

ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL E MINERALIZAÇÃO DO  
DEPÓSITO AURÍFERO DA MINA SAN GREGÓRIO -  
URUGUAI

T.F.P. de Quadros

Curso de Pós-Graduação, Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre,

J.C. Koppe

Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, RS

## ABSTRACT

*This work relates hydrothermal controls associated with mineralization of the San Gregorio Gold Mine, located in a Precambrian basement window named Rivera Crystalline Island, north of Uruguay. The mineralizing environment is characterized by high fluid-rock ratio, focused in a shear zone, where a transtensive structure trapped the hydrothermal fluids, focusing and controlling the mineralization at the San Gregorio Gold Mine. In this environment, interactions between fluids and the hostesses reactive rocks, produced six hydrothermal phases (three ore phases). The hydrothermal alteration was characterized by chloritization, carbonitization, sericitization, sulphetation and oxidation main processes, in a retrogressive, brittle-ductile to brittle, sin to post-tectonic regime, under temperature and pressure conditions compatible with greenschist facies metamorphism. The ore fluids carried the gold in the thio-complexes form, under neutral conditions and, perhaps, under gradually increase oxidation, as indicated by hydrothermal paragenesis. The gold deposition was motivated by sulphetation and boiling processes, in the first and second ore phases, respectively, the third ore phase was characterized mainly by gold remobilization deposited by two previous ore phases.*

## RESUMO

*Este trabalho descreve os controles hidrotermais associados à mineralização do depósito aurífero da Mina San Gregorio, localizada na Ilha Cristalina de Rivera, uma janela do embasamento Pré-Cambriano exposta no norte do Uruguai. O ambiente mineralizador foi caracterizado por altas razões fluido-rocha, focalizados em uma zona de cisalhamento, onde uma estrutura de transtensão atuou como armadilha para os fluidos hidrotermais, concentrando-os e condicionando a mineralização na Mina San Gregorio. Neste ambiente, reações fluido-rocha produziram seis fases hidrotermais, três das quais associadas à mineralização aurífera. A alteração hidrotermal foi caracterizada pelos processos principais de cloritização, carbonatação, sericitização, sulfetação, silicificação e oxidação, em um ambiente retrogressivo do tipo frágil-dúctil a frágil e sin a pós-tectônico, em condições equivalentes à fácies metamórfica xisto-verde. Os fluidos mineralizantes transportaram o ouro por meio de complexos sulfetados, em condições aproximadamente neutras e, pelo menos, gradativamente oxidantes, como indicado pela paragénese hidrotermal. A deposição do ouro foi causada por processos de sulfetação e de "boiling", na primeira e segunda fases de mineralização, respectivamente; a terceira fase caracterizou-se, principalmente, pela remobilização do ouro depositado pelas duas fases anteriores.*

## INTRODUÇÃO

Quando as rochas são infiltradas por grandes quantidades de fluido advindos de uma fonte externa, a composição dos minerais constituintes das rochas muda, adaptando-se à composição do fluido (Barnes, 1987).

Numa área de descarga de fluidos focalizada, como em uma zona de cisalhamento, o volume de fluidos excede em muito a capacidade de tamponamento das rochas; com isso a composição mineralógica e

química das rochas da área afetada é, também, controlada pela composição do fluido. Porém, o zonamento mineralógico-químico, observado em muitos depósitos minerais associados a zonas hidrotermalmente alteradas, pode, por outro lado, refletir algumas variações na composição do fluido. Estas variações são, em geral, resultantes de sua interação com as encaixantes (Quadros, 1995).

Este ambiente, caracterizado por altas razões fluido-rocha, focalizados em uma zona de cisalhamento, foi o am-

ambiente gerador das associações mineralógicas que caracterizaram as seis fases hidrotermais identificadas na Mina San Gregorio; três das quais associadas à mineralização aurífera. Na zona de cisalhamento (Sistema de Cisalhamento Rivera (SCR) e a Estrutura San Gregorio (ESG)), uma estrutura de transtensão do tipo *duplexing at bend* atuou como uma armadilha para os fluidos, isto é, uma zona de alívio de pressão que concentrou os fluidos mineralizantes e condicionou o processo mine-

ralizador. Estes fluidos formaram o depósito aurífero da Mina San Gregorio (Quadros, 1995; Quadros et al., 1995), classificado, por Quadros (op. cit.), como uma jazida hidrotermal epigenética meso a epitermal, localizada na porção norte do Uruguai (ver mapa de localização, Fig.1), em uma área de exposição de rochas Pré-Cambrianas, denominada Ilha Cristalina de Rivera.

## FASES DE ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL

A tendência evolucional das interações fluido-encaixante ocorreu no sentido da formação de paragêneses mais simples e homogêneas no final do processo. O zonamento hidrotermal constituiu-se na principal evidência da tendência das rochas encaixantes em direção ao equilíbrio ou à evolução química.

Evidentemente que, como em San Gregorio, o hidrotermalismo e a mineralização aurífera estiveram associados a reativações do Sistema de Cisalhamento Rivera, estes estiveram relacionados intimamente aos esforços tectônicos que atuaram na região, em uma época sin a pós-tectônica.

Em San Gregorio, as fases hidrotermais estabeleceram-se sobre rochas dioríticas e sienograníticas, constituindo os minérios A (de capa) e B (de lapa), respectivamente. A intensidade do hidrotermalismo e da deformação atuou no sentido do aumento em direção ao interior da zona de cisalhamento. As primeiras fases, apesar de menos intensas, estabeleceram-se sobre uma maior área de cobertura, enquanto as fases posteriores cobriram uma área menor, mais no interior da zona de

cisalhamento. Evidentemente que, em virtude das diferenças composicionais e reológicas das encaixantes, os processos deformativos e alterativos atuaram de maneira diversa. Com isso, observou-se que as fases iniciais, pervasivas, estabeleceram-se mais intensamente nos dioritos, composicionalmente mais reativos, enquanto as fases finais, mais venulares, atuaram principalmente sobre os granitos, reologicamente mais frágeis.

A seguir, são detalhadas as seis fases de alteração, dentre as quais três fases de mine-

ralização aurífera associadas, encontradas em San Gregorio, em ordem cronológica decrescente. Estas fases de alteração hidrotermal foram discriminadas com base em associações minerais diagnósticas e na relação espacial com o minério, seguindo o procedimento adotado por Kischida & Kerrich (1987), ao estudar o depósito de Kirkland Lake, Ontário.

### Fase clorita-carbonato (Fase 1)

Esta fase de alteração pervasiva constituiu o halo mais distal, marcando o início

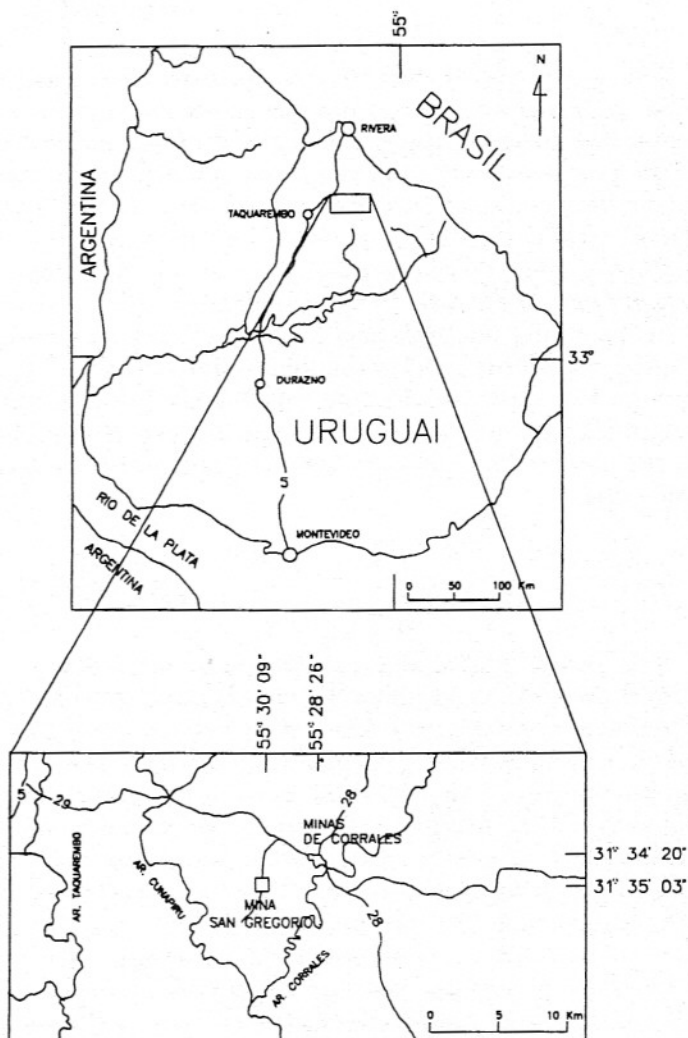


Figura 1 - Mapa de localização.

do processo hidrotermal, situando-se, predominantemente, sobre as rochas classificadas como dioritos e dioritos hidrotermalizados. O sienogranito, de composição menos reativa em relação aos elementos transportados pelo fluido mineralizante, manteve-se inalterado, durante esta fase. Os limites externos desta fase mantiveram-se relativamente restritos aos limites externos da zona de cisalhamento (porção sul da mina), enquanto os limites internos comportaram-se de maneira razoavelmente difusa devido a algumas transições com a fase carbonato-mica branca-

ouro, mais interna à zona de cisalhamento, porém, de uma maneira geral, estes situaram-se sobre o contato diorito hidrotermalizado / diorito protomilonítico hidrotermalizado (mapa de detalhe, Fig. 2).

Os dioritos encaixantes, afetados por esta fase, mostraram uma granulação mais fina em relação aos dioritos externos à ESG, bem como uma coloração verde-escuro acinzentada característica. Aspectos de deformação tectônica, como o alongamento e a orientação da textura primária, bem como o estabelecimento da textura secundária, caracterizada pelos

minerais de alteração, foram intensificados no sentido do interior da zona de cisalhamento. Os minerais diagnósticos desta fase compreenderam a clorita e o carbonato, secundariamente albita, epidoto, óxidos e, mais raramente, actinolita, biotita, quartzo e esfeno.

A actinolita e a biotita apresentaram um comportamento metaestável a instável, porém, foram colocadas nesta fase em virtude de sua ocorrência restrita e da impossibilidade de separá-las em uma fase individualizada, que, possivelmente, deveria ser anterior a fase clorita-carbonato, cor-

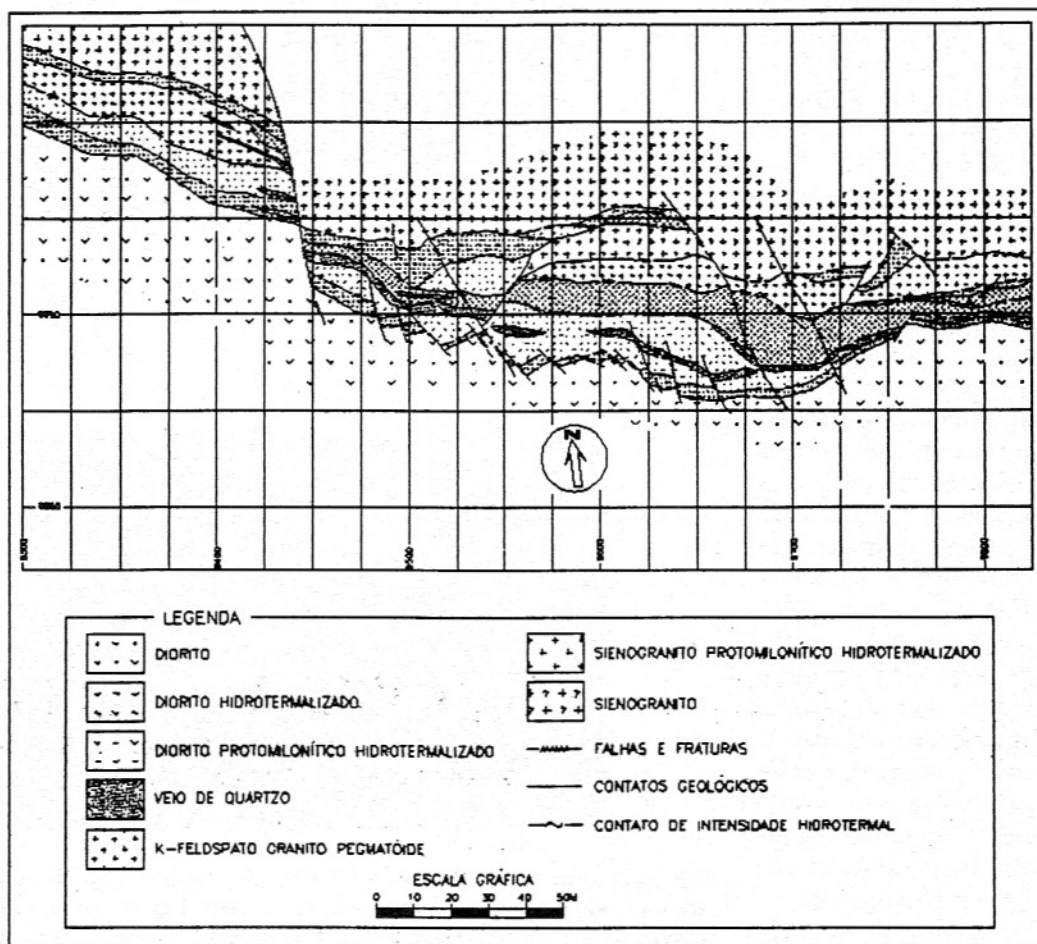


Figura 2 - Mapa de detalhe da Mina San Gregorio.

respondendo a uma temperatura mais elevada, acima de 350°C.

A ocorrência de óxidos correspondeu à formação de agregados de pseudobrookita e anatásio. Associada a esses agregados, é comum a ocorrência de ilmenita e magnetita titanífera, algumas vezes inclusas naqueles, sugerindo que os agregados sejam o resultado de substituição pseudomórfica da ilmenita e magnetita. No sentido do interior da zona de cisalhamento, estes agregados, localmente, começam a ser substituídos por rutilo e associações de rutilo e anatásio; por vezes, cristais de pirita ocorrem associados, principalmente, próximo ao contato com a fase carbonato-sericita.

Foram predominantes e diagnósticos desta fase alterativa, os processos de cloritização e carbonatação. A cloritização manifestou-se pela formação de clorita às expensas dos máficos (piroxênio, anfíbólio e biotita), localmente, como substituição do plagioclásio primário. A carbonatação resultou na formação de calcita e, mais raramente, Fe-dolomita, a partir dos máficos, e de cristais de plagioclásio primários, em associação com clorita. Em geral, o processo de carbonatação desenvolveu-se paralelamente à orientação da textura de alteração. As reações, que ocorreram durante esta fase alterativa, indicaram a adição de  $H^+$  (hidrólise),  $H_2O$  (hidratação),  $CO_2$  (carbonatação), e algum S (sulfetação incipiente). Foi importante, também, a liberação inicial de Ti e Fe dos óxidos originais e fixação do elemento Ti pelos minerais de alteração (pseudobrookita e anatásio), enquanto o aparecimento de algum sulfeto e magnetita secundária indicou a

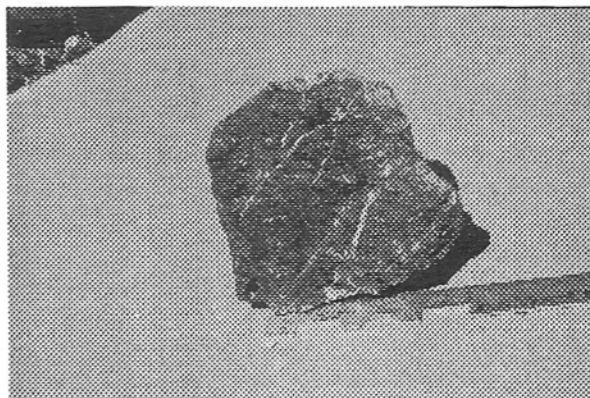
fixação do elemento Fe extraído; este fato presume um incremento inicial da  $f_s$ .

Esta fase de alteração pervasiva foi cortada localmente por raras vênulas preenchidas por quartzo, carbonato e microclínio (Fase 4), e por vênulas mais tardias e mais finas preenchidas por carbonato (Fase 5), por vezes reabertas e preenchidas por filmes óxidos (Fase 6). Faixas compostas por microclínio e quartzo, com carbonato subordinado (Fase 2), também cortaram esta fase. As

Figuras 3 e 4 mostram algumas feições pertinentes a esta fase.

#### Fase feldspato potássico-quartzo (Fase 2)

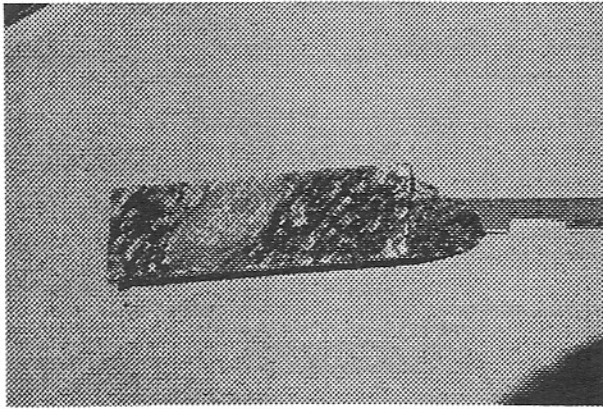
Esta fase (Figs. 5 e 6) caracterizou-se por formar faixas compostas por feldspato potássico, quartzo e, subordinadamente, carbonato, raramente albita, as quais cortaram a associação mineral que compôs a fase anterior (Fase 1), sendo identificadas, principalmente, por suas cores avermelhadas



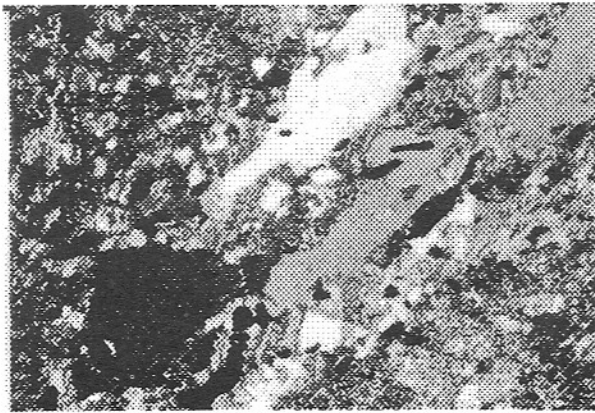
**Figura 3** - Fase clorita-carbonato sobre o diorito hidrotermalizado, cortado por uma rede de vênulas (Fase 5) preenchidas por quartzo e carbonato e com locais de oxidações.



**Figura 4** - Fotomicrografia mostrando os processos de carbonatação e, secundariamente, cloritização, pertencentes à Fase clorita-carbonato. Vênula de carbonato (Fase 5), com clorita na borda, é, posteriormente, cortada por microvênulas preenchidas por filme óxido. LP. Escala: 1cm = 0,5 mm.



**Figura 5** - Testemunho de sondagem mostrando a Fase K-feldspato-quartzo, onde faixas constituídas por estes minerais, acompanhados por carbonato, cortam a rocha afetada pela Fase 1.



**Figura 6** - Fotomicrografia onde aparece faixa de K-feldspato-quartzo (Fase 2) cortando a rocha afetada pela fase de alteração anterior. Notar embainhamentos e inclusões de minerais da Fase 1 nos cristais de feldspato e quartzo da faixa. LP. Escala: 1cm = 0,5mm.

contrastando com o fundo esverdeado imposto pela Fase 1. Como a fase clorita-carbonato, esta fase de alteração também não foi identificada nas rochas graníticas.

Estas faixas possuem, em seu interior, inclusões de diversos constituintes da rocha e, inclusive, de minerais característicos da fase clorita-carbonato, como cristais de plagioclásio parcialmente alterados, apatita, opacos e ferromagnesianos alterados, muitas vezes alongados.

O processo predominante característico desta fase é a potassificação, indicada pela

presença ostensiva do feldspato potássico, produzido por metasomatismo de K sobre a mineralogia da rocha. A razão  $K^+/H^+$  é elevada, posicionando-se sobre o campo de estabilidade do feldspato potássico.

#### Fase carbonato-mica branca-sulfeto-ouro (Fase 3)

Esta fase (Figs. 7 e 8) constituiu o halo mais interno da zona hidrotermal, envolvendo o veio de quartzo F1, que marcou a faixa central da mina, e inaugurando o processo mineralizador, na medida em

que comportou a primeira fase de mineralização aurífera. Evidenciou um incremento das transformações hidrotermais.

Caracterizou-se por apresentar cores em tons acastanhados e granulação fina. Nos dioritos, limitou-se, externamente, no contato com a fase clorita-carbonato e, internamente, com o veio F1. Nos sienogranitos, apesar de menos intensa, devido à composição menos reativa desta rocha em relação ao fluido mineralizante, limitou-se à área coberta pelo sienogranito protomilonítico hidrotermalizado (ver mapa, Fig. 2). Ao longo da área afetada por esta fase, no sentido do interior da zona de cisalhamento, observou-se a potencialização da alteração e da deformação, esta última, inicialmente com características mais dúcteis, com a geração de texturas protomiloníticas e miloníticas, que passaram a padrões mais frágeis, com a formação de fraturas, além de venulações (representantes das fases de alteração posteriores, tipicamente frágeis). Esta graduação indicou um ambiente frágil-dúctil quando do estabelecimento desta fase, ainda predominantemente pervasiva.

A associação hidrotermal que representou esta fase foi cortada por uma grande intensidade de vênulas, de quartzo-carbonato-sulfeto, representantes da fase de alteração 4, bem como vênulas mais finas e mais tardias de carbonato (Fase 5). Localmente, faixas com grande intensidade de fraturas preenchidas por filmes óxidos (Fase 6) conferiram à rocha uma coloração amarronzada.

Os minerais característicos desta fase abrangeram carbonatos, mica branca, sulfetos, óxidos e, subordinadamente, clorita e algum quartzo. Esta

mineralogia apontou a carbonatação, sericitização, e sulfetação, como os principais processos alterativos.

A intensa carbonatação, desenvolvida paralelamente às texturas miloníticas, foi responsável pela formação da Fedolomita, indicando um aumento na atividade do  $\text{CO}_2$ .

A sericitização consistiu na formação de mica branca, sugerindo uma razão  $\text{K}^+/\text{H}^+$  mais baixa em relação a fase anterior, com o posicionamento desta razão sobre o campo da muscovita.

A sulfetação produziu, principalmente, pirita, bem cristalizada, com forma euédrica e granulação média, e mais raramente, calcopirita, galena e esfalerita, dentre outros. Associada a este processo, instalou-se a primeira fase de mineralização aurífera.

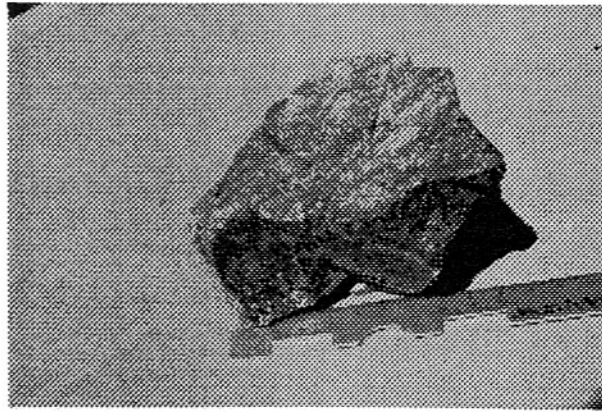
Esta associação foi explicada pelo mecanismo de sulfetação das encaixantes, também observada em outros depósitos auríferos por Phillips & Groves (1983), Romberger (1988), Neall (1987), Huston & Large (1989), entre outros. Através deste mecanismo, principalmente encaixantes com alta razão  $\text{FeO}/\text{FeO} + \text{MgO}$ , como os dioritos da ESG, forneceram o elemento Fe a partir dos máficos e dos óxidos, enquanto o fluido mineralizante forneceu os elementos S e Au, associados em complexos do tipo  $\text{Au}(\text{HS})_2^-$  (Seward, 1984), que se desestabilizaram quando o fluido entrou em contato com as encaixantes, produzindo, principalmente, pirita e ouro associado. O ouro precipitou devido à diminuição da atividade do S no fluido, o que baixou a solubilidade do Au naquele.

Em San Gregorio, este processo foi consubstanciado pelas reações entre a ilmenita e

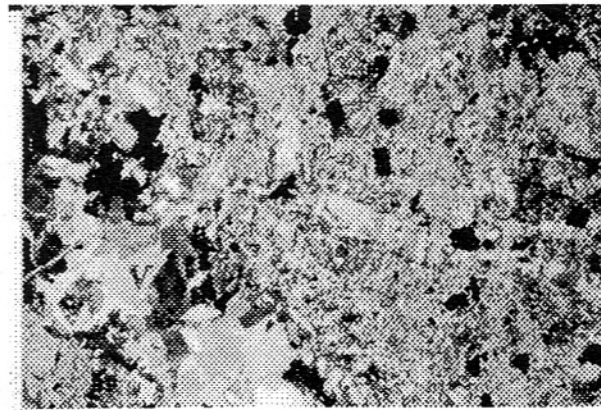
magnetita primárias e o fluido mineralizante, transformadas, pseudomorficamente, para pseudobrookita e anatásio na fase clorita-carbonato, e, posteriormente, principalmente nesta fase carbonato-mica branca-sulfeto-ouro, para anatásio e rutilo, indicando um aumento na atividade do elemento S (Udubasa, 1980). Associado a estes agregados, instalaram-se a pirita e o ouro. Com isso, o Ti e o Fe, liberados pelos óxidos primários, foram incorporados

nos óxidos hidrotermais, e nas piritas, respectivamente. A sulfetação atuou de maneira mais intensa nos dioritos, mais reativos, com isso esta primeira fase de mineralização aurífera foi menos proeminente no sienogranito, mais pobre em minerais ferromagnesianos.

A partir do anteriormente exposto, as reações, em geral de hidrólise e carbonatação, que marcaram esta fase, caracterizaram alta atividade de  $\text{CO}_2$ , S, e média razão  $\text{K}^+/\text{H}^+$ .



**Figura 7** - Diorito protomilonítico hidrotermalizado típico, afetado pela Fase carbonato-mica branca-sulfeto-ouro, onde aparece textura protomilonítica constituída de carbonato e mica branca alterando cristais de plagioclásio. Grãos de pirita e opacos são afetados por processo de oxidação.



**Figura 8** - Fase carbonato-mica branca-sulfeto-ouro em fotomicrografia. A rocha é afetada por processos de carbonatação, sericitização e sulfetação. Vênula posterior de quartzo e carbonato da Fase 4 (1) corta a mineralogia desta fase de alteração. LP. Escala: 1cm = 0,5 mm.

#### Fase quartzo-carbonato-sulfeto-ouro (Fase 4)

Esta fase de alteração (Figs. 9 e 10), principalmente venular, marcou a instalação de um ambiente mais frágil, além da segunda fase de mineralização aurífera.

Caracterizou-se, principalmente, pela instalação de um veio de quartzo, de grande possança, denominado veio F1, posicionado paralelamente e ao longo da falha F1 (ver mapa, Fig. 2), a mais proeminente da zona de cisalhamento, o qual separou, na área da mina, as rochas dioríticas das sienograníticas.

A mineralogia diagnóstica do veio F1 foi composta por quartzo, carbonatos de granulação fina, feldspato potássico, identificado como microclínio, e sulfetos bem cristalizados, principalmente pirita, porém, de granulação fina.

Partículas de ouro de granulação muito fina ocorrem, em geral, nos interstícios da mineralogia do veio. Toda essa mineralogia mostrou processos de fraturamento e mesmo brechação em intensidades variáveis.

Este veio F1, formado a partir de aberturas e reaberturas geradas por processos multifásicos de hidrofraturamento que, acompanhados por processos tectônicos, geraram texturas cataclásticas do tipo brecha, também mostrou, localmente, texturas laminadas e crustiformes, observando-se classificação descrita em Hodgson (1989).

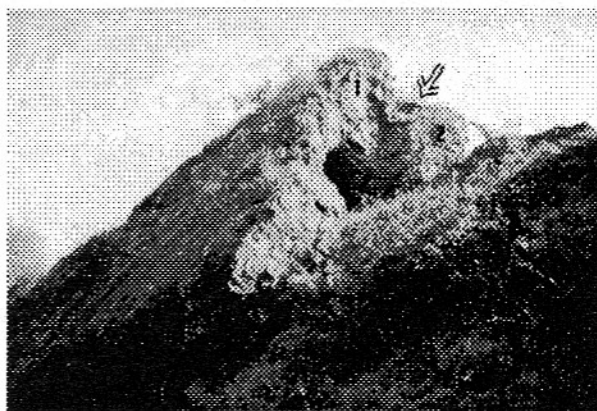
Esta fase de alteração também foi responsável pela instalação de uma rede de venulações, em geral posicionadas paralelamente ao veio F1, compostas com a mesma mineralogia e texturas deste e cor-

tando as encaixantes dioríticas e sienograníticas, alteradas pela fase anterior (carbonato-mica branca-sulfeto-ouro). Nas paredes destas vênulas e, também localmente, no veio F1, ocorrem fragmentos das encaixantes, que foram arrancados quando da instalação dos veios por processos de hidrofraturamento, gerando texturas brechadas, conforme classificação de Hodgson (1989). Nas proximidades das vênulas, observou-se uma intensificação das transformações mineralógicas e texturais, com a implantação de um processo de

silicificação pervasiva, acompanhado por um processo de potassificação subordinado, sobre a rocha alterada pelo processo alterativo anterior, indicando que o processo de silicificação, nas proximidades do veio F1, foi também pervasivo, além de venular.

A associação mineral descrita para esta fase indicou que processos de silicificação, carbonatação, sulfetação e, s u b o r d i n a d a m e n t e , potassificação foram intensos.

É importante salientar que a posterioridade deste processo de sulfetação em relação



**Figura 9** - Veio F1 (1, à esquerda), pertencente à Fase quartzo-carbonato-sulfeto-ouro, marcando a falha F1 (seta) que o separa do K-feldspato granito pegmatóide (2, à direita).



**Figura 10** - Vênulas de quartzo e carbonato (Fase 4) sobre o diorito hidrotermalizado. Notar fragmentos da rocha alterada arrancados e imersos no veio.



a sulfetação da fase anterior foi indicada por diferenças texturais entre as duas gerações de pirita (pirita da fase anterior mostra-se fraturada e com granulação maior), além das relações de *crosscutting*, onde, por vezes, piritas representando da fase anterior foram cortadas por vênulas com piritas de segunda geração, representando desta Fase 4.

Nesta fase alterativa, a mineralização aurífera ocorreu, principalmente associada aos processos de formação dos veios, preenchendo fraturas como resultado de queda súbita de pressão, que promoveu o imediato preenchimento da mesma pelo fluido mineralizante. Conforme a fratura foi sendo aberta, o fluido hidrotermal entrou em contato com as paredes das encaixantes que, em resposta à alta pressão de fluidos explodiu, formando zonas de brechação. A extensão da fratura deu-se por sucessivos episódios de fraturamento hidráulico explosivo e brechação, de acordo com os conceitos de Phillips (1972).

Após a ocorrência do hidrofraturamento, também auxiliado por esforços tectônicos, a precipitação dos elementos dissolvidos no fluido hidrotermal, ocorreu, possivelmente, por mecanismos do tipo *boiling* (auxiliados por alguma queda na temperatura), promovendo a redução da atividade do S na solução e a oxidação do fluido e conseqüente precipitação dos metais e demais elementos que estavam em solução. A precipitação do ouro pode ter ocorrido, em nível de hipótese, principalmente, em função da queda na atividade do S, que desestabilizou os complexos bisulfídicos transportadores do ouro, de acordo com os conceitos de Drummond & Ohmoto

(1985), Seward (1984), Romberger (1988).

Este complexo evento multifásico de formação de veios, em parte também pervasivo, foi, na área da mina, cortado por venulações tardias, representantes de fases alterativas posteriores de carbonatação e oxidação.

#### Fase carbonato venular (Fase 5)

Esta fase (Fig. 11), tipicamente venular, estabelecida em ambiente essencialmente frágil, gerou uma rede de finas vênulas preenchidas, predominantemente, por carbonato (Fedolomita, identificada por colorimetria) e, subordinadamente, por clorita recristalizada.

Estas venulações, que ocorreram tanto nas encaixantes dioríticas quanto nas encaixantes sienograníticas, cortaram todas as fases de alteração e estruturas anteriores.

#### Fase óxido-ouro (Fase 6)

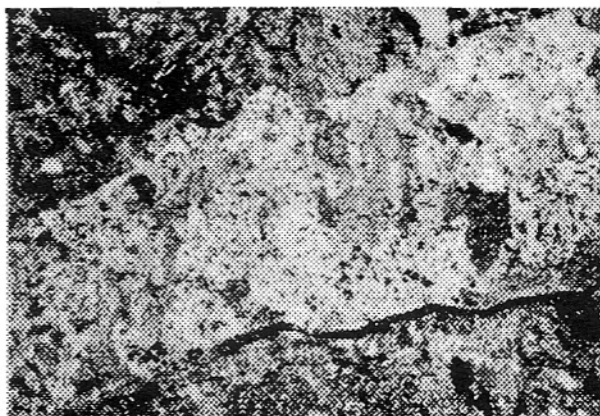
Esta fase (Fig. 12) marcou o final do processo hidrotermal em San Gregorio e

foi responsável pela instalação da terceira e última fase aurífera na mina.

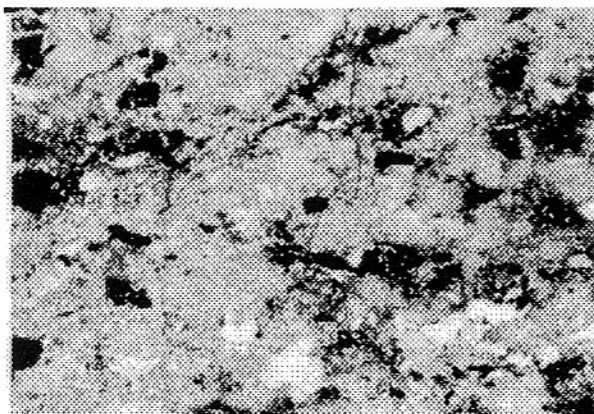
Em um ambiente ainda frágil, reativações das estruturas condicionaram a abertura, bem como a reabertura, de fraturas e venulações por onde um fluido, agora mais oxidante, percolou, formando filmes óxidos e produzindo, nas imediações destas fraturas, oxidações da mineralogia existente. Estes fluidos, causaram a oxidação, principalmente, das piritas, por substituição pseudomórfica, e dos carbonatos ferríferos, tanto das fases pervasivas como da fase venular, e geraram minerais do tipo goethita e, subordinadamente, hematita.

Associados a esses óxidos, posicionaram-se grãos de ouro, muitos inclusos nestes e relativos às fases auríferas anteriores (ouro incluso em goethita gerada por substituição pseudomórfica das piritas associadas à primeira fase aurífera), e outros em fraturas, remobilizados pelos fluidos oxidantes.

A remobilização do ouro, neste caso, poderia ser explicada, como hipótese, a partir de complexos do tipo AuS<sub>2</sub>,



**Figura 11** - Fotomicrografia onde aparece vênula de carbonato (Fase 5) cortando a rocha afetada pelas fases de alterações anteriores. Microvênula posterior (na borda) preenchida por filme óxido corta a vênula de carbonato. LP. Escala: 1 cm = 0,5 mm.



**Figura 12** - Fotomicrografia mostrando o processo de oxidação (Fase 6) atuando sobre opacos e pirritas. LP. Escala: 1cm = 0,5 mm.

de boa mobilidade em ambientes um pouco mais oxidantes segundo estudos de Seward (1984) e Huston & Large (1989). O ouro, remobilizado das pirritas a partir de um aumento na atividade do elemento S nas proximidades destas, quando da goethitização destas pirritas, poderia formar complexos de polisulfetos estáveis em soluções parcialmente oxidantes e ser transportados por estes em condições próximas ao tampão pirita-hematita.

A precipitação do ouro ocorreria por maiores aumentos no Eh/pH dos fluidos, segundo conceitos de Huston & Large (1989).

### RELAÇÕES ENTRE AS FASES DE ALTERAÇÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O hidrotermalismo, sin a pós-tectônico, caracterizado pelas seis fases de alteração identificadas em San Gregorio, atuou em um ambiente frágil-dúctil a frágil retrogressivo, produzindo, a partir de reações fluido-encaixantes, minerais hidrotermais equivalentes a fácies metamórfica xisto-verde, em um ambiente caracterizado

por temperaturas e pressões abaixo de 350°C e 2kb, respectivamente (Quadros, 1995).

A interação fluido-rocha evoluiu no tempo e no espaço, de maneira a determinar a formação dos halos de alteração hidrotermal, onde as fases iniciais distribuíram-se em uma área maior, enquanto as fases posteriores restringiram-se às porções mais centrais.

A ambiência frágil-dúctil a frágil e sin a pós-tectônica do hidrotermalismo ficou evidente, principalmente, a partir da instalação das fases iniciais pervasivas, em geral, dispostas concordantemente às texturas protomiloníticas, seguidas pelas fases finais venulares, com orientações médias concordantes à zona de cisalhamento, e formadas por reativações da fase de deformação D1 que afetou a ESG (Quadros, 1995; Quadros et al., 1995), e por processos de fraturamento hidráulico, em resposta a diminuição da porosidade das encaixantes causada pela instalação da mineralogia hidrotermal e conseqüente aumento da Pf.

A ordem cronológico-evolutiva, conforme utilizada para a descrição das fases

hidrotermais, da mais antiga para a mais nova (Fase 1 a 6), foi consubstanciada pelas relações texturais e mineralógicas entre elas.

A interação fluido-rocha foi expressa pelas associações mineralógicas nas diferentes fases de alteração, às quais são mostradas na Tabela 1, onde a Fase 1 corresponde à fase clorita-carbonato, a Fase 2 corresponde à fase feldspato potássico-quartzo, a Fase 3 corresponde à fase carbonato-mica branca-sulfeto-ouro, a Fase 4 corresponde à fase quartzo-carbonato-sulfeto-ouro, a Fase 5 corresponde à fase carbonato venular e a Fase 6 corresponde à fase óxido-ouro.

Observando-se o processo hidrotermal como um todo, verificou-se a importância dos processos de cloritização, carbonatação, sericitização, sulfetação, silicificação e oxidação, mais ou menos nesta ordem cronológica, na formação das fases hidrotermais, onde o hidrotermalismo atuou no sentido do aumento na atividade do CO<sub>2</sub>, S e do O<sub>2</sub>. O aumento na concentração da sílica durante a evolução dos fluidos ficou claro a partir da geração dos veios de quartzo.

O pH manteve-se próximo a valores neutros durante todo o processo evolutivo. Possíveis diminuições do pH devido a produção de H<sup>+</sup> pelos processos de dissociação de ácidos e de carbonatação, durante os processos hidrotermais, podem ter sido, em parte, neutralizadas pelas reações de hidrólise formadas, por exemplo durante a sericitização dos feldspatos, de acordo com os conceitos de Kishida & Kerrich (1987) e Mikucki & Ridley (1993).

O aumento do Eh, foi evidenciado pelo aumento na atividade do O<sub>2</sub>, a partir das

**Tabela 1** - Evolução paragenética das fases hidrotermais.

Fases	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	Fase 6
Hidrotermais/ Mineralogia						
Clorita	+++++		-----		-----	
Pbrook-Anat	+++++	-----				
Actinolita	++-----					
Epídoto	++-----					
Biotita	++-----					
Esfeno	-----					
Albita	++++-----	-----				
Anat-Rutilo	-----	-----	+++++			
Calcita	+++++					
Quartzo	-----	+++++	-----	+++++		
Microclínio		+++++	-----	-----		
Fe-dolomita		-----	+++++	+++++	+++++	
Mica branca			+++++			
Sulfetos			+++++	+++++		
Goet-Hemat						+++++
Ouro			+++++	+++++		+++++

Legenda: — Fase metaestável, +++ Fase estável, Pbrook = Pseudobrookita, Anat = Anatásio, Goet = Goethita, Hemat = Hematita

interações fluido-rocha, pelo menos, o que culminou no processo de oxidação no final do hidrotermalismo, já que não foram constatados processos intempéricos mais profundos que denunciasses a participação de fluidos meteóricos no

processo hidrotermal.

O ouro foi, muito possivelmente, transportado por complexos bissulfídicos do tipo  $Au(HS)_2^-$ , sendo precipitado por processos de sulfetação das encaixantes na primeira fase de mineralização, e por mecanis-

mos do tipo *boiling* na segunda fase de mineralização. A terceira fase constituiu-se, mais provavelmente, em um processo de remobilização, onde complexos polissulfídicos do tipo  $AuS_2$  podem ter sido importantes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARNES, H.L. (1979) Geochemistry of hydrothermal ore deposits. John Wiley & Sons, Inc., 798 p.
- DRUMMOND, S.E. & OHMOTO, H. (1985) Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems. *Economic Geology*, **80**:126-147.
- HODGSON, C.J. (1989) The structure of shear-related, vein-type gold deposits: a review. *Ore Geology Reviews*, **4**:231-273.
- HUSTON, D.L. & LARGE, R.R. (1989) A chemical model for the concentration of gold in volcanogenic massive sulfide deposits. *Ore Geology Reviews*, **4**:171-200.
- KISHIDA, A. & KERRICH, R. (1987) Hydrothermal alteration zoning and gold concentration at the Kerr-Addison Archean Lode Gold Deposit, Kirkland Lake, Ontario. *Economic Geology*, **82**:649-690.
- MIKUCKI, E.J. & RIDLEY, J.R. (1993) The hydrothermal fluid of Archean lode-gold deposits at different metamorphic grades: compositional constraints from ore and wallrock alteration assemblages. *Mineral. Deposita*, **28**:469-481.
- NEALL, F.B. (1987) Sulphidation of iron-rich rocks as a precipitation mechanism for large Archean gold deposits in Western Australia: thermodynamic confirmation. In: S.E. Ho & D.I. Groves (Eds.) *Recent Advances in Understanding Precambrian Gold Deposits*. Geol. Dept. & Univ. Ext., Univ. West. Australia, publ. **11**:265-269.
- PHILLIPS, W.J. (1972) Hydraulic fracturing and mineralization. *J. Geol. Soc. Lond.*, **128**:337-359.

- PHILLIPS, G.N. & GROVES, D.I. (1983) The nature of Archean gold-bearing fluids as deduced from gold deposits of Western Australia. *J. Geol. Soc. Aust.*, **30**:15-39.
- QUADROS, T.F.P. de (1995) Geologia e gênese do depósito aurífero da Mina San Gregorio. Diss. de Mest., Curso de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 196p.
- QUADROS, T.F.P. de; KOPPE, J.C.; STRIEDER, A.J. (1995) Dynamic shear development and mineralization at the San Gregorio gold mine, Uruguay. In: Hans-Peter Rossmannith (Ed.) *Proceedings of the Second International Conference on the mechanics of jointed and faulted rock*, Viena. A.A. Balkema publ., Rotterdam (Netherlands), p.347-353.
- ROMBERGER, S.B. (1988) Geochemistry of gold in hydrothermal deposits. *U. S. Geol. Surv. Bull.*, **1857-A**:9-25.
- SEWARD, T.M. (1984) The transport and deposition of gold in hydrothermal systems. In: R.P. Foster, (Ed.), *Gold'82: The Geology, Geochemistry and Genesis of Gold Deposits*. A. A. Balkema, Rotterdam, p.168-181.
- UDUBASA, G. (1980) Rutile of posmagmatic mineral formation. *Dări Seamă Inst. Geol. Geofiz.*, (Rom.) Bucharest., **1**:784-793.