-58,3	23,5L	7,8			55	8,58	0,79
18	-58,4	23,1L	7,4		330	75	11,49	0,72
19	-58,4	23,3L	8,2		300	50	9,61	0,80
20	-58,2	23,7L	7,3			70	12,88	0,73
21	-58,3	21,6L	7,7		291	60	9,69	0,78
22	-58,2	23,4L	8,3		310	65	7,63	0,74
23	-58,2	23,6L	8,4		310	60	9,13	0,77
24	-58,3	21,1L			248	70		

Tabela 2. Dados microtermométricos da amostra de veio de quartzo SZ-83B.

Número da inclusão	$T_f\text{CO}_2$ (°C)	$T_h\text{CO}_2$ (°C)	Densidade CO ₂ (g/cm ³)
1	-59,0	22,3	0,65
2	-59,0	20,4	0,67
3	-59,0	20,4	0,67
4	-58,9	20,6	0,67
5	-59,0	23,6	0,63
6	-59,0	21,3	0,66
7	-59,2	20,1	0,67
8	-58,6	20,5	0,67
9	-58,9	20,0	0,67
10	-59,0	21,2	0,66
11	-59,1	19,2	0,68
12	-59,1	19,6	0,67
13	-58,9	24,7	0,61
14	-58,9	27,2	
15	-59,0	24,3	0,62
16	-59,0	24,9	0,62
17	-59,0	24,3	0,62
18	-58,9	25,0	0,61
19	-58,8	23,5	0,63
20	-58,7	24,5	0,62

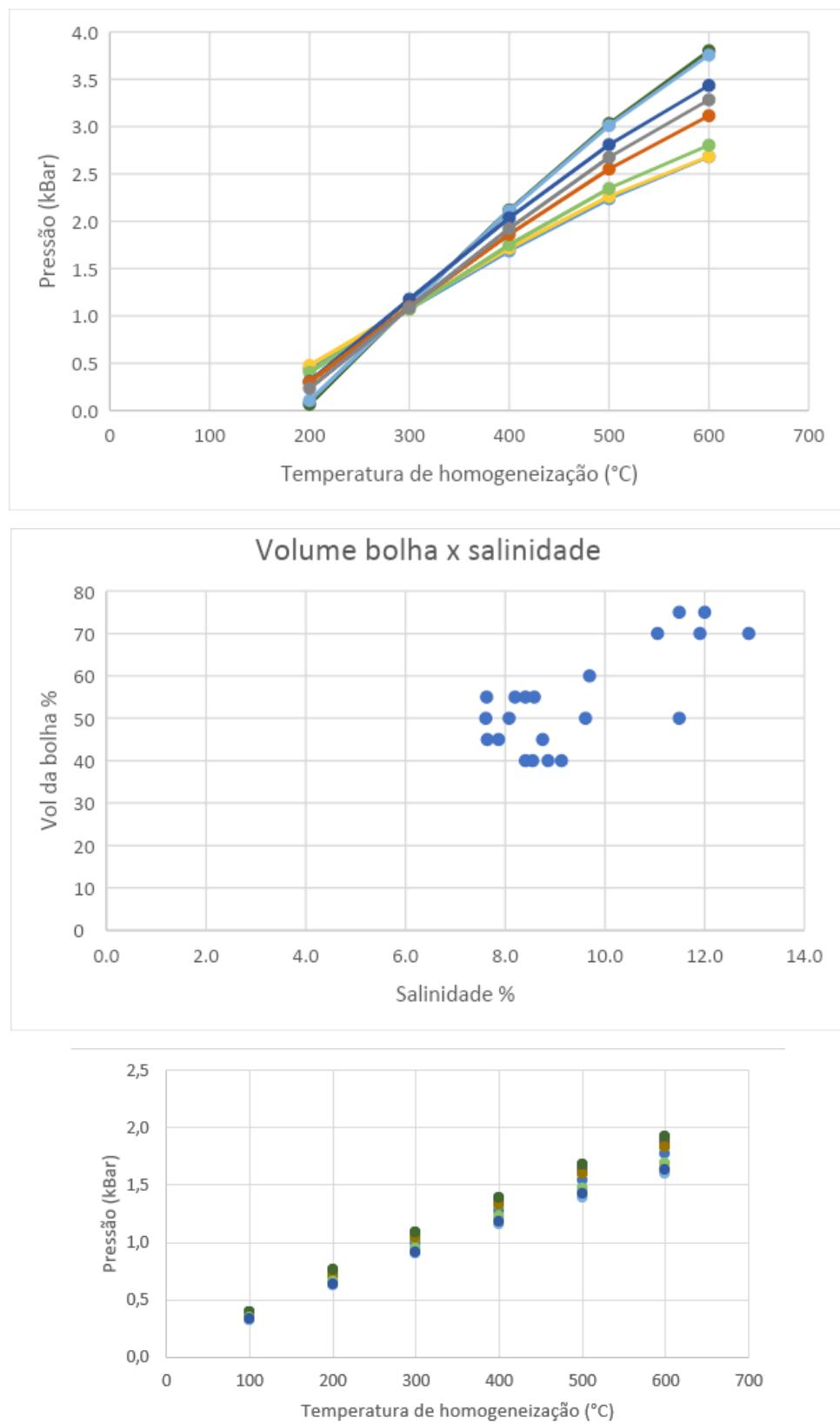


Figura 20 (a) Isócoras das inclusões aquocarbônicas (b) Gráfico de volume da bolha de carbono por salinidade (c) Isócoras das inclusões carbônicas.

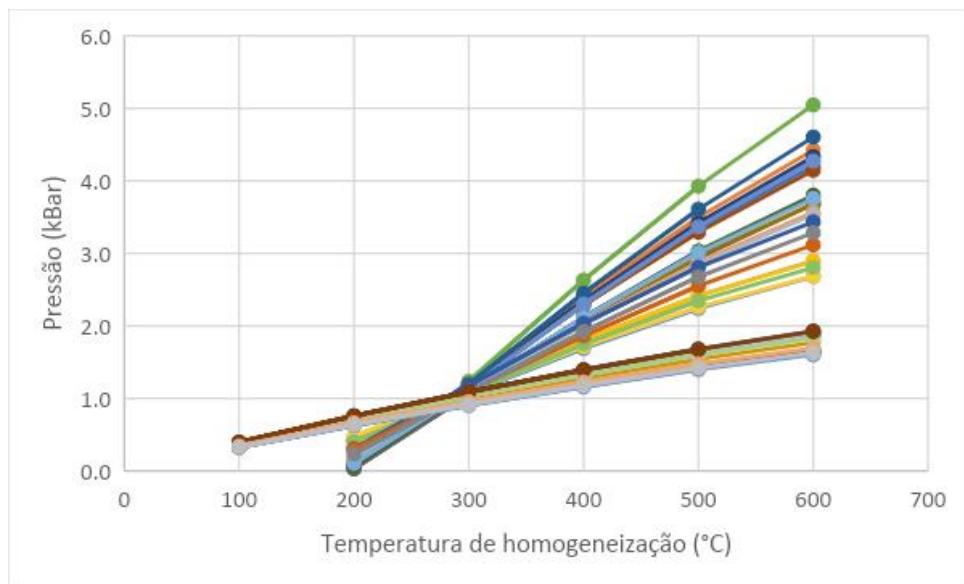


Figura 21 Cruzamento das inclusões carbonáticas (secundária) e aquocarbônicas (primárias).

6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÕES

6.1 Análises aerogeofísicas e suas implicações

As imagens de aerogamaespectrometria foram capazes de delimitar bem as distintas unidades geológicas presentes na região dos depósitos de ouro orogênico de Piririca e Ivaporunduva, no município de Eldorado Paulista. Essa análise separou bem os corpos graníticos próximos ao Grupo Votuverava, nos quais ao norte é limitado pelo Granito Agudos Grandes, e ao sudeste pelo Biotita Granito Porfirítico Cinza. A Formação Piririca, região de estudo deste projeto, diferencia-se das demais unidades metassedimentares por uma maior concentração de potássio como evidenciado no diagrama ternário K-Th-U. Essa maior concentração de potássio é bem delimitada de forma retilínea no ternário devido às Zonas de Cisalhamento Piririca e Ivaporunduva. A maior concentração de potássio na Formação Piririca pode ser resultado de alteração hidrotermal do tipo potássica ou, alternativamente, outro fator que pode explicar a maior concentração é que os sedimentos da Formação Piririca são mais ricos que os demais do Grupo Votuverava e que devido ao baixo metamorfismo foram preservados em forma de feldspato potássico.

As imagens de aeromagnetometria foram fundamentais para diferenciar os tipos de cristalização que ocorrem entre as zonas de cisalhamento analisadas e dentro das unidades do Grupo Votuverava, com enfoque na Formação Piririca. As zonas de cisalhamento Ribeira, Lancinha e Ivaporunduva são bem delimitadas quando aplicado o TILT com filtro regional aplicado. Quando retirado o filtro regional outro lineamento é observado um ao meio da

Formação Piririca, não na Zona de Cisalhamento Piririca onde era esperado. A causa disso pode ser devido à baixa cristalização de magnetita na Zona de Cisalhamento Piririca em relação as demais zonas de cisalhamento na região. Entretanto, é visível a diferença entre como se apresenta as anomalias magnéticas entre o centro da Formação Piririca e a Zona de Cisalhamento Ivaporunduva, como observado no sinal analítico. Tal fato pode ser inferido como resultado de diferentes fontes das magnetitas e de graus distintos de deformação, enquanto na Zona de Cisalhamento Ivaporunduva pode ser advindo de fluxo de fluidos no centro a partir de magnetitas primárias em metabasitos posteriormente deformados.

Na bibliografia os depósitos minerais na folha Eldorado Paulista 1:100.000 se encontram principalmente na Suíte Intrusiva de Jacupiranga (depósito de intrusão alcalina) e depósitos do tipo ouro orogenético nas zonas de cisalhamento Piririca e Ivaporunduva. Uma das razões pelo qual essas duas zonas de cisalhamento podem ser mais férteis em minerais de minério é representado na figura 8a em que foi aplicado redução ao polo com filtro gaussiano regional. Todavia, como observado em todas as análises de aeromagnetometria, a Zona de Cisalhamento Ivaporunduva contém maior fonte de anomalias magnéticas, resultando em um maior potencial para estudos posteriores na área de geologia econômica.

A diferença entre as zonas de cisalhamento em questão de anomalias magnéticas pode ser dada por algumas hipóteses, dentre elas o ângulo entre os esforços com a zona de cisalhamento. Isso pode desenvolver uma maior quantidade do comportamento cíclico de uma zona de cisalhamento em relação à outra (devido maior pressão causada pelos esforços). Quanto maior o ângulo entre o σ_1 com a parede da zona de cisalhamento, maior é o tempo de residência dos fluidos devido à dificuldade de reativação friccional, e maior será o fluxo em poucos eventos sísmicos, quando a pressão de fluidos supera valores litostáticos e de resistência ao cisalhamento das rochas.

Outra situação que pode ser postulada nessa diferenciação entre as zonas de cisalhamento que delimitam a Formação Piririca, é que houve uma diferenciação de fluidos entre as duas zonas de cisalhamento. Caso os fluidos fossem diferentes entre si, um pode ter carregado consigo maior quantidade de elementos que precipitaram a magnetita e outros minerais de minério. Outra hipótese é a proximidade entre a Zona de Cisalhamento Piririca com os granitos Córrego Arrelá e Agudos Grandes, os quais podem ter fornecido fluidos magmáticos que percolaram as referidas zonas. Pode se considerar também que a Zona de Cisalhamento Ivaporunduva foi percolada por fluidos metamórficos que remobilizaram elementos de rochas básicas e calcissilicáticas associadas à unidade, o que encontra evidência nas inclusões fluidas estudadas neste trabalho.

6.2 Análise estrutural e implicações geotectônicas

Em complemento com os dados de aerogeofísicos realizados, os dados de campo demonstram a diferenciação entre as zonas de cisalhamento e a distinta formação de veios e sua composição. Ocorrem três famílias de veios: (1) A maioria estando paralelo à foliação milonítica; (2) Veios sub-verticais perpendiculares à foliação principal no qual a maioria é de composição carbonática; (3) Veios sub-horizontais com leve mergulho para SW. Essas três famílias resultam em no mínimo dois regimes de esforços distintos entre si, em que uma o σ_1 é próximo à perpendicular da foliação milonítica, em que resulta em uma fase transpressiva; a outra o σ_1 é sub-paralelo à foliação milonítica, formando assim uma fase transcorrente. A partir das análises de campo a primeira família de esforços veio anterior à segunda.

Quando comparado com a tectônica, uma interpretação plausível para esses regimes de esforços é que o primeiro foi gerado a partir da transpressão principal que ocorre na região em que σ_1 é direcionado na horizontal em direção NW-SE. O segundo regime de esforços pode ser atuante mais localmente em que seja um resultado de um sistema transpressional particionado relacionado à evolução da Zona de Cisalhamento Ribeira (Faleiros 2003). Neste molde, as zonas de cisalhamento Ivaporunduva e Piririca poderiam ter sido formadas inicialmente em forma de empurrões e posteriormente reativadas a partir de esforços secundários advindos de esforços secundários da formação da Zona de Cisalhamento Ribeira. Nessa ideia ocorreu apenas um evento tectônico progressivo em que sua evolução pode ser similar àquelas da Zona de Cisalhamento Figueira e Agudos Grandes (Fig. 22).

6.3. Metamorfismo e sua trajetória P-T-t

As fases deformacionais na evolução cinemática das unidades geológicas da região foram contemporâneas à evolução metamórfica. Isso é bem representado na foliação milonítica e formação dos minerais metamórficos, como biotita e clorita nas rochas metassedimentares e quanto ao talco nas rochas calcissilicáticas. As paragêneses de ambos os litotipos analisados indica um pico metamórfico entre as zonas da clorita e da biotita, com temperatura entre 400 e 500 °C. Considerando dados regionais de pressão ao redor de 5-6 kbar estimou-se um fluido de no mínimo 40% de sua composição como água para as rochas calcissilicáticas. A temperatura obtida no pico metamórfico a partir das paragêneses das amostras condizem com a recristalização dos grãos de quartzo predominantemente por rotação de subgrão, também compatíveis com temperatura entre 400 e 500 °C.

As inclusões fluidas dominantes registram uma composição próxima àquela do fluido que possibilitou o metamorfismo das rochas calcissilicáticas, uma proporção de 40:60 de CO₂ para H₂O. Ao aplicar as isócoras das inclusões primárias aquocarbônicas conjuntamente com as primárias carbônicas resultaram em cruzamento em torno de 240-300 °C e 0,8-1,2 kbar.

Somando os dois dados foi possível traçar a trajetória de pressão e temperatura no retrometamorfismo da rocha, descrito na figura 23.

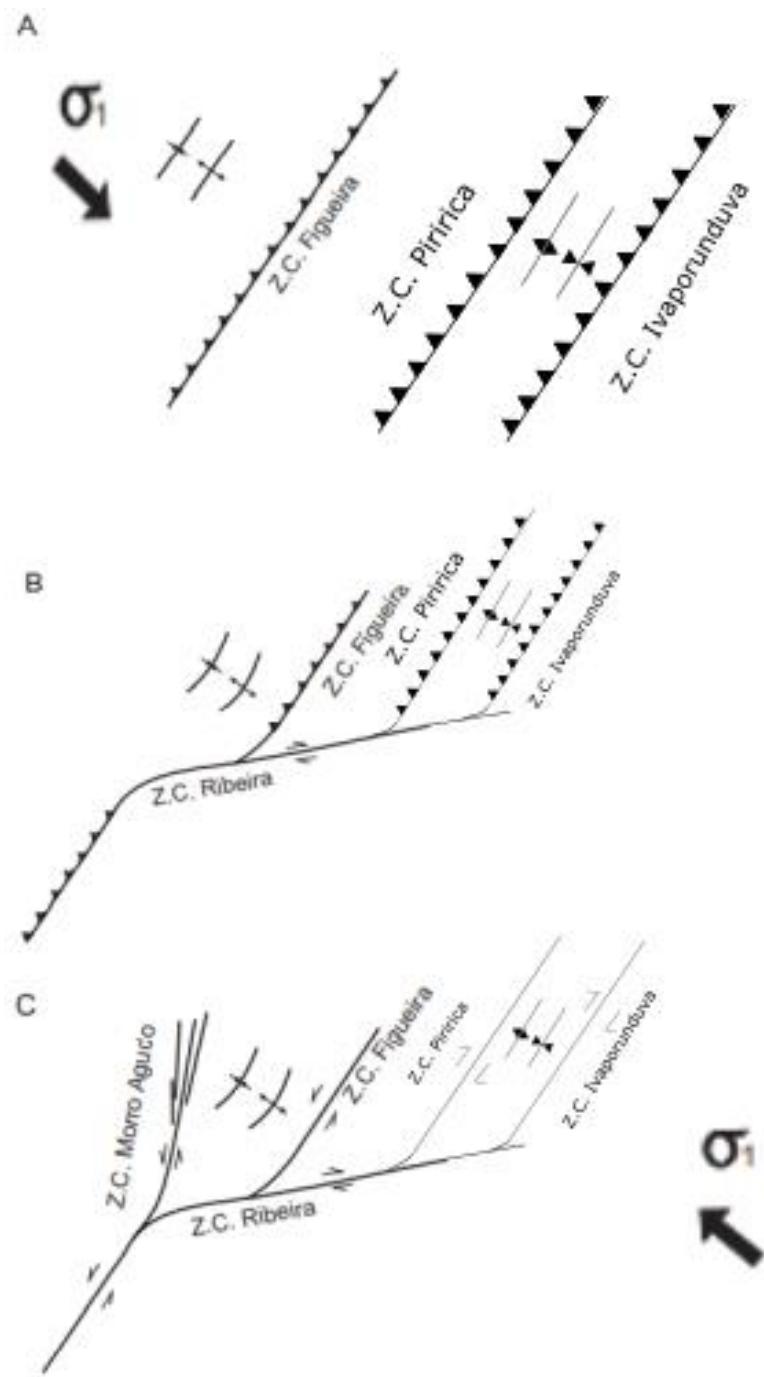


Figura 22. Modelo tectônico do desenvolvimento das zonas de cisalhamento da Faixa Ribeiro meridional, modificado de Faleiros 2003 (A) episódio compressivo caracterizado por empurrões seguidos de dobramentos. (B) instalação de regime transcorrente com geração das falhas ENE. (C) reativação direcional das falhas NE e geração das falhas transcorrentes NNE.

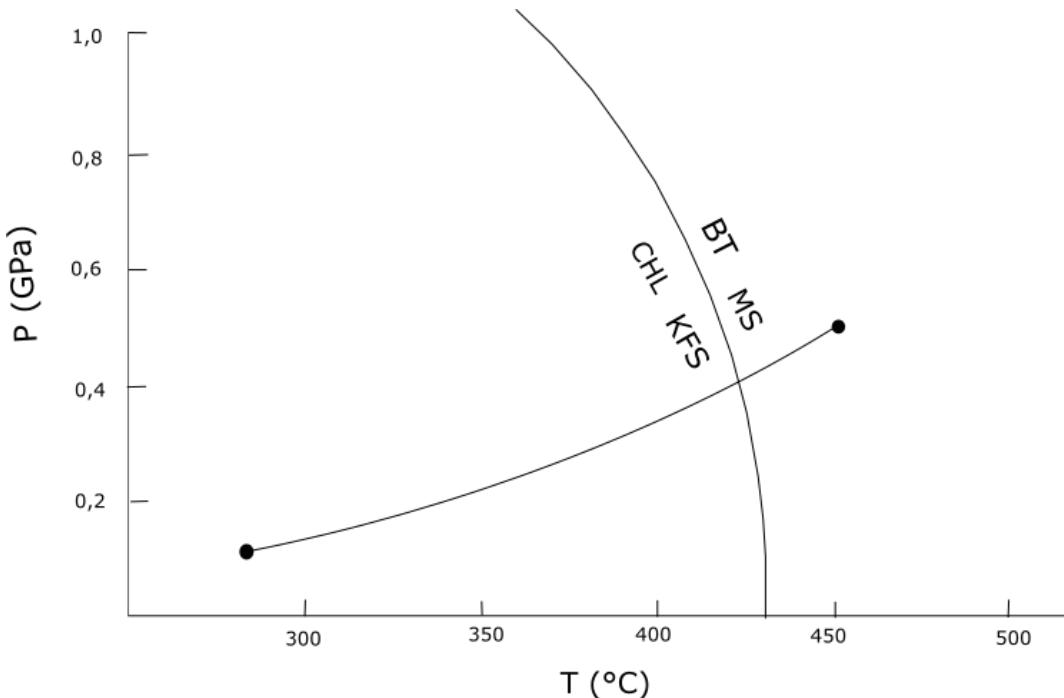


Figura 23. Trajetória P-T-t obtida na fase de retrometamorfismo com o limite da reta univariante limite da reação $\text{Chl} + \text{Kfs} \rightarrow \text{Bt} + \text{Ms}$.

Salienta-se que o veio em que foi estudado e analisado as inclusões fluídas é de composição quartzosa do grupo de veios paralelos à foliação milonítica (grupo 1). Essa medida de temperatura e pressão adquirida pelo cruzamento das isócoras não significa que todos os veios da região terão as mesmas características. Entretanto, ele pode ser utilizado como outras ferramentas, como comparativo entre as famílias de veios, caso os veios sub-horizontais ou as perpendiculares fornecerem outros resultados será possível detalhar melhor a trajetória retrometamórfica.

6.4 Percolação de fluido e alteração hidrotermal

Os dados obtidos, como flutuabilidade da pressão, se encaixam no mecanismo de bombeamento sísmico (Sibson et al., 1975) ou comportamento falha-válvula (Sibson et al., 1988). Neste processo cíclico de fraturamento e precipitação mineral, as descontinuidades são caminhos pelo qual os fluidos podem percolar e precipitar minerais de bens econômico. De acordo com Silva & Câmara (1990) as mineralizações são epigenéticas, ocorrem de forma estruturalmente controlada por zona de cisalhamento destral e associadas a veios de quartzo sulfetados. Os dados de inclusões fluídas obtidas são similares com aqueles descritos por Nogueira (1990) em que a salinidade é relativamente baixa de até 13 % em peso NaCl_{eq} , o teor de CO_2 é elevado variando próximo a 40% do fluido e a temperatura de deposição é

média, entre 240-300 °C. Esses dados são compatíveis com depósitos de ouro do tipo orogênico.

Além dos dados obtidos através da microtermometria, foi evidenciado um metamorfismo de fácies xisto verde nas rochas encaixantes, o que também corrobora com tal interpretação. Finalmente, as alterações hidrotermais observadas em campo e lâminas petrográficas são majoritariamente controladas por veios e vênulas, tanto na borda dessas estruturas quanto inteiramente composto de minerais de alteração, e por vezes são disseminadas na matriz. Quando zonada, a alteração se dá por clorita em suas bordas e no centro por quartzo e calcita, o perfil das alterações segue o esperado para alterações hidrotermais de depósitos do tipo ouro orogênico (Fig. 24)

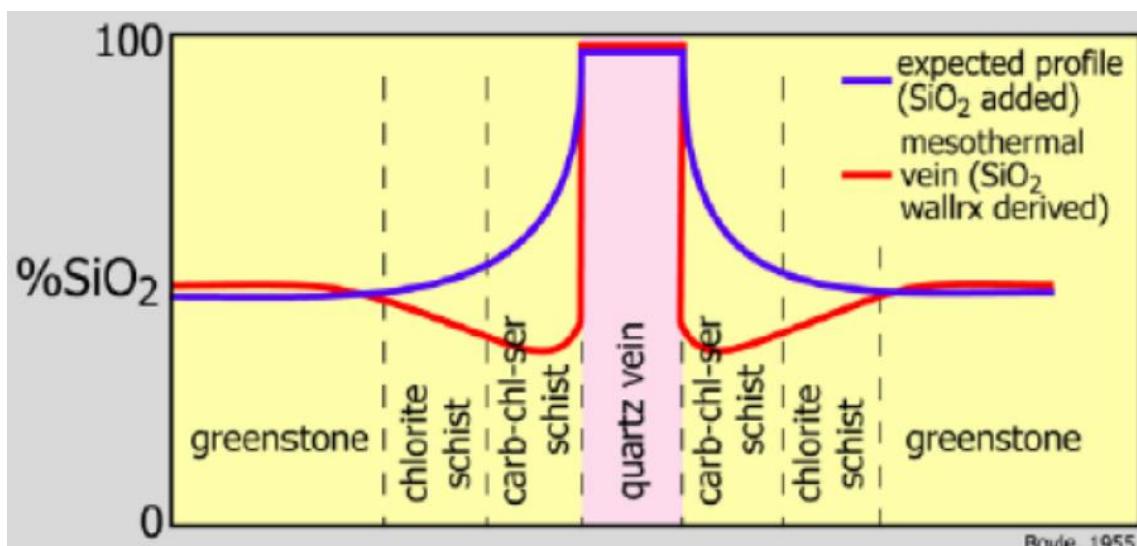


Figura 24. Modelo de zoneamento hidrotermal esperado em depósito de ouro orogenético (Boyle 1955)

7. CONCLUSÕES

A Formação Piririca está situada entre duas zonas de cisalhamento, Piririca e Ivaporunduva, e contém maior quantidade de potássio e anomalias magnéticas do que as demais formações do Grupo Votuverava. Dentro da Formação Piririca observa-se uma concentração de anomalias magnéticas no centro da unidade principalmente em corpos maficos e calcissilicáticos, e anomalias magnéticas na Zona de Cisalhamento Ivaporunduva em detrimento da Zona de Cisalhamento Piririca. Tal fato conota cristalização de minerais magnéticos superior na Zona de Cisalhamento Ivaporunduva e um maior potencial de exploração.

A geologia da Faixa Ribeira Meridional contém diversas zonas de cisalhamento, de direção majoritariamente NE-SW, relacionados a uma tectônica Brasiliiana em regime transcorrente a transpressional. Essas estruturas foram reativadas, ocasião em que ocorreu fluxo de fluidos durante o estágio de exumação da rocha encaixante. Entretanto, salienta-se que as descontinuidades secundárias e terciárias são mais prováveis da ocorrência da mineralização de ouro em zonas de cisalhamento (Bierlein 2006). Em decorrência disso, as zonas de cisalhamento Piririca e Ivaporunduva são potenciais, uma vez que elas foram formadas a partir da zona de cisalhamento Ribeira (Perrota 1996, Faleiros 2003)

Em amostra de campo observou-se três famílias principais de veios, em que os veios extensionais subverticais são anteriores aos sub-horizontais. Os esforços formadores da primeira família são compatíveis com o esforço principal da região em que σ_1 tem orientação NW-SE. A segunda família de veios extensionais pode ser explicada por esforços posteriores durante a formação da Zona de Cisalhamento Ribeira. Os veios analisados são majoritariamente ataxiais de textura blocada e contêm alteração hidrotermal com cloritização.

O metamorfismo das amostras de rochas calcissilicáticas e metassedimentares, bem como a microtectônica em quartzo, apontam para um metamorfismo de fácies xisto verde intermediário. Além disso, foi possível interpretar o retrometamorfismo como horário e sua inclinação, a partir do cruzamento de isócoras obtidas das inclusões fluidas. Este ponto de intersecção contém flutuabilidade de pressão acoplada, um critério necessário para a existência do sistema falha-válvula.

As inclusões fluidas são aquocarbônicas com proporção média de 60:40 de água com CO₂, são evidentes dois grupos quanto a salinidade, um de salinidade em volta de 12%, com maior densidade e outro de 8% com menor densidade. A temperatura obtida a partir do cruzamento das isócoras identifica condições e 240-300 °C e 0,8-1,2 kbar no momento de aprisionamento das inclusões. Todos esses dados de inclusões fluidas são bons indicativos de fluidos potenciais para transporte e deposição de minério em depósito ouro orogênico.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bakker, R.J., 1997, Clathrates: Computer programs to calculate fluid inclusion V-X properties using clathrate melting temperatures: Computers and Geosciences, v. 23, p. 1–18.
- Bakker, R.J., 1999. Adaptation of the Bowers and Helgeson (1983) equation of state to the H₂O –CO₂ –CH₄ – N₂ – NaCl system. Chem. Geol. 154, 225 – 236

- Bakker, R.J., and Brown, P.E., 2003, Computer modelling in fluid inclusion research: Mineralogical Association of Canada Short Course Series, v. 32, p. 175–212.
- Bierlein, F.P., Murphy, F.C., Weinberg, R.F., Lees, T., 2006. Distribution of orogenic gold deposits in relation to fault zones and gravity gradients: targeting tools applied to the Eastern Goldfields, Yilgarn Craton, Western Australia. *Mineralium Deposita* 41, 107–126.
- Bodnar R.J. 2003. Capítulo 1: Introduction to fluid inclusions. In: Samson I., Anderson A., Marshall D. eds. 2003. *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation*. Canadá, Ottawa: Mineral. Assoc. of Canada, p. 1-8. (Short Course Series, 32.)
- Bons, P.D., Montenari, M., 2005. The formation of antitaxial calcite veins with well developed fibres, Oppaminda Creek, South Australia. *Journal of Structural Geology* 27, 231e248.
- Boullier, A.M., Robert, F., 1992. Paleoseismic events recorded in Archaean gold-quartz vein networks, Val d'Or, Abitibi, Quebec, Canada. *Journal of Structural Geology* 14: 161-179.
- Boyle, R.W., 1995. The geochemistry and origin of the gold-bearing quartz veins and lenses of the Yellowknife Greenstone Belt: *Econ. Geol.* 50:51-66
- Camara, M.M. 1992. Classificação das principais mineralizações auríferas primárias do Vale do Ribeira. In: CONGR. BRAS. GEOL., 37, São Paulo, 1992. Bol. res. exp. ... São Paulo, SBG, 1992, v.1, p.236.
- Campanha, G.A.C., (Tese de Livre-Docência) 2002. O papel do sistema de zonas de cisalhamento transcorrentes na configuração da porção meridional da Faixa Ribeira. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 105 pp., 5 anexos
- Campanha, G.A.C., Brito Neves, B.B., 2004. Frontal and oblique tectonics in the Brazilian shield. *Episodes* 27, 255–259.
- Campanha, G.A.C., Faleiros, F.M., Basei, M.A.S., Tassinari, C.C.G., Nutman, A.P. & Vasconcelos, P.M., 2015. Geochemistry and age of mafic rocks from the Votuverava Group, southern Ribeira Belt, Brazil: evidence for 1490 Ma oceanic back-arc magmatism. *Precambrian Research*, 266, 530– 550.
- Candia, M.A.F.; Szabó, G.A.J.; Del Lama, E.A., 2003 – Petrologia Metamórfica: Fundamentos para a Interpretação de Diagramas de Fase. EDUSP, São Paulo. 190 p. Cap. 8.
- CASTRO, C. P. de. Microestruturas e textura de equilíbrio em quartzo recristalizado. 2007. 142 f. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Cordel, L., Grauch V.J.S. 1985. Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan basin, New Mexico. SEG. p. 181-197.

- Cox, S.F., 1995. Faulting processes at high fluid pressures: An example of fault-valve behavior from the Wattle Gully Fault, Victoria, Australia. *Journal of Geophysical Research*, 100/n.o B7, 12841- 12859.
- Duan, Z., Møller, N., Weare, J.H., 1995. Equation of state for the NaCl – H₂O –CO₂ system: prediction of phase equilibria and volumetric properties. *Geochim. Cosmochim. Acta* 59, 2869 – 2882.
- Duschek, W., Kleinrahm, R., Wagner, W., 1990. Measurements and correlation of the (pressure, density, temperature) relation of carbon dioxide: II. Saturated-liquid and saturated-vapour densities and the vapour pressure along the entire coexistence curve. *J. Chem. Thermodyn.* 22, 841 – 864.
- Dugdale, A.L. and Hagemann, S.G., 2001. The Bronzewing lode-gold deposit, Western Australia: P- T-X evidence for fluid immiscibility caused by cyclic decompression in goldbearing quartz- veins. *Chemical Geology* 173: 59-90.
- Faleiros, F.M., 2003. Zona de Cisalhamento Ribeira: deformação, metamorfismo e termobarometria de veios sin-tectônicos. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 146 pp.
- Faleiros, F. M., Campanha, G. A. C., Bello, R.M.S., Fuzikawa, K., 2007. Fault–valve action and vein development during strike–slip faulting: An example from the Ribeira Shear Zone, Southeastern Brazil. *Tectonophysics* 438: 1-32.
- Faleiros, F.M., Pavan, M., 2013. Geologia e Recursos Minerais da Folha Eldorado Paulista – SG.22- X-B-VI, escala 1:100.000, Estados de São Paulo e Paraná. Serviço Geológico do Brasil – CPRM, Programa Geologia do Brasil – Levantamentos Básicos. 128 p. ISBN 978-85-7499-174-0.
- Faleiros, F.M., Campanha, G.A.C., Pavan, M., Almeida, V.V., Rodrigues, S.W.O., Araújo, B.P., 2016. Short-lived polyphase deformation during crustal thickening and exhumation of a collisional orogen (Ribeira Belt, Brazil). *Journal of Structural Geology* 93: 106-130.
- S. Fuchs, A.E. William-Jones, W.J. Przybylowicz 2016 The origin of the gold and uranium ores of the Black Reef Formation, Transvaal Supergroup, South Africa *Ore Geol. Rev.*, 72, pp. 149-164
- Gratier, J-P., Gueydan, F., 2007 Deformation in the presence of fluids and mineral reactions: effect of fracturing and fluid-rocks interaction on seismic cycle, in: *Tectonic Faults, agents of change on a dynamic earth*, edited by M.R. Handy, G. Hirth, N. Hovius, Dahlem Workshop, The MIT Press, Cambridge, Mass., USA. pp. 319-356.

- Goldstein R.H. 2003. Capítulo 2: Petrographic analysis of fluid inclusions. In: Samson I., Anderson A., Marshall D. eds. 2003. Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation. Canadá, Ottawa: Mineral. Assoc. of Canada, p. 9-53. (Short Course Series, 32.)
- Hammond N.Q. Robb L. Foya S. Ishiyama D., 2011, Mineralogical, fluid inclusion and stable isotope characteristics of Birimian orogenic gold mineralization at the Morila mine, Mali, West Africa: *Ore Geology Reviews*, v.39, p. 218–229.
- Heilbron, M., Pedrosa-Soares,A.C., Campos Neto, M.C., Silva, L.C., Trouw, R.A.J., Janasi, V.A., 2004. Província Mantiqueira. In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R., Brito-Neves, B.B. (Eds.), *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida.* , pp. 203–234.
- Henderson, I.H.C., MacCaig, A.M., 1996. Fluid pressure and salinity variations in shear zone-related veins, central Pyrenees, France: implications for the fault-valve model. *Tectonophysics* 262: 321-348.
- Montomoli, C., Ruggieri, G. Boiron, M.C., Cathelineau, M., 2001. Pressure fluctuation during uplift of the Northern Apennines (Italy): a fluid inclusion study. *Tectonophysics* 341: 121-139.
- Nogueira S.A.A., 1990. Estudo das mineralizações filoneanas auríferas do depósito de Piririca, Vale do Ribeira SP São Paulo, IGC/USP, Dissertação de Mestrado.
- Parry, W.T., Bruhn, R.L., 1990. Fluid pressure transients on seismogenic normal faults. *Tectonophysics* 179: 335-344.
- Parry, W.T., Hedderly-Smith, D., Bruhn, R.L., 1991. Fluid inclusions and hydrothermal alteration on the Dixie Valley fault, Nevada. *Journal of Geophysical Research* 96: 19733-19748.
- Perrota, M.M. 1996. Potencial aurífero de uma região no Vale do Ribeira, São Paulo, estimado por modelagem de dados geológicos, geofísicos, geoquímicos e de sensores remotos num sistema de informações geográficas. São Paulo, 149p. (Tese de Doutoramento, Inst. Geoc. Univ. S. Paulo).
- RAMSAY,J.G. & HUBER,M.I. 1983. The techniques of modern structural geology: strain analysis. Acad. Press, 278 pp, N. York.
- Ramsay, J.G. and Huber, M.I., 1987. The Techniques of Modern Structural Geology, Vol. 2: Folds and Fractures. Academic Press, London.

- Robert, F., Boullier, A-M and Firdaous, K., 1995. Gold-quartz veins in metamorphic terranes and their bearing on the role of fluids in faulting. *Journal of Geophysical Research*, 100 (B7), 12861- 12879.
- Roedder, E., 1984, Fluid inclusions: *Reviews in Mineralogy*, v. 12, 644 p.
- Sadowski, G.R., 1991. A megafalha de Cubatão no Sudeste Brasileiro. *Bol. IG-usp, Sér. Cient.* 22, 15-28.
- Sibson, R. H., Moore J. and Rankin, A.H., 1975. Seismic pumping - a hydrothermal fluid transport mechanism, *Journal Geol. Soc. London* 131: 653-659.
- Sibson, R.H., Robert, F. and Poulsen, K.H., 1988. High-angle reverse faults, fluid pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits. *Geology* 16: 551-555
- Span, R., Wagner, W., 1996. A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100 K at pressures up to 800 MPa. *J. Phys. Chem. Ref. Data* 25, 1509 – 1596
- Turner, F. J. & Weiss, L. E. 1963. *StructuralAnalysis of Metamorphic Tectonites*. McGraw-Hill, New York.
- Winkler, H.G.F., 1979. *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*, fifth ed. Springer-Verlag, New York. 348pp.
- Zhang, Y.G., Frantz, J.D., 1987. Determination of the homogenization temperatures and densities of supercritical fluids in the system NaCl – KCl –CaCl₂ – H₂O using synthetic fluid inclusions. *Chem. Geol.* 64, 335 – 350.