

DEPÓSITOS DE ESMERALDA DE SANTA TEREZINHA (GO)

JOÃO CARLOS BIONDI*

ABSTRACT EMERALD DEPOSITS OF SANTA TEREZINHA (GOIÁS, BRAZIL). Mesoscopic and microscopic analysis of the structural deformation underwent by Santa Terezinha Sequence led to the recognition of five different types of emerald ore bodies, a. Complex folded ore body, generated by substitution of geological units deformed during Dn+2, Dn+3, and Dn+4 events; b. Plane horizontalized ore body, deformed by Dn+3 and Dn+4 events; c. Plane verticalized ore body, mat fills tension faults and anti-Riedel faults of Dn+4 event; d. Pipe and "boat" like ore bodies, restricted to the axial zones of Fn+2 folds; and e. Stratiform ore body, generated by replacement of some rocks by hydrothermal fluids coming from faults. Two types of ores, the carbonate (rich) ore and the chlorite-biotite (poor) ore, and nine types of hydrothermal zones have been characterized chemical and mineralogically. The mass balance of the hydrothermalism shows that occurred two phases of hydrothermal activities: a. Structurally induced infiltration of shear zone by CO₂ rich hot water. Talc schists were carbonated and leached. Adjacent rocks received part of the substances leached and all the system is depleted on F and K₂O; b. The system was overruled by a reflux of meteoric water and by a new hydrothermal fluid, probably granite derived, rich in Be and F, perhaps with K₂O, Na₂O, SiO₂ and S too. In this phase, emeralds were emplaced into carbonated talc schists; chlorite-biotite ore envelops the carbonated talc-schist and hydrothermal zones developed, making emerald-deposits as they are today.

Keywords: Emerald deposits, hydrothermalism, Santa Terezinha Region (GO-Brazil), structural control.

RESUMO A análise microscópica e mesoscópica das deformações que afetaram a Sequência Santa Terezinha permitiu identificar cinco tipos de corpos mineralizados em esmeraldas: a. minério dobrado de modo complexo, formado pela substituição de rochas afetadas pelas deformações Dn+2, Dn+3 e Dn+4; b. minério plano horizontalizado, afetado pelas deformações Dn+3 e Dn+4; c. minério plano verticalizado, que preenche falhas tensionais e anti-Riedel da deformação Dn+4; d. minério em "charutos" e "canoas", formadas nas regiões de dianteiras das dobras Fn+2; e. minério estratiforme, formado pela substituição de níveis litológicos propícios ao hidroterralismo a partir de falhas. Foram caracterizados mineralógica e quimicamente dois tipos de minério: o carbonatado (minério rico) e a clorita biotita (minério pobre), e nove tipos diferentes de zonas hidrotermais. O balanço de massa do hidroterralismo permitiu deduzir que este se desenvolveu em duas etapas: a. percolação das zonas de cisalhamento por águas quentes, ricas em CO₂. Nesta fase, os talco xistos foram carbonatados e lixiviados. Suas encaixantes recebem parte das substâncias lixiviadas dos talco xistos e são lixiviadas em F e K₂O; e b. o sistema é invadido por um refluxo de águas meteóricas às quais se soma um fluido, provavelmente de derivação granítica, rico em Be e F, talvez também com K₂O, S, Na₂O e SiO₂. Nesta fase, o talco-xisto carbonatado é mineralizado em esmeraldas, forma-se um capeamento de biotita em torno do talco xisto carbonatado, e formam-se as zonas hidrotermais, constituindo o depósito como é atualmente.

Palavras-chaves: Depósitos de esmeraldas, hidroterralismo, Santa Terezinha, controle estrutural.

INTRODUÇÃO Descoberto em 1981, o depósito de esmeraldas de Santa Terezinha (GO) deve ter produzido cerca de 150 a 200t de berilos verdes e de esmeralda. A lavra é feita de modo errático, através de 60 ou 70 poços verticais que descem a até 230 m abaixo da superfície, de modo a atingirem o minério ou "xisto". O exame de boa parte dessas lavras e a execução de várias sondagens possibilitou coletar informações estruturais, mineralógicas e químicas que permitem propor um esquema geral e integrado para a formação desses depósitos.

GEOLOGIA REGIONAL

Litologias Quatro grandes unidades geológicas compõem a região onde se situa o depósito de esmeraldas de Santa Terezinha (Fig. 1).

a. *Embasamento gnáissico* Aflora como domos nas partes a oeste e a sudeste da área mapeada (Fig. 1). O domo da Serra de Santa Cruz, a oeste, é constituído por biotita gnaisses locais portadores de granada e de hornblenda. Há rápidas variações composicionais e os cristais de quartzo são bastante estirados. São rochas bandadas, com bandamento irregular e descontínuo, com bandas de largura variável entre o milímetro e o decímetro. Em afloramento, nota-se a presença de uma foliação principal bem marcada e ondulada, interrompida, com frequência, por fraturas preenchidas por quartzo. O aspecto geral é de uma rocha cataclástica marcada sobretudo pela foliação e por lineações de quartzo do tipo *mullions*.

O domo situado a leste de Campos Verdes (Fig. 1) é composto predominantemente por anfibólio gnaisses e por anfibólitos, com níveis cálcio-silicáticos e núcleos com xistos com cianita. Os afloramentos são raros devido à espessa cobertura laterítica que abrange toda a unidade. Pontualmente, foram observadas rochas cinza-escuras, com pouco quartzo, sempre anfibolíticas, esporadicamente com epidoto, biotita e escapolita. Há zonas dominadas por anfibólitos (hornblenditos).

As feições de cataclase são menos desenvolvidas que aquelas observadas no domo da Serra de Santa Cruz. Não há evidências constantes de estiramento dos minerais e o bandamento é mais regular. Nas bordas desta unidade, a cataclase está melhor desenvolvida não raro tendo conduzido à formação de milonitos.

b. *Gnaisses miloníticos* Ocupam todo o noroeste da área mapeada. São milonitos a quartzo e feldspato (plagioclásio e microclínio) com moscovita e pouca biotita. O zircão, a allanita e a ilmenita são acessórios comuns. Epidoto, clorita e pinita ocorrem esporadicamente. A rocha tem cor branca e granulção média.

O principal aspecto que caracteriza estes gnaisses é o estiramento acentuado dos minerais. Sobre tudo o quartzo, mas também os feldspatos, estão achatados e estilhaçados. Em alguns locais, a deformação mostra caráter mais dúctil, tendo gerado minerais achatados, porém não-estilhaçados.

c. *Granito São José do Alegre* Aflora entre os gnaisses

* Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Caixa Postal 19011, CEP 81504, Curitiba, PR, Brasil

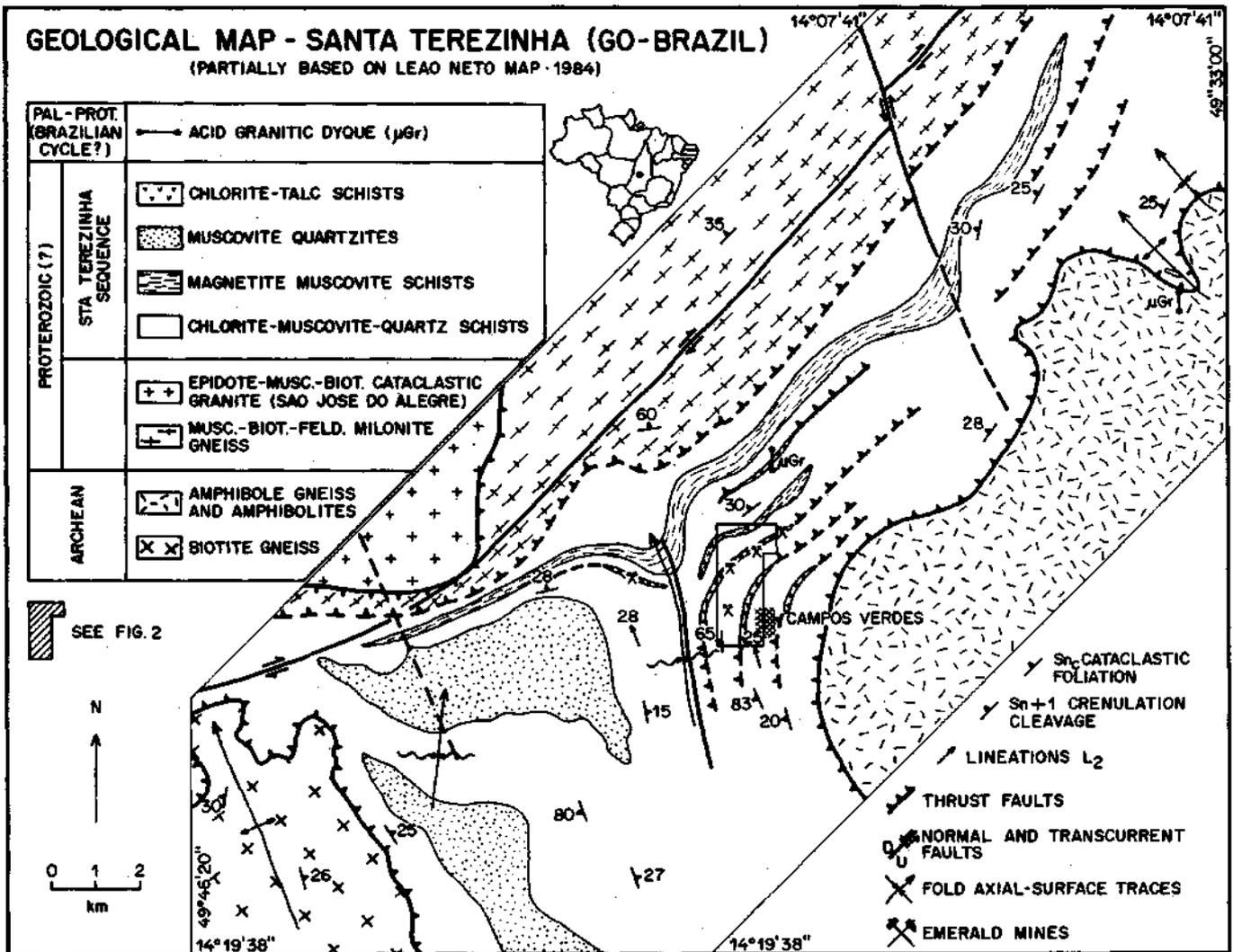


Figura 1 — Geologia da região onde estão as minas de esmeralda
Figure 1 - Geology of the Santa Terezinha emerald mine region (GO-Brazil)

miloníticos, a oeste-noroeste da área da figura 1. É uma rocha cinza esbranquiçado, porfírica, com matriz com minerais de dimensões entre 0,1 mm e 4,0 mm, e porfiroblastos de plagioclásio e microclínio com dimensões entre 4,0 mm e 50,0 mm. É uma rocha granítica com moscovita (= 4%) e com mais plagioclásio (30% - 40%) que microclínio (21% - 38%). A granada e a ilmenita são os principais acessórios, além do zircão, da allanita, da apatita e do leucoxênio. O epidoto, a clorita e a pirita ocorrem localizadamente, formados por hidrotermalismo.

A textura é porfiroblástica, tipo "dente de cavalo" e a rocha é foliada. A foliação é quase imperceptível na parte central da intrusão e acentua-se gradualmente do centro para as bordas, onde, em alguns locais, a rocha está milonitizada.

Quimicamente (Quadro 2), o Granito São José do Alegre é sódico ($\text{Na}_2\text{O} = 5,0\%$ e $\text{K}_2\text{O} = 32\%$), aluminoso ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 17,3\%$), rico em flúor ($\text{F} = 820$ ppm), em enxofre ($\text{S} = 130$ ppm), em níquel ($\text{Ni} = 14$ ppm) e em cromo ($\text{Cr} = 13$ ppm).
d. *Seqüência Santa Terezinha* Esta unidade contém todos os depósitos de esmeraldas conhecidos na área mapeada (Figs. 1 e 2). Todos os litotipos desta unidade, observados nas áreas em que existem ou existiram lavras de esmeralda, mostram composições mineralógicas transformadas, em graus diferentes, por ações hidrotermais. A ação do hidrotermalismo foi

desigual, variando principalmente conforme a receptividade da rocha aos fluidos hidrotermais e conforme a permeabilidade, primária e secundária, das rochas em cada local. Na região das minas, no geral, as transformações foram acentuadas, pervasivas, e as rochas desta região não são representativas da unidade como um todo. As rochas hidrotermalizadas serão descritas posteriormente, em um tópico específico.

As rochas mais comuns na Seqüência Santa Terezinha são *clorita-moscovita quartzos xistos*, que contém biotita, microclínio e granada em quantidades variadas. Em média, estas rochas são compostas por 40% a 60% de quartzo, 30% a 50% de moscovita, O a 15% de clorita, O a 5% de biotita, O a 4% de microclínio e O a 2% de granada, junto com plagioclásio, magnetita e cloritóide em quantidades subordinadas, raramente ultrapassando 2%. A textura é grano-lepidoblástica com uma ou duas foliações bem marcadas. A foliação principal é de transposição com fatiamento muito desenvolvidos. Este tipo de rocha é encaixante de todos os outros litotipos que compõem a seqüência.

Magnetita-moscovita xistos Formam leitos contínuos, orientados SW-NE. Mineralogicamente, são moscovititos com 0 a 10% de magnetita e O a 5% de turmalina (schorlita). São bem foliados e crenulados. A textura é lepidoblástica.

Moscovita (sericita) quartzitos ocorrem em todas as posi-

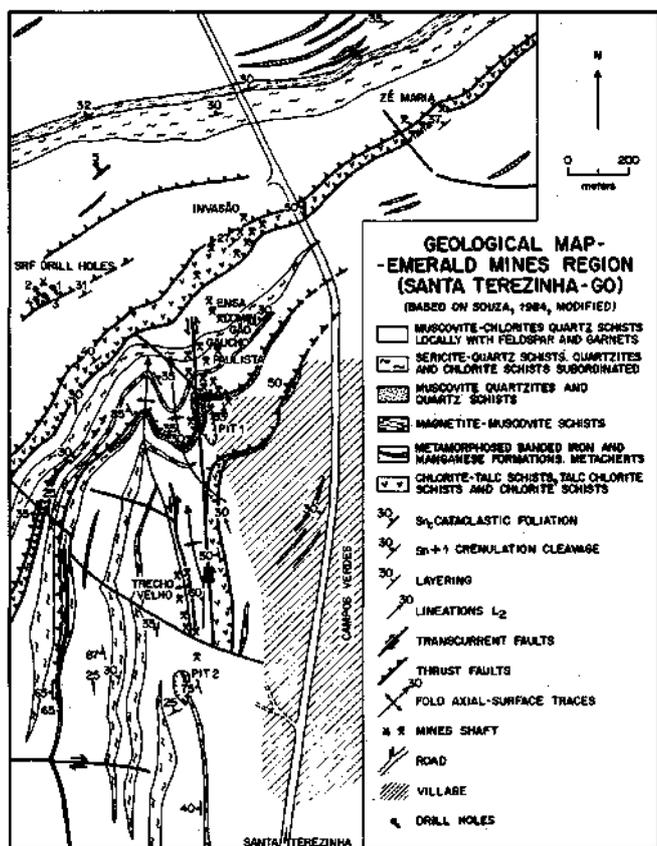


Figura 2 — Geologia local das minas de esmeralda
Figure 2 - Local geology of emerald mines

ções da Sequência, com leitos e lentes de dimensões variadas. Predominam sobre os clorita-moscovita xistos na metade oeste da área, onde foram mapeados em duas grandes zonas. São rochas de granulação fina a média, bandadas, com alternância de leitos milimétricos a submilimétricos de quartzo e de moscovita. Em alguns locais, essas rochas têm porfiroblastos de granada e magnetita, e gradam lateral e verticalmente para quartzitos e quartzitos com moscovita.

Os clorita-talco xistos são pouco freqüentes e parecem ocorrer apenas nas regiões mineralizadas por esmeralda. São compostos por 0-50% de clorita, 40%-100% de talco e 0-10% de tremolita, junto com cromita (0-1%), pirita (0-2%) e magnetita (0-5%). Sempre estão bastante deformados, com mais de uma foliação, que conferem à rocha um aspecto amarrutado.

Blocos rolados de rochas granitóides foram encontrados em ao menos dois locais (Fig. 1). Embora as condições de intemperismo dificultem a identificação dessas rochas, suas composições variam entre diorito e granodiorito.

Na região mineralizada (Fig. 2), o mapeamento de detalhe revelou as mesmas rochas anteriormente descritas, transformadas, em graus variados, por hidrotermalismo. Junto aos magnetita-moscovita xistos, na parte norte da área (Fig. 2), afloram leitos de metacherts e de formações ferro-manganesíferas bandadas, que se associam com clorita-quartzo xistos, os quais têm espessura métrica e extensões de 100 a 300 m. São rochas com bandas milimétricas compostas sobretudo por quartzo e magnetita. Localizadamente, a magnetita é substituída por óxidos de manganês.

No geral, o ambiente de sedimentação da Sequência Santa Terezinha é marinho de águas profundas, de plataforma, provavelmente turbidítico, com areias e siltes argilosos predominantes (clorita-moscovita-quartzo xistos, moscovita-quartzitos e quartzitos), nos quais se intercalam sedimentos vulcânico-gênicos químicos (cherts e formações ferríferas), além de

possíveis rochas metavulcânicas ácidas e intermediárias (clorita - moscovita xistos) e leitos de rochas ultrabásicas (clorita-talco xistos). Não foi possível determinar se estas rochas ultrabásicas seriam intrusivas ou derrames. Gusmão Costa (1986) as identificou como komatiitos, sugerindo, portanto, que sejam derrames ou rochas vulcanoclásticas ultrabásicas.

Toda a seqüência está metamorfisada em grau baixo ou xisto verde, zona da biotita. Não há transição metamórfica entre os xistos da Sequência Santa Terezinha e os gnaisses anfíbolitos das áreas. Os contatos observados são sempre tectônicos.

Geologia estrutural A figura 3, obtida em lâmina delgada da amostra JC-ES-21, sintetiza a história estrutural da Sequência Santa Terezinha. A feição planar mais antiga observada é Sn-1. Não foi possível identificar se este plano corresponde a um antigo acamamento ou a uma antiga foliação. Atualmente, na região hidrotermalizada, onde estão as minas de esmeralda, Sn-1 está preenchida por carbonato devido a se ter tornado uma superfície de descolamento durante as deformações posteriores. Sn-1 foi dobrada em um sistema de cisalhamento simples que gerou uma foliação de cisalhamento (tipo Q, denominada Siic e, concomitantemente, uma foliação de achatamento (tipo S) denominada Sn., planoaxial das obras recumbentes que afetam Sn-1 (Figs. 3,4 e 5 B, C e D). Os espaços gerados pelas intersecções de Sn., e Siig foram preenchidos por quartzo, gerando uma lineação horizontalizada (LI), orientada entre NS e N20E, bem marcada e freqüente em toda a região.

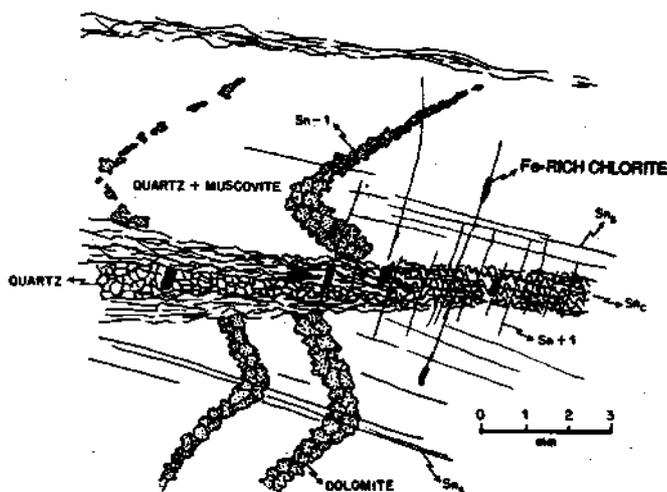


Figura 3 — Dobras e foliações, observadas em lâmina delgada (amostra JC-ES-21), que afetam as rochas da Sequência Santa Terezinha

Figure 3 - Folds and foliations in Santa Terezinha rock samples (Thin section JC-ES-21)

Uma última foliação crenula todas as anteriores. É uma clivagem de crenulação, denominada Sn + 1 (Figs. 3,4 e 6A), que orientou a cristalização de grandes prismas de clorita rica em ferro, de origem hidrotermal. Esta foliação é semivertical e é planoaxial de dobras isoclinais que, não raro, têm flancos rompidos.

Além dessas foliações, foi observado na área o acamamento original das rochas (So). As atitudes de So são difíceis de serem obtidas (Fig. 5A) devido ao fatiamento causado por Snc.

Snc, a foliação de cisalhamento, predomina sobre todas as outras, geralmente obliterando as foliações mais antigas (So e Sn-1) e mascarando a foliação de achatamento (Sns). É uma foliação de transposição e de fatiamento que reparte as rochas em micrólitos transformando-as em milonitos. Esta foliação é cogenética das dobras recumbentes formadas pelo dobra-

mento das superfícies Sn-1 (Fig. 7, fase 1) - dobras estas que sempre têm flancos rompidos pelas superfícies de cisalhamento. Na época de origem dessas dobras, tinham eixos horizontalizados com direções próximas de N29E (Fig. 5D). Quando desenvolvidas sobre rochas plásticas, as charneiras dessas dobras migraram proporcionando a formação de dobras em bainha, observadas em Santa Terezinha, na região das minas de esmeralda. Feições desse tipo foram descritas também por D'el-Rey Silva & Guiluani (1988), na mina de esmeralda TN-167 em Santa Terezinha, e por Araújo & Leonardos (1986) na região de Pirenópolis (GO), ao sul de Santa Terezinha.

Grandes falhas de baixo ângulo (Figs. 1 e 2) estão geneticamente relacionadas a Snc. Estas falhas afloram e limitam fatias de rochas que proporcionam a "escamação" da região, caracterizando uma zona de cisalhamento de baixo ângulo. Certamente são muito mais numerosas do que o mostrado nas figuras 1 e 2 (o mapeamento delas sendo dificultado pelo manto de intemperismo). A atitude predominante de Snc é N29E, 33 NW (Fig. 5D). É dobrada e tem mergulhos que variam desde 60-65° NW, na parte sul da região das minas (Fig. 2), até a horizontal. Os contatos das rochas gnáissicas e as bordas do Granito São José do Alegre estão orientados por Snc. A milonitização dos gnaisses miloníticos da parte noroeste da figura 1 é devida a Snc.

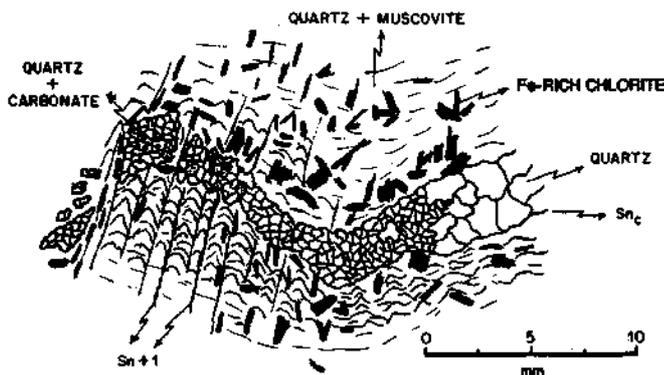


Figura 4 - Efeitos da deformação Dn+3 sobre as feições mais antigas, observados em lâmina delgada (amostra J C-ES-19) de amostra da Seqüência Santa Terezinha)

Figure 4 — Dn+3 deformation superimposed over ancient deformations (Thin section JC-ES-19)

Os gnaisses miloníticos e todas as rochas da Seqüência Santa Terezinha são alóctones. Migraram sobre o domo gnáissico de Santa Cruz e sobre os anfibólio gnaisses, segundo a direção N60-80W, provavelmente de oeste para leste, conforme mostrado pela vergência das dobras que afetam Sn-1 e pela orientação dos *mullions* de quartzo formado nas intersecções de Snc com Sns.

Sn + 1 é a segunda foliação mais freqüente da área. É uma clivagem de crenulação com atitude predominante próxima de N14W, 84SW (Fig. 6A). Esta foliação é plano axial de dobras normais e de dobras isoclinais (Fig. 4 e 7, fase 2), que afetam as superfícies Sn-1, Snc e Sns. Raramente, Sn-1 e Snc são percebidas em afloramentos, predominando largamente Snc como superfície dobrada. O cruzamento de Snc com Sn+1 gera uma lineação de intersecção (L₂) cuja atitude média medida (Fig. 6B e 6D), é de 22°, N12W.

As dobras que têm Sn+1 como plano axial foram formadas por um sistema compressivo orientado aproximadamente para N76E. Esta compressão, associada a um cisalhamento

simples, evoluiu, por rompimento das rochas, para um cinturão de cisalhamento de alto ângulo.

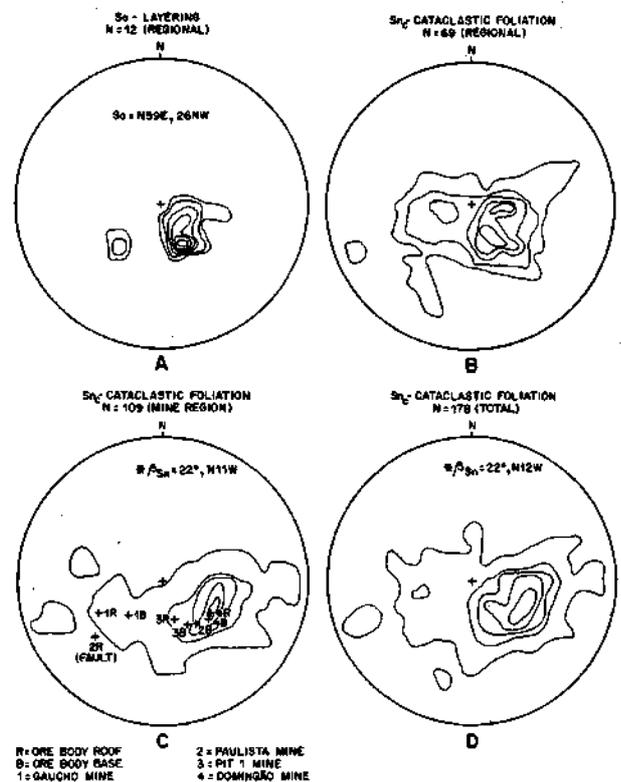


Figura 5 — Diagrama de igual área para pólos dos planos So e Snc, hemisfério inferior. A. B andamento S₀. Contornos a 8, 13, 18, 23, 28 e 33%. B. Foliação cataclástica regional Snc. Contornos a 1,3,6,9 e 12%. C. Foliação cataclástica Snc na região das minas. Contornos a 0,5,5,10,15 e 20%. D. Todas as medidas da foliação cataclástica Snc. Contornos a 0,5,3, 6, 9 e 12%

Figure 5 - Equal area diagram for So and Snc poles, bottom hemisphere. A. So bedding, with 8,13, 18, 23, 28 and 33% curves. B. Snc regional cataclastic foliation on mine region with 0, 5, 5, 10, 15, and 20% curves. D. Total Snc cataclastic foliation with 0.5,3,6,9, and 12% curves

O diagrama da figura 6C, sintetizado na figura 8, mostra as falhas e as fraturas conjugadas formadas por este cinturão de cisalhamento de alto ângulo para a área da figura 2. As principais modas estão listadas na figura 8 e no quadro 1, e ressaltam a semelhança das atitudes das falhas de empurrão (Fig. 8), conjugadas a este cisalhamento de alto ângulo (moda = N49E, O - 37° NW), com as atitudes de Snc (moda = N29E, 33 NW), principal foliação do cinturão de cisalhamento de baixo ângulo, mais antigo (Figs. 6D e 7). Este fato proporcionou uma reativação do cisalhamento de baixo ângulo que, conforme será mostrado, foi importante na disseminação dos fluidos que causaram o hidrotermalismo e a mineralização em esmeralda. Esta reativação foi facilitada pela existência de rochas muito plásticas e deslizes, como os talco xistos (Fig. 2).

Os domos gnáissicos são cisalhados por Snc nas regiões de contato com rochas da Seqüência Santa Terezinha, caracterizando contatos tectônicos gerados pelo deslizamento dos metassedimentos sobre estes gnaisses. Situação semelhante ocorre na área de afloramento do Granito São José do Alegre. Esta foliação dificulta muito a identificação de feições mais antigas existentes nos gnaisses e no granito.

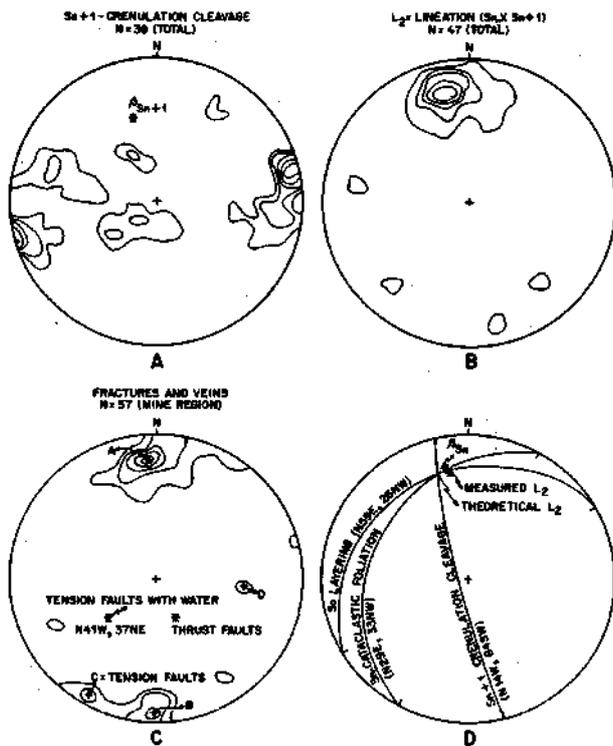


Figura 6 — Diagrama de igual área para pólos de S_n , S_{n+1} e planos de fraturas. A. Clivagem de crenulação S_{n+1} . Contornos a 2, 5, 10, 15 e 20%. B. Lineação L_2 ($S_{n+1} S_{n+1}$). Contornos a 2, 9, 16, 25 e 34%. C. Falhas, veios e fraturas conjugados ao cisalhamento de alto ângulo. Contornos a 3, 6, 9, 12 e 15%. D. Projeção de valores médios de S_0 , S_{n+1} e S_{n+1} estereograficados. Notar que a lineação L_2 está na intersecção desses três planos. A falha de cavalgamento do Pit 1 (Fig. 6C) é semi-paralela a S_{n+1} (Fig. 5D)

Figure 6 - Equal area diagram for S_n , S_{n+1} , and fractures poles. A. S_{n+1} crenulation cleavage; with 2, 5, 10, 15, and 20% curves. B. $S_{n+1} S_{n+1}$ lineation, with 2, 9, 16, 25, and 34% curves. C. Faults, veins and fractures related with high angle faults. D. Stereographic projection of average values of S_0 , S_{n+1} , and S_{n+1} planes. Note that L_2 lineation is placed at the intersection of these planes. Number 1 pit thrust fault (Fig. 6C) is almost parallel with S_{n+1} (Fig. 5D)

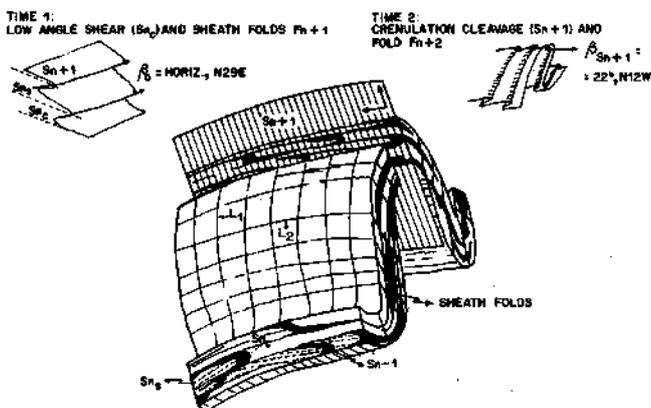


Figura 7 - Modelo esquemático mostrando a deformação D_{n+2} (fase 1), a deformação D_{n+3} (fase 2) e o resultado final dessas deformações sobre a Sequência Santa Terezinha
Figure 7 - Schematic model showing D_{n+2} (phase 1) and D_{n+3} (phase 2) deformation relationship over Santa Terezinha Sequence

TIME: 3
REACTIVATION OF PHASES 1 AND 2, PLUS HIGH ANGLE SHEAR

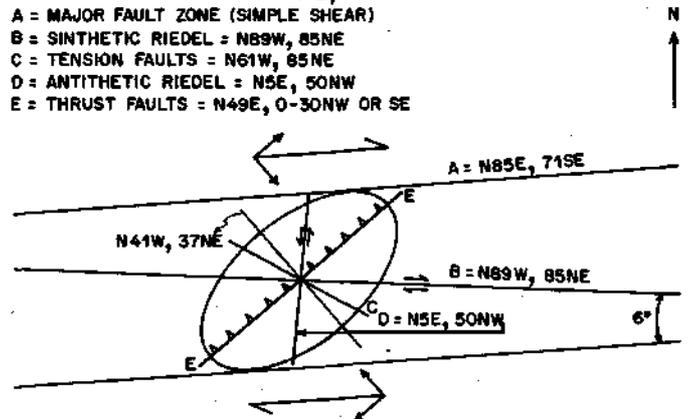


Figura 8 - Esquema orientado mostrando as atitudes e identificando as falhas conjugadas formadas durante a deformação D_{n+4} (fase 3)

Figure 8 - Schematic oriented model showing faults related with D_{n+4} (phase 3) deformation in Santa Terezinha sequence

Estratigrafia A Sequência Santa Terezinha tem sido correlacionada com a Sequência Mara Rosa (Ribeiro Filho 1981), que seria parte das unidades superiores do cinturão de rochas verdes de Crixás (Machado 1981) pertencente ao Grupo Pilar de Goiás (Danni & Ribeiro 1978). A idade desta Sequência seria arqueana ou proterozóica inferior. Os gnaisses, com biotita e com anfibólio, são rochas mais antigas e, possivelmente, o Granito São José do Alegre também é mais antigo.

Na área das figuras 1 e 2, o empilhamento das litologias teria que considerar a aloctonia de toda a Sequência Santa Terezinha e dos milonito-gnaisses que deslizaram sobre os domos gnáissicos e o Granito São José do Alegre. Dentro da Sequência Santa Terezinha (Fig. 2), os diversos dobramentos e, sobretudo, a "escamação" provocada pelas falhas de empurrão associadas à foliação S_{nc} causam complicações que impossibilitaram, no estudo feito, definir uma estratigrafia para a área. De modo bastante simplificado, o bloco diagrama da figura 7 ilustra a complexidade do relacionamento entre as diversas litologias que compõem a sequência.

Todas as deformações posteriores a D_{n+1} (Quadro 1) têm sido atribuídas ao Brasiliano (Araújo & Leonardos 1986), embora alguns autores (e.g. Souza & Leão Neto 1984) considerem Transamazônicas (2.100 Ma-1.900 Ma) as foliações cisalhantes de baixo ângulo, Uruaçuanas (1.300 Ma-900 Ma), as clivagens de crenulação, e Brasilianas (700 Ma-550 Ma) algumas ondulações pouco expressivas que afetam os metassedimentos. Faltam informações que permitam a determinação definitiva das idades dessas deformações. Os diferentes tipos de deformação e de esforços necessários para gerá-los sugerem épocas de geração diferentes, embora todos estes esforços caibam, sucessivamente, dentro de uma mesma orogênese.

DEPÓSITOS DE ESMERALDA DE SANTA TEREZINHA
Morfologia e controle estrutural dos corpos mineralizados
Morfologia No que concerne à morfologia, há cinco tipos de corpos mineralizados nos depósitos de Santa Terezinha (Fig. 9). O tipo mais comum tem morfologia complexa (Fig. 9A), consequência de diversas fases de dobramento e falhamento que deformaram as rochas da região, conforme já descrito. O exemplo considerado tipo foi observado na Mina Domingos (ou "Domingão"), a 91m da superfície (Fig. 2 e Fig. 9A).

Na Mina Domingos, o minério é uma rocha xistosa composta essencialmente por talco, biotita e carbonato ou biotita e talco (amostras 26 e 28A, Quadro 2). Há esmeralda também,

Quadro 1 - Evolução geológica da região das minas de esmeralda de Santa Terezinha (GO)
 Quadro 1-Structural history of emerald mines region

EVENO GEOLÓGICO	DEFORMAÇÃO	DOBRAMENTO	SUPERFÍCIE COGENÉTICA	LINEAÇÃO COGENÉTICA	CARACTERÍSTICAS
ARQUEANO Gênese dos biotita gnáisses e dos anfíbio gnáisses	Dn	Fn	?	?	- Domos gnáissicos do embasamento
ARQUEANO OU PROT, INFERIOR (?) Metamorfismo n+1 e anatexia	?	?	?	?	- Gênese e diapirismo do Granito São José do Alegre
ARQUEANO OU PROT, INFERIOR (?) Sedimentação ou Metamorfismo n+2	- Dn+1	- ?	So Sn-1	- ?	- Sn-1 é uma superfície dobrada que aparece entre planos de cisalhamento. Na área das minas está preenchida por carbonato.
BRASILIANO (?) Cinturão de cisalhamento de baixo ângulo	Dn+2	Fn+1 (dobrando) (Sn-1)	Snc e Sns	L ₁ (mullions no cruzamento de Snc com Sns)	- Snc = foliação de cisalhamento. Predomina sobre todas as outras foliações - Sns = foliação de achatamento. É plano-axial das dobras Fn+1, que afetam Sn-1. Raramente visível em afloramentos - Época de migração da Sequência Santa Terezinha que desliza de W para E sobre as unidades mais antigas - Formação de dobras recumbentes que podem evoluir para dobras em bainha quando as rochas forem plásticas. Flancos sempre rompidos - Milonitização, fatiamento e escamação das rochas que quase sempre formam leitos limitados por falhas de baixo ângulo
BRASILIANO (?) Cisalhamento simples e hidrotermalismo	Dn+3	Fn+2 (dobrando) Snc, Sns e Sn-1)	Sn+1	L ₂ (cruzamento de Snc com Sn+1)	- Sn+1 é uma clivagem de crenulação. É a segunda mais frequente nos afloramentos, depois de Snc - Formação de dobras isoclinais e dobras normais com planos totais verticais - Crenulação intensa de Snc. Compressão segundo a direção N78E - Início do hidrotermalismo (sintectônico)
BRASILIANO (?) Cinturão de cisalhamento de alto ângulo e hidrotermalismo	Dn+4	?	Falhas e fraturas conjugadas	?	- As modes das falhas e fraturas conjugadas, observadas na área das minas de esmeralda, são: • Cisalhamento principal = N85E, 71SE • Falhas anti-Riedel = N5E, 50NW • Falhas Riedel = N89W, 85NE • Falhas de tensão = N41-61W, 85NE • Falhas de cavilamento = N49E, 0-37° NW ou SE • Reativação de todos os planos formados em Dn+2 (cinturão de cisalhamento de baixo ângulo) e Dn+3 (cisalhamento puro) • Intenso hidrotermalismo e mineralização em esmeralda durante o cisalhamento e, sobretudo, após o seu término, na fase de relaxamento tectônico

em menor quantidade, nas encaixantes das rochas carbonatadas, geralmente um carbonato-clorita quartzo xisto (amostra 31, Quadro 2) ou um clorita-biotita xisto ou um biotita-clorita xisto. A complexidade da morfologia desses corpos mineralizados é consequência de todos os dobramentos e falhamentos anteriormente descritos. O minério substitui rochas que foram afetadas por dobras recumbentes e dobras em bainha (dobramento Fn+1, Quadro 1), e por dobras isoclinais e dobras normais (dobramento Fn+2, Quadro 1), e tem morfologia adaptada a essas deformações. A complexidade aumenta devido a deslocamentos e fraturamentos gerados na época dos cisalhamentos de alto ângulo (Dn+4, Quadro 1).

Na Mina Paulista (ou "Toninho Paulista"), a 31 metros da superfície, o corpo de minério é plano, pouco inclinado, com boa continuidade lateral (Fig. 2 e Fig. 9B). Os maiores teores de esmeralda estão em rochas xistosas compostas essencialmente por carbonato e talco com biotita e quartzo associados (amostras 27 e 33, Quadro 2). O minério rico é envolvido por biotititos ou clorita biotititos com ou sem quartzo e com pouco carbonato (amostras 23 e 34, Quadro 2). Os contatos são gradacionais sobre distâncias curtas, de 5 cm a 10 cm. As

características estruturais internas deste tipo de corpo mineralizado são:

a. O corpo mineralizado é dobrado. Geralmente tem mergulhos entre 15° e 30°, e contém *mullions* de quartzo orientados paralelamente à direção de mergulho. As atitudes dos *mullions* são sempre próximas de 20° - 25°, N10-15W.

b. Quando os mergulhos são altos (flancos de dobras), maiores que 30°, os *mullions* estão horizontalizados e orientados transversalmente em relação às direções de mergulho. As atitudes continuam próximas de 20° - 25°, N10-15W.

c. Quando o minério contém pouco carbonato, biotita e clorita, é possível identificar, no corpo mineralizado, dobras Fn+1 (Quadro 1) que afetam a superfície Sn-1.

d. Quando aparecem as dobras Fn+1, é possível, também, identificar a foliação plano axial dessas dobras (Sns).

e. Normalmente, há vestígios da clivagem de crenulação Sn+1 (Quadro 1), sobre o minério e as encaixantes.

Na Mina ENS A (Fig. 2 e Fig. 9C), a 110 ms da superfície, o corpo mineralizado é verticalizado, bastante contínuo segundo a sua direção e o seu mergulho. O minério é uma rocha xistosa, composta por clorita e carbonato, de aspecto amarro-

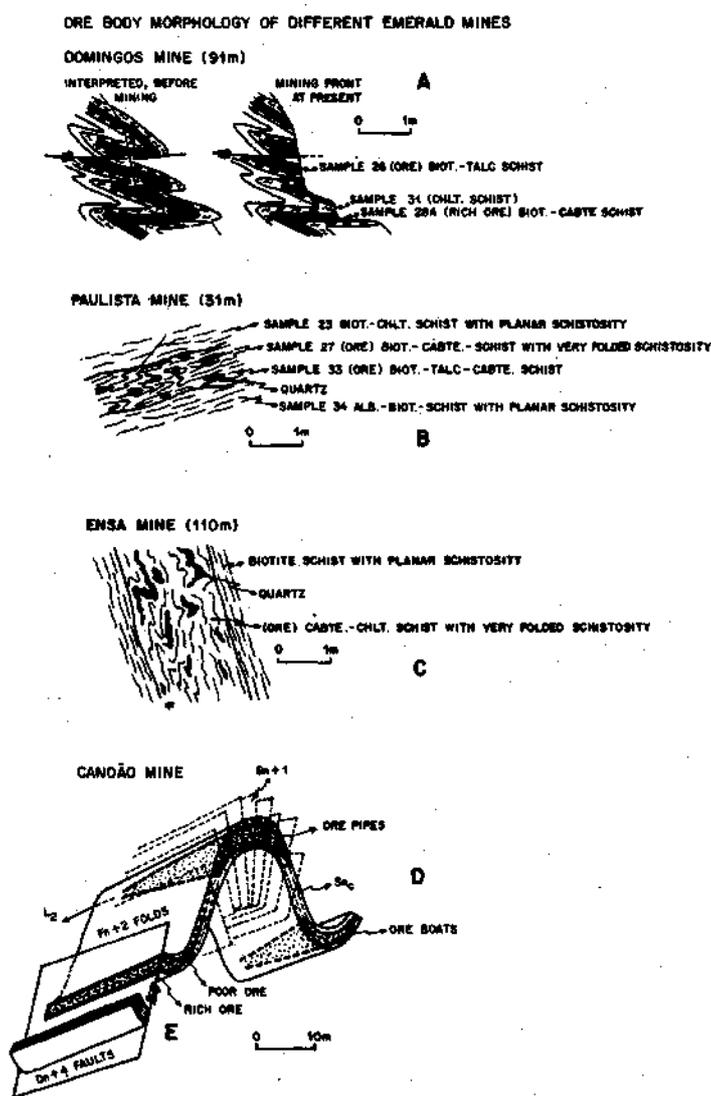


Figura 9 — Os diversos tipos de corpos mineralizados em esmeraldas descritos em Santa Terezinha. a. corpos dobrados; b. corpos planos horizontalizados; c. corpos planos verticalizados; e d. "charutos", "canoas" e mineralizações estratiformes derivadas de falhas

Figure 9 - Ore body morphology of different emerald mines. A. folded ore bodies; B. horizontal ore bodies; C. vertical ore bodies; D. ore pipes and boats; and E. stratiform ore bodies related with faults

tado, envolvida por biotita-clorita ou clorita-biotita xistos com foliação plano-paralela. Os contatos entre estas litologias são gradacionais sobre distâncias entre 10 cm e cerca de 1 m. As características internas dos corpos mineralizados deste tipo são:

- a. São sempre verticalizados e não são dobrados. Têm *millions* de quartzo com atitudes horizontalizadas, orientados entre NS e N65W.
- b. Não contêm vestígios de dobras antigas (Tipo Fn+1).
- c. Não contêm vestígios da clivagem de crenulação Sn+1.
- d. O minério, em alguns locais, tem aspecto brechóide.

A primeira lavra de esmeralda em Santa Terezinha foi feita a céu aberto no chamado "canoão" (Fig. 2, *pit* 2). Posteriormente, um novo "canoão" foi descoberto mais ao norte do primeiro (Fig. 2, *pit* 1). Nesses locais, os corpos mineralizados têm formas alongadas (Fig. 9D), segundo as charneiras isoclinais ou de dobras abertas. O minério é essencialmente uma

massa isotropa de carbonato com clorita e biotita. Quando as charneiras contêm talco xistos, o talco é também constituinte do minério. Neste caso, a zona mineralizada de alto teor é envolvida por minério pobre, com pouco carbonato, rico em biotita e clorita. Quando, no ápice de anticlinais, este tipo de corpo mineralizado é chamado de "charuto". Quando em sinclinais, são denominados "canoas" (Fig. 9D). D'el-Rei Silva & Guiluani (1988) descreveram corpos desse tipo também na mina TN-167. Foram observados, ainda, na Mina Domingos, a 131 m da superfície.

Quando níveis com talco xistos são interceptados por falhas verticalizadas, formam-se corpos mineralizados nos quais o minério rico concentra-se nos talco xistos junto ao plano de falha. Os teores de esmeralda decrescem ao longo do nível de talco xisto; conforme aumenta a distância até o plano de falha (Fig. 9D). O minério é idêntico àquele observado nos "canoões" e nos "charutos". Corpos mineralizados desse tipo foram observados na Mina ENSA e na Mina Paulista. Quando ocorrem em regiões de charneiras de dobras, estes corpos mineralizados confundem-se com os "canoões" e "charutos".

Controle Estrutural Corpos mineralizados como os representados na figura 9A são gerados pela substituição de níveis rochosos dobrados em Dn+1 (?), Dn+2 e Dn+3, e falhados em Dn+4 (Quadro 1). O controle do minério é essencialmente litológico, condicionado pela presença de rochas suscetíveis às transformações hidrotermais. O minério substitui a rocha e herda a complexidade estrutural da rocha deformada anteriormente à mineralização.

Depósitos do tipo 9B estão contidos em zonas de cisalhamento de baixo ângulo formadas durante Dn+2 (Quadro 1). São corpos dobrados por Dn+3 e falhados por Dn+4, e paralelos à foliação Snc, de cisalhamento.

Talvez o tipo mais simples de corpo mineralizado seja aquele da figura 9C. São formados pelo preenchimento e por substituição de falhas conjugadas à deformação Dn+4, formadora de um cinturão de cisalhamento de alto ângulo. As principais falhas mineralizadas foram as anti-Riedel (moda a N5E, 50 NW) e as falhas de tensão (moda a N61W, 85 NE, Quadro 1 e Fig. 2). As falhas anti-Riedel, com direções próximas da NS (Fig. 6C, Fig. 8 e Fig. 2), condicionam a grande maioria das lavras antigas (trecho velho) e das atuais. Nessas lavras, a mineralização está contida nas falhas ou em níveis de talco xistos por ela interceptadas, como mostrado na Fig.9D (parte esquerda).

Os "charutos" e "canoas" são corpos mineralizados alongados, formados em ao menos duas situações estruturais diferentes:

- a. Corpos formados nas regiões de charneiras de dobras isoclinais ou normais tipo Fn+2 (Quadro 1). O corpo mineralizado é orientado paralelamente a L2 (Fig. 2, Fig. 66 e D, Fig. 7 e Fig. 9D). É formado pelo preenchimento de uma zona porosa, formada nas charneiras das dobras Fn+2, onde se cruzam três planos: 1. a foliação cisalhante Snc; 2. o acamamento original S₀; e 3. a clivagem de crenulação Sn+1 (Fig. 6D e Fig. 9D). Além de naturalmente serem zonas de tensão, portanto propícias ao hidrotermalismo, a intersecção de todas essas superfícies causa um quebraimento intenso, observado em todas as escalas (Fig. 4), gerando uma porosidade secundária muito importante. O preenchimento dessa região leva à formação dos "charutos" e "canoas". Esta é a situação mais freqüente observada quando o corpo mineralizado é alongado.
- b. A formação de dobras em bainha, na fase Fn+1 (Quadro 1), proporciona o aparecimento de estruturas alongadas. A substituição dessas dobras em bainha, quando formadas sobre talco xistos, proporciona o aparecimento de "charutos" e "canoas" (Fig. 7 e Fig. 9D). Maiores detalhes são dados por D'el-Rey Süva & Guiluani (1988).

O MINÉRIO A esmeralda ocorre nos depósitos de Santa

Quadro 2 - Composição química e mineralógica das zonas hidrotermais e das zonas mineralizadas das minas de esmeralda de Santa Terezinha (GO - Brasil)
 Chart 2 - Chemical and mineralogical composition of hydrothermal and mineralized zones of Santa Terezinha emerald mines (GO - Brazil)

LOCATION	HYDROTHERMAL ZONE NUMBER																					PAULISTA MINE					BOHUMLOS MINE					NOT HYDROTHERMALISED TALC	NOT HYDROTHERMALISED MESCOVITE + QUARTZ	SÃO JOSÉ DO ALEGRE GRANITE
	1			1A			2		3	4	5	6		7	8	9	HANDING WALL	RICHMOND	FOOT WALL	RICHMOND	FOOT WALL	SCHIST	SCHIST	60										
	6	35	41	50	51	5	56	7	8	10	14	15	53	54	20	21									23	27	33	34	26	20A	31	71	60A	60
SiO ₂	62,9	39,8	33,2	36,3	44,9	41,4	45,7	73,0	40,2	34,0	53,1	61,3	43,2	67,3	51,7	62,9	46,7	39,2	36,3	40,2	51,2	18,4	63,1	56,7	67,6	68,0								
Al ₂ O ₃	16,3	11,2	0,42	7,0	12,2	10,9	15,6	12,1	10,7	8,3	14,4	13,7	11,2	16,5	24,2	19,5	13,5	0,79	1,0	14,8	0,45	1,7	12,2	2,6	19,9	17,3								
Fe ₂ O ₃	3,9	7,8	0,94	1,0	1,7	4,0	1,5	0,44	0,94	1,2	1,4	1,3	3,4	0,60	1,6	0,86	3,0	0,12	0,20	4,0	0,60	0,47	1,4	2,01	2,8	0,94								
FeO	4,1	9,1	5,9	7,3	7,9	7,7	9,5	2,3	8,6	9,7	6,6	6,1	8,2	1,8	7,0	2,9	8,6	5,2	4,3	9,7	4,5	5,8	8,6	3,5	2,0	1,4								
MgO	2,6	5,8	22,4	37,1	22,2	9,2	4,7	1,4	12,5	12,0	4,1	4,6	7,4	2,4	2,0	1,3	15,0	24,8	26,3	12,2	18,4	29,5	12,4	27,15	0,86	0,62								
CaO	0,7	7,4	1,8	0,40	4,7	6,8	4,6	1,4	8,7	11,8	4,8	1,5	10,3	0,67	0,72	0,71	0,14	7,1	9,0	0,99	1,7	8,8	6,2	0,39	0,14	2,1								
Na ₂ O	1,9	1,4	0,03	0,02	2,4	3,2	5,6	2,8	1,2	0,04	1,1	1,1	2,0	5,2	1,5	4,0	0,67	0,07	0,07	3,1	0,12	0,07	1,4	0,49	0,13	5,0								
K ₂ O	3,3	2,1	<0,05	<0,05	2,4	2,8	2,9	1,7	0,28	0,21	2,2	2,2	<0,05	2,3	4,5	3,3	5,1	0,54	0,90	5,8	0,10	1,4	0,76	0,01	8,20	3,2								
H ₂ O	0,12	0,11	0,05	0,09	0,07	0,06	0,11	0,08	0,09	0,05	0,08	0,07	0,09	0,05	0,07	0,06	0,12	0,04	0,08	0,15	0,07	0,06	0,17	0,08	0,06	0,15								
H ₂ O*	1,87	1,33	1,53	4,28	2,06	0,54	1,01	0,65	3,13	2,82	4,33	1,97	2,93	0,90	2,75	1,73	2,28	0,84	0,89	1,33	1,45	0,35	2,99	2,45	1,47	0,62								
CO ₂	1,1	11,3	-	-	8,1	9,3	7,7	3,0	13,5	18,3	8,3	5,8	10,0	1,5	1,7	1,8	1,0	-	-	2,8	-	-	11,2	-	0,10	0,10								
FF	-	-	21,49	13,64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20,86	20,26	-	11,76	31,52	-	4,35	-	-								
ppm																																		
F	520	250	200	230	520	1000	730	260	470	440	240	320	320	720	430	390	3700	3100	4600	3400	3500	5400	1600	820	1000	820								
S	120	1300	100	80	190	3300	940	360	250	260	220	180	830	110	1100	140	5000	150	220	8200	70	170	2200	190	200	130								
Cl	<20	<20	<20	<20	190	120	240	<30	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	200	<20	<20	600	<20	420	35	<20	<20	<20								
Br	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15								
Be	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	13	120	36	23	1260	176	2	<2	<2	3								
Cr	340	8	2700	2400	330	76	42	5	1600	1520	255	330	355	7	144	82	118	1640	920	312	1520	2000	76	1500	9	13								
V	172	1080	60	136	268	358	408	70	230	260	168	116	380	380	74	148	318	76	52	400	74	78	190	35	70	54								
Mn	110	132	1800	1060	260	124	48	10	470	860	110	110	140	14	90	51	158	1560	1220	148	1360	1580	198	1100	12	14								
Sr	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5								
Cu	2	350	2	<2	8	138	82	33	9	55	39	80	180	4	62	13	152	2	6	138	<2	<2	33	n.a.	7	4								
TOTAL (wt%)	98,04	97,80	98,82	98,18	99,05	98,75	98,58	99,90	100,12	98,83	99,74	99,68	98,78	99,30	98,69	99,13	96,83	99,32	99,52	96,27	99,79	98,67	99,80	99,07	98,36	99,52								
wt. %																																		
Quartz	45	10	-	-	15	5	<0,5	55	40	16	60	30	33	22	21	45	23	8	3	-	<0,5	-	42	-	54	30								
Carbonate	2	45	13	7	30	15	14	8	32	69	13	6	8	1,5	8	10	1,5	30	50	3	5	75	28	5	-	-								
Mg Chlorite	7	7,5	<1	35	12	<0,5	<0,5	-	17	15	-	10	39	2,5	-	-	15	<1	-	<1	<1	-	24	1	-	-								
Mg-FeChlorite	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	4	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
Ps Chlorite	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,5	2,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
Muscovite	25	21	-	-	1,0	14	-	13	5	1	22	30	-	25	55	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40	2							
Fuchsite	-	-	-	-	-	-	1,5	-	3	1	-	-	-	-	-	-	-	45	31	-	85	5	-	90	-	-								
Talc	-	-	85	58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	55	16	15	75	7	19*	3	-	2	4								
Biotite	<0,5	-	-	-	27	12	25	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-								
Albite (ovml)	17,5	7	-	-	15	45	55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	13	-	1	38								
Plagioclase (matrix)	-	-	-	-	<0,5	-	-	23	<2	-	-	-	15	45	-	30	-	<1,0	1	-	2	-	-	1	-	-								
Magmatite	1,5	3	-	-	-	2	-	-	-	<0,5	-	-	3	1	-	1,5	1	-	-	2	-	-	1	-	-	-								
Sulphide	1,5	6,5	1,5	-	<0,5	7	1	<0,5	1,5	-	1	1	-	-	1,5	-	<0,5	-	-	<0,5	-	1	-	-	-	-								
Butile	-	-	-	-	<0,5	-	-	-	<0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4								
Epidote	-	<0,5	-	<0,5	<0,5	<0,5	-	-	-	-	-	-	2	-	<0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	<0,5								
Garnet	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
Tourmaline	<0,5	-	-	<0,5	-	<0,5	<0,5	-	-	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5								
Emerald	-	-	-	-	tr	-	tr	-	-	-	-	-	-	tr	-	tr	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-								
Tremolite or Actinolite	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
Apetite	-	-	-	-	<0,5	-	<0,5	-	-	-	-	-	<0,5	-	<0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	22								
Microcline																																		

* There are 2 types of biotites
 tr = traces

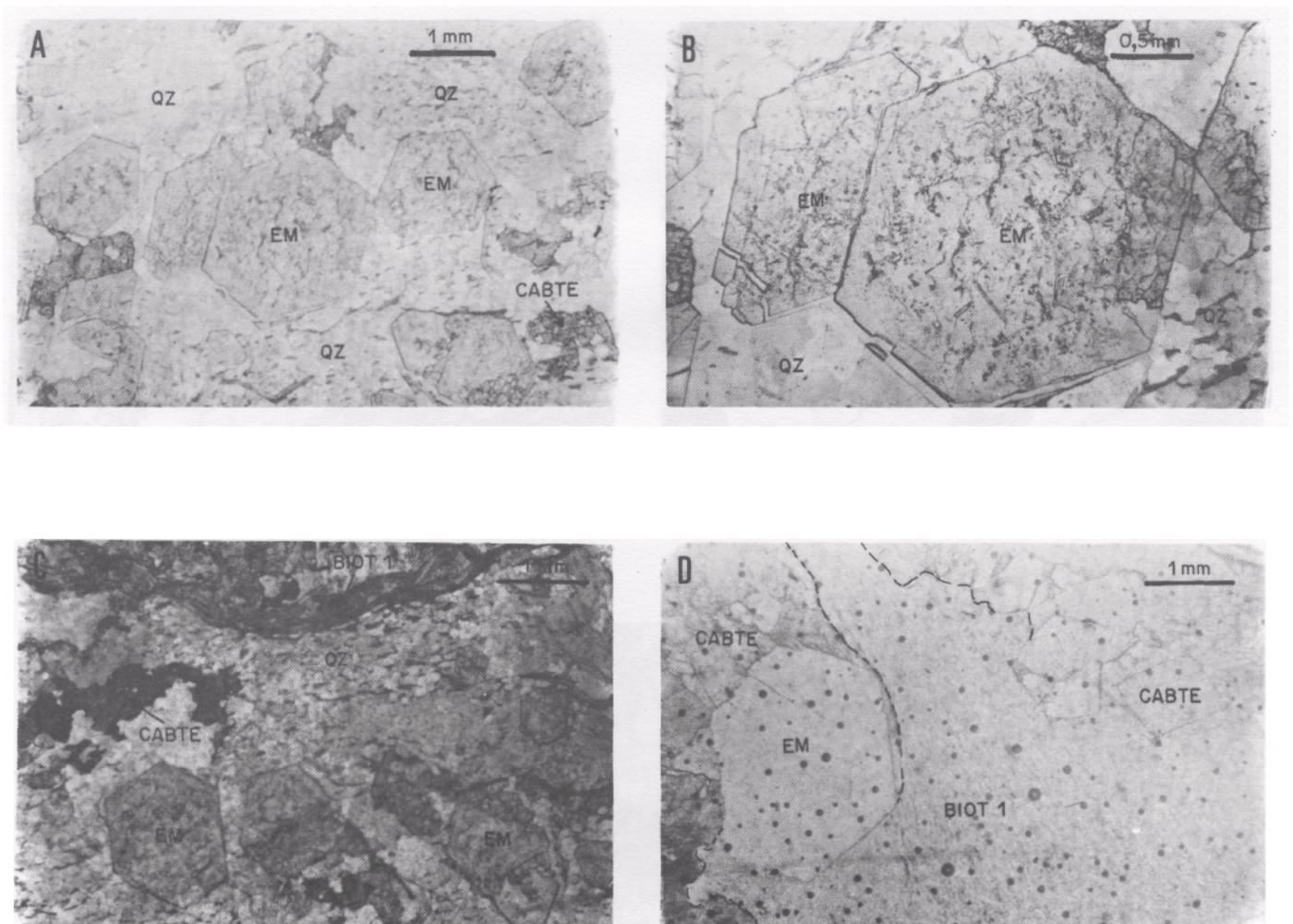
Terezhinha em cinco formas diferentes:

a. Como prismas com seções hexagonais com dimensões entre menos de 1 mm e 3 cm de comprimento e diâmetros entre menos de 1 mm e 1 cm. Esmeraldas desse tipo constituem o melhor tipo de minério da região. Ocorrem dentro de vênulas e amas de quartzo (Prancha 10 A, B e C) hidrotermal ou dentro de massas carbonatadas ricas em talco e clorita. As vênulas e amas de quartzo com esmeralda são encontradas nas falhas de baixo e alto ângulos (Fig. 9B e Q ou nos níveis mineralizados a partir das falhas (Fig. 9D). Nesse caso, as vênulas estão nas proximidades das falhas, contidas em talco xistos carbonatados ou nos seus envoltórios ricos em biotita e clori-

ta. Estas vênulas e amas têm poucos centímetros de largura e poucos decímetros de extensão. Quanto mais distantes das falhas, as vênulas e as amas são menores e existem em menor quantidade.

b. Os minérios contidos nos "charutos" e nos "canoões" (Fig. 9D) são essencialmente constituídos por carbonates, com pouco talco e pouca clorita. São massas isotrópicas nas quais os minerais orientados existentes ou são reliquias do talco xisto antigo substituído parcialmente, ou são injeções de biotita e/ou clorita hidrotermais (Prancha 2C) Este tipo de minério contém esmeralda prismática (Prancha 2D).

c. Os biotititos ou clorita biotititos que envolvem os



Prancha 1 — A. Prismas de esmeralda em vênula de quartzo hidrotermal. B. Detalhe da foto grafia anterior mostrando as inclusões de epidoto (agulhas), carbonato, moscovita e opacos (cromita?). C. Amas de quartzo com esmeralda prismática atravessada por uma injeção de biotita. D. Esmeralda prismática em minério tipo "charuto". O minério é composto essencialmente por dolomita e siderita. Há vênulas ou injeções de biotita (os pontos negros são bolhas de ar contidas no bálsamo da preparação). A e B são da Mina Paulista, C é da Mina Gaúcho e T) é da Mina ENSA. Abreviações usadas: EM = esmeralda, QZ = quartzo, BIOT = biotita e CABTE = carbonato

Plate 1 - A. Emerald crystals into hydrothennal quartz vein. B. Close up showing epidote needles, carbonate, muscovite, and opaque minerals (chromite?) into emerald crystals. C. Quartz vein with emerald crossed by biotite veinlets. D. Emerald crystals in pipe type ore body. Ore is essentially composed by dolomite and siderite, with veinlets of biotite (blanc dots are air bubbles). A and B are from Paulista mine, C is from Gaúcho mine, and D is from ENSA mine. EM = emerald; QZ = quartz; BIOT = biotite; CABTE = carbonate

núcleos carbonatados dos corpos mineralizados contêm esmeraldas geralmente pequenas e anédricas. Raramente têm mais que 5 mm de diâmetro. As formas são arredondadas. Os teores são baixos, embora as pedras sejam de boa qualidade. Não são raros os prismas pequenos de esmeralda também nestas rochas.

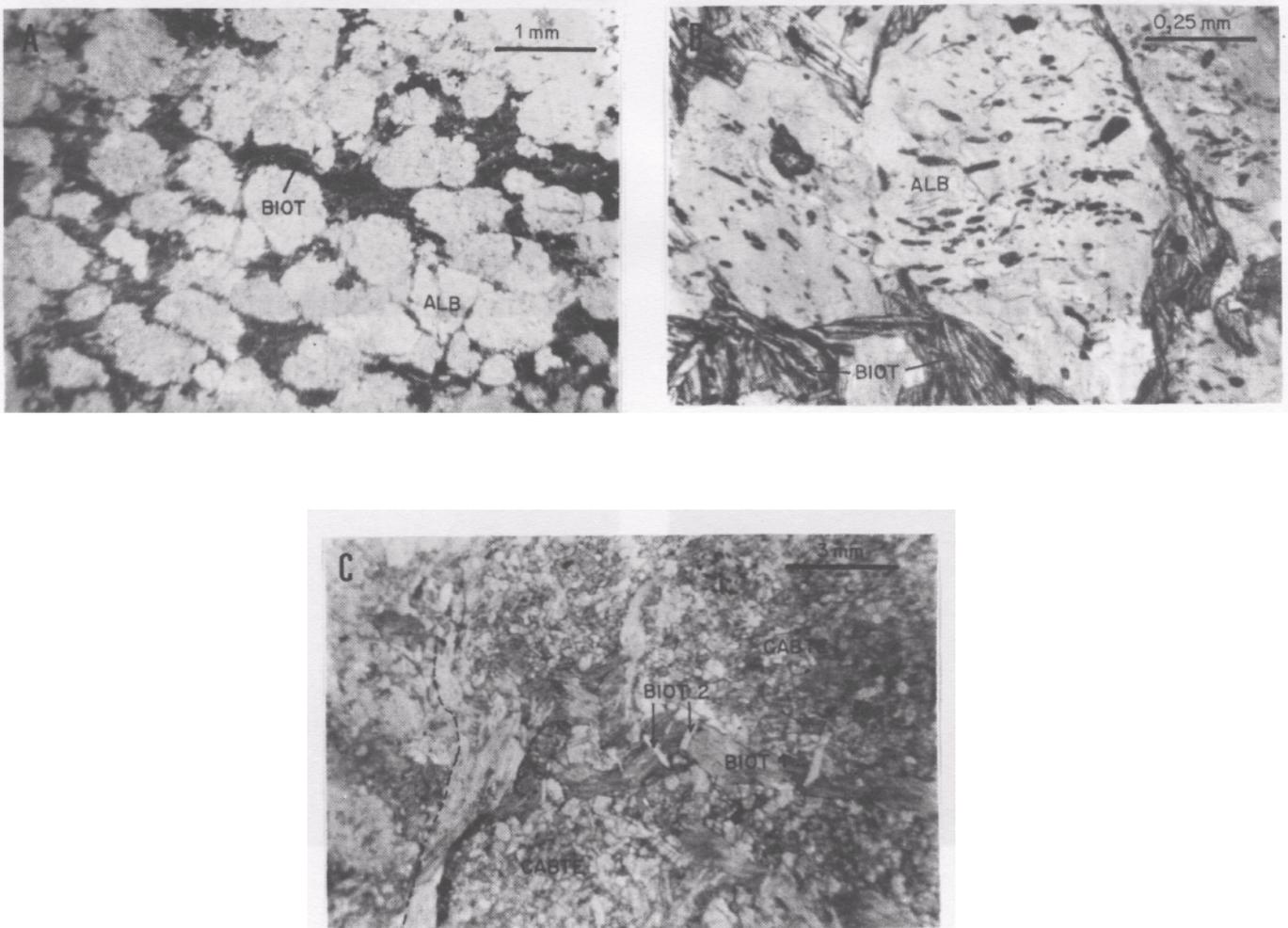
d. O berilo verde ("bagulho", para os garimpeiros) predomina largamente sobre a esmeralda. Normalmente, a proporção berilo/esmeralda é igual ou superior a 100. O berilo verde ocorre em todos os depósitos. É mais freqüente nos minérios dos corpos mineralizados como os representados na figura 9A ou naqueles tipo 9D, em posições distantes das falhas. Têm todas as formas e dimensões possíveis com até 3 cm de comprimento e 1 cm de diâmetro.

e. O berilo verde microcristalino ("borra", para os garimpeiros) ocorre, também, em todos os tipos de depósitos. Forma manchas e disseminações de cores esverdeadas dentro

das rochas hidrotermalizadas ou preenchendo pequenas fraturas. Ocorre nas partes mais externas das regiões que contêm minério de alto teor (Figs. 9B, C e D) ou em talcos xistos situados nas posições mais distantes das falhas mineralizadas (Fig. 9D, parte esquerda). A presença dessas manchas de berilo microcristalino é um indicador de proximidade do minério.

Os teores de esmeralda dos minérios conhecidos variam entre cerca de 50 g/m³ (berilo verde + esmeraldas em depósitos como os representados nas figuras 9A e 9B) e cerca de 800 g/m³ (berilo verde + esmeralda em depósitos como os das figuras 9C e 9D). Até 1984, o Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM) registrou a produção de 52.954 kg de pedras (berilo verde + esmeraldas). Pelo menos o dobro desta quantidade foi retirado após 1984, até o presente.

Mineralogicamente (Quadro 2), os minérios são essencialmente de dois tipos:



Prancha 2 - A. Albita ovalada constituindo um albitito com matriz de biotita. B. Detalhe mostrando as inclusões orientadas e dobradas dentro da albita. A cristalização da albita é, portanto, sincinemática. As inclusões são de epidoto, opacos (?) e moscovita. C. Minério carbonatado, isotrópico, atravessado por vênulas injetadas de biotita (Biot.1). Notar uma segunda geração de biotita (Biot. 2), prismática, orientada transversalmente às vênulas de biotita da primeira geração. Abreviações usadas ALB = albita; BIOT = biotita; CABTE = carbonato

Plate 2 - A. Oval albite in albitite with biotite matrix. B. Close up showing oriented and folded epidote and opaque inclusions into albite. Albitites are sincinematic minerals. C. Isotropic carbonated ore crossed by biotite veinlets. (Biot. 1) and with a second generation of biotite (Biot. 2), with prismatic crystals crossing Biot 1 veinlets. ALB = albite; BIOT = biotite; CABTE = carbonate

a. *Tipo carbonatado*: compostos por 5 a 80% de dolomita, 5% a 85% de talco, até 20% de biótita, até 10% de quartzo (em vênulas e amas), menos que 1% de clorita magnésiana e menos que 1% de magnetita. Rutilo ocorre em pequenas quantidades. Junto à dolomita, podem ocorrer a ankerita e, mais raramente, a siderita. Texturalmente, esse tipo de minério é isotrópico. Contém vênulas de quartzo e de biótita (Prancha 2C).

b. *Tipo a clorita-biotita*: normalmente envolve os núcleos de minério carbonatado. Neste minério, a quantidade de clorita magnésiana+biótita nunca é inferior a 25%. Têm de 3% a 75% de biótita, até 30% de clorita magnésiana, até 20% de dolomita e até 50% de quartzo. Ao contrário do minério carbonatado, o quartzo ocorre em mosaico, na matriz da rocha, envolvido por clorita e biótita. A pirita euhédrica, com até 1 cm de aresta, é muito freqüente, perfazendo até 3% da rocha. Junto ao quartzo, na matriz da rocha, o plagioclásio (albita) perfaz até 15% do minério. O rutilo ocorre como traço. Texturalmente, este minério tem aspecto foliado, causado pela presença (de biótita e clorita. Esta foliação é de fluxo ou herdada por substituição de minerais previamente orientados. Alguns minérios deste tipo formaram-se ao final da fase compressiva Dn+ 3 ou concomitantemente à reativação dos cisalhamentos de baixo ângulo que ocorreu durante a deformação Dn+4 (Quadro 1). Nestes casos, portam uma textura orientada tectonicamente, o que caracteriza uma xistosidade.

Quimicamente (Quadro 2 e Fig. 10), os *minérios carbonatados* (minérios ricos) têm teores de MgO sempre acima de 20% podendo alcançar 31%. Os teores de CaO variam de 1% a 10%, o que indica a predominância da dolomita sobre a calcita nesses minérios. Os teores de SiO₂ normalmente estão entre 35% e 40%. Baixam a 15%-20%, quando a carbonatação é intensa, e sobem a 50%-55%, quando a carbonatação é reduzida e os silicatos persistem não substituídos pelo carbonato. Os teores da Na₂O são baixos, menores que 0,2% e os de K₂O variam entre 0,1% e 1,5%. O FeO predomina sobre o Fe₂O₃. Os teores de FeO variam entre 4% e 6% e os de Fe₂O₃ variam entre 0,1% e 0,6%. A maior parte do ferro deste tipo de minério integra a ankerita ou a siderita. Os teores de Al₂O₃ são baixos, sempre menores que 2%.

No que concerne aos elementos menores, estes minérios se caracterizam pelos teores elevados em Be (36 ppm a 1.260 ppm), em Cr (920 ppm a 2.000 ppm), em Ni (1.220 ppm a 1.580 ppm) e em flúor (3.100 ppm a 5.500 ppm). Os teores em enxofre (70 ppm a 220 ppm), em cloro (maior que 20 ppm),

em Vanádio (52 ppm a 78 ppm) e em Cu (até 6 ppm) são baixos.

Os minérios com *clorita-biotita* (minérios encaixantes, pobres), no que concerne aos óxidos diferenciam-se dos minérios carbonatados pelos teores em MgO mais baixos (12% a 15%) e pelos teores em CaO normalmente também mais baixos (0,1% a 6,5%). A quantidade de ferro é muito maior que nos minérios carbonatados, variando de 8,0% a 10,0% para o FeO e de 1,0% a 4,0% para o Fe₂O₃. Neste tipo de minério, a quantidade de carbonato é muito menor, e o MgO junto ao FeO estão contidos sobretudo nas biotitas. Os teores de SiO₂ são sempre superiores a 40%, indicando a predominância de silicatos sobre carbonates. Pelo mesmo motivo são muito maiores os teores de Al₂O₃, sempre acima de 12%. Uma outra diferença marcante provém dos elementos alcalinos. Os teores de Na₂O variam de 0,6% a 3,1% (menor que 0,2% para os minérios carbonatados) e os teores de K₂O variam de 0,7% a 6% (0,1% a 1,5%, para os minérios carbonatados). Os teores de Na₂O se relacionam à presença de plagioclásio, que se expressa como albita oval (Prancha 2A e B) ou disseminada na matriz. Em ambos os casos, são plagioclásios hidrotermais.

Os teores elevados em enxofre (220 ppm a 8.200 ppm), em Cu (33 ppm a 152 ppm), em V (190 ppm a 400 ppm) e em cloro (35 ppm a 400 ppm), muito maiores que os dos minérios carbonatados, são diagnósticos dos minérios com clorita-biotita. Os teores de Be (até 23 ppm), de Cr (76 ppm a 118 ppm) e de Ni (148 ppm a 198 ppm) são menores. Para ambos os minérios, os teores de Sn (menor que 5 ppm) e de Ta (menor que 15 ppm) são muito baixos.

A figura 10 mostra as variações dos teores comentadas acima, teores estes listados no quadro 2. Sobressaem como diferenças importantes entre o minério rico, carbonatado, e o minério de baixo teor, encaixante, os teores de (Ca, Mg) CO₃, de FeO, de Al₂O₃, de Na₂O, de K₂O, de S, de Cl, de Cr, de V, de Ni, de Cu e de Be. Os teores de Be, menores nos minérios com clorita-biotita, são proporcionais à menor quantidade de esmeraldas encontradas nesse tipo de minério. As esmeraldas dos minérios carbonatados devem ter o Cr como principal agente cromóforo, enquanto o V deve ser o cromóforo principal das esmeraldas dos minérios com clorita-biotita. Serão discutidos, posteriormente, os ganhos e perdas causados pelo hidrotermalismo na gênese desses minérios.

As zonas hidrotermais Toda a região onde estão as lavras de esmeralda é hidrotermalizada. Em superfície (Fig. 2), foi

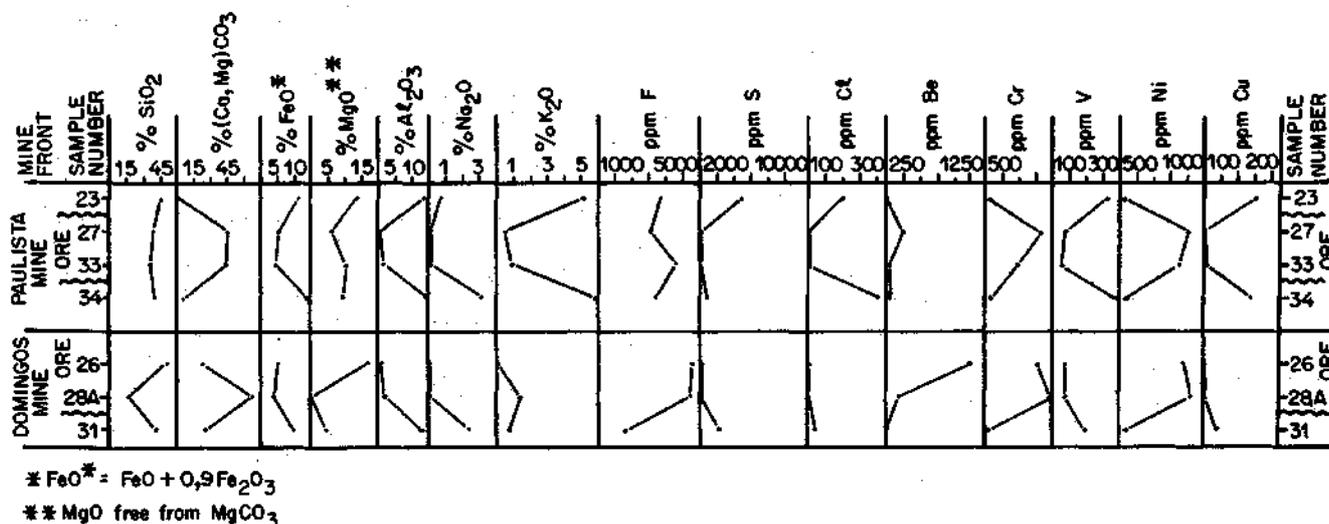


Figura 10 - Variação dos teores químicos das zonas mineralizadas mineralizadas em esmeraldas das minas Paulista e Domingos
 Figure 10 - Chemical composition variation between ore and host rocks from Paulista and Domingos mines

possível reconhecer feições hidrotermais em uma área de cerca de 3 km². Estas feições foram confirmadas com a descrição de galerias e frentes de lavra, e com a execução de sondagens testemunhadas.

Conforme comentado, as zonas cisalhadas formam corpos miheralizados (Fig. 9B e C), lavrados em diversos locais. Visando testar a existência de mineralização sobre algumas falhas de baixo ângulo, a NW da área das minas (Fig. 2), foram feitas quatro sondagens testemunhadas (SRF drill holes). A descrição e as análises mineralógica e química dos testemunhos obtidos permitiram identificar as zonas hidrotermais formadas no local.

Foram feitas duas seções verticais. A primeira seção é paralela à direção do falhamento (SRF 1,3 e 4, Fig. 11). A outra é transversal ao falhamento (SRF 4 e 2, Fig. 11). Estas sondagens interceptaram três zonas de cisalhamento de baixo ângulo - uma delas, a mais próxima da superfície, desenvolvida sobre talco xistos. As zonas de cisalhamento foram identificadas pela textura e pelas estruturas observadas nos testemunhos. A verticalidade de Snc e a horizontalidade de Sn+1, observadas em alguns locais (Fig. 11), indicam a existência de

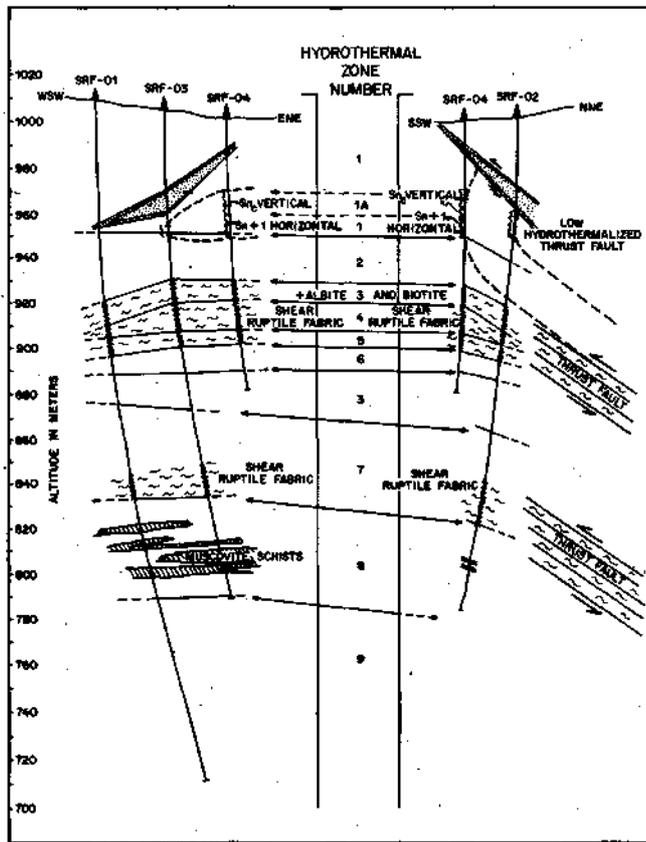


Figura 11 - Posição estrutural das zonas hidrotermais
Figure 11 - Structural position of hydrothermal zones

cavalcamentos sucessivos, provavelmente formando rampas de duplexes. Araújo & Leonards (1986) observaram estruturas desse tipo ao sul de Santa Terezinha.

Duas seqüências rochosas diferentes foram interceptadas. A seqüência superior é composta por rochas cloritosas, pouco moscovíticas, com texturas foliadas e bandadas bem marcadas. Esta unidade termina aproximadamente na cota 790 m. Abaixo desta cota, passa a predominar um quartzito moscovítico com textura granular maciça, muito pouco foliado. Estas duas unidades correspondem aos clorita-moscovita-quartzo xistos

e aos moscovita quartzitos observados e mapeados regionalmente (Figs. 1 e 2).

Foram separadas nove zonas hidrotermais, caracterizadas pelas suas composições mineralógicas (Fig. 12) e químicas (Fig. 15).

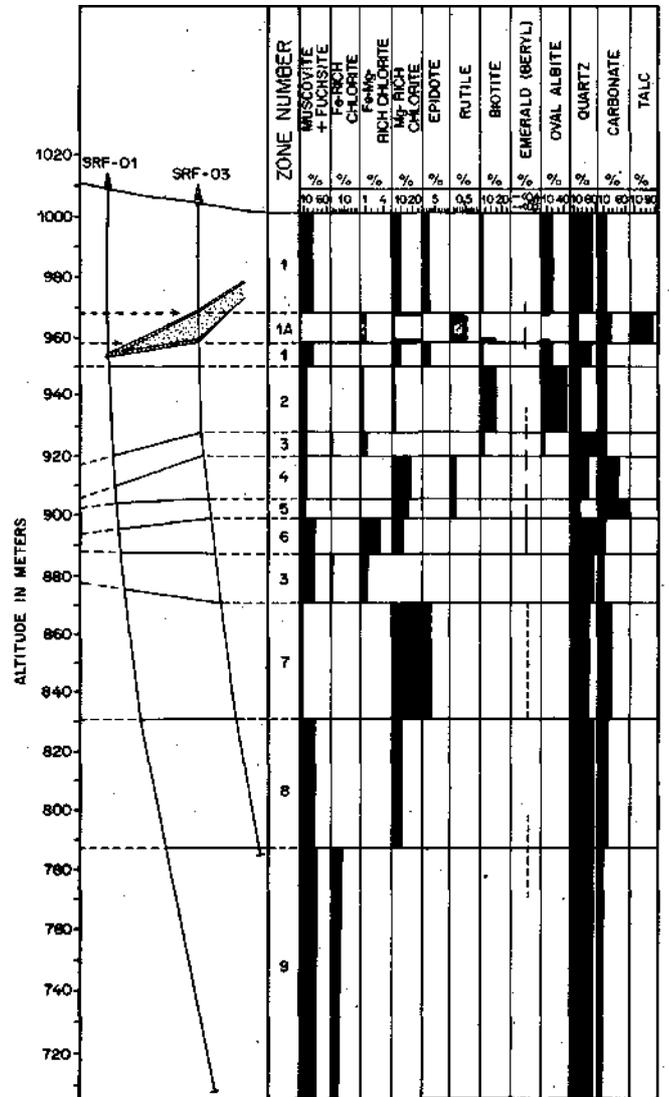


Figura 12 - Composição mineralógica e caracterização mineralógica das zonas hidrotermais
Figure 12 - Hydrothermal zones and mineralogical compositions at Santa Terezinha region

Caracterização Mineralógica e Química das Zonas Hidrotermais A figura 12 e o quadro 2 mostram a composição mineralógica quantificada nas zonas hidrotermais descritas. Normalmente, os minerais hidrotermais diferenciam-se daqueles da rocha original por não estarem orientados ou deformados (Prancha 2A e B) ou por se posicionarem discordantemente em relação às orientações originais, preenchendo fraturas ou como injeções (Prancha 2Q). Em alguns casos, as rochas originais foram quase inteiramente substituídas por minerais hidrotermais. Ao todo foram descritas 72 lâminas delgadas, cujas composições construíram a figura 12. No Quadro 2, são mostradas as modas somente das rochas que foram analisadas quimicamente.

Os carbonates (dolomita, calcita e ankerita), o quartzo e a moscovita existem, em proporções variadas, em todas as zonas. Quantidades grandes de carbonates junto a pouco

quartzo devem indicar regiões de temperaturas elevadas (Kennedy 1950 e Ellis 1963 a, b). As zonas números 1A, 4-5 e 7 (Figs. 11 e 12) destacam-se justamente por essas características. A variação antagonística dos teores de SiO₂ e de (Mg, Ca, Fe) CO₃ observada na figura 13 confirma esta observação. Nota-se (Fig. 11) que as regiões de temperaturas elevadas são aquelas identificadas textura! e estruturalmente como as zonas de cisalhamento e cavalgamento. As composições mineralógicas e químicas indicam, portanto, que as falhas de baixo ângulo foram, no local, os canais pelos quais os fluidos hidrotermais percolaram, a altas temperaturas. As temperaturas decrescem quando aumenta a distância até esses canais.

A albita ovalada e a biotita (Prancha 2A e B) são diagnósticas das zonas 1, 2 e 3; não existem nas outras zonas. A presença de mais de 40% de albitona zona 2, junto a quase 20% de biotita (Fig. 12 e Quadro 2), caracteriza um biotita-albita greisen. Quanto mais próximo da zona de cisalhamento, maior é a quantidade e mais complexas são as geminações observadas nas albitas. Brown (1962), Smith (1962) e Iwasaki (1963), entre outros, relacionam tais características com a temperatura de formação da albita. A quantidade e a variedade das geminações é maior quanto maior for a temperatura do ambiente. Em posições distantes do cisalhamento (zona 1), as quantidades de albita e biotita diminuem e aparece o epidoto. A albita é desprovida de geminações na zona 1.

Estas albitas contêm grande quantidade de inclusões. Em diversas situações observadas, estas inclusões estão orientadas e mostram formas sinuosas (Prancha 2B), sugerindo que a cristalização foi sincinemática. Possivelmente, cristalizaram-se quando os cisalhamentos de baixo ângulo foram reativados, na fase de deformação Dn+4 (Quadro 1 e Fig. 16). É provável

que tenha havido uma outra fase de cristalização de albita, após cessada a reativação, na fase tensional do tectonismo.

A zona 1A é uma lâmina de talco xisto, com os bordos cloritizados, deformada por uma falha. Os deslocamentos de baixo ângulo ocorrem preferencialmente segundo estes planos (Fig. 2) por serem plásticos e escorregadios. As modificações hidrotermais observadas nesta zona são idênticas àquelas descritas anteriormente para os minérios. Aqui, porém, a quantidade de esmeraldas é muito pequena e as suas dimensões são microscópicas. Os teores baixos de F, Be, e CO₂ (Quadro 2 e Fig. 13) sugerem que não foi gerada maior quantidade de esmeraldas devido à pouca intensidade do hidrotermalismo no local.

A clorita magnesiânica predomina sobre as outras cloritas. Esta ocorre em todas as zonas menos nas zonas 3 e 9 (Fig. 12). A clorita metamórfica, original da rocha, é também magnesiânica. Normalmente, é bastante difícil separar o que é hidrotermal do que é metamórfico. As quantidades mostradas na figura 12 e no quadro 2 são a soma das cloritas magnesianas encontradas. A clorita ferro-magnesiânica tem ocorrência restrita às zonas 2,3 e 6. É uma clorita hidrotermal em todos os casos. A clorita rica em ferro ocorre na zona 3, misturada e gradando para a clorita ferro-magnesiânica. Na zona 9, a clorita rica em ferro ocorre como prismas com 0,5 mm a 5 mm de comprimento, dispersos aleatoriamente entre os grãos de quartzo e moscovita. É, também, uma clorita hidrotermal.

A "fuchsitá" ocorre nos contatos da zona 1A e nas zonas 4 e 5. São locais em que os teores de Cr são mais elevados (Fig. 13). É bastante difícil separar a "fuchsitá" da moscovita hidrotermal ou original da rocha.

O berilo ocorre em todas as zonas. Nas zonas 7, 8 e 9,

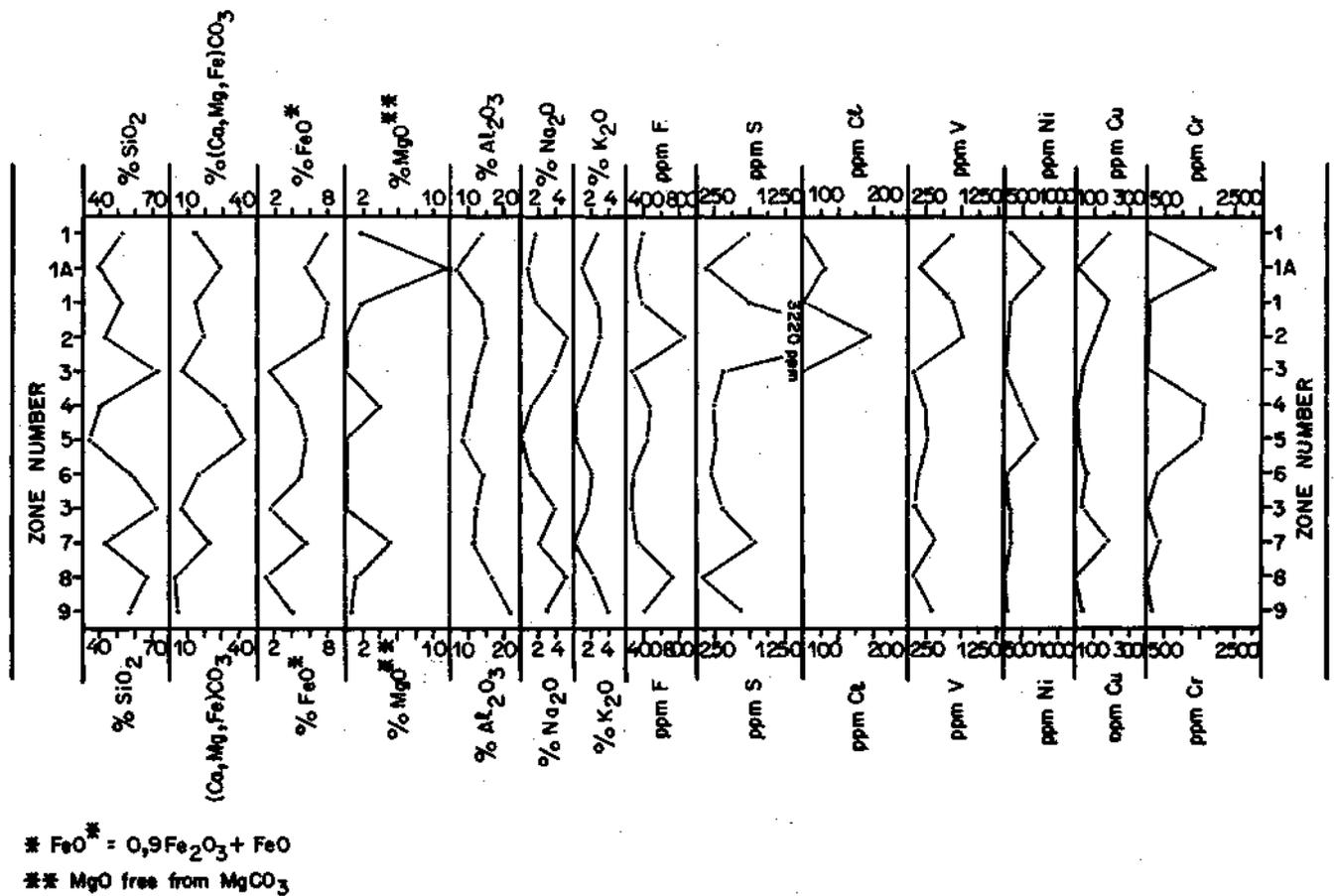


Figura 13 - Variação dos teores químicos das zonas hidrotermais (comparar com Figs. 13 e 14)
 Figure 13-Chemical composition variation across hydrothermal zones (compare with Figs. 13 and 14)

foram encontradas pequenas manchas verdes de berilo microcristalino ("borra"). O berilo verde ("bagulho") foi encontrado em pequena quantidade, como cristais microscópicos, nas zonas 1, IA, 2, 3, 4, 5 e 6. Os teores muito baixos de Be dessas rochas (Quadro 2) devem ser o principal motivo da ausência de esmeraldas.

Quimicamente, as zonas hidrotermais mostram teores que refletem, como é óbvio, as suas composições mineralógicas. A zona 2, com os albita *greisens*, destaca-se pelos teores elevados de Na₂O e Al₂O₃, conseqüências da presença de albita, mas também por seus teores elevados de flúor, cloro, enxofre e vanádio, contra baixos teores de cromo e de MgO. Estas características químicas, junto às mineralógicas, tornam a zona 2 comparável ao minério pobre observado nas minas, denominado minério com clorita-biotita (Quadro 2, amostras 23, 31 e 34). Portanto, para a formação desse tipo de rocha hidrotermal, não é imprescindível a presença de talco xistos, como faz crer a descrição das frentes de lavra em Santa Terezinha e de outros depósitos nos quais as esmeraldas se relacionam a rochas magnesianas (Schwarz 1987).

A comparação das composições das zonas hidrotermais não mineralizadas (Fig. 13) com as composições das zonas mineralizadas (Fig. 10) revela como principais diferenças: a. Os teores de Be da região hidrotermalizada, mas não mineralizada, são sempre menores de 2 ppm. Normalmente, são bem mais altos nas zonas mineralizadas, podendo alcançar ao menos 1.260 ppm nos minérios ricos, carbonatados, b. Os teores de flúor são mais elevados nas zonas mineralizadas, variando de 1.600 ppm (minério pobre) a 5.500 ppm (minério rico). Nas zonas hidrotermalizadas não-mineralizadas, os teores de flúor raramente são maiores que 500 ppm e não ultrapassam 1.000 ppm.

O berílio e o flúor marcam, realmente, em Santa Terezinha, o que é zona mineralizada e o que é zona estéril ou pouco mineralizada. Nota-se (Quadro 2; Figs. 10 e 13) que para todas as outras substâncias, há situações semelhantes nas zonas hidrotermalizadas com e sem esmeraldas. Não são as outras substâncias, portanto, que condicionam a formação da esmeralda. A zona IA, por exemplo, e a zona 2 têm composições mineralógicas e químicas iguais as zonas de minério rico (carbonatado) e de minério pobre (com clorita-biotita), respectivamente. O que as diferencia dos minérios são seus teores baixos em flúor e berílio, e por isso não têm esmeraldas em quantidades significativas. Um fluido hidrotermal fluorado e rico em Be seria, então, a principal condição de gênese do berilo em depósitos deste tipo.

Balanco de massa para o hidrotermalismo O balanço de perdas e ganhos ocorridos durante o hidrotermalismo pode ser feito usando-se a técnica proposta por Babcock (1973). Por esta técnica, as perdas e ganhos podem ser calculados desde que: a. se conheça a densidade das rochas envolvidas no hidrotermalismo; b. se tenha amostras não hidrotermalizadas das rochas envolvidas no hidrotermalismo; c. ao menos uma substância tenha permanecido inerte durante o hidrotermalismo, e d. se tenha análises químicas das rochas hidrotermalizadas e não hidrotermalizadas. Satisfeitas estas condições, as perdas e ganhos são calculados pela equação:

$$X_n = a \left[\left(K_v \frac{Q_n^B D^B}{D^A} \right) - Q_n^A \right]$$

X_n = transferência de massa (em gramas) do componente n entre as fases A e B

K_v = fator volume (razão entre o volume final e inicial das rochas)

Q_n^B = fração de peso da substância n na rocha B hidrotermalizada

Q_n^A = fração de peso da substância n na rocha A hidrotermalizada (rocha original)

B

D = densidade da rocha hidrotermalizada

D^A = densidade da rocha original, não-hidrotermalizada

A amostra 60A (Quadro 2) é um moscovita-quartzo xisto não-hidrotermalizado obtido por sondagem do mesmo horizonte (sondagem $n-5$, Fig. 2) no qual se desenvolveram as zonas hidrotermais numeradas de 1 a 8 (a zona 9 está em uma unidade litológica diferente). A amostra 71 foi obtida do mesmo modo. É um talco xisto, também não-hidrotermalizado. Estas duas amostras foram adotadas como representativas das zonas hidrotermalizadas não-mineralizadas (amostra 60A) e das zonas mineralizadas (amostra 71), respectivamente. Suas densidades e suas composições químicas e mineralógicas constam no Quadro 2.

Conforme é geralmente aceito (Brimhall 1979, Klemm *et al.* 1989, entre outros), o Al₂O₃ foi considerado imóvel durante o hidrotermalismo. Fazendo $X_n = 0$ para Al₂O₃, foi calculado o fator volume para amostras representativas das zonas de 1 a 8 e para amostras do minério carbonatado e do minério com clorita-biotita. Os resultados são mostrados no Quadro 3. Note-se nesse quadro que, tanto a amostra 60A quanto a amostra 71, foram usadas como amostras originais, supostamente geradoras dos minérios rico e pobre. Isto foi feito para testar qual seria o resultado mais coerente, aquele que considera que o minério foi originado pelo hidrotermalismo do moscovita-quartzo xisto regional (amostra 60A) ou pelo hidrotermalismo de um talco xisto (amostra 71).

A simples comparação dos fatores volumes (K_v , Quadro 3) permite uma opção. A adoção do moscovita xisto como rocha original do minério obrigaria a aceitação de aumentos de volume de até 1.702% (amostra 33). É bem pouco provável que isto tenha acontecido, embora se esteja dentro de zonas de cisalhamento em regime tensional. Adotando-se o talco xisto como rocha original, o minério pobre, com clorita-biotita, seria gerado por uma diminuição de volume da ordem de 78% a 83%. Estes valores parecem coerentes com valores observados em outras regiões (Klemm *et al.* 1989) e também são coerentes com a mineralogia e as feições estruturais anteriormente descritas. Esta experiência mostra, portanto, que os corpos mineralizados carbonatados (minério rico) são produtos do hidrotermalismo sobre talco xistos. Os minérios com clorita-biotita podem ser gerados pela transformação de talco xistos ($K_v = -80\%$ a -83%) ou pela transformação de moscovita-quartzo xistos (Quadro 3, zona 2, com $K_v = +23\%$). Conclusão igual pode ser obtida comparando as perdas e ganhos das substâncias químicas em ambos os casos, a partir da amostra 60A e da amostra 71 (Quadro 3).

O balanço de massa das zonas hidrotermalizadas numeradas de 1 a 8 é mostrado na figura 14 e no quadro 3, considerando o moscovita-quartzo xisto (amostra 60A) como rocha original. Nota-se, para os óxidos, que, no geral, o hidrotermalismo enriqueceu todas as zonas em todas as substâncias, com exceção de K₂O, que foi sempre lixiviado. As zonas cisalhadas (n's 4, 5 e 7) foram as regiões de maior percolação de fluido e, portanto, as de mais alta temperatura. Nessas zonas aconteceram os maiores enriquecimentos em carbonates. Com exceção da zona 2 (os albita *greisens*), todas as outras foram enriquecidas em SiO₂. As zonas 2 e 3, ricas em albita ovalada, e a zona 8, rica em albita na matriz, foram os locais de maior precipitação de Na₂O. Com exceção da zona 3, todas as outras zonas foram enriquecidas em FeO* (ferro total). Nota-se que o hidrotermalismo foi essencialmente carbonático-magnesiano (ganhos de mais de 50g de CO₂ + MgO por 100g de rocha nas zonas 4 e 5), silicoso (ganhos dá ordem de 20g por 100g de rocha) e ferruginoso (ganhos de 5g a 10g por 100g de rocha). O MgO (livre de carbonates) foi enriquecido nas zonas 4 e 7, mais cisalhadas, onde constituiu a clorita magnesianas.

Considerando os elementos menores (Fig. 14, parte direita), nota-se que o hidrotermalismo proporcionou o enriquecimento de todas as zonas em todas as substâncias, à exceção do

Quadro 3 — Ganhos e perdas ocorridos no hidrotermalismo
Chart 3 - Gain and loss during hydrothermalism

Zone number	RELATIVE TO SAMPLE Nº 60A								RELATIVE TO SAMPLE Nº 60A					RELATIVE TO SAMPLE Nº 71				
	1	2	3	4	5	6	7	8	Fossiliferous Mass		Distillate Mass			Fossiliferous Mass		Distillate Mass		
Sample number	4	56	7	8	10	1A	53	54	ore	foot wall	ore	foot wall	ore	foot wall	ore	foot wall	ore	foot wall
SiO ₂	+ 13,39	- 5,03	+ 56,81	+ 11,89	+ 29,67	+ 20,58	+ 16,87	+ 18,67	+ 663	+ 5,88	- 8,79	+ 158,78	- 1,97	+ 2,26	- 33,5	- 35,5	- 33,8	- 53,8
Al ₂ O ₃	- 0,08	+ 0,07	- 0,06	+ 0,01	- 0,01	+ 0,03	+ 0,08	+ 0,05	0,00	- 0,02	+ 0,02	0,00	- 0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FeO ^a	+ 4,73	+ 8,67	- 2,23	+ 13,06	+ 23,19	+ 2,07	+ 19,56	- 1,69	+ 90,68	+ 11,83	+ 13,38	+ 65,02	+ 11,53	+ 7,3	- 5,06	- 2,8	+ 6,6	- 3,1
HgO ^b	+ 1,40	- 0,86	- 0,86	+ 6,67	- 0,63	- 0,86	+ 7,96	+ 0,57	+ 210,83	+ 19,45	+ 12,18	- 0,86	+ 6,15	+ 6,4	+ 20,5	- 21,8	- 21,6	- 22,6
H ₂ O	+ 2,18	+ 7,08	+ 6,10	+ 2,10	- 0,03	+ 3,39	+ 3,63	+ 6,16	+ 1,26	+ 0,84	+ 4,04	+ 0,69	+ 3,77	+ 0,3	- 0,6	+ 0,86	- 0,6	+ 0,93
K ₂ O	- 4,19	- 6,49	- 5,41	- 7,68	- 7,69	- 5,18	- 8,20	- 5,82	+ 7,71	- 0,68	- 0,39	+ 2,18	- 5,98	+ 2,36	+ 0,70	+ 1,82	+ 1,16	+ 0,15
(Ca,Mg,Fe)CO ₃	+ 7,84	+ 22,61	+ 11,63	+ 57,12	+ 103,05	+ 26,92	+ 40,25	+ 3,91	+ 873,62	+ 3,19	+ 8,61	+ 799,16	+ 41,29	+ 107,68	- 7,92	- 7,23	+ 97,19	- 2,88
H ₂ O ^c	+ 0,80	- 0,18	- 0,40	+ 6,35	+ 5,38	+ 6,51	+ 3,75	- 0,38	+ 24,24	- 1,89	+ 0,32	+ 2,43	+ 3,38	+ 0,87	- 1,93	- 1,23	- 0,93	- 0,83
F	- 36,76	- 6,54	- 57,36	- 12,53	+ 6,88	- 66,79	- 62,88	- 12,94	+ 252,08	+ 444,93	+ 357,65	+ 219,83	+ 168,32	+ 1.127,63	- 9,36	- 21,66	+ 753,36	- 47,56
S	- 5,41	+ 100,75	- 39,04	+ 0,63	+ 63,16	+ 18,44	+ 127,88	- 6,70	+ 617,71	+ 83,64	+ 90,37	+ 170,96	+ 15,79	+ 38,84	+ 78,55	+ 128,56	+ 7,29	+ 28,15
Cl	-	+ 33,29	-	-	-	-	-	-	-	+ 29,65	+ 53,86	-	+ 5,69	-	+ 4,87	+ 7,1	-	+ 6,75
Be	-	-	-	-	-	-	-	-	+ 71,62	+ 1,91	+ 3,10	+ 303,98	-	+ 9,46	+ 0,25	+ 0,61	+ 27,21	-
Cr	+ 16,12	+ 4,48	- 0,90	+ 296,88	+ 248,25	- 36,39	+ 62,29	- 0,05	+ 829,58	+ 16,48	+ 16,17	+ 339,77	+ 11,66	+ 91,89	+ 167,7	+ 168,01	+ 139,39	+ 168,36
V	+ 13,92	+ 6,34	+ 6,68	+ 39,79	+ 56,16	+ 16,23	+ 68,71	+ 1,93	+ 64,46	+ 39,89	+ 6,86	+ 84,29	+ 21,91	+ 10,17	+ 2,69	+ 2,68	+ 6,57	+ 0,39
Ni	+ 13,18	+ 4,34	+ 0,64	+ 86,25	+ 207,66	+ 16,02	+ 23,76	+ 0,49	+ 2.266,07	+ 11,07	+ 18,72	+ 8.861,93	+ 34,01	+ 218,76	+ 106,91	+ 107,37	+ 136,62	+ 185,76
Cu	- 0,66	+ 9,88	+ 4,71	+ 0,97	+ 12,64	+ 4,70	+ 30,37	- 0,11	+ 11,26	+ 21,69	+ 17,88	- 0,70	+ 4,67	-	-	-	-	-
Sr	-	-	-	-	+ 17,69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Density (g/cm ³)	2,82	2,80	2,74	2,75	2,78	2,82	2,87	2,78	2,99	2,79	2,92	2,92	2,77	2,97	2,79	2,92	2,97	2,77
Volume change	+ 1%	+ 2%	+ 6%	+ 8%	+ 13%	+ 2%	+ 6%	+ 1%	+ 170%	+ 4%	+ 2%	+ 960%	+ 3%	+ 146,3%	+ 80,6%	+ 43,1%	+ 64,8%	+ 78,3%
Kv	1,16	1,23	1,61	1,82	2,35	1,22	1,67	1,17	18,02	1,62	1,24	10,40	1,58	2,461	0,19%	0,16%	1,668	0,23%

Cl and Br in sample 60A considered = 0,0ppm FeO^a = FeO + 0,39Fe₂O₃ HgO^b = HgO free from carbonates

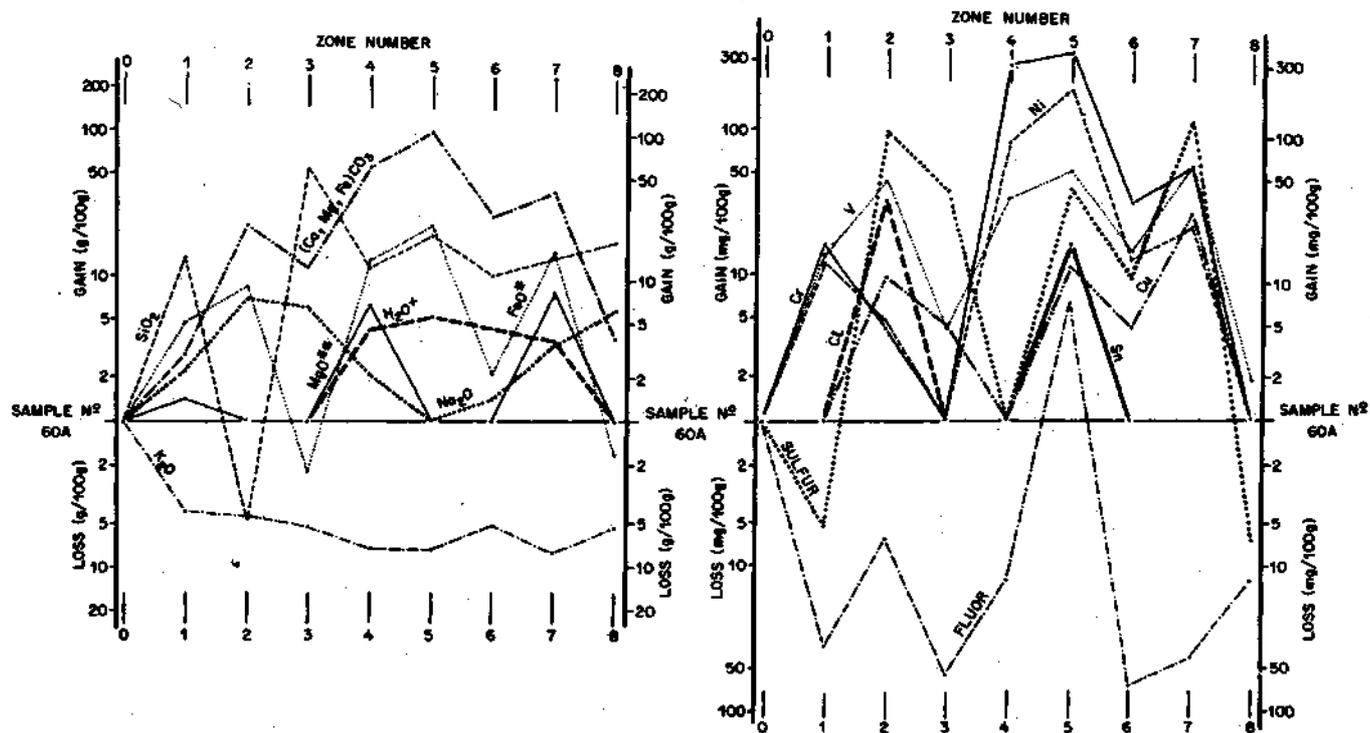


Figura 14 — Balanço de massa (perdas e ganhos) ocorrido durante a formação das zonas hidrotermais. A amostra original é a de n° 60A (moscovita-quartzo xisto)

Figure 14 - Gain and loss occurred during hydrothermalism (original sample is n° 60A, muscovite-quartz schist)

flúor que somente não foi lixiviado da zona 5 (+6,86g para 100g de rocha). Provavelmente, isto é importante para explicar a ausência de Be e de quantidades importantes de esmeraldas no local.

O, Cr, em geral, é um elemento geoquimicamente inerte. O seu enriquecimento nas zonas 1, 4, 5 e 7 deve ser sobretudo residual, causado pela lixiviação das outras substâncias. Nota-

se que as zonas cisalhadas 5 e 7 e a zona 2 foram, no geral, as mais enriquecidas em novas substâncias. Somente a zona 5 ganhou Sn e F. A zona 2 recebeu muito enxofre (pirita), vanádio e cobre - esta é a única zona em que houve aporte de cloro. No geral, em relação aos elementos menores, o hidrotermalismo lixiviou o flúor das rochas e enriqueceu as zonas cisalhadas em Ni (ganhos de mais de 50 mg por 100g de

rocha, nas zonas 4 e 5), em enxofre (ganhos de mais de 100mg por 100g de rocha, nas zonas 2 e 7) e em vanádio (ganhos de mais de 50 mg por 100g de rocha, nas zonas 5 e 7). O cromo (ganhos de mais de 50 mg por 100g de rocha) foi residualmente enriquecido nas zonas 4, 5 e 7. As zonas cisalhadas foram fracamente supridas ou nada receberam do hidrotermalismo. A excessão seria a zona 2 (albita greisens) que recebeu todas as substâncias menos o flúor. A zona 2 é a única em que houve aporte de cloro.

As zonas mineralizadas (Quadro 3 e Fig. 15) tiveram suas composições comparadas à amostra de talco-xisto n- 71. O minério de alto teor, carbonatado, evoluiu no hidrotermalismo de modo igual à zona 5. A formação do minério carbonatado do passou pelo aporte hidrotermal de todas as substâncias menos o Na₂O, o MgO e a H₂O. O maior aporte foi de carbonato (CO₂ + MgO), seguido por FeO*. O MgO** (não constituinte da dolomita) foi trazido para o minério da mina Paulista e foi lixiviado do minério da mina Domingos.

O minério de baixo teor, com clorita-biotita, evolui de modo inverso ao carbonatado. Perdeu todas as substâncias com excessão do K₂O. A mesma relação de perda e ganho ocorreu entre o minério de alto e de baixo teor, quando se consideram

os elementos menores. O minério carbonatado é sempre enriquecido nas substâncias que o minério com clorita-biotita é empobrecido, e vice-versa. Dois exemplos: a. o minério carbonatado da Mina Paulista (amostra n- 33) ganhou 1.127 mg de F, 210 mg de Ni e 9,46 mg de Be por 100 g de rocha. O minério com clorita-biotita da mesma mina (amostras n's 23 e 24) perdeu entre 10 mg e 21 mg de F, e 106 mg e 107 mg de Ni por 100 g de rocha. Ganhou somente 0,2 mg a 0,4 mg de Be. b. O minério carbonatado nada ganhou de Cl, contra um aporte de 4 mg a 7 mg de Cl por 100 g de rocha para o minério com clorita-biotita. Notar que as únicas substâncias que foram enriquecidas concomitantemente em ambos os tipos de minério foram o Be, o S, o V, e o K₂O.

O quadro 4 e a figura 16 mostram, esquematicamente, o balanço químico do hidrotermalismo, baseado no balanço de massa descrito anteriormente. Em uma primeira etapa de hidrotermalismo, enquanto houve aumento de temperatura, toda a região foi percolada por água quente que carregava grande quantidade de CO₂ em solução. Este fluido teve como principais condutos sobretudo as falhas de baixo e alto ângulos. No quadro 4, a percolação é considerada como tendo ocorrido através de uma falha de baixo ângulo que afetou e cisalhou um

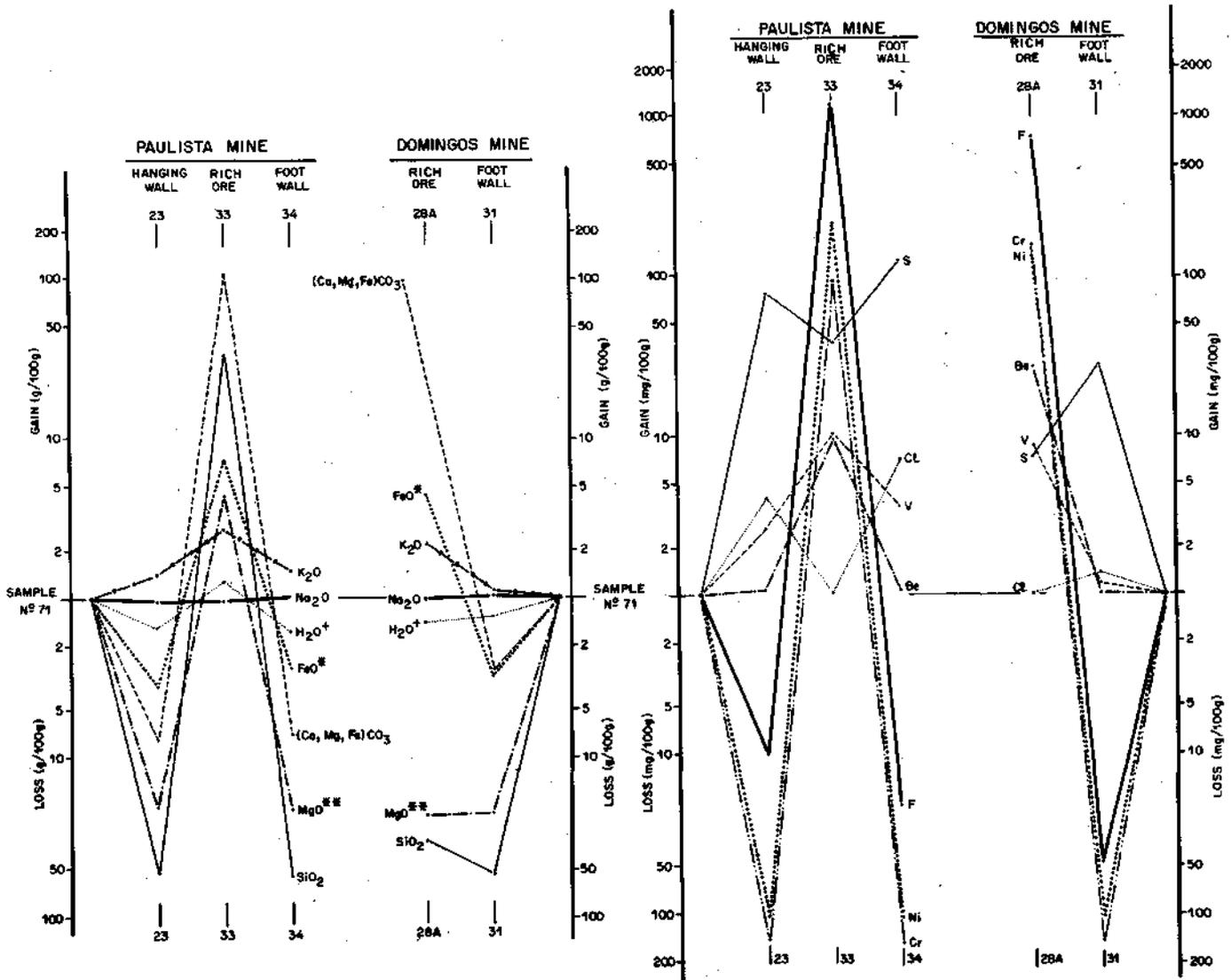


Figura 15 - Balanço de massa (perdas e ganhos) ocorrido durante a formação dos minérios rico e pobre (encaixantes) das Minas Paulista e Domingos. A amostra original é a de n- 71 (talco xisto)

Figure 15 - Gain and loss occurred during genesis of rich and poor (host rock) ores of Paulista and Domingos mines (original sample is n° 71, talc schist)

Quadro 4 - Balanço químico do hidrotermalismo nos depósitos de esmeralda de Santa Terezinha
 Quadro 4 - Hydrothermal mass balance into emerald mines

RAISING TEMPERATURE		DECREASING TEMPERATURE		FINAL PRODUCT	
<p>CHLORITE-MUSCOVITE QUARTZ SCHIST</p> <p>- Fluor - K₂O</p> <p>+ Cr (residual) } Fuchsite + Al₂O₃ (residual) } + K₂O (residual) } Muscovite</p> <p>albite + quartz cpy+py chlorite (matrix)</p> <p>+ Na₂O + SiO₂ + Ni + Cu + FeO + MgO</p>	<p>Be rich fluid (+F + K₂O + Na₂O + SiO₂ S?)</p> <p>- Lixiviation of K₂O, Na₂O, SiO₂, S and F</p> <p>+ Deposition of carbonates</p> <p>+ Na₂O } Oval albite + SiO₂ = Quartz</p> <p>+ Be + V } Emerald (poor) + K₂O + F + SiO₂ } Reaction with talc + S + FeO } Pyrite</p> <p>+ Be + Cr + V } Emerald (rich) + K₂O + SiO₂ + F } Veinlets of quartz and biotite</p>	<p>HYDROTHERMAL ZONES</p> <p>+++ SiO₂ = Quartz ++ FeO } Chlorite + MgO } ++ (Mg, Ca, Fe)CO₃ + Muscovite + Cr₂O₃ = Fuchsite + S + Cu } Calcopirite + Ni + V + Cl</p> <p>CHLOR.-BIOT. ORE</p> <p>+ SiO₂ + K₂O } Biotite + MgO } + FeO } Pyrite + S } + Be } Emerald (poor) + V } + Cr }</p> <p>CARBONATED ORE</p> <p>+++ (Mg, Ca, Fe)CO₃ = Carbonates ++ Be + Cr } Emerald (rich) + V } + SiO₂ } Quartz - Biotite + K₂O } + S } Pyrite + Talc (residual) + Magnetite</p>			
			<p>TALC SCHIST</p> <p>- Na₂O - SiO₂ - Ni - Cu - FeO - MgO</p>	<p>+ Be + V } Emerald (poor) + K₂O + F + SiO₂ } Reaction with talc + S + FeO } Pyrite</p>	<p>CHLOR.-BIOT. ORE</p> <p>+ SiO₂ + K₂O } Biotite + MgO } + FeO } Pyrite + S } + Be } Emerald (poor) + V } + Cr }</p>
			<p>TALC SCHIST</p> <p>CO₂ + HOT WATER</p> <p>+++ (Mg, Ca, Fe)CO₃ = Carbonates ++ Cr (residual) = Chromite ++ MgO (residual) = Talc ++ Fe₃O₄ (residual) = Magnetite</p>	<p>+ Be + Cr + V } Emerald (rich) + K₂O + SiO₂ + F } Veinlets of quartz and biotite</p>	<p>CARBONATED ORE</p> <p>+++ (Mg, Ca, Fe)CO₃ = Carbonates ++ Be + Cr } Emerald (rich) + V } + SiO₂ } Quartz - Biotite + K₂O } + S } Pyrite + Talc (residual) + Magnetite</p>

horizonte de talco xisto (igual ao da amostra n° 71) encaixado por moscovita-quartzo xistos (iguais aos da amostra n° 60A). A água rica em CO₂ tem como principais efeitos: a. carbonatar o talco xisto; b. enriquecer residualmente o talco xisto em Cr₂O₃, MgO e Fe₂O₃; c. lixiviar Na₂O, SiO₂, MgO, FeO, F, Ni e Cu do talco xisto.

As encaixantes, com porosidade secundária adquirida em Dn+3 e Dn+4 (Quadro 1), foram atravessadas pelo fluido proveniente das zonas de cisalhamento. Conforme estes fluidos se distanciaram dos principais canais de percolação, as suas temperaturas diminuíram, embora a temperatura geral do sistema hidrotermal ainda estivesse em ascensão. Nas encaixantes, os fluidos hidrotermais causaram: a. deposição ao menos de parte do Na₂O + SiO₂ (formando albitas) e do SiO₂ (formando quartzo), lixiviados do talco xisto da zona de cisalhamento; b. enriquecimento residual em Al₂O₃ (formando clorita) e do Cr₂O₃ (formando fuchsite); e c. lixiviação do flúor e do K₂O.

A temperatura máxima atingida pelo sistema deve ter sido da ordem de 600°C, medida em inclusões fluidas de esmeraldas (Lacerda Filho & Ribeiro Filho 1985). Provavelmente, a partir de temperaturas dessa ordem, o sistema hidrotermal começou retroagir, diminuindo de temperatura (Quadro 4 e Fig. 16). Toda a região começou a ser invadida por águas meteóricas, antes expulsa pela expansão das isotermas, e por um fluido portador de berílio. Talvez, mas não necessariamente, este fluido carregava também F, K₂O, Na₂O, SiO₂ e S. Esta mistura de fluidos causou:

- a. Nas encaixantes das zonas de cisalhamento,
 - Deposição de carbonates
 - Lixiviação de F, K₂O, Na₂O, SiO₂ e S
 - Deposição de Na₂O e SiO₂ nas encaixantes imediatas dos

talcos xistos, formando albita (oval).

- b. Nos talco xistos das zonas de cisalhamento,
 - Deposição de K₂O e SiO₂ que, reagindo com o talco, forma biotita. Originou-se uma zona de biotititos que envolve o núcleo anteriormente carbonatado
 - Deposição de FeO e S, que formam pirita dentro do biotítito
 - Deposição de um pouco de Be + V 4- Cr₂O₃, formando esmeraldas (minério pobre), também dentro do biotítito
 - A desestabilização do fluido rico em Be é completa quando atinge o núcleo rico em MgO em carbonates da zona de cisalhamento. Nessa região, é depositada a maior parte do Be e do V que reagem com o Cr₂O₃ formando esmeralda (minério rico). Todo o ambiente é fortemente enriquecido em flúor
 - O K₂O e o SiO₂ restantes reagem com o MgO, formando vênulas (injeções) de biotita em meio aos carbonates
 - A temperaturas ainda mais baixas, o MgO e o FeO começam a reagir com SiO₂, formando clorita e não mais biotita, e as biotitas transformam-se em clorita.

O resultado final é mostrado no quadro 4 (parte direita). O talco xisto tem, agora, um núcleo carbonatado rico em esmeraldas. Este núcleo é capeado por clorita-biotita xistos piritosos com algumas esmeraldas (minério pobre). As encaixantes imediatas dos clorita-biotita xistos estão albitizadas e enriquecidas em moscovita ("fuchsite"); clorita, quartzo e carbonato, constituindo as zonas hidrotermalizadas.

DISCUSSÃO O sistema hidrotermal que gerou o depósito de esmeraldas de Santa Terezinha começou sua atividade ao final da fase de deformação Dn+3 (Quadro 1). Esta deformação foi compressiva e proporcionou a expulsão da água da região, proporcionando toda a lixiviação e carbonatação ocorridas durante a ascensão da temperatura. Esta deforma-

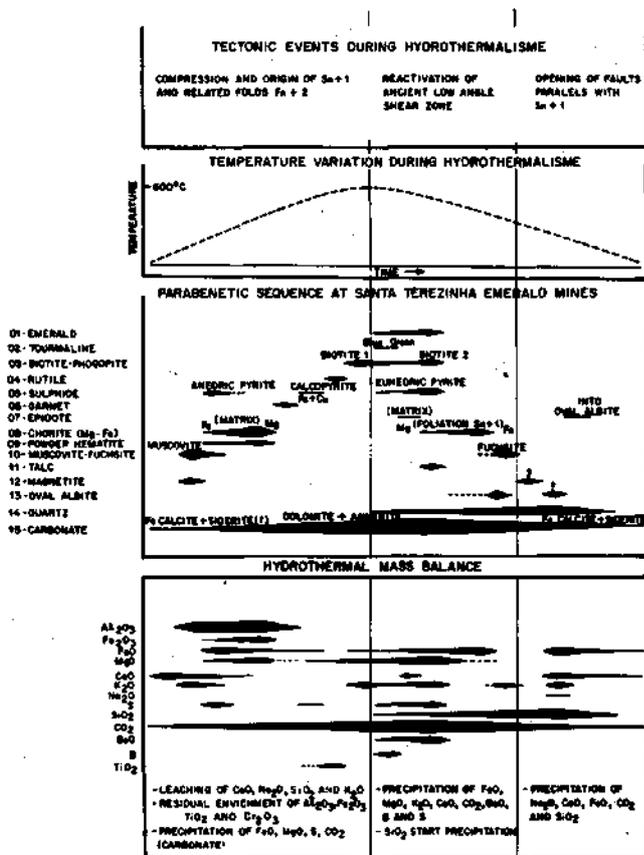


Figura 16 — Esquema geral mostrando e correlacionando, de cima para baixo: a. eventos tectônicos; b. variação de temperatura; c. seqüência paragenética; e d. balanço de massa ocorrido durante o hidrotermalismo gerador dos depósitos de esmeraldas de Santa Terezinha

Figure 16 - General scheme showing, from top to bottom: a. tectonic events, b. temperature variation during hydromermalism; c. paragenetic sequence; and d. hydrothermal mass balance ocuned during the genesis of emerald deposits of Santa Terezinha

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, J.O. & LEONARDOS, O.H. 1986. A esmeralda do município de Pirenópolis. Goiás: um exemplo de greisenização de talco-xistos. In: CONGR. BRAS. GEOL., 34, Goiânia, 1986. Anais. Goiânia, SBG. v.4, p.1835-1843.
- B ABCOK, R.S. 1973. Computational models of metassomatic process. Lithos, 6:279-290.
- BRIMHALL, G.H. 1979. Lithologic determination of mass transfer mechanisms of multiple-stage porphyry copper mineralization at Butte, Montana - vein formation by hypogene leaching and enrichment of potassium-silicate protore. *Econ. Geol.* 74:556-589.
- BROWN, W.L. 1962. Peristerite unmixing in the plagioclases and metamorphic facies series. *Norsk. Geologist Tidsskrift*, 42:355-382.
- DANNI, J.C.M. & RIBEIRO, C.C. 1978. Caracterização da seqüência vulcano-sedimentar de Pilar de Goiás e de Guarinos, Goiás. In: CONGR. BRAS. GEOL., 30, Recife, 1978. Anais. Recife, SBG, v.2, p.582-589.
- D'EL REY SILVA, L.J. & GUILUANI, G. 1988. Controle estrutural da jazida de esmeraldas de Santa Terezinha de Goiás: implicações na gênese, tectônica regional e no planejamento da lavra. In: CONGR. BRAS. GEOL., 35, Belém, 1988. Anais... Belém, SBG, v.1, p.413-420.
- ELLIS, M. 1963a. The solubility of calcite in water. *Am Jour.* 5d.257:354-365.
- ELLIS, M. 1963b. The solubility of calcite in water and in sodium chloride solutions. *Am. Jour. sci.* 261:259-267.
- GUSMAO COSTA, S.A. 1986. Correlação da seqüência encaixante das esmeraldas de Santa Terezinha de Goiás com os terrenos do tipo *greenstone belt* de Crixás e tipologia dos depósitos. In: CONGR. BRAS. GEOL., 36, Goiânia, 1986. Anais... Goiânia, SBG. v.2, p.599-609.
- IWASAKI, M. 1963. Metamorphic rocks of the Kotu-bizan área, eastern Sikoku. *Tokio Univ., FaciSci. Jour.*, Sec. 2, 15:1-90.
- KENNEDY, W.C. 1950. The solubility of quartz in water. *Econ. Geol.* 45:629-653.
- KLEMD, R.; MAIDEN, K.J.; OKRUSCH, M. & RICHTER, P. 1989. Geochemistry of the Matchless metamorphosed massive sulfide deposit, South Africa/Namibia - Wall-rock alteration during submarine ore-forming process. *Econ. Geol.* 84:603-617.
- LACERDA FILHO, J.V. & RIBEIRO FILHO, W. 1985. Geologia das mineralizações de esmeralda de Santa Terezinha de Goiás. In: SIMP. GEOL. CENTRO-OESTE, 2, Goiânia, 1985. Anais... Goiânia, SBG. p.185-207.
- MACHADO, E.E. 1981. Novas considerações e integração geológica da região de Pilar-Crixás/Mara Rosa-Porangatu. In: SIMP. GEOL. CENTRO-OESTE, 1, Goiânia, 1981. Anais... Goiânia, SBG. p.300-318.
- RIBEIRO FILHO, W. 1981. Reavaliação da geologia do Pilar-Mara Rosa. In: SIMP. GEOL. CENTRO-OESTE, TT Goiânia, 1981. Anais... Goiânia, SBG. D.281-299.
- SCHWARZ, D. 1987. *Esmeraldas - Inclusões em gemas*. Ouro Preto, UFOP/Imprensa Universitária. 439 p.
- SMITH, J.V. 1962. Genetic aspects of twinning in feldspars. *Norsk. Geohgisk Tidsskrift*, 42:244-263.
- SOUZA, J.O. & LEAO NETO, R. 1984. *Mapeamento geológico do garimpo de esmeraldas de Santa Terezinha de Goiás*. Goiânia, DNPM/CPRM. 65p. (Rei. Fin. Proj. Est. Garimpos Brás.).

MANUSCRITO A641

Recebido em 8 de fevereiro de 1990

Revisão do autor em 3 de julho de 1990

Revisão aceita em 10 de julho de 1990