

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

**Caracterização da alteração hidrotermal  
micácea do tipo greisen e dos reequilíbrios  
de baixa temperatura em áreas graníticas:  
o exemplo do Distrito Estanífero de  
Encruzilhada do Sul, RS**

**Roberto dos Santos Teixeira**

Orientador: **Prof. Dr. José Carlos Frantz**

Comissão Examinadora: **Prof. Dr. Artur Cezar Bastos Neto**  
**Prof. Dr. Farid Chemale Júnior**  
**Prof. Dr. Vitor Paulo Pereira**

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

Porto Alegre – 2005

## **Agradecimentos**

Ao finalizar o presente trabalho queremos agradecer o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo auxílio financeiro que permitiu a realização da parte analítica de química mineral e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio grande do Sul – FAPERGS, pelo suporte financeiro para as etapas de campo realizadas no Distrito Estanífero de Encruzilhada do Sul.

Agradecemos ao Instituto de Geociências pela infraestrutura disponibilizada para a realização das etapas de preparação de amostras, tratamento de dados e pelo aprendizado em geologia.

Ao professores, técnicos e colegas que de alguma forma colaboraram para a realização da presente dissertação de mestrado queremos manifestar nossos agradecimentos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geociências nossos agradecimentos pela oportunidade de realizar esse trabalho.

Ao orientador, professor José Carlos Frantz, os agradecimentos pelo acompanhamento, apoio e orientação em todas as etapas de campo e de laboratório para obtenção dos dados necessários para a conclusão da presente dissertação.

À Dra. Juliana Charão Marques pelo apoio e acompanhamento nas etapas de campo e de amostragem nas minas de estanho do distrito.

Ao professor André Sampaio Mexias pelo apoio e orientação durante as etapas de preparação e tratamento de amostras para análises por Difractometria de Raios-X e Microscopia Eletrônica de Varredura.

Ao técnico Onésio do Laboratório de Microsonda Eletrônica do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília pelo apoio durante a realização das análises de micas.

À Revista Pesquisas em Geociências e a sua Comissão Editorial pela oportunidade de apresentar a presente Dissertação de Mestrado na forma de artigo científico.

## Resumo

A alteração hidrotermal que acompanham a mineralização de estanho no Distrito Estanífero de Encruzilhada do Sul tem relação espacial com intrusões graníticas e é o seu mais importante controle de ocorrência. Os granitos aos quais estão associadas as principais zonas de alteração hidrotermal estão incorporados na Suíte Intrusiva Cordilheira e na Suíte Intrusiva Campinas.

Zonas de alteração hidrotermal com mica branca, turmalina, caolinita e cassiterita indicam intensa circulação de fluidos em um amplo intervalo de temperatura. As zonas de alteração micáceas acompanham veios de quartzo e contêm cassiterita. As zonas com alteração a caolinita são em geral estéreis e podem representar alteração hidrotermal de muito baixa temperatura ou mesmo alteração intempérica.

O detalhamento das zonas de alteração hidrotermal permite reconhecer a presença de paragêneses de alta e de baixa temperatura. A primeira é constituída por zonas micáceas e zonas turmalinizadas, enquanto a segunda está representada por uma alteração onde domina a presença das zonas argilizadas.

A análise dos fluidos associados aos produtos de alteração hidrotermal nas três principais minas do Distrito, Mina Cerro Branco, Mina Campinas e Mina Tabuleiro indicou a presença de fluidos aquosos e fluidos aquo-carbônicos no processo gerador da alteração hidrotermal. As temperaturas de homogeneização das fases fluidas variam em um amplo intervalo desde 440°C até 120°C.

As zonas de alteração hidrotermal que acompanham os corpos graníticos da Suíte Intrusiva Cordilheira apresentam distribuição pervasiva por centenas de metros com predomínio de alterações contendo mica branca e turmalina. As zonas de alteração hidrotermal que acompanham os corpos da Suíte Intrusiva Campinas são limitadas à cúpulas e zonas de contato das injeções graníticas, com predomínio de alteração micácea, com veios de quartzo associados, e zonas argílicas subordinadas.

As micas brancas associadas a *greisen* e a zonas de alteração micácea, geradas tanto sobre granitóides da Suíte Intrusivas Cordilheira quanto da Suíte Intrusiva Campinas, variam entre muscovita e fengita, com predomínio do politipo 2M<sub>1</sub>. O politipo 2M<sub>1</sub> representa o maior volume de micas geradas durante a alteração hidrotermal. Politipo 3T também ocorre mas é menos freqüente e representa a formação de micas brancas sobre restos de biotita durante a formação de *greisens*.

A composição de mica branca associada às zonas de alteração hidrotermal é marcada por

aumento nos valores de Si e de Al que correspondem tanto a substituições tetraédricas quanto octaédricas. A mica branca hidrotermal gerada sobre granitos da Suíte Intrusiva Cordilheira tem aumentos do número de cátions de Si por unidade de fórmula, no sítio IV, acompanhados por um pequeno aumento de Al<sup>VI</sup> sem variação significativa do Al total. No caso da mica branca gerada sobre granitóides da Suíte Intrusiva Campinas os aumentos de Si são acompanhados por aumentos de Al<sub>tot</sub> e de Al<sup>VI</sup> com mesma magnitude.

As zonas de alteração argílica estão presentes de forma importante apenas nas zonas de cúpula das intrusões graníticas da Suíte Intrusiva Campinas, com distribuição ao longo das margens de veios de quartzo e *greisen* em *stockwork*. O detalhamento das zonas argílicas indicou a presença de caolinita, haloisita 7Å e haloisita 10Å, sem a presença de dickita.

Os processos hidrotermais que atuaram no Distrito Estanífero de Encruzilhada do Sul ocorreram em uma faixa de temperatura de cerca de 450°C até cerca de 120°C. A alteração argílica foi possivelmente iniciada sob a ação dos fluidos hidrotermais de mais baixa temperatura, com o volume final da alteração argílica sendo gerado por fluidos intempéricos que atuaram sobre as zonas de alteração argílica hidrotermal.

## Abstract

The hydrothermal alteration that hosts the tin mineralization in the Encruzilhada do Sul's Tin District constitutes the main pathfinder of the ore. The alteration is spatially related with granitic intrusions from the Cordilheira Intrusive Suite and the Campinas Intrusive Suite. The hydrothermal alteration zones are characterized by white mica, tourmaline, kaolinite and cassiterite. This mineralogical assemblage indicates high fluid circulation and large temperature range. The mica-rich alteration zones are cassiterite-rich and occur associated to quartz veins. The kaolinite-rich alteration zones are normally barren and possibly result from a very low temperature hydrothermal alteration or even from weathering.

The detailed description of hydrothermal alteration zones allows the recognition of high- and low-temperature paragenesis, characterized by distinctive mineralogy. The former is constituted by mica- and tourmaline-rich zones whilst the last is dominated by argillic zones.

The fluid analyses from the three main mines of the district, the Cerro Branco Mine, the Campinas Mine and the Tabuleiro Mine, revealed aqueous and aqueo-carbonic fluids related to the hydrothermal alteration process. The homogeneous temperatures of the fluid phases vary within a large range, from 440°C to 120°C.

The hydrothermal alteration zones that occur associated with granitic bodies from the Cordilheira Intrusive Suite show a pervasive distribution along hundreds of meters. White mica- and tourmaline-rich alterations predominate in these zones. The hydrothermal alteration zones that occur associated with granitic bodies from the Campinas Intrusive Suite are restricted to apical zones and contact zones. Mica-rich alteration associated with quartz-veins prevails in these bodies accompanying by minor argillic zones.

The white micas that occur associated to greisen and to mica-rich alteration zones from both intrusive suites (Cordilheira and Campinas) vary from muscovite to phengite. The 2M<sub>1</sub> polytype predominates and consists of the major volume of micas crystallized during the hydrothermal alteration process. The 3T polytype also occurs but is less abundant. The 3T polytype occurs when white mica replace biotite remains during greisens formation.

The white mica from hydrothermal alteration zones is characterized by increasing in Si and in Al, which correspond to both octahedric and tetrahedric substitutions. The

hydrothermal white mica from the Cordilheira Intrusive Suite has additional Si cations per formula unit, at IV site, followed by a minor increase of Al<sup>VI</sup> without significant change in total Al. In the case of the hydrothermal white mica from the Campinas Intrusive Suite, the increases of Si are followed by substantial increases of total Al and Al<sup>VI</sup>.

Significant argillic alteration zones occur only at apical intrusion zones from the campinas Intrusive suite. The argillic zones occur along the quartz vein margins and greisen from stockwork. The detailed description from the argillic zones allowed the identification of kaolinite, halloysite 7Å and halloysite 10Å. Dickite is absent.

The temperature range from the hydrothermal process that occurred in the Encruzilhada do Sul's Tin District varied from 450°C to circa 120°C. The argillic alteration possibly was initiated by the low temperature hydrothermal fluids. The final volume of argillic alteration was probably produced by weathering fluids that circulated in these previously hydrothermal argillic alteration zones.

## Índice

<b>Agradecimentos</b>	<b>i</b>
<b>Resumo</b>	<b>ii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iv</b>
<b>Carta da Revista Pesquisas em Geociências</b>	<b>vi</b>
<b>Índice</b>	<b>vii</b>
<b>Índice das Figuras</b>	<b>viii</b>
<b>Objetivos</b>	<b>1</b>
<b>Localização e Acesso da Área</b>	<b>1</b>
<b>Metodologia</b>	<b>3</b>
<b>Artigo</b>	<b>6</b>
<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>8</b>
<b>FLUIDOS HIDROTERMAIS</b>	<b>9</b>
<b>ZONAS DE ALTERAÇÃO HIDROTERMAL</b>	<b>12</b>
<b>Alteração Micácea</b>	<b>17</b>
<b>Alteração Argílica</b>	<b>23</b>
<b>CONCLUSÕES</b>	<b>30</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>31</b>
<b>Discussão Final</b>	<b>33</b>

## Índice das Figuras

<b>Figura 1</b> – TH de fases fluidas	<b>11</b>
<b>Figura 2</b> – <i>Greises</i> da Suíte Cordilheira	<b>13</b>
<b>Figura 3</b> – Turmalinitos bandados	<b>14</b>
<b>Figura 4</b> – <i>Stockwork</i> de quartzo com <i>greisens</i>	<b>15</b>
<b>Figura 5</b> – Zona argilizada	<b>16</b>
<b>Figura 6</b> – Mica branca em <i>greisens</i>	<b>18</b>
<b>Figura 7</b> – Substituições em micas brancas	<b>20</b>
<b>Figura 8</b> – Difrátogramas	<b>26</b>
<b>Figura 9</b> – Difrátogramas	<b>27</b>
<b>Figura 10</b> – Imagens BSE	<b>28</b>
<b>Tabela I</b> – Parâmetro b em micas brancas	<b>19</b>
<b>Tabela II</b> – Amostras detalhadas	<b>24</b>
<b>Tabela III</b> – Identificação de caolinitas	<b>25</b>

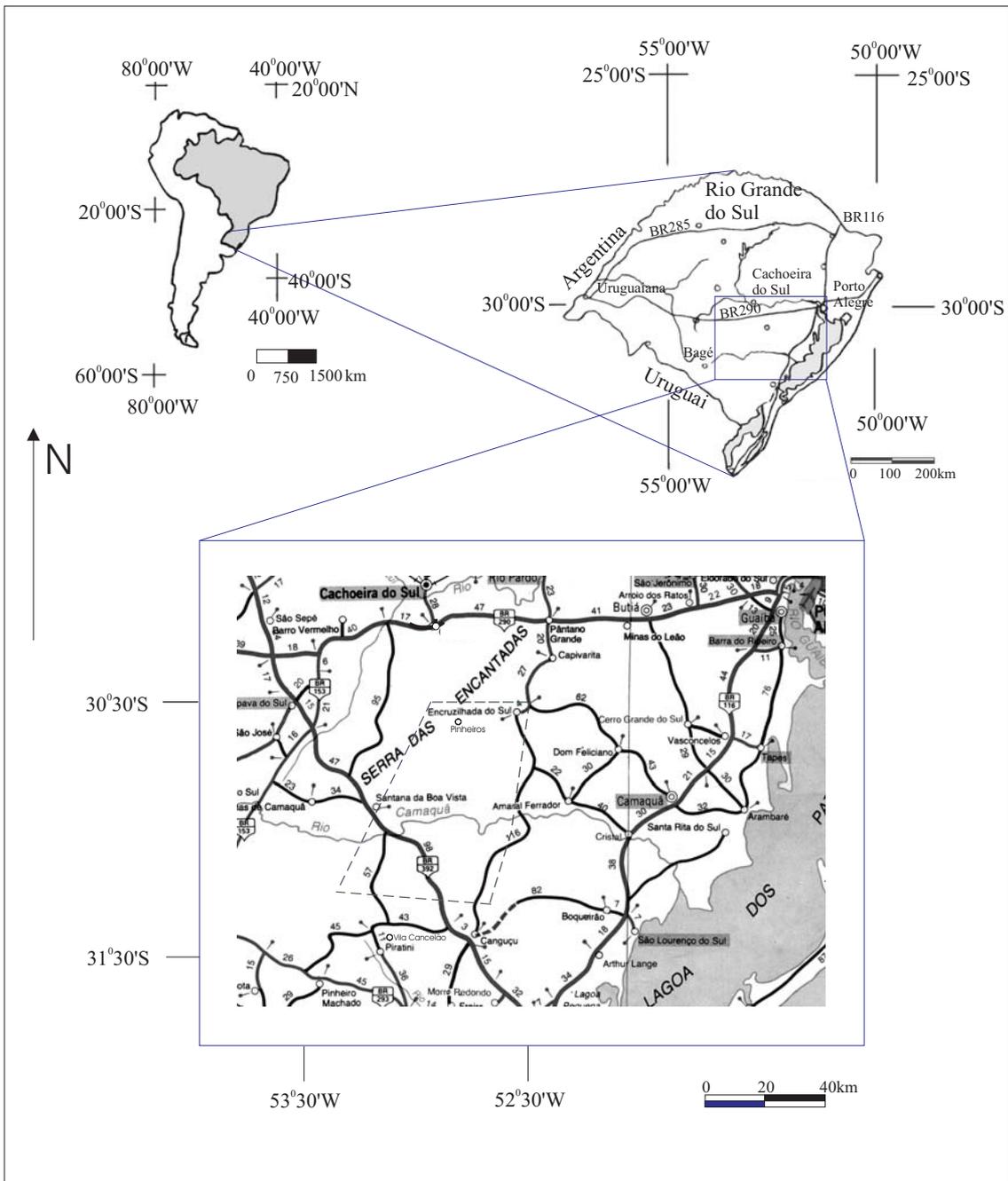
## **Objetivos**

O presente trabalho tem por objetivo principal a caracterização das zonas de alteração hidrotermal micáceas e argílicas geradas nas cúpulas e contatos de corpos graníticos das suítes intrusivas Cordilheira e Campinas, com o desenvolvimento de mineralizações de estanho. Foi parte integrante do presente estudo a caracterização petrográfica das zonas de alteração hidrotermal micácea e argílica descritas nas principais minas de estanho do Distrito Estanífero de Encruzilhada do Sul.

## **Localização e Acesso da Área**

A área de trabalho abrangeu parte do Distrito Estanífero de Encruzilhada do Sul, que está situado na região leste do Escudo Sul-rio-grandense, entre os municípios de Encruzilhada do Sul, Santana da Boa Vista e Canguçu. A área está situada na porção centro-norte da faixa granítica leste do Cinturão Dom Feliciano.

O acesso norte à área pode ser feito de Porto Alegre através da rodovia federal BR290 até a localidade de Pântano Grande e daí até Encruzilhada do Sul através de rodovia estadual. O acesso sul pode ser feito através das rodovias federais BR116 até Pelotas e BR392 até Santana da Boa Vista. As vias internas da área são de revestimento solto e com condições de tráfego durante todo o ano (ver mapa de acesso e localização do Distrito Estanífero de Encruzilhada do Sul).



Mapa de localização e acesso do Distrito Estanífero de Encruzilhada do Sul.

## Metodologia

A metodologia utilizada envolveu mapeamento e amostragem dos diferentes tipos de rochas hidrotermalizadas da área trabalhada e a definição das zonas de alteração hidrotermal locais associadas à circulação de fluidos e que condicionaram a formação da alteração hidrotermal que contém a mineralização de estanho do distrito e a zonalidade dessa alteração hidrotermal. Ênfase especial foi dada às zonas de cúpula e zonas de contato dos granitóides das suítes intrusivas Cordilheira e Campinas com suas encaixantes devido a estreita relação espacial existente entre estas unidades, a alteração hidrotermal e a mineralização de estanho no Distrito Estanífero de Encruzilhada do Sul.

Nas zonas de alteração hidrotermal foi realizada uma amostragem de detalhe em corpos de *greisen*, turmalinitos, veios de quartzo e zonas argilizadas com o objetivo de identificar possíveis variações na composição destes produtos de alteração hidrotermal entre as diferentes minas e os diferentes tipos de granitóides que atuaram como protólitos para a alteração hidrotermal.

Os dados de química mineral foram obtidos por microsonda eletrônica através de equipamento Cameca SX-50 do Laboratório de Microsonda Eletrônica do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília.

O feixe utilizado como padrão foi de 10 $\mu$  para todos os elementos analisados. O tempo de leitura para cada elemento foi de 10s, com uma corrente de 25nA e uma voltagem de 15kV. Para as análises consideradas no cálculo do número de cátions por unidade de fórmula foi levado em conta o limite de detecção de cada elemento segundo a seguinte relação:

$$N_P - N_B \geq 3N_B \quad \text{onde } N_P = \text{pico} \times \text{tempo} \text{ e } N_B = \text{pico}_B \times \text{tempo}$$

Os elementos analisados para micas brancas de alteração hidrotermal foram Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, Rb, Sr, Ba, Zn, Cs, F e Cl. A maior parte desses elementos não foi considerada para efeitos de cálculo de fórmula ou para definição de parâmetros de composição dado aos baixos valores obtidos durante a etapa analítica.

As micas brancas das zonas de alteração hidrotermal foram ainda analisadas para Li utilizando-se 1 grama de concentrado, fundido em 4 gramas de borato de Na e dissolvida por ataque ácido em 50ml de HCl 1N. A leitura dos valores foi obtida por ICP, situando-se sempre abaixo de 200ppm.

O cálculo do número de cátions por unidade de fórmula para as micas brancas foi feito com base a 22 átomos de oxigênio como normalização.

A determinação de politipos e do parâmetro b em micas brancas de zonas de alteração hidrotermal foi feita por Difractometria de Raios-X com radiação  $\text{CoK}\alpha$ , 30kV, 30mA e filtro de Fe. A determinação dos politipos foi feita em intervalo de varredura de  $21$  a  $41^\circ 2\theta$  e a da reflexão 060 de  $67$  a  $75^\circ 2\theta$ , com tempo de contagem de 4 segundos e degrau de varredura do goniômetro de  $0,01^\circ 2\theta$ .

As análises de Difractometria de Raios-X foram realizadas no Centros de Estudos em Petrologia e Geoquímica (CPGq) do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O equipamento utilizado foi um difratômetro SIEMENS-BRUKER-AXS D5000 com goniômetro  $\theta$ - $\theta$ .

A primeira identificação da fração argilosa das zonas de alteração hidrotermal foi feita em 48 amostras provenientes da amostragem das três principais minas trabalhadas e foram analisadas na forma do pó. Essas amostras brutas e a fração  $<2\mu\text{m}$  das mesmas foram analisada na forma orientada natural, saturadas com etileno-glicol e aquecida à  $550^\circ\text{C}$  durante 2 horas. A radiação utilizada foi  $\text{CoK}\alpha$ , 35Kv e 30mA.

A segunda identificação foi feita mediante a seleção de 8 amostras dentre as 48 iniciais. Essas amostras selecionadas foram analisadas em diferentes frações granulométricas, frações estas escolhidas em função da caracterização preliminar realizada com o apoio de microscopia eletrônica de varredura utilizando elétrons secundários.

Essas amostras foram analisadas na forma orientada natural, saturada com formamida e aquecidas à 550°C durante 2 horas. A radiação utilizada nesta seqüência analítica foi  $\text{CuK}\alpha$ , 40Kv e 25mA.

Após a identificação dos argilo-minerais do grupo das caolinitas as lamelas foram medidas objetivando o estudo por difratometria de raios X em diferentes frações, quando fosse o caso.

As 8 amostras selecionadas e detalhadas pela Difratometria de Raios-X também foram analisadas por Microscopia Eletrônica de Varredura na forma de elétrons secundários e elétrons retroespalhados.

A Microscopia Eletrônica de Varredura foi realizada com um equipamento JEOL JSM 5800 do Centro de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

O tratamento inicial foi feito com elétrons secundários para escolha das amostras mais representativas a serem detalhadas por Difratometria de Raios-X. Após esse detalhamento por difratometria, as amostras foram novamente submetidas a imageamento com Microscopia Eletrônica de Varredura desta vez utilizando elétrons retroespalhados para definição dos diversos tipos e arranjos morfológicos de argilo-minerais, em especial caolinitas, presentes nas zonas argilizadas da minas do Distrito Estanífero de Encruzilhada.

## Artigo

### **CARACTERIZAÇÃO DA ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL MICÁCEA DO TIPO GREISEN E DOS REEQUILÍBRIOS DE BAIXA TEMPERATURA EM ÁREAS GRANÍTICAS: O EXEMPLO DO DISTRITO ESTANÍFERO DE ENCRUZILHADA DO SUL, RS\***

### **CHARACTERIZATION OF THE HYDROTHERMAL GREISEN-TYPE PHYLIC ALTERATION AND THE LOW-TEMPERATURE REEQUILIBRIUM ON THE GRANITIC AREAS: THE ENCRUZILHADA DO SUL TIN DISTRICT EXEMPLE, RS\***

ROBERTO DOS SANTOS TEIXEIRA<sup>1</sup>; JOSÉ CARLOS FRANTZ<sup>2</sup>; ANDRÉ SAMPAIO MEXIAS<sup>2</sup>;  
JULIANA CHARÃO MARQUES<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Caixa Postal 15001, CEP91509-900, Porto Alegre, RS, Brasil.

<sup>2</sup>Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

<sup>3</sup>Laboratório de Geologia Isotópica, Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

\* Trabalho realizado com apoio do CNPq e da FAPERGS

**Abstract** – The hydrothermal alteration associated with the tin mineralization in the Encruzilhada do Sul Tin District is characterized by zones with different compositions. The most important of these hydrothermal zones are the phyllic and the argillic. The first one is composed mainly by white mica and quartz with tourmaline. The argillic alteration is composed by kaolinite. The phyllic zones represent associations with greisens and disseminated pervasive white mica on the granitic wall rocks. The argillic zones are constrained to the top zones of some granitic intrusions associated with greisens and quartz-veins in the stockworks. The hydrothermal fluids associated with the alteration show homogenization temperatures ranging from about 450°C to 120°C. The first temperature is the upper limit for the hydrothermal system, related with the white mica high temperature alteration. The second temperature is the lower limit of the argillic alteration under the hydrothermal conditions. The white mica related with the phyllic alteration range from phengite to muscovite. The argillic alteration has the presence of halloysite, probably as a weathering product.

**Keywords** – Tin mineralization, Hydrothermal alteration, Tin-granites

## INTRODUÇÃO

A alteração hidrotermal que acompanha a mineralização de estanho existente no Distrito Estanífero de Encruzilhada do Sul (Leinz & Pinagel, 1945) tem na relação espacial com intrusões graníticas seu mais importante controle de ocorrência. A presença de zonas de alteração hidrotermal, contendo mica branca, caolinita, turmalina e cassiterita, com veios de quartzo e *greisen*, indica intensa circulação de fluidos em um intervalo de temperatura amplo.

A mineralogia dos depósitos é simples e está representada essencialmente por cassiterita em veios de quartzo e em corpos de *greisen*. Zonas contendo alteração a caolinita são, em geral, estéreis e podem representar alteração hidrotermal tardia de mais baixa temperatura ou mesmo alteração intempérica.

O detalhamento das zonas de alteração hidrotermal permite, separar duas associações diferentes quanto ao posicionamento espacial. A primeira ocorre no interior das zonas de milonitos gerados durante a deformação transcorrente que foi ativa durante o Ciclo Brasileiro e nos corpos graníticos da Suíte Intrusiva Cordilheira. Ela está representada por corpos de *greisen*, porções pegmatóides e veios de quartzo orientados, acompanhados por zonas com intensa muscovitização e desenvolvimento de turmalina e por turmalinitos bandados. A segunda associação ocorre nas zonas de cúpula dos corpos graníticos da Suíte Intrusiva Campinas e nas zonas de contatos com as rochas encaixantes. Essa associação está representada por corpos de *greisen* acompanhados por um reticulado de veios de quartzo, envolvidos por intensa argilização, com predomínio de caolinita, e por uma zona externa onde o granito está parcialmente preservado.

O detalhamento das zonas de alteração hidrotermal permite reconhecer a presença de paragêneses de alta e de baixa temperatura. A primeira é constituída por

zonas micáceas e zonas turmalinizadas, enquanto a segunda está representada por uma alteração onde domina a presença das zonas argilizadas.

A alteração hidrotermal observada nas três minas mais importantes do Distrito Estanífero de Encruzilhada do Sul indica que na Mina Cerro Branco a associação melhor representada é a de mais alta temperatura. Na Mina Campinas e na Mina Tabuleiro a alteração hidrotermal presente indica a existência de paragêneses de alta e de baixa temperatura.

### **FLUIDOS HIDROTERMAIS**

A análise de inclusões fluidas teve como base a relação espacial das inclusões no interior de grãos de quartzo, a origem das inclusões e o conteúdo fluido à temperatura ambiente. Com base nestes dados, foi estabelecida uma comparação das fases fluidas nas três principais minas do Distrito, Mina Cerro Branco, Mina Campinas e Mina Tabuleiro (Frantz et al. 1998). As inclusões fluidas analisadas indicam a presença de fluidos aquosos e fluidos aquo-carbônicos no processo gerador da alteração hidrotermal.

A análise microtermométrica das inclusões fluidas na Mina Cerro Branco (Frantz et al. 1998) permitiu definir que a homogeneização total das inclusões líquidas aquo-carbônicas ocorre de forma comum para o estado vapor com o intervalo de maior frequência de temperatura situado entre 200 e 220°C (Fig. 1A). As inclusões do tipo aquosas apresentam uma temperatura de homogeneização total, para o estado líquido, com picos entre 120 e 280°C, destacando-se os intervalos entre 200 e 220°C e entre 240 e 260°C (Fig. 1B).

Na Mina Campinas, a homogeneização total das inclusões aquo-carbônicas ocorre a temperaturas que variam entre 260 e 440°C. As inclusões com homogeneização para a fase líquida têm os valores de temperatura centrados entre 340 e 360°C, enquanto

as que homogeneízam para a fase vapor têm temperaturas entre 360 e 400°C (Fig. 1C). As inclusões aquosas na Mina Campinas apresentam homogeneização total para a fase líquida entre 120 e 140°C e entre 180 e 200°C (Fig. 1D).

Na Mina Tabuleiro a homogeneização total das inclusões aquo-carbônicas ocorre em um intervalo de temperatura situado entre 280 e 380°C, com a maior frequência situando-se entre 320 e 340°C (Fig. 1E). As inclusões aquosas apresentam temperaturas de homogeneização total entre 120 e 140°C, 180 e 200°C e entre 320 e 340°C, este último com a maior frequência (Fig. 1F).

Os fluidos aquo-carbônicos (Lwc) indicam semelhança, quanto à composição, entre as inclusões fluidas analisadas nas três minas (Frantz et al. 1998). A variação nas temperaturas de homogeneização total, para uma mesma gama de salinidade dos fluidos, pode estar indicando um resfriamento progressivo do sistema hidrotermal, com diminuição da temperatura dos fluidos em posições intracúpula e em depósitos distais. Ou ainda, poderia representar fluidos com estágios evolutivos comuns nas três minas mas atuando sob condições e temperaturas diferentes (Frantz et al. 1998).

As inclusões aquosas (Lw) estão distribuídas em quatro grupos de maior frequência, segundo as temperaturas de homogeneização total ao estado líquido. O primeiro e o segundo grupos situam-se em torno de 150°C e de 200°C, respectivamente. Ocorrem nas três minas e representam inclusões de zonas de borda de grãos de quartzo, de contatos intergranulares e de fraturas transgranulares. Representam fluidos tardios no sistema hidrotermal. O terceiro e quarto grupos, situados em torno de 250°C e 325°C, representam inclusões aquosas primárias e/ou pseudo-secundárias intragranulares que podem estar indicando os fluidos hidrotermais envolvidos na geração da mineralização. O terceiro grupo de inclusões encontra representação em zonas intermediárias e de borda

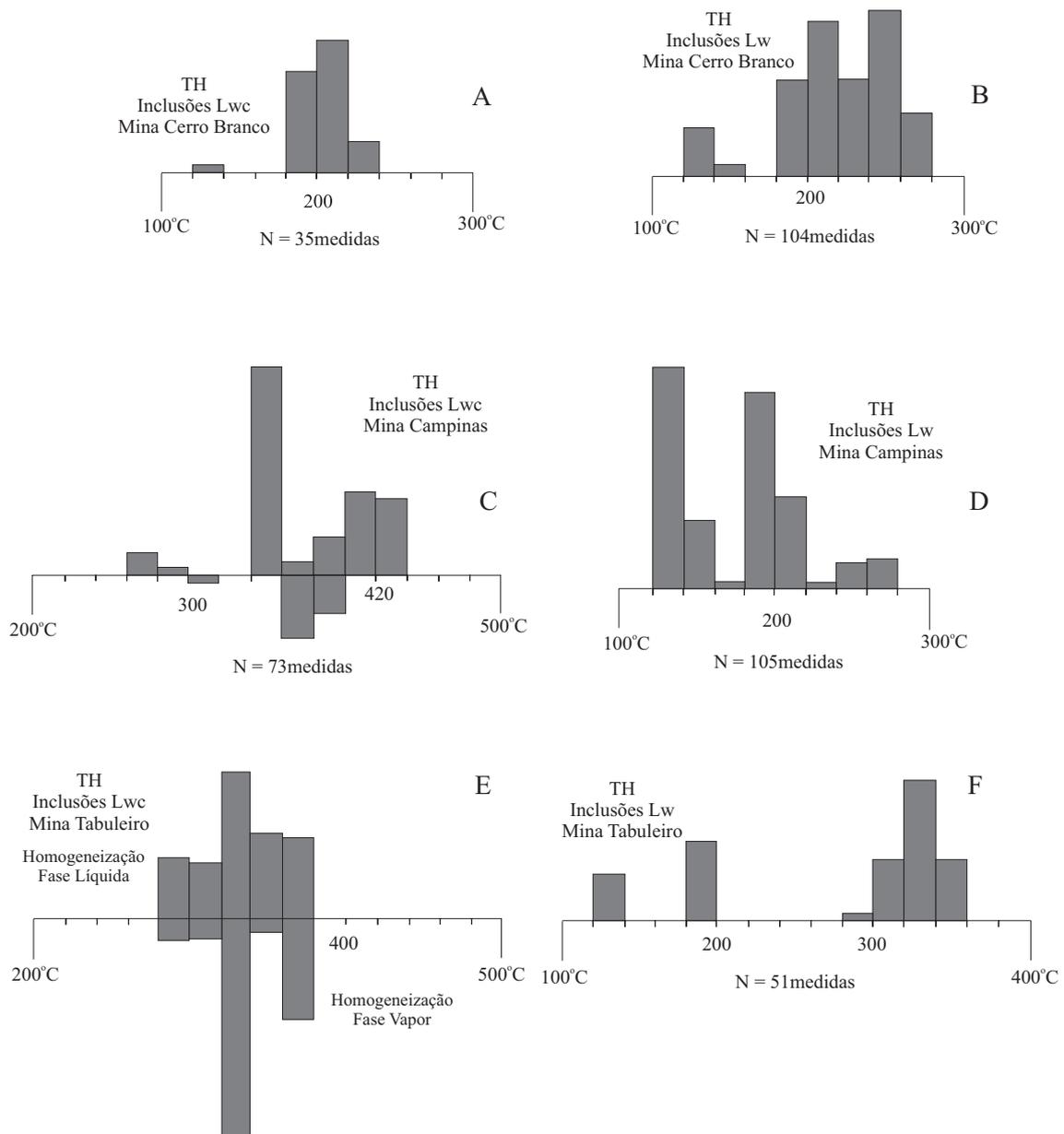


Figura 1: Fluidos aquo-carbônicos (Lwc) e aquosos (Lw) das minas Cerro Branco (A e B), Campinas (C e D), e Tabuleiro (E e F), com histogramas de temperaturas de homogeneização (TH) em diferentes intervalos.

de grãos de quartzo de veios da Mina Campinas e em zonas de núcleo de grãos de quartzo de veios da Mina Cerro Branco. O quarto grupo ocorre associada somente a zonas de núcleo de grãos de quartzo dos veios da Mina Tabuleiro.

A petrografia das inclusões fluidas e os dados de microtermometria indicaram que as inclusões aquosas com alto grau de preenchimento, posicionadas nas margens dos

grãos de quartzo dos veios, são tardias e representam os fluidos de mais baixa temperatura que atuaram na alteração hidrotermal.

### **ZONAS DE ALTERAÇÃO HIDROTERMAL**

As zonas de alteração hidrotermal que acompanham os corpos graníticos das suítes Cordilheira e Campinas apresentam características de distribuição e composições diferentes. As da Suíte Intrusiva Cordilheira tendem a apresentar uma distribuição pervasiva por centenas de metros onde predominam alterações contendo mica branca e turmalina, como na Mina Cerro Branco. Já as zonas de alteração hidrotermal associadas aos corpos da Suíte Intrusiva Campinas estão limitadas às cúpulas e zonas de contato das injeções graníticas e são representadas por alteração micácea, com veios de quartzo associados, e zonas argílicas subordinadas, como ocorre na Mina Campinas.

A alteração hidrotermal associada à Suíte Cordilheira é composta por *greisen* (Fig 2A e B) e turmalinitos distribuídos ao longo de todos os corpos e das encaixantes, sempre acompanhando as faixas miloníticas em zonas de mais alto *strain* e em zonas de dilatação associadas. A presença de turmalina é indicadora de grande quantidade de boro no sistema hidrotermal desses granitos, com diminuição no grau de polimerização dos componentes (Bagdassarov *et al.*, 1993).

Os granitos da Suíte Intrusiva Cordilheira são acompanhados por inúmeros veios de composição quartzo-feldspática, com mica branca e turmalina, textura pegmatóide e aplítica, com espessuras variando de 5 a 120cm.

Os veios de quartzo têm espessuras variando de 1 a 45cm, têm quantidades variadas de turmalina e mica branca e contêm cassiterita.

Os corpos de *greisen* da Suíte Intrusiva Cordilheira têm espessuras variando de 1 a 30cm, são constituídos por mica branca e quartzo, com quantidades variadas de

turmalina e contêm cassiterita.

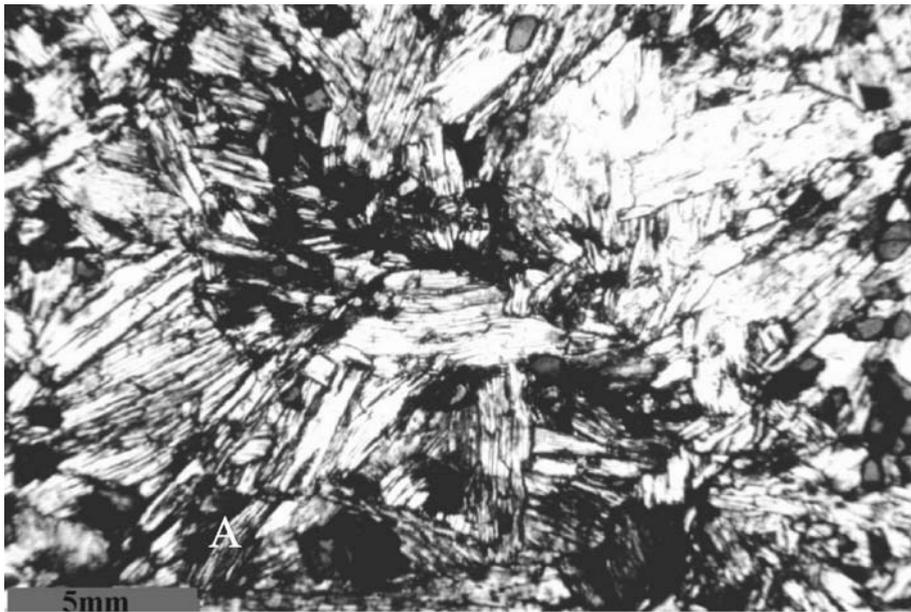


Figura 2: *Greisen* com mica branca, turmalina e cassiterita (A) e *greisen* com mica branca e quartzo, com cassiterita (B), associados a granitos da Suíte Intrusiva Cordilheira.

Os turmalinitos são rochas constituídas por turmalina e quartzo, contendo mica branca e biotita em proporções menores e variadas. A distribuição destas rochas varia de cerca de 5 a 10cm, ao redor de veios de quartzo e corpos de *greisen*, até centenas de metros ao redor dos corpos da suíte, como auréola mais externa de uma zona com intensa

circulação de fluidos (Fig. 3).

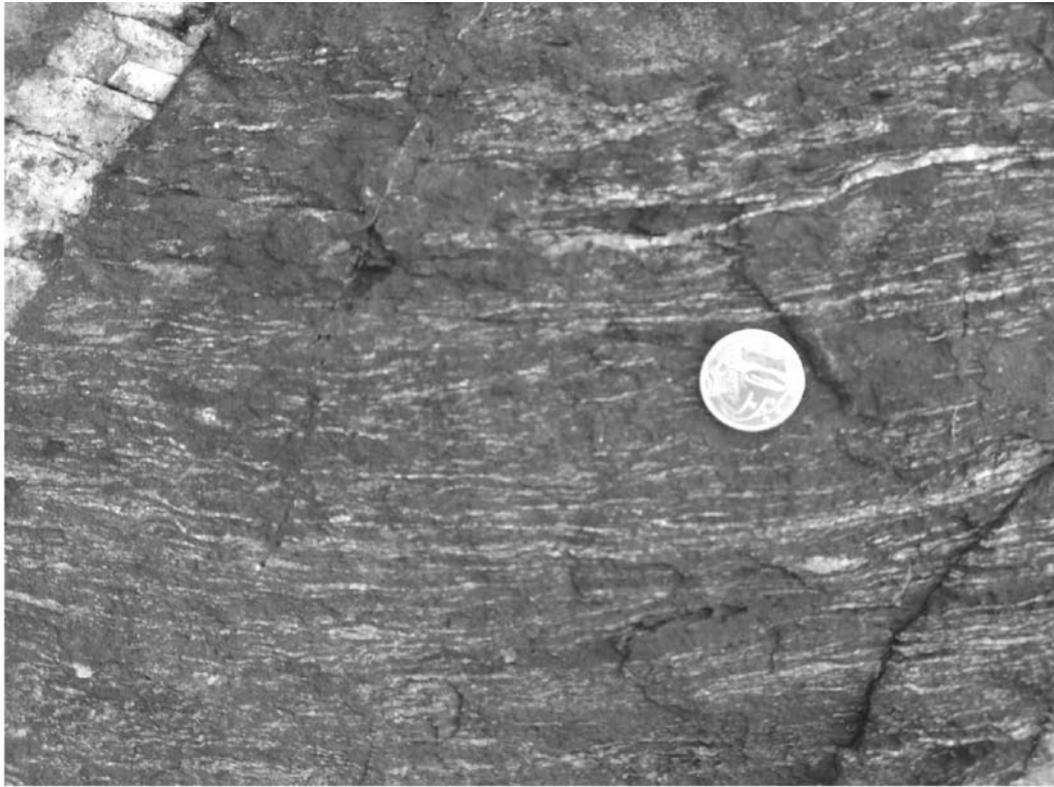


Figura 3: Turmalinitos bandados associados a rochas miloníticas de zonas de cisalhamento transcorrente de idade brasiliana, representando auréolas externas de zonas de alteração hidrotermal associadas a corpos graníticos da Suíte Intrusiva Cordilheira.

Os granitóides da Suíte Intrusiva Campinas são acompanhados por zonas internas de alteração hidrotermal contendo um reticulado de veios de quartzo do tipo *stockwork* intracúpula, acompanhados por corpos de *greisen* com posição preferencial na margem dos veios, ou distribuídos como corpos lenticulares isolados intracúpula, no contato das intrusões com a encaixante, e projetados para o interior da encaixante por menos de uma centena de metros. Turmalinitos localizados representam o envelope mais externo de

algumas zonas de alteração hidrotermal intracúpula e de contato com a encaixante, envolvendo veios e *greisen* (Fig. 4). Outras destas zonas de alteração, mais freqüentes, são envolvidas por um envelope de alteração argílica contendo mica branca muito fina e caolinita (Fig. 5).



Figura 4: Veios de quartzo, em *stockwork* em zona de cúpula granítica de corpo da Suíte Intrusiva Campinas, com *greisen* na margem, contendo mica branca com textura grossa e cassiterita, na Mina Campinas.

Os veios de quartzo têm espessura variando de 5 a 50cm, são constituídos por quartzo, mica branca, contêm cassiterita, e têm K-feldspato pouco freqüente e rara turmalina.

Os corpos de *greisen* têm espessura variando de 1 a 40cm, são constituídos por

mica branca e quartzo, com rara turmalina e contêm cassiterita.



Figura 5: Zona de alteração hidrotermal associada à cúpula de intrusão granítica de corpo da Suíte Intrusiva Campinas, contendo alteração de baixa temperatura com mica branca fina e argila do tipo caolinita.

As zonas de alteração argílica têm espessura variando de 2 a 250cm e são constituídas por argila de cor branca do tipo caolinita.

Os minerais analisados e que foram objeto de estudo do presente trabalho são as micas brancas e os argilo-minerais do grupo das caolinitas e que participam como fases minerais maiores nas diversas zonas de alteração hidrotermal associadas aos corpos

graníticos das suítes Cordilheira e Campinas. As micas brancas representam o principal componente em volume na formação de *greisens* e os argilo-minerais do grupo da caolinita representam o principal componente em volume na formação de zonas argilizadas.

### **Alteração Micácea**

As micas brancas associadas a *greisen* e a zonas de alteração micácea, geradas sobre os granitóides das suítes intrusivas Cordilheira e Campinas, variam entre muscovita e fengita, com predomínio do politipo 2M<sub>1</sub>. O politipo 2M<sub>1</sub>, mais comum, representa o maior volume de micas geradas durante a alteração hidrotermal (Fig. 6A). O politipo 3T é menos freqüente e representa a formação de micas sobre restos de biotita, reequilibrada durante o processo de formação de *greisen* (Fig. 6B).

Os dados existentes com relação aos politipos indicam a presença quase que constante de ambos em todas as zonas de alteração hidrotermal, embora sempre com a dominância do politipo 2M<sub>1</sub>. A caolinita ocorre associada a várias destas zonas como um mineral de alteração tardia de baixa temperatura.

As duas fracas reflexões em 3,60Å e 3,11Å em difratogramas de Raios-X para detalhamento de estrutura, observadas em quase todas as amostras, são diagnósticas da presença do politipo 3T e podem significar restos de biotita primária (magmática) (Bailey, 1984) não totalmente transformada em mica branca durante o processo de formação de *greisen*.

Em relação ao parâmetro “b” observou-se uma constância nos valores identificados para as micas de *greisen* em todas as zonas de alteração (Tab. I).

A mica branca associada à alteração hidrotermal nas diferentes minas estudadas é marcada por aumento nos valores de Si e de Al que correspondem tanto a substituições

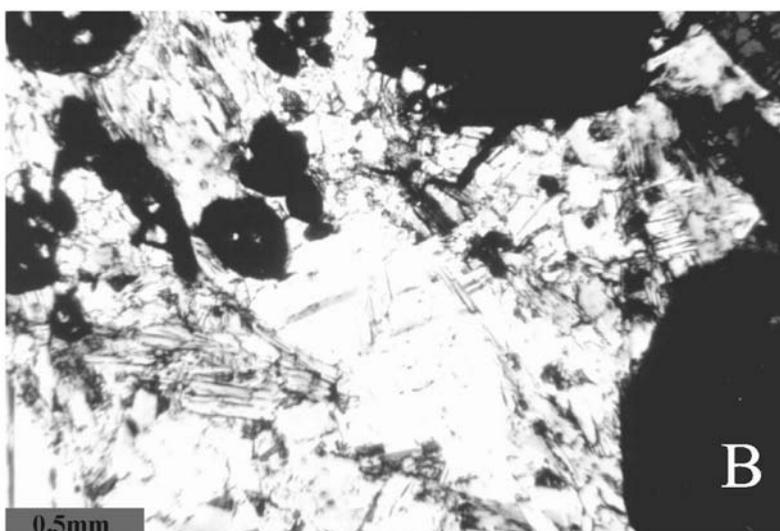
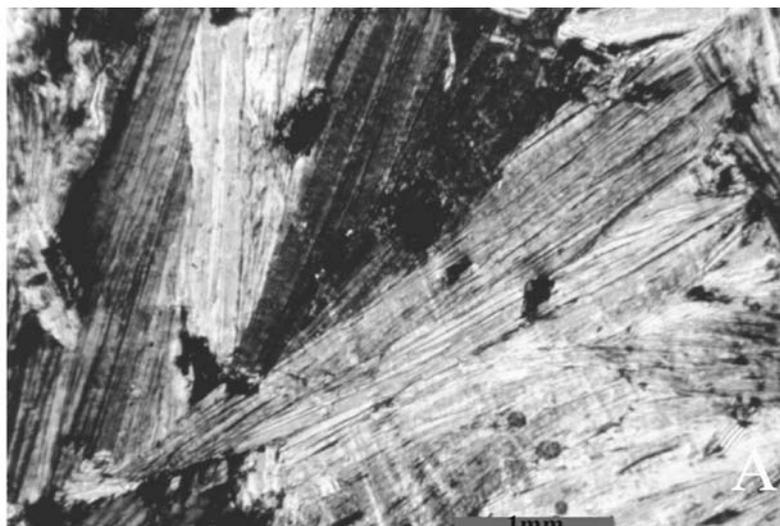


Figura 6: Mica branca associada a zonas hidrotermais micáceas e a corpos de *greisen*, na forma de lamelas bem desenvolvidas, representando o politipo 2M<sub>1</sub> dominante na mica branca hidrotermal (A), e mica branca fina associada a restos de biotita representando a principal ocorrência do politipo 3T gerado durante a alteração hidrotermal (B).

tetraédricas quanto octaédricas. Em geral, os aumentos do número de cátions de Si por unidade de fórmula, no sítio IV, são acompanhados por um pequeno aumento de Al<sup>VI</sup> na mica de *greisen* das zonas de alteração hidrotermal sobre os granitos da Suíte Intusiva

Cordilheira, sem variação significativa do Al total, o que deve implicar em substituições do tipo  $Al^{IV}+Al^{VI} \leftrightarrow Si^{IV}+Al^{VI}$ . No caso da mica de *greisen* gerada com a participação dos granitóides da Suíte Intrusiva Campinas, os aumentos de Si são acompanhados por aumentos de  $Al_{tot}$  e de  $Al^{VI}$  com mesma magnitude. Isto pode estar implicando em substituições do tipo  $(3M^{2+})^{VI} \leftrightarrow (Al^{3+}+M^{2+}+\square)^{VI}$  (Fig. 7 A e B).

**Tabela I**

<b>Amostra</b>	<b>Reflexão 060</b>	<b>Parâmetro "b"</b>
HT10 Mica 2M <sub>1</sub>	1,5007	9,004
HT10 Mica 3T	1,5012	9,007
HB01 Mica 2M <sub>1</sub>	1,5019	9,011
HB01 Mica 3T 0,6 Amper	1,5030	9,018
HB01 Mica 3T 1,0 Amper	1,5025	9,015
HB03 Mica 2M <sub>1</sub>	1,5026	9,016
HB03 Mica 3T 0,6 Amper	1,5035	9,021
HB03 Mica 3T 1,0 Amper	1,5022	9,013

Resultados de Difractometria de Raios-X para a reflexão 060 e parâmetro "b" de micas de *greisen* dos granitos Tabuleiro(HT) e Cerro Branco(HB) (valores em Å).

A principal substituição no sítio octaédrico está representada pela diminuição de Fe e aumento de Al, que definem uma correlação da ordem de 1:1 com a participação secundária do Mg (Fig. 7 C e D) e do Ti.

O Fe tende a apresentar um comportamento homogêneo em todos os tipos de mica analisados, indicando uma diminuição progressiva da zona de cúpula da Mina Campinas para a zona de contato desta mesma mina, seguida da zona de cúpula e da zona de contato da Mina Tabuleiro e, finalmente, da Mina Cerro Branco, com os valores médios de Fe mais baixos. De forma comparativa, o politipo 3T tem valores mais elevados de Fe por unidade de fórmula do que o politipo 2M<sub>1</sub> para todas as zonas de

alteração hidrotermal analisadas.

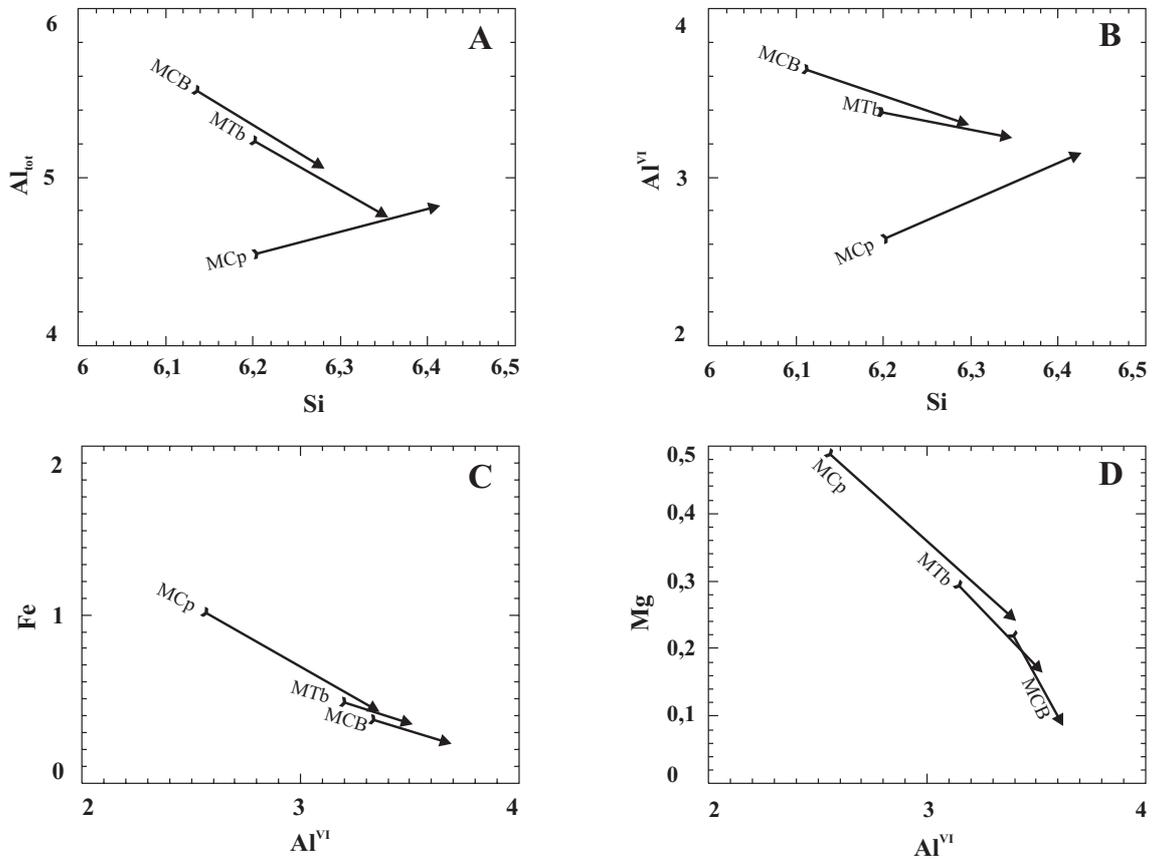


Figura 7: Principais substituições observadas na composição de micas brancas de greisens das minas Cerro Branco (CB), Tabuleiro (Tb) e Campinas (Cp), indicando que para a Mina Campinas as substituições com Al são diferentes das observadas nas minas Cerro Branco e Tabuleiro. Os valores são de cátions por unidade de fórmula e o sentido da seta indica o sentido das reações, em correlação de núcleo para borda nos cristais analisados.

O Mg tem uma variação geral que indica uma diminuição progressiva similar a do Fe para as mesmas zonas de alteração hidrotermal. No caso do Mg, os valores observados são semelhantes entre os politipos  $2M_1$  e  $3T$ , mas para conteúdos de  $Al^{VI}$  pouco mais elevados no politipo  $2M_1$  da zona de cúpula e parte da zona de contato da

Mina Campinas.

Os valores de Na têm correlação positiva com os valores de  $Al^{VI}$ , evidenciando o caráter mais aluminoso e sódico de micas associadas a zonas de alteração hidrotermal geradas sobre protólitos graníticos da Suíte Intrusiva Cordilheira. Isso ocorre nas zonas de contato da Mina Campinas, zona de contato da Mina Tabuleiro e Mina Cerro Branco.

O K tem correlação inversa à observada para o Na, com os politipos 3T sendo mais alto K que os  $2M_1$  para cada associação e, em geral, com valores médios mais altos para micas de *greisen* na cúpula da Mina Campinas.

O aumento de  $Al^{VI}$  com a diferenciação das micas das zonas de alteração hidrotermal, acompanhado de uma diminuição nos valores de Fe e Mg em número de cátions por unidade de fórmula, tende a gerar um aumento no grau de vacância no sítio octaédrico e uma diminuição no número total de cátions na estrutura das micas. Micas de *greisen* das Minas Cerro Branco, zona de *contato* Tabuleiro e parte da zona de contato da Mina Campinas têm uma tendência a variações mais acentuadas do grau de vacância do sítio VI e de diminuição do número total de cátions para intervalos menores de variação de  $Al^{VI}$ , de Fe e de Mg, além de já serem micas com caráter dioctaédrico mais acentuado que as micas das demais zonas. As micas de *greisen* da zona de cúpula e de parte da zona de contato da Mina Campinas e zona de cúpula da Mina Tabuleiro têm menor tendência de aumento na vacância octaédrica e na diminuição do número de cátions para intervalos maiores de variação nos valores de  $Al^{VI}$ , de Fe e de Mg. As micas de *greisen* destas zonas tendem a apresentar cerca de 0,3 cátions a mais por unidade de fórmula no sítio octaédrico e cerca de 0,5 a 1 cátion a mais no total. Em todas as zonas de alteração hidrotermal, o politipo 3T tem graus de ocupação octaédrica e número total de cátions maiores que o politipo  $2M_1$  correspondente, o que seria normal considerando, para o politipo 3T, uma origem a partir de biotita, com substituições tri-dioctaédricas. Situação

pouco diferente é observada para a mica de *greisen* da Mina Cerro Branco e *contato* da Mina Tabuleiro, onde os dois politipos têm uma tendência ao mesmo grau de ocupação octaédrica e de número total de cátions.

A correlação existente entre Si-Fe+Mg-Al (Speer, 1984) sugere que as micas de *greisen* das diferentes zonas de alteração hidrotermal, assim como seus politipos, têm tendências diversas, possivelmente ligadas a composição do protólito sobre o qual foram geradas.

A composição média das micas brancas de *greisen* de cada uma das zonas de alteração hidrotermal, considerando a presença de politipos 3T e 2M<sub>1</sub>, pode ser representada por:

#### Mina Cerro Branco

$(K_{1,82}Na_{0,08})(Al_{3,50}Fe_{0,29}Mg_{0,15}Ti_{0,06})(Si_{6,25}Al_{1,75})O_{20}(OH)_{3,87}F_{0,13}$  Politipo 3T

$(K_{1,69}Na_{0,22})(Al_{3,65}Fe_{0,27}Mg_{0,10}Ti_{0,02})(Si_{6,15}Al_{1,85})O_{20}(OH)_{3,93}F_{0,07}$  Politipo 2M<sub>1</sub>

#### Mina Campinas - zona de cúpula

$(K_{1,86}Na_{0,06})(Al_{2,95}Fe_{0,67}Mg_{0,38}Ti_{0,08})(Si_{6,37}Al_{1,63})O_{20}(OH)_{3,67}F_{0,33}$  Politipo 3T

$(K_{1,83}Na_{0,06})(Al_{3,24}Fe_{0,51}Mg_{0,33}Ti_{0,03})(Si_{6,34}Al_{1,66})O_{20}(OH)_{3,80}F_{0,20}$  Politipo 2M<sub>1</sub>

#### Mina Campinas - zona de contato

$(K_{1,74}Na_{0,11})(Al_{3,28}Fe_{0,50}Mg_{0,24}Ti_{0,08})(Si_{6,21}Al_{1,79})O_{20}(OH)_{3,75}F_{0,25}$  Politipo 3T

$(K_{1,82}Na_{0,09})(Al_{3,37}Fe_{0,44}Mg_{0,24}Ti_{0,03})(Si_{6,33}Al_{1,67})O_{20}(OH)_{3,85}F_{0,15}$  Politipo 2M<sub>1</sub>

#### Mina Tabuleiro - zona de cúpula

$(K_{1,87}Na_{0,07})(Al_{3,40}Fe_{0,37}Mg_{0,19}Ti_{0,07})(Si_{6,28}Al_{1,72})O_{20}(OH)_{3,84}F_{0,16}$  Politipo 3T

$(\text{K}_{1,69}\text{Na}_{0,06})(\text{Al}_{3,49}\text{Fe}_{0,35}\text{Mg}_{0,20}\text{Ti}_{0,05})(\text{Si}_{6,24}\text{Al}_{1,76})\text{O}_{20}(\text{OH})_{3,82}\text{F}_{0,18}$  Politipo 2M<sub>1</sub>

#### Mina Tabuleiro - zona de cúpula

$(\text{K}_{1,86}\text{Na}_{0,05})(\text{Al}_{3,24}\text{Fe}_{0,45}\text{Mg}_{0,33}\text{Ti}_{0,09})(\text{Si}_{6,26}\text{Al}_{1,74})\text{O}_{20}(\text{OH})_{3,87}\text{F}_{0,13}$  Politipo 3T

$(\text{K}_{1,84}\text{Na}_{0,08})(\text{Al}_{3,35}\text{Fe}_{0,43}\text{Mg}_{0,21}\text{Ti}_{0,06})(\text{Si}_{6,22}\text{Al}_{1,78})\text{O}_{20}(\text{OH})_{3,76}\text{F}_{0,24}$  Politipo 2M<sub>1</sub>

As variações observadas na composição de micas de *greisen* nas zonas de alteração hidrotermal das minas Cerro Branco, Tabuleiro e Campinas permitem concluir que há uma forte influência da composição do protólito sobre o sistema gerado.

A influência do politipismo sobre a composição parece, também, evidente. A presença do politipo 3T associado ao politipo 2M<sub>1</sub> parece indicar uma tendência ao desenvolvimento de zonas de alteração onde o processo hidrotermal atuou de forma diferente. O politipo 3T tem sempre valores de Fe e Ti mais altos para cada associação analisada. Isto sugere uma origem a partir de biotita, preservando algumas das características originais deste mineral, ou ainda, a geração de micas a temperaturas mais elevadas no sistema hidrotermal representando o registro do início da alteração.

#### **Alteração Argílica**

As zonas de alteração argílica estão presentes de forma importante apenas nas zonas de cúpula das intrusões graníticas. A associação mais comum é a de zonas argílicas distribuídas ao longo das margens de veios de quartzo e de quartzo-*greisen*. Zonas argílicas mais pronunciadas estão presentes nas cúpulas das intrusões Tabuleiro e Campinas, nas minas de mesmo nome, onde ocorrem como um grande volume de material argilizado que envolve a principal zona mineralizada com veios de quartzo e bolsões de *greisen* em *stockwork*.

Os principais resultados apresentados e discutidos no presente trabalho referem-se, portanto, a zonas argílicas amostradas nas cúpulas graníticas das minas Campinas e Tabuleiro e nas zonas de contato dessas intrusões até um máximo de 100 metros das cúpulas argilizadas (Tab. II).

**Tabela II**

<b>Amostra</b>	<b>Identificação</b>	<b>Descrição Resumida</b>	<b>Posição</b>
HC-16	Hidrotermalito	Greisen muito fino no contato veio/granito	Intracúpula
HC-03	Hidrotermalito	Greisen em núcleo de veio e muito fino no contato	Intracúpula
HC-09	Hidrotermalito	Greisen muito fino no contato veio/granito (alteração)	Intracúpula
HT-03	Hidrotermalito	Greisen no contato veio/encaixante	Até 100m da Cúpula
HT-08	Hidrotermalito	Greisen em núcleo de veio e fino no contato veio/encaixante	Até 100m da Cúpula
HC-42	Hidrotermalito	Greisen zonado-contato granito/milonito (grosso a fino)	Até 100m da Cúpula
HT-06	Hidrotermalito	Greisen zonado no contato veio/encaixante (grosso a fino)	Até 100m da Cúpula
HC-48	Hidrotermalito	Greisen zonado-contato granito/milonito (grosso a fino)	Até 100m da Cúpula

Amostras selecionadas para detalhamento por Microscopia Eletrônica de Varredura-MEV (imagem de elétrons retroespalhados) e por Difractometria de Raios-X-DRX.

Nas amostras submetidas a detalhamento por Difractometria de Raios-X constatou-se a presença de caolinitas, haloisita 7Å e haloisita 10Å na fração grossa, de 2 ou 5 até 20 µm, e na fração fina, <2 ou <5 µm (Tab. III). Nas amostras analisadas não foi identificada a presença de dickita.

Os padrões característicos de difratogramas de amostras orientadas destacam a presença de haloisita 7Å, haloisita 10Å e de caolinita, como evidenciado na amostra HC-16 fração <5 µm (Fig. 8).

A presença de haloisita 7Å foi identificada em cerca de 60% das amostras ou frações submetidas a detalhamento por Difractometria de Raios-X. Já a caolinita na forma pura foi identificada em cerca de 40% das amostras ou frações detalhadas.

**Tabela III**

<b>Amostra</b>	<b>Fração Analisada (DRX)</b>	<b>Argilo-mineral</b>
HC-16	5 - 20 $\mu\text{m}$	Caolinita – Haloisita 7Å
HC-16	< 5 $\mu\text{m}$	Haloisita 7Å – Haloisita 10Å - Caolinita
HC-03	< 20 $\mu\text{m}$	Caolinita – Haloisita 7Å
HC-09	< 10 $\mu\text{m}$	Caolinita
HT-03	< 20 $\mu\text{m}$	Caolinita – Haloisita 7Å
HT-08	< 10 $\mu\text{m}$	Caolinita – Haloisita 7Å
HC-42	2 - 20 $\mu\text{m}$	Caolinita
HC-42	< 2 $\mu\text{m}$	Caolinita
HT-06	2-20 $\mu\text{m}$	Caolinita
HT-06	< 2 $\mu\text{m}$	Caolinita – Haloisita 7Å
HC-48	< 20 $\mu\text{m}$	Caolinita

Identificação dos argilo-minerais caoliniticos por Difractometria de Raios-X e por Microscopia Eletrônica de Varredura.

As amostras analisadas indicam que a caolinita apresenta um grau de desordem importante e que está presente nos difratogramas do pó (Fig. 9) pelas baixas intensidades das reflexões basais 001 e 002, e pela forma não bem definida dos picos nos intervalos entre  $20^{\circ}$ - $33^{\circ}$  ( $2\theta$ ) (reflexões 02l e 11l) e  $35^{\circ}$ - $40^{\circ}$  ( $2\theta$ ) (reflexões 13l, 20l e 003) (Bridley 1984).

As análises processadas ao microscópio eletrônico de varredura permitiram identificar a presença de haloisita, sempre na forma de tubos pequenos sobre a superfície de grãos de caolinita (Fig. 10 A e F). A caolinita ocorre na forma de livros (Fig. 10 B e D), de vermes (Fig. 10 E e F) e de gravata borboleta (Fig. 10 C, D, G e H), quando associada a alteração de mica brancas hidrotermais. A caolinita na forma de livros e de vermes está, de forma bastante provável, associada à alteração de feldspato.

Os resultados obtidos indicam que dois processos de caolinização podem ter ocorrido. Um processo de caolinização associado à transformação do K-feldspato e outro à transformação da mica branca fengítica. As reações apresentadas a seguir representam os processos de transformação de micas e de feldspato potássico em caolinita.

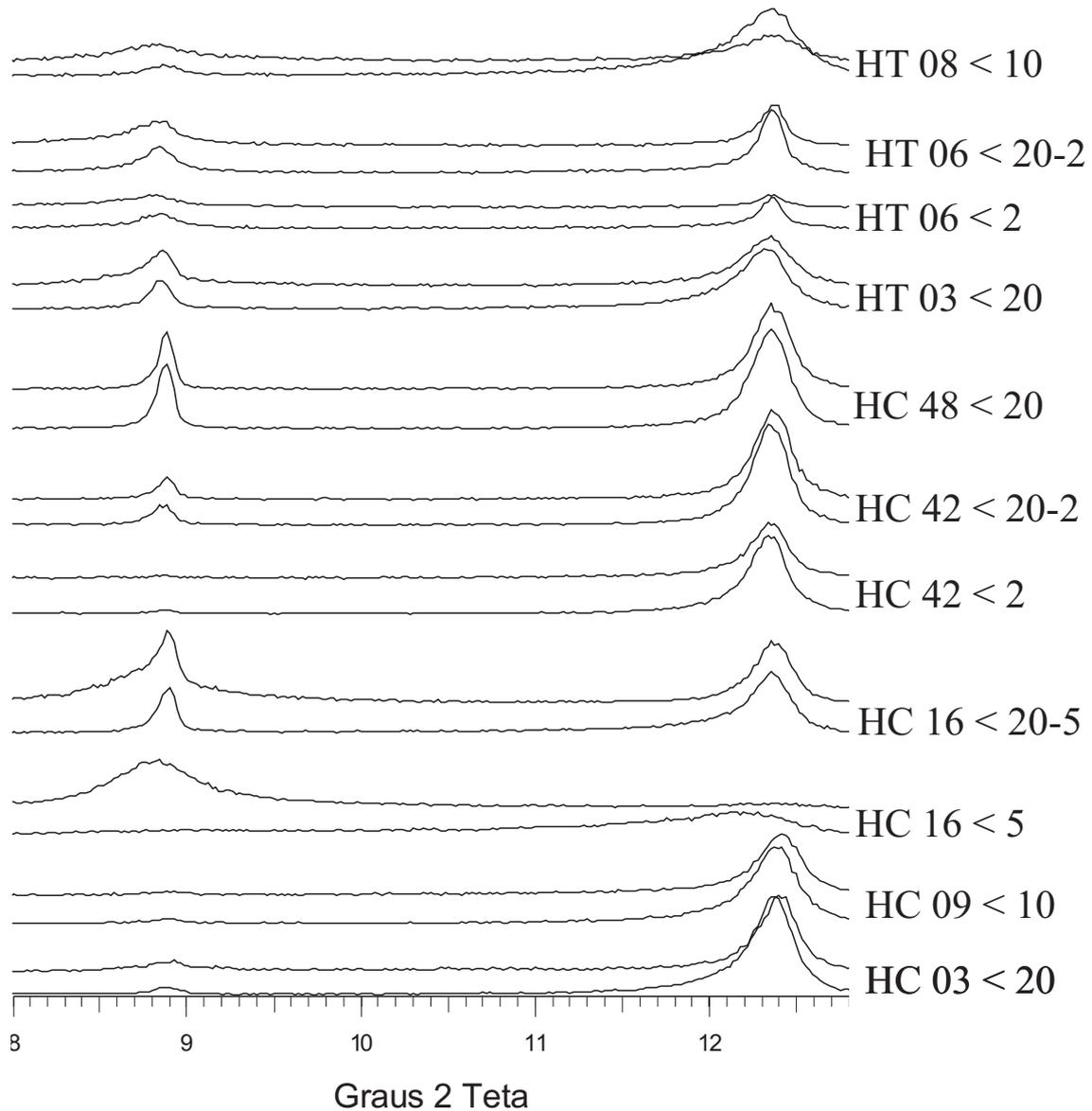
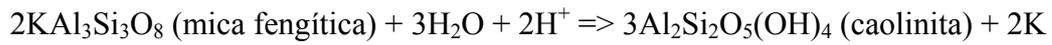


Figura 8: Difractogramas de amostras representativas de zonas argílicas orientadas destacando a presença das haloisitas 7Å e 10Å e caolinita.

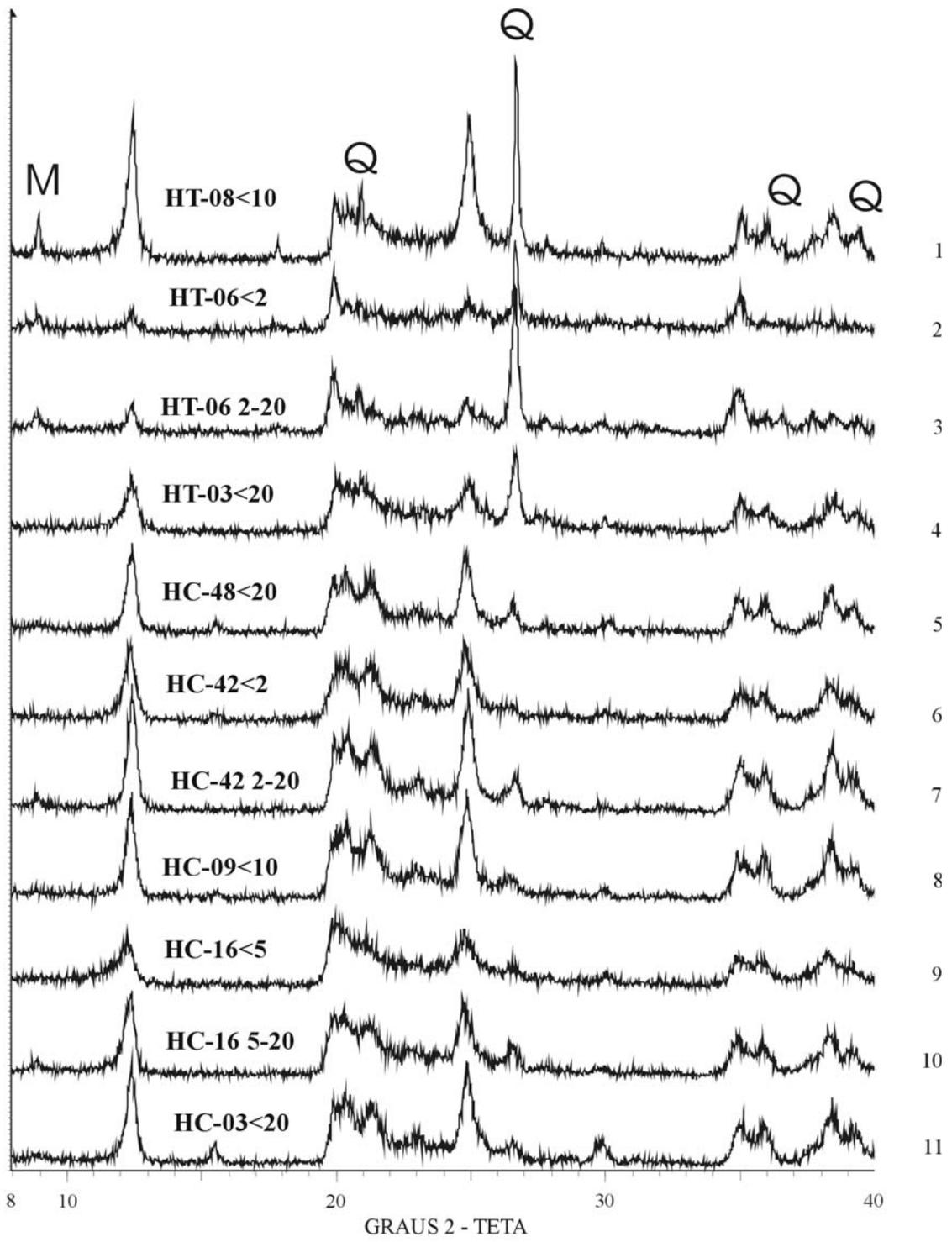


Figura 9: Difratoqramas de amostras de zonas argílicas na forma de pó submetidas a Difratomtria de Raios-X e fração granulométrica analisada em  $\mu\text{m}$ .

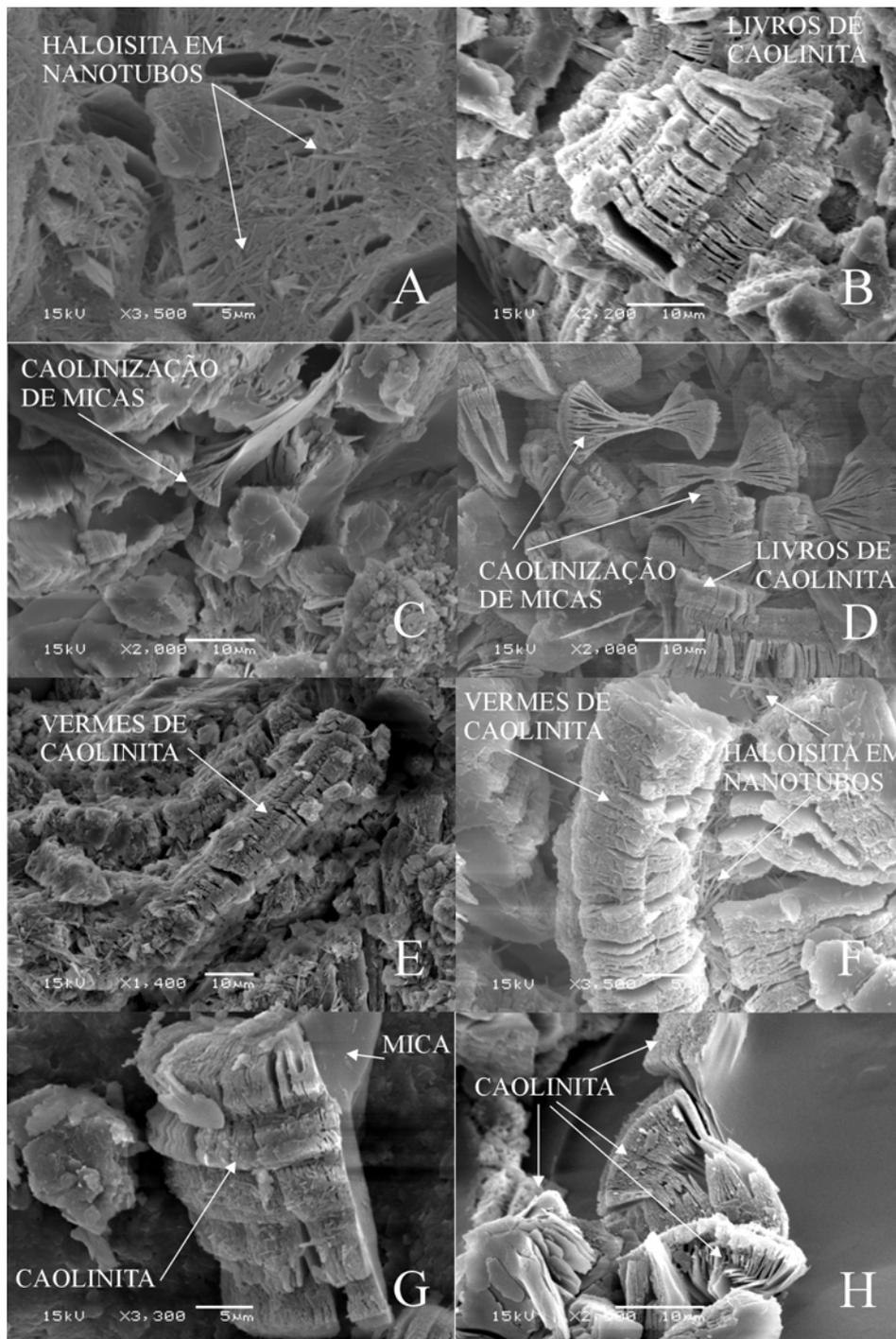


Figura 10: Imagens de elétrons retroespalhados por Microscopia Eletrônica de Varredura: amostra HC-16 com haloisita em tubos crescendo sobre caolinita (A); amostra HC-03 com caolinita em livro e tubos de haloisita (B); amostra HC-09 com formação de caolinita nas bordas de folhas de mica (C); amostra HC-42 com caolinização de micas como gravata borboleta (D); amostra HT-08 com caolinita vermiforme (E); amostra HT-03 com caolinita vermiforme e tubos de haloisita (F); amostra HT-06C com caolinitização de bordas de folhas de mica e tubos de haloisita na superfície caolinitizada (G); amostra HC-48 com caolinita nas bordas de grão de mica (H).

A reação da transformação de mica em caolinita é o inverso do que ocorre no processo de formação de ilitas (Lanson et. al., 2002). Na formação da caolinita ocorre a disponibilização de potássio em solução e a reação necessita de solução com baixo pH. A reação da transformação de K-feldspato em caolinita representa a disponibilização de potássio em solução na forma de hidróxido e de sílica, que pode cristalizar como quartzo, calcedônia ou opala.

Os produtos e reagentes identificados a partir das reações apresentadas sugerem a participação de um fluido aquoso de baixo pH e, bastante provável, de origem meteórica. Isto parece corroborar com os dados obtidos através do estudo de inclusões fluidas (Frantz et al. 1998) que indicaram fluidos aquosos com temperaturas na faixa de 100 a 150°C em bordas de grãos e em fraturas transgranulares de cristais de quartzo de veios com halos de alteração argílica.

A grande quantidade de haloisita 7Å e um grau de desordem importante nas caolinitas como um todo sugerem, no entanto, uma origem intempérica como processo dominante formador dos argilo-minerais. Esta interpretação é consistente com os dados obtidos por Difractometria de Raios-X.

A exemplo do que ocorre e está descrito para a formação de *china clays* associadas aos depósitos de estanho e estanho-tungtênio e a cúpulas graníticas hidrotermalizadas do sudoeste da Inglaterra (Bristow 1990; Psyrrillos et al., 1998), sugerimos que a caolinização que ocorre nas áreas das minas de estanho do Distrito Estanífero de Encruzilhada do Sul pode estar associada a mais de um processo de formação.

Os processos envolvidos teriam seu ordenamento iniciado através da circulação de um fluido aquoso hidrotermal/meteórico, de baixo pH (ácido), com temperaturas

situadas entre 100 e 150°C. Esse fluido aquoso atuou formando caolinita a partir da alteração de micas e de K-feldspato.

O seguimento do processo implicaria na ação de um fluido aquoso intempérico/meteórico que atuou provocando o desordenamento estrutural da caolinita primária hidrotermal e na formação, a partir desta, da haloisita cuja ocorrência está sempre ligada a caolinita.

## CONCLUSÕES

Os dados existentes sobre a composição de minerais formados durante as fases de alteração hidrotermal indicam uma forte interação entre a composição dos protólitos e os produtos gerados. Feições deste tipo são observadas nas micas brancas que resultaram da instabilização de biotita pré-existente e de forma geral nas micas associadas a *greisen*.

A dominância absoluta do politipo 2M<sub>1</sub> indica que as micas brancas presentes em *greisen* das zonas hidrotermalizadas foram formadas a temperatura alta (Velde, 1965), possivelmente em uma faixa de temperatura entre 450 e 500°C.

Os processos hidrotermais que atuaram associados aos granitóides da Suíte Intrusiva Cordilheira foram responsáveis por amplas zonas de alteração hidrotermal, geradas através da circulação de fluidos aquosos de origem magmática e magmático-meteórica. A injeção dos granitóides da Suíte Intrusiva Campinas, resultou na ação mais focada de fases fluidas aquo-carbônicas e aquosas, gerando alteração hidrotermal restrita a cúpulas e zonas de contato das intrusões.

As inclusões fluidas aquosas tardias, em zonas de contatos intergranulares de cristais de quartzo dos veios mineralizados, indicam fluidos hidrotermais com origem a partir de influxos meteóricos no sistema hidrotermal. A alteração argílica, com caolinita dominando, foi possivelmente iniciada sob a ação dessa fase de fluidos, com

temperaturas da ordem de 150°C. A intensidade e o volume final da alteração argílica identificada nas três minas são consequência da ação de fluidos intempéricos que agiram sobre zonas de alteração argílica hidrotermal.

A caracterização mineralógica e de distribuição das zonas de alteração hidrotermal identificadas no Distrito Estanífero de Encruzilhada do Sul pode representar um modelo importante na identificação de sistemas hidrotermais para a geologia de exploração mineral em áreas graníticas.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bagdassarov, N.S.; Dingwell, D.B.; Webb, S.L. 1993. Effect of boron, phosphorus and fluorine on shear stress relaxation in haplogranite melts. **Eur. J. Mineral.**, **5**(3): 409-425.
- Bailey, S.W. 1984. Classification and structures of the micas. In: Bailey, S.W. (ed.). **Micas**. Chelsea, Mineral. Soc. Am., p. 1-12. (série Reviews in Mineralogy 13).
- Brindley, G.W. & Brown, G. 1984. Crystal Structure of Clay Minerals and Their X-ray Identification. **Mineralogical Society of London**. 495p.
- Chi, G.; Guha, J.; Zhang Lu, H. 1993. Separation mechanism in the formation of proximal and distal tin polymetallic deposits, Xinlu Ore Field, Southern China- Evidence from fluid inclusion data. **Econ. Geol.**, **88**(4): 916-933.
- Dempster, T.J.; Tanner, P.W.G.; Ainsworth, P. 1994. Chemical zoning of white micas: A record of fluid infiltration in the Oughterard granite, western Ireland. **Am Mineral.**, **79** (5/6): 536-544.
- Frantz, J.C.; Coelho, N.F., Botelho, N.F. 1998. Gênese e evolução dos fluidos envolvidos na alteração hidrotermal e na mineralização de estanho dos granitos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geociências**, **28**(3): 301-306.

- Lanson, B.; Beaufort, D.; Berger, G.; Bauer, A.; Cassagabere, A.; Meunier, A. 2002. Links between authigenic kaolin-group minerals and illitic minerals in diagenetically altered sandstone reservoirs. **ClayMinerals**, **37**(1): 1-22.
- Leinz, V. & Pinagel, H. 1945. **Estanho e Tungstênio no Rio Grande do Sul**. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM. 90 p. (Boletim 70).
- Monier, G. & Robert, J.L. 1986. Muscovite solid solutions in the system  $K_2O$ - $MgO$ - $FeO$ - $Al_2O_3$ - $SiO_2$ - $H_2O$ : an experimental study at 2 kbar  $P_{H_2O}$  and comparison with natural Li-free white micas. **Mineral. Mag.**, **50**: 257-266.
- Pollard, P.J.; Andrew, A.S.; Taylor, R.G. 1991. Fluid inclusion and stable isotope evidence for interaction between granites and magmatic hydrothermal fluids during formation of disseminated and pipe-style mineralization at the Zaaiplaats Tin Mine. **Econ. Geol.**, **86**(1): 121-141.
- Psyrillos, A.; Manning, D.A.C.; Burley, S.D. 1998. Geochemical constraints on kaolinization in the St Austell Granite, Cornwall, England. **Journal of the Geological Society**, **155**(5): 829-840.
- Samson, I.M. 1990. Fluid evolution and mineralization in a subvolcanic granite stock: The Mount Pleasant W-Mo-Sn Deposits, New Brunswick, Canada. **Econ. Geol.**, **85**(1): 145-163.
- Speer, J.A. 1984. Micas in igneous rocks. In: Bailey, S.W. (ed.). **Micas**. Chelsea, Mineral. Soc. Am. p. 299-356. (série Reviews in Mineralogy 13).
- Velde, B. 1965. Phengite micas: synthesis, stability, and natural occurrence. **Am. J. Sci.**, **263**: 886-913.

## **Discussão Final**

O trabalho que foi realizado durante as etapas de campo para a preparação da presente dissertação de mestrado permitiu a caracterização das principais zonas de alteração hidrotermal, em especial as zonas micáceas e argílicas, geradas como alteração pervasiva e nas cúpulas e nos contatos de corpos graníticos das suítes intrusivas Cordilheira e Campinas. Essas zonas de alteração hidrotermal representam os produtos gerados durante a circulação de fluidos, com o desenvolvimento de mineralizações de estanho.

Esse estudo permitiu, ainda, a caracterização das diferenças existentes entre as zonas de alteração hidrotermal micácea e argílica descritas nas principais minas de estanho do Distrito Estanífero de Encruzilhada do Sul.

A metodologia utilizada, envolvendo mapeamento geológico e amostragem dos diferentes tipos de rochas hidrotermalizadas, permitiu que as zonas de alteração hidrotermal locais fossem definidas.

Os processos hidrotermais que atuaram associados a rochas graníticas da Suíte Intrusiva Cordilheira foram responsáveis por amplas zonas pervasivas de alteração hidrotermal. Tais zonas foram geradas através da circulação de fluidos aquosos. Os fluidos hidrotermais associados a injeções de corpos granitóides da Suíte Intrusiva Campinas foram mais focados quanto a sua ação, gerando alteração hidrotermal restrita a cúpulas e zonas de contato das intrusões. As fases fluidas que geraram a alteração hidrotermal foram aquo-carbônicas e aquosas.

A circulação dos fluidos condicionou a formação da alteração hidrotermal que contém a mineralização de estanho do distrito e a zonalidade dessa alteração hidrotermal.

As zonas de cúpula das intrusões graníticas e as zonas de contato dos granitóides das suítes intrusivas Cordilheira e Campinas com suas encaixantes indicaram ser a relação espacial mais importante entre estas unidades graníticas, as zonas principais de alteração hidrotermal e a mineralização de estanho no Distrito Estanífero de Encruzilhada do Sul.

A amostragem de detalhe em *greisens*, veios de quartzo e zonas argilizadas permitiu identificar variações na composição dos produtos de alteração hidrotermal entre as diferentes minas e entre os diferentes tipos de granitóides que atuaram como protólitos para a alteração hidrotermal.

Os dados produzidos sobre a composição de minerais hidrotermais indicam dependência entre a composição dos protólitos e os produtos gerados. Feições deste tipo são observadas de forma importante nas micas brancas que resultaram da instabilização de biotita pré-existente e nas micas associadas a *greisens*.

A dominância de politipos  $2M_1$  nas micas brancas indica que as micas brancas presentes nos *greisens* das zonas hidrotermalizadas foram formadas a temperatura alta (Velde, 1965), possivelmente entre 450 e 500°C.

Inclusões fluidas aquosas tardias, com temperaturas de homogeneização da ordem de 100°C a 150°C, com ocorrência em zonas de contatos intergranulares de cristais de quartzo dos veios mineralizados, indicam a presença de fluidos hidrotermais originados por influxos meteóricos no sistema hidrotermal. A alteração argílica, com caolinita dominando, foi possivelmente iniciada sob a ação dessa fase de fluidos.

A intensidade e o volume final da alteração argílica identificada nas três minas têm indicações de haverem sido formados como consequência da ação de fluidos intempéricos que agiram sobre zonas pré-existentes de alteração argílica hidrotermal.

A caracterização mineralógica, da zonalidade e da distribuição das zonas de alteração hidrotermal associadas a tipos específicos de intrusões graníticas no Distrito

Estanífero de Encruzilhada do Sul representam um avanço no conhecimento geológico dessa região.

O estabelecimento de modelos hidrotermais e de zonalidades hidrotermais agregam um importante conhecimento na identificação de sistemas hidrotermais para a geologia de exploração mineral em áreas graníticas.

Teixeira, Roberto dos Santos  
Caracterização da alteração hidrotermal  
micácea do tipo greisen e dos reequilíbrios de  
baixa temperatura em áreas graníticas: o exemplo  
do Distrito Estanífero de Encruzilhada do Sul, RS.  
/ Roberto dos Santos Teixeira. – Porto Alegre:  
UFRGS, 2005.  
[43f.]. il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências.  
Programa de Pós-Graduação em Geociências,  
Porto Alegre, RS - BR, 2005.

1. Geoquímica. 2. Alteração Hidrotermal. 3.  
Encruzilhada do Sul, RS. I.Título.

---

Catálogo na Publicação  
Biblioteca do Instituto de Geociências – UFRGS  
Renata Cristina Grün CRB10/1113