

## Dobras atectônicas em Crostas Ferruginosas de Pirapora do Bom Jesus-SP e Bacia Terciária de São Paulo

Joel Barbujani Sígolo<sup>1</sup> & Marcelo Altafini<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental - Instituto de Geociências - USP  
Rua do Lago 562, CEP 05508-900, São Paulo, SP

<sup>2</sup>Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica - Instituto de Geociências - USP

Palavras-Chave: Origem, crostas ferruginosas, dobras atectônicas, dados geoquímicos e estruturais.

### RESUMO

São discutidas neste trabalho as hipóteses de gênese tectônica e geoquímica de dobras em crostas ferruginosas na Bacia Terciária de São Paulo situadas na Vila Madalena e em sedimentos correlatos na região de Pirapora do Bom Jesus. Na análise deste problema empregou-se microscopia óptica, micromorfologia de minerais, texturas e estruturas secundárias, análises químicas totais e pontuais em MEV/EDS e análise de minerais pesados. Foram utilizados diagramas de Schimidt-Lambert para análise de parâmetros geométricos, morfológicos e orientações preferenciais das dobras e fraturas, tanto nas crostas como em padrões regionais de rochas encaixantes.

As crostas ferruginosas apresentam organização textural, composição química e mineral semelhantes (basicamente hidróxidos de ferro - domínio da goethita - argilas caoliníticas e quartzo), embora encontrem-se encaixadas em litologias diferentes e contextos geológicos distintos. Os diferentes dados obtidos indicam origem das crostas a partir da cimentação por hidróxidos de ferro oriundos do sedimento encaixante. A diferença reside apenas no empobrecimento em  $Fe_2O_3$  e enriquecimento em  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  e elementos alcalinos no sedimento, inverso do observado nas crostas ferruginosas.

Comprova-se esta origem por diferentes diagramas geoquímicos discriminativos, exibindo evolução a partir do sedimento encaixante em direção as crostas ferruginosas. Tal evolução deve-se a remobilização e concentração de hidróxidos de ferro, devido a deslocamento descendente do nível hidrostático, acompanhado de ascensão do relevo.

Não existem similaridades entre a geometria das dobras nas crostas ferruginosas da região de Pirapora e os padrões de dobras regionais. No entanto, as fraturas observadas devem ter sido originadas por reativação tectônica de sistemas de falhas regionais (Taxaquara, Jundiuvira e Romeiros). Estas fraturas condicionaram o fluxo d'água, permitindo que hidróxidos de ferro precipitassem no interior das mesmas.

Keywords: origin, iron crust, atectonic folds, geochemistry and structural data.

### ABSTRACT

This paper discusses the genesis of folds in iron crust developed in Tertiary sediments of the São Paulo Basin (São Paulo-SP) and sediments in Proterozoic metasediments host rocks of the São Roque Group in Southeastern Brazil.

Both iron crusts made up basically of iron hydroxides and present textural organization, similar chemical and mineralogical composition, although they are located in different rocks and geologic settings. They are constituted basically by iron hydroxides.

Diverse diagram link the evolution of both sedimentary host-rocks and iron crusts composition, to a geochemical origin. These iron crusts were formed by remobilisation and concentration of iron oxides and hydroxides, originated by the descending meteoric water and groundwater level oscillation, related to seasonal climatic variations and uplift relief ascending movements.

No correlation was observed between structural data for iron crust fold and tectonic fold or regional deformation patterns in host-rocks. This indicates that tectonic processes of folding were not directly involved in the origin of this folded iron crust.

In addition, fractures in the Pirapora outcrop formed by neotectonic reactivation of regional lineaments, were the conduits for water flow, allowing iron oxides and hydroxides are to be precipitated. Oxides and hydroxides are precipitated obliquely to the fractures in the dransdown cone formed by the groundwater level down. The group formed by the deposition of this oxides and hydroxides in the dransdown cone show structures like folds delineates the pattern and feature of folded iron crusts observed in this outcrop.

## INTRODUÇÃO

A existência de crostas ferruginosas envolve reorganização de relevo quase sempre promovido por movimentos ascensionais de porção importante da topografia que as contem (Ambrosi & Nahon, 1986; Beauvais & Colin, 1993), gerando modelado geomorfológico específico quando de sua existência (Goudie, 1973). As crostas ferruginosas dobradas descritas neste trabalho reportam-se a duas áreas distintas: uma situada na Bacia Terciária de São Paulo, na Rua Girassol, bairro de Vila Madalena (São Paulo, SP) e outra em Pirapora do Bom Jesus.

A origem destas “dobras” foi por muitos anos explicada sob diferentes hipóteses. Por um lado, uma interpretação sugerindo origem tectônica (proveniente de deformações modernas Quaternárias/Terciárias). Por outro, uma origem geoquímica, associada a remobilização e concentração de hidróxidos de ferro. A primeira referência sobre estas crostas ferruginosas na Bacia de São Paulo foi efetuada por Suguio & Barbour (1969). Posteriormente, Sígolo & Ohnuma (1996) apresentam proposta para sua origem e evolução. Ambos trabalhos, no entanto, não trazem esclarecimento quanto à existência dos dobramentos a elas associados.

Na tentativa de esclarecer a origem destas estruturas, foram aplicados estudos comparativos da constituição química e geoquímica das crostas e das rochas encaixantes e matriz destas crostas, bem como de diferentes materiais encontrados nas fraturas dos afloramentos.

## MÉTODOS

A amostragem dos materiais foi executada em perfis, sendo três no afloramento da rua Girassol e cinco em Pirapora do Bom Jesus. Nas amostras das “dobras” (cros-

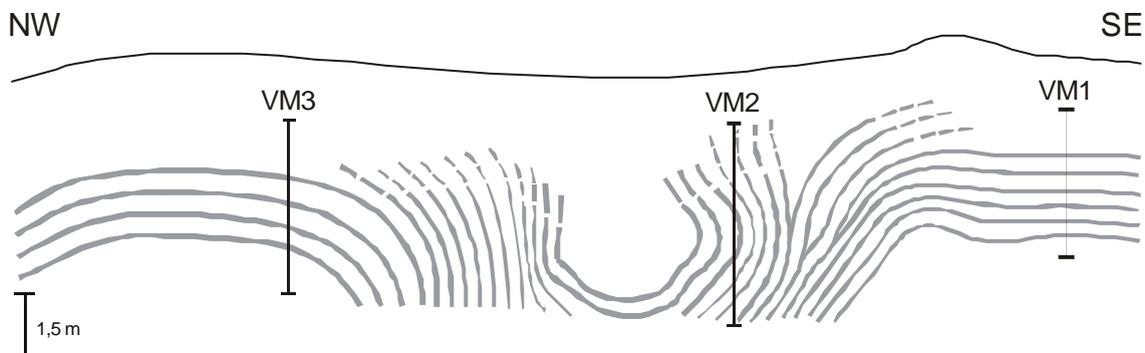
tas), do sedimento encaixante e da matriz (amostras indeformadas e totais), foram realizadas análises micromorfológicas, análises químicas totais, análises químicas pontuais qualitativas e semi-quantitativas em MEV/EDS e análises mineralógicas (DRX e separação de minerais pesados).

Os dados provenientes das análises químicas totais foram tratados em diagramas geoquímicos visando comparar o conteúdo químico dos elementos maiores nos perfis e obter relações de similaridade ou não entre os materiais investigados. Além disso, foram realizadas análises geométricas das dobras nas crostas ferruginosas (direção preferencial de flancos, charneiras, planos axiais das dobras nas crostas ferruginosas), sendo posteriormente comparados com as mesmas feições estruturais disponíveis na literatura sobre as rochas encaixantes (dobras e fraturas).

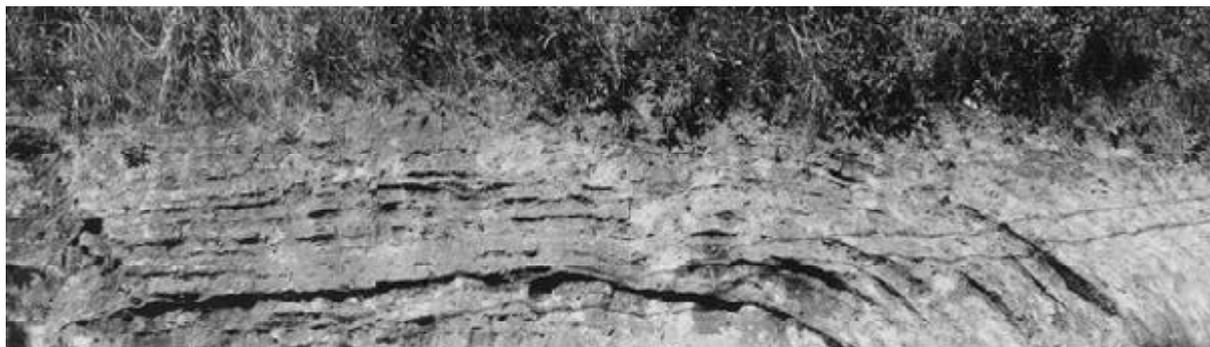
## AFLORAMENTO DA RUA GIRASSOL – VILA MADALENA – SÃO PAULO, SP

O afloramento possui 40m de extensão e 5m de altura. Exibe seqüência rítmica de crostas ferruginosas “dobradas” constituídas por hidróxidos de ferro (goethita) de cor marrom escura (Figura 1 e 2).

O sedimento encaixante constitui-se de material arenargiloso de cor marrom-amarelada, contendo grãos de quartzo de 0,2 a 1,5 cm e feldspatos alterados. Ocorrem também intercalações de níveis quartzosos pouco espessos (0,5 cm). Este afloramento e outros associados à Bacia Terciária de São Paulo foram descritos por Sígolo & Ohnuma (1996), quando foi proposta a evolução e origem das diferentes crostas ferruginosas existentes nesta bacia sedimentar.



**Figura 1:** Croqui esquemático do afloramento da Vila Madalena, exibindo a localização dos perfis de amostragem (VM).



**Figura 2:** Fotografia correspondente a porção esquerda do afloramento esquematizado na Figura 1.

## AFLORAMENTO DE PIRAPORA DO BOM JESUS, SP - KM 53 DA ESTRADA DOS ROMEIROS

Neste local, as crostas ferruginosas “dobradas” constituem-se predominantemente por goethita. São encaixadas em sedimento argiloso avermelhado, com clastos de quartzo leitoso e filitos do Grupo São Roque (Formação Pirapora do Bom Jesus).

Exibe 140m de extensão e 20m de altura e divide-se em porção com (120m de extensão) e porção sem dobras (20m de extensão) (Figura 3). A espessura das crostas dobradas varia de 1 a 10 centímetros e são visíveis a partir da base do perfil. Alcançam até 15m de altura e são capeadas por couraça ferruginosa indeformada com 20 cm de espessura por toda a extensão do afloramento.

Quatro grupos de fraturas e falhas foram diagnosticados (G1, G2, G3 e G4) (Figuras 3, 4 e 5). O grupo G1, constitui-se de fraturas individualizadas, sem preenchimento e o grupo G2, de fraturas preenchidas por

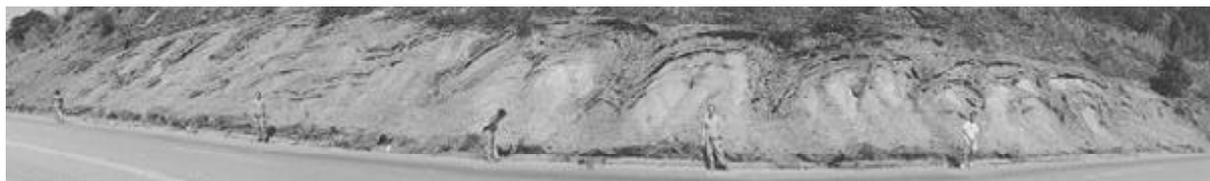
hidróxidos de ferro, com até 10 cm de espessura. Estes dois grupos limitam as dobras (F2, F3, F4, F5, F8 e F9 - Figura 4). O grupo G3 representa um conjunto de fraturas pouco espessas (2 a 5 cm), preenchidas por hidróxidos de ferro. Estas fraturas ora condicionam o fechamento das “dobras”, ora cortam as mesmas (CF - Figura 4 e 5). O grupo G4 constitui-se de falhas que cortam e deslocam as crostas deformadas (F7, F10 e F11 - Figura 4 e 5).

## RESULTADOS

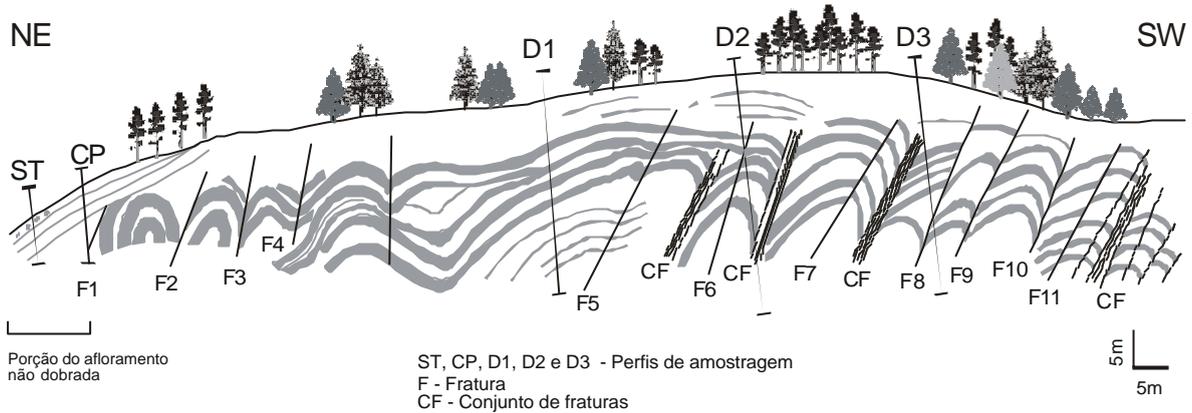
### Afloramento da Rua Girassol, Vila Madalena

#### *Caracterização dos diferentes materiais*

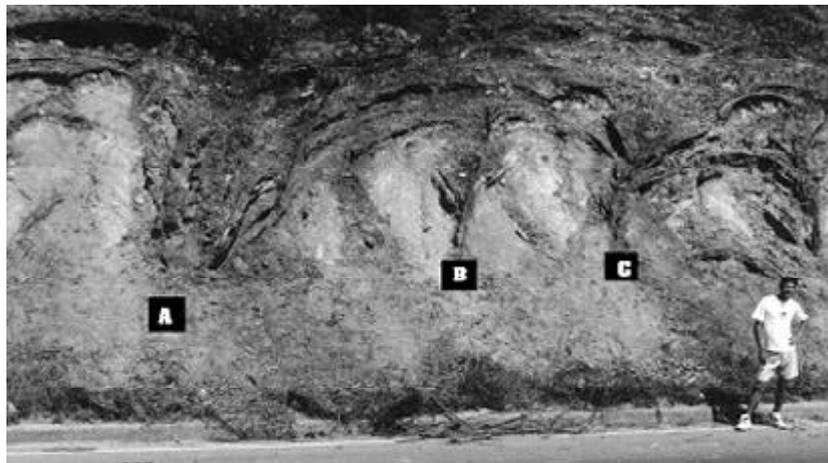
As determinações em DRX e a análise de minerais pesados de amostras das crostas ferruginosas e da matriz confirmaram a existência de quartzo, biotita, argilo-mineral do grupo da caolinita, hematita, goethita e ilmenita.



**Figura 3:** Montagem fotográfica do afloramento da Estrada dos Romeiros, Km 53, Pirapora do Bom Jesus-SP.



**Figura 4:** Croqui esquemático do afloramento de Pirapora, exibindo a localização dos perfis de amostragem e os sistemas de fraturas e falhas.



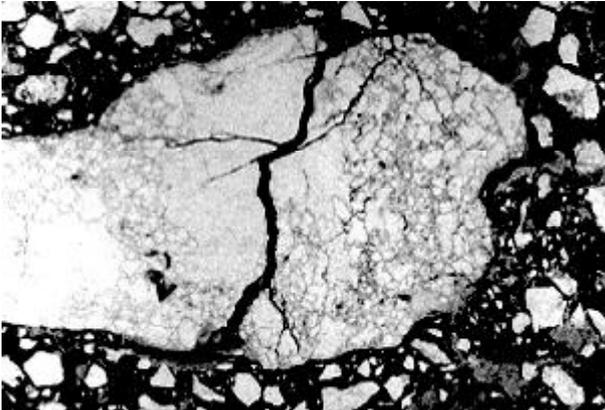
**Figura 5:** Fotografia de parte do afloramento de Pirapora exibindo três conjuntos de fraturas: (A) - Grupo de fraturas do tipo G3, preenchidas por hidróxidos de ferro. (B) - Fraturas individualizadas, preenchidas por hidróxidos de ferro, ora truncando os flancos das "dobras" (G4), ora encaixam as mesmas (G2) (C).

Anatásio, estaurolita e zircão são acessórios.

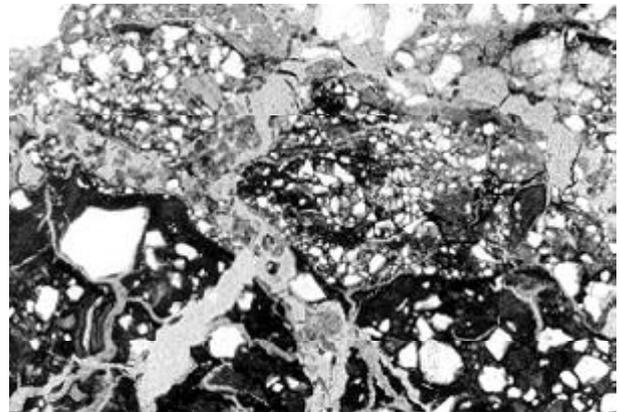
Na microscopia óptica foi possível identificar-se alguns minerais primários representados predominantemente por quartzo e, secundariamente, por turmalina e mica (biotita). Os grãos de quartzo apresentam-se angulosos a subangulosos. Alguns grãos apresentam feições de corrosão ou microfissurados. As fissuras intraminerais encontram-se preenchidas por hidróxido de ferro (goethita) (Figura 6). Estas feições são indicativas da invasão do plasma goethítico sobre plasma caolinítico (matriz). Além disso, apresentam remobilização de hidróxidos de ferro na re-

gião de contato entre o plasma caolinítico da matriz (direita da Figura 6) e o plasma goethítico da crosta (esquerda da Figura 6).

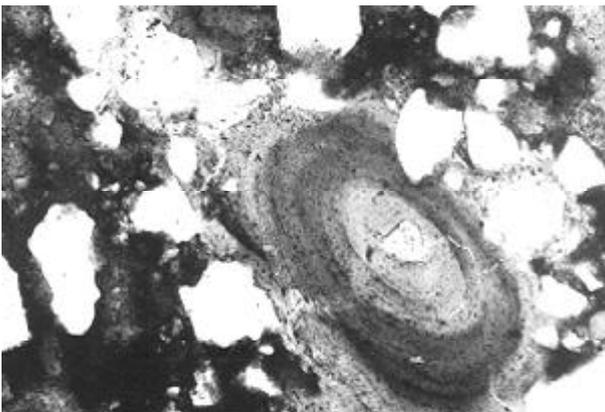
No setor das crostas, os grãos minerais encontram-se envoltos por plasma ferruginoso, fino e compacto, de cor marrom avermelhada. No setor da matriz, o plasma possui cor marrom amarelada (Figura 7 e 8). São observadas fissuras e vazios, preenchidos por argila e hidróxidos de ferro, algumas delas exibindo bandamento concêntrico formado pela segregação de ferro e argila (ferriargilans zonados) Figura 8.



**Figura 6:** Fotomicrografia em luz natural, exibindo fissura preenchida por hidróxidos de ferro invadindo cristal de quartzo parcialmente corroído envolto por plasma goethítico da crosta. Aresta horizontal igual a 5,3 mm.



**Figura 7:** Fotomicrografia em luz natural, exibindo fissura parcialmente preenchida por plasma caolinítico (porção superior da foto). Na porção inferior, plasma goethítico. Aresta horizontal igual a 5,3 mm.



**Figura 8:** Fotomicrografia em luz natural. Cavidade preenchida por material argilo-ferruginoso, formando estrutura concêntrica (ferriargilan zonado). Aresta horizontal igual a 1,39 mm.

### Composição química dos materiais

Dos resultados das análises químicas totais de elementos maiores (Si, Al e Fe, Tabela 1) nos perfis de amostragem observa-se maior concentração de ferro nas crostas (amostras VMC) e de sílica na matriz (amostras VMM). Não há variações na porcentagem de alumínio entre os materiais (matriz *versus* crostas). Este quadro comprova-se nos diagramas destacados por dois agrupamentos distintos: um de amostras da matriz e outro das amostras das crostas (Figuras 9, diagrama  $\text{SiO}_2 \times \text{Al}_2\text{O}_3$  e, 10 diagrama  $\text{SiO}_2 \times \text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Os elementos Ca, K, Na e Mg ocorrem em menores porcentagens nas amostras da matriz. O titânio permanece estável nos perfis, ocorrendo em concentrações equivalentes, tanto nas amostras da matriz como nas amostras das crostas.

### Afloramento de Pirapora do Bom Jesus

#### Caracterização dos diferentes materiais

As determinações em DRX e análise de minerais pesados de amostras das crostas ferruginosas e da matriz e do sedimento sem “dobras”, evidenciam a presença de quartzo (dominante), goethita, caulinita e, secundariamente, biotita, hematita, ilmenita e gibbsita. Rutilo e zircão são acessórios.

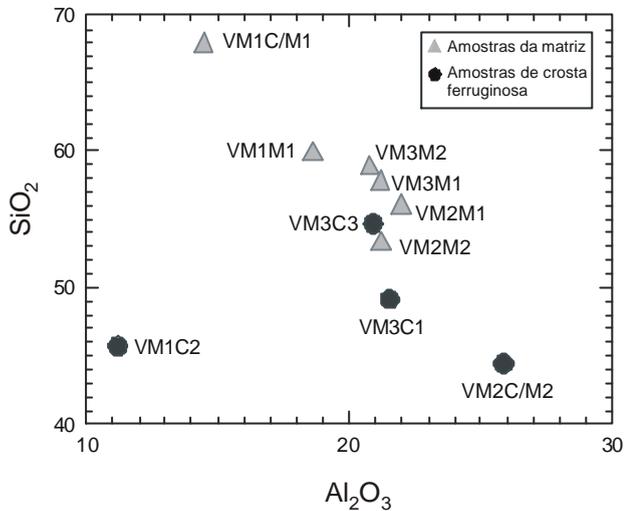
A análise micromorfológica das amostras possibilitou o reconhecimento de dois plasmás distintos: um avermelhado e argilo-ferruginoso, nas crostas; e outro, amarelado e caulínítico, na matriz (Figura 11). Os grãos

**Tabela 1:** Resultados das análises químicas totais das amostras coletadas nos perfis do Afloramento da Rua Girassol -Vila Madalena .

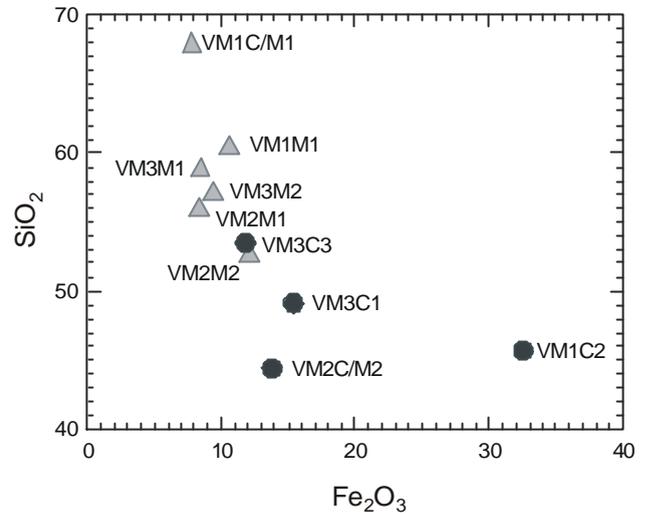
AMOSTRA	VM1M1	VM1C/M1	VM1C2	VM2M1	VM2C/M2	VM2M2	VM3M1	VM3C1	VM3M2	VM3C3
%SiO <sub>2</sub>	60,01	68,03	45,71	57,30	44,44	53,45	57,90	49,15	59,01	53,53
%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,65	14,47	11,20	21,97	25,89	21,21	21,17	21,55	20,79	20,90
%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,67	7,79	32,61	8,35	13,83	12,10	8,74	15,40	8,39	11,85
%MgO	0,17	0,15	0,10	0,18	0,15	0,19	0,19	0,19	0,17	0,16
%CaO	0,05	0,12	0,05	0,05	0,04	0,03	0,05	0,06	0,03	0,05
%Na <sub>2</sub> O	0,09	0,07	0,05	0,09	0,05	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07
%K <sub>2</sub> O	1,38	0,99	0,67	1,35	0,80	1,68	1,49	1,51	1,40	1,20
%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02	0,02	0,02	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04
%MnO	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
%TiO <sub>2</sub>	0,98	0,83	0,69	1,42	1,28	1,19	1,09	1,19	1,57	1,48
%P.F.	7,79	7,33	8,78	9,24	12,81	9,05	8,96	9,75	8,36	9,34
%Total	99,82	99,80	99,88	100,02	99,33	99,05	99,72	98,93	99,86	98,66
%H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0,92	1,01	0,95	1,63	7,41	1,43	1,23	1,08	1,33	1,02
Ba (ppm)	320	235	165	319	197	390	331	337	325	279
Cr (ppm)	57	<15	<15	114	100	83	69	67	61	71
Ni (ppm)	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	17	18	22
Sr (ppm)	47	37	30	66	51	47	48	52	65	61
V (ppm)	120	69	82	370	221	178	122	140	100	161
Zr (ppm)	440	576	423	581	433	396	453	439	574	539

As análises em MEV/EDS de amostras do afloramento da Rua Girassol evidenciam que elas compõem-se de grãos de quartzo de tamanho variado, cimentados por material ferruginoso. A matriz intercalada a estas crostas é composta essencialmente por grãos de quartzo equigranulares, poucos cristais placóides de biotita, exibindo baixa concentração de ferro e alumínio no plasma. As análises químicas qualitativas confirmaram os resultados das análises químicas totais, mostrando que as mais altas concentrações de ferro são encontradas nas crostas.

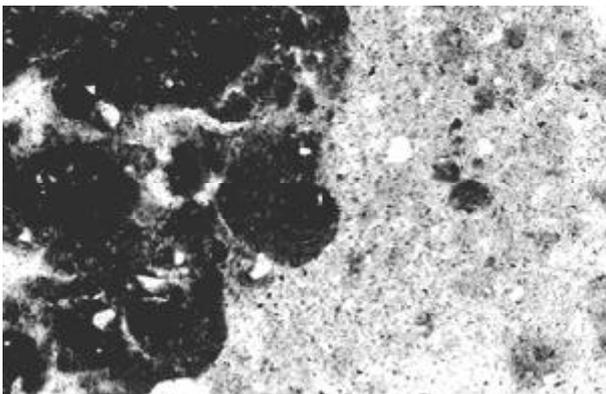
de quartzo apresentam-se semi-angulosos, frequentemente corroídos e microfissurados. São comuns litorelíquias constituídas por fragmentos de filito e quartzito. Hidróxidos de ferro são observados nos materiais analisados na forma de fissuras preenchidas por plasma goethítico e caulínítico de diferentes gerações (Figura 12) associados às feições de preenchimento de cavidades por material argilo-ferruginoso (ferriargilans).



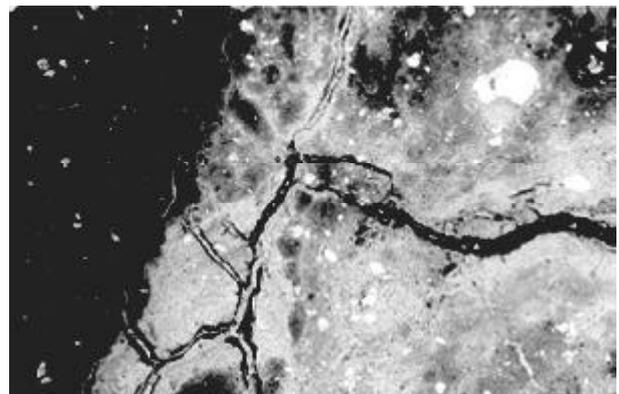
**Figura 9:** Diagrama  $Fe_2O_3$  x  $SiO_2$  (%), exibindo a distribuição dos campos de agrupamento das amostras (crostas e matriz), em função do comportamento geoquímico dos elementos (Vila Madalena).



**Figura 10:** Diagrama  $Fe_2O_3$  x  $Al_2O_3$  (%), exibindo a distribuição dos campos de agrupamento das amostras (crostas e matriz), em função do comportamento geoquímico dos elementos. (Vila Madalena).



**Figura 11:** Fotomicrografia em luz natural. Contato entre plasma da crosta (porção mais escura na parte esquerda da foto) e plasma da matriz (porção mais clara, parte direita da foto). Aresta horizontal igual a 5,3 mm.



**Figura 12:** Fotomicrografia em luz natural. Contato entre plasma da crosta goethítica (porção mais escura) e plasma caolinítico da matriz (porção mais clara). Em associação, diferentes fissuras parcialmente preenchidas por goethita. Aresta horizontal igual a 5,3 mm.

Composição química dos materiais

Os diagramas geoquímicos construídos a partir dos dados da Tabela 2 exibem a formação de três conjuntos distintos: crostas, matriz e rocha sem deformação. Observa-se que a matriz, quando comparada com as crostas, é empobrecida em Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e enriquecida em SiO<sub>2</sub>. O sedimento da porção sem “dobras” exibe composição intermediária. O Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> exibe concentrações constantes nas amostras analisadas (Figuras 13 e 14, Tabela 2).

Verifica-se na Figura 13 que Mg, Ca, Na, e K estão sendo eliminados nas amostras das crostas e exibem relativa concentração na matriz e na rocha sem crostas ferruginosas “dobradas” (Figuras 15, 16, 17, 18 e 19). Os resultados das análises químicas pontuais em MEV/EDS confirmaram que o plasma da matriz é mais enriquecido em silício e alumínio. No plasma da região das crostas predomina o ferro. Microfissuras preenchidas por material com alto teor de ferro indicam remobilização de óxidos e hidróxidos de ferro principalmente na interface crosta e matriz. Análise pontual qualitativa em seqüência, nas regiões que compreendem a matriz e crosta, demonstrou nitidamente o aumento nas concentrações de ferro e alumínio, a medida que se avança para a região do plasma correspondente a crosta (Figuras 15, 16, 17, 18 e 19). A sílica, por sua vez, permanece em concentrações constantes ao longo da seção analisada, exceto na re-

gião de interface crosta/matriz, quando ocorre aumento significativo no teor de silício.

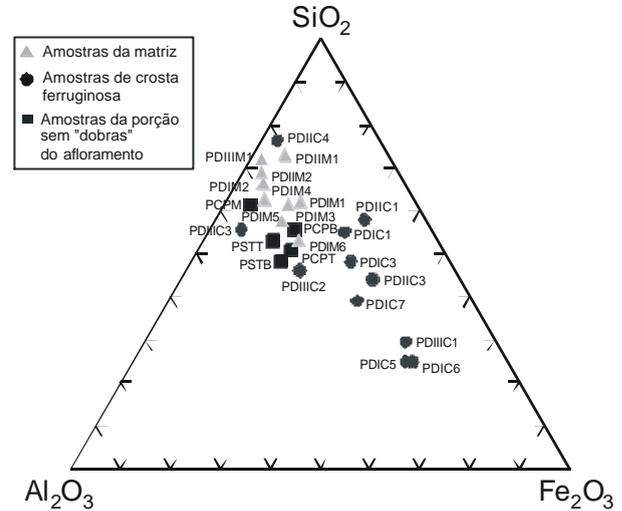
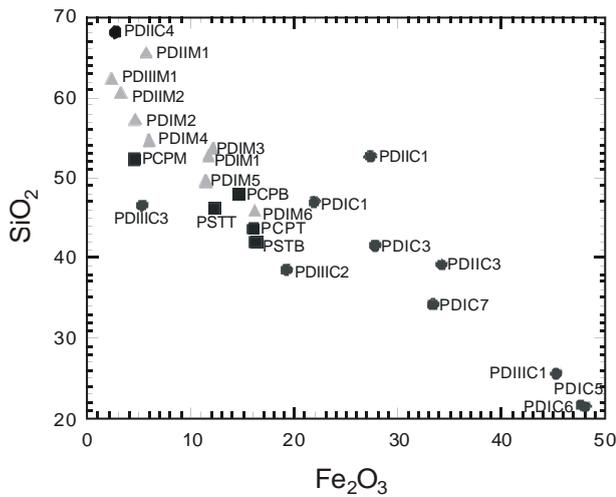


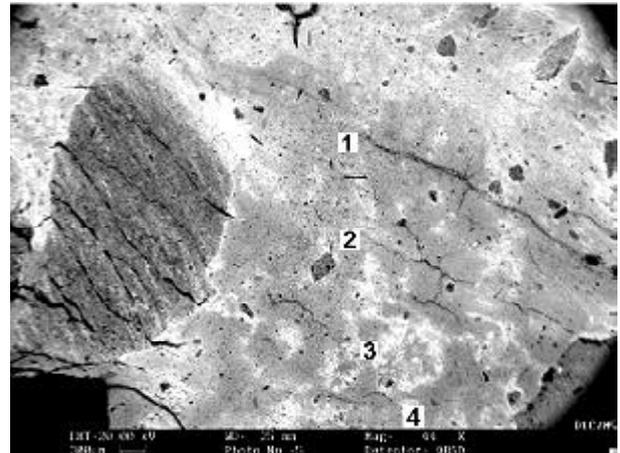
Figura 13: Diagrama triangular Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> x Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> x SiO<sub>2</sub> (%), exibindo a distribuição dos conjuntos de amostras. Nota-se concentrações mais elevadas de Fe nas amostras das crostas e de Si e Al da matriz e da porção sem “dobras” do afloramento de Pirapora.

Tabela 2: Resultados das análises químicas totais para as amostras coletadas nos perfis do Afloramento de Pirapora do Bom Jesus.

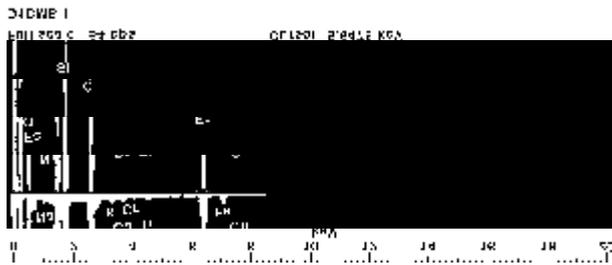
AMOSTRA	%SiO <sub>2</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%MgO	%CaO	%Na <sub>2</sub> O	%K <sub>2</sub> O	%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%MnO	%TiO <sub>2</sub>	%P.F.	%Total	%H <sub>2</sub> O	Ba (ppm)	Cr (ppm)	Ni (ppm)
PSTT	46,23	26,35	12,25	0,38	0,04	0,13	1,42	0,03	0,02	1,71	10,92	99,47	2,38	317	133	51
PSTB	42,65	27,19	16,34	0,24	0,03	0,17	1,41	0,04	0,03	1,75	10,51	100,36	1,85	306	184	54
PCPT	43,64	25,96	16,00	0,21	0,02	0,19	1,37	0,04	0,04	1,66	10,16	99,30	1,94	278	208	72
PCPB	47,94	23,81	14,69	0,20	0,02	0,19	1,35	0,03	0,03	1,64	9,31	99,22	1,89	277	223	77
PCPM	52,26	28,34	4,57	0,25	0,02	0,16	1,39	0,02	0,01	1,55	10,51	99,07	2,03	287	121	87
PD1M1	53,62	21,06	12,14	0,19	0,04	0,14	1,12	0,05	0,01	1,45	9,23	99,05	1,39	239	176	40
PD1C1	46,87	18,72	21,94	0,17	0,03	0,18	1,02	0,08	0,01	1,30	8,55	98,89	1,58	212	126	33
PD1M2	57,36	24,37	4,64	0,21	0,02	0,15	1,29	0,03	0,01	1,61	9,11	98,82	1,99	276	144	43
PD1C3	41,58	17,40	27,75	0,15	0,02	0,12	0,94	0,12	0,01	1,17	9,20	98,47	1,73	199	290	33
PD1M3	53,68	22,72	11,23	0,20	0,02	0,14	1,19	0,03	0,01	1,51	9,24	99,97	2,10	254	147	40
PD1M4	54,08	25,85	6,66	0,21	0,02	0,16	1,28	0,04	0,01	1,62	10,07	99,99	2,02	276	189	49
PD1C5	21,69	17,80	47,69	0,09	0,06	0,04	0,40	0,06	0,01	0,85	9,61	98,31	1,69	105	184	32
PD1M5	49,58	24,69	11,44	0,20	0,03	0,16	1,25	0,03	0,01	1,63	9,89	98,91	1,71	264	162	29
PD1C6	21,47	16,89	48,01	0,08	0,03	0,03	0,46	0,04	0,02	0,98	10,17	98,18	1,66	126	48	25
PD1M6	45,86	24,07	16,59	0,19	0,06	0,16	1,17	0,04	0,01	1,57	10,37	100,08	1,76	239	202	32
PD1C7	34,09	20,39	33,35	0,15	0,03	0,13	0,98	0,03	0,02	1,35	10,08	100,60	1,43	205	154	46
PDIIIM1	65,66	18,64	5,73	0,08	0,01	0,03	0,38	0,03	0,02	1,02	8,97	100,57	1,80	98	39	18
PDIIIC1	52,57	10,95	27,36	0,04	0,01	0,03	0,24	0,03	0,01	0,62	9,01	100,86	1,91	51	90	<15
PDIIIM2	60,52	23,88	3,36	0,11	0,01	0,04	0,60	0,04	0,01	1,15	9,93	99,65	1,71	164	58	21
PDIIIC3	39,14	15,64	34,26	0,07	0,02	0,03	0,42	0,04	0,01	0,86	9,28	99,77	1,61	107	87	25
PDIIIC4	68,26	18,36	2,72	0,08	0,01	0,03	0,38	0,04	0,02	0,96	9,66	100,52	2,08	101	43	18
PDIIIM1	62,29	23,80	2,33	0,19	0,03	0,18	1,34	0,02	0,01	1,60	8,09	99,89	2,00	280	169	51
PDIIIC1	25,66	15,56	45,22	0,09	0,03	0,04	0,24	0,06	0,01	0,78	11,70	99,40	1,71	105	99	36
PDIIIC2	40,67	26,01	19,24	0,15	0,03	0,05	0,76	0,11	0,01	1,37	11,50	99,90	1,77	181	140	33
PDIIIC3	46,51	31,93	5,33	0,17	0,01	0,05	0,93	0,06	0,01	1,82	12,68	99,50	2,18	231	83	38
DTICF	21,63	17,61	48,39	0,09	0,06	0,05	0,40	0,08	0,01	0,85	11,83	100,99	2,02	102	180	18
DTICS	21,62	16,76	50,17	0,09	0,03	0,04	0,41	0,05	0,02	1,00	10,95	101,12	2,85	130	34	36
DTIIM1	69,71	18,49	2,56	0,07	0,01	0,03	0,37	0,03	0,02	0,95	7,64	99,89	1,89	103	17	<15
DTIIC1	53,90	10,93	28,82	0,03	0,02	0,03	0,22	0,03	0,01	0,62	6,80	101,42	0,99	54	85	<15
DTIIM2	65,67	18,61	5,60	0,07	0,01	0,04	0,37	0,03	0,02	1,00	7,74	99,17	1,28	100	15	<15
DTIIC2	39,54	15,50	35,08	0,08	0,02	0,03	0,42	0,05	0,01	0,89	9,31	100,93	2,59	110	74	<15
DTIIM3	60,43	23,55	3,19	0,11	0,02	0,05	0,56	0,06	0,01	1,15	9,49	98,62	1,99	162	37	<15
DTIIC1	25,44	15,28	45,81	0,08	0,04	0,07	0,44	0,07	0,01	0,78	11,91	99,93	2,46	107	90	31
DTIIM1	39,63	25,79	19,32	0,14	0,02	0,05	0,70	0,12	0,01	1,36	12,26	99,40	2,23	176	124	21
DTIIC/M1	46,22	31,89	5,15	0,17	0,02	0,06	0,90	0,08	0,01	1,81	12,57	98,88	2,06	235	61	<15
DTIIC/M2	30,99	22,25	33,73	0,12	0,03	0,06	0,62	0,07	0,01	1,19	12,23	101,29	1,98	155	74	<15



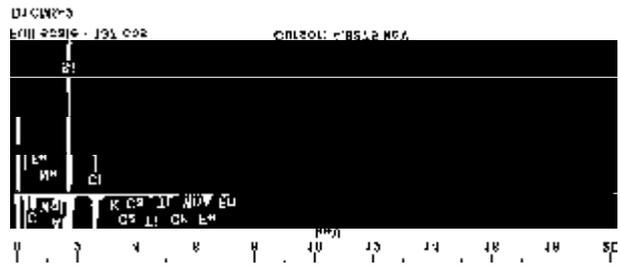
**Figura 14:** Diagrama  $Fe_2O_3$  x  $SiO_2$  (%), exibindo a distribuição dos campos de agrupamento das amostras em função do conteúdo químico dos elementos. Observa-se concentração mais elevada de Fe nas amostras das crostas e de Si, na matriz. As amostras da porção sem “dobras” localizam-se no campo intermediário do diagrama (Pirapora).



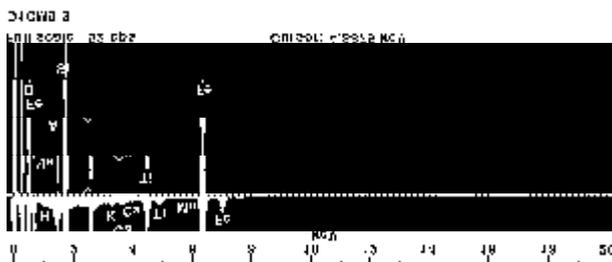
**Figura 15:** Imagem de MEV. Aspecto geral do plasma das crostas (afioramento de Pirapora) exibindo fissuras preenchidas por hidróxido de ferro, à direita, e litoreliquia, à esquerda. Pontos 1, 2, 3, 4 representam análises pontual qualitativa.



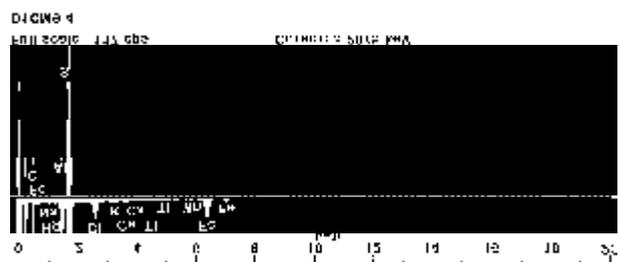
**Figura 16:** Espectro EDS de análise qualitativa do ponto 1 assinalado na Figura 15. Determinação na região compreendida por crosta. Picos de ferro, oxigênio e silício destacados, e picos de titânio, potássio, sódio, cálcio e magnésio, menos expressivos.



**Figura 17:** Espectro EDS de análise qualitativa do ponto 2 assinalado na Figura 15. Determinação na região compreendida por crosta. Picos de ferro, oxigênio e silício destacados, e picos do titânio, potássio, sódio, cálcio e magnésio menos expressivos e adição do alumínio.



**Figura 18:** Espectro EDS de análise qualitativa do ponto 3 assinalado na Figura 15. Determinação na região compreendida por crosta. Picos de ferro, oxigênio, silício e titânio destacados e picos do potássio, sódio, cálcio e magnésio, manganês e alumínio menos expressivos.

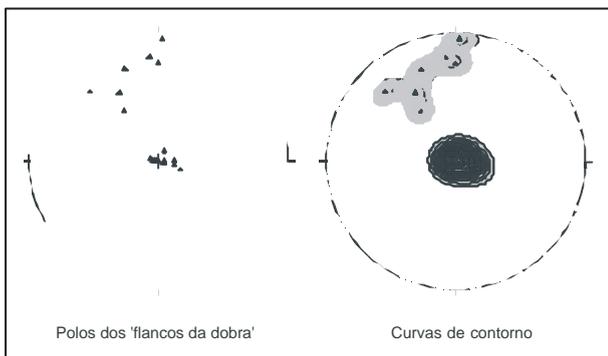


**Figura 19:** Espectro EDS de análise qualitativa do ponto 4 assinalado na Figura 15. Determinação na região compreendida pela crosta. Picos de ferro, oxigênio, silício menos destacados que a Figura 18, e picos do potássio, sódio, cálcio e magnésio pouco individualizados; os picos de manganês e alumínio são quase inexistentes.

## ANÁLISE ESTRUTURAL

### Afloramento da Vila Madalena

Nesta área foram obtidas medidas estruturais das crostas deformadas encontradas no lado esquerdo do afloramento (Figura 20). As dobras identificadas caracterizam um antifórme com flanco direito com mergulho alto para SE e flanco esquerdo mergulhando suavemente para NW.



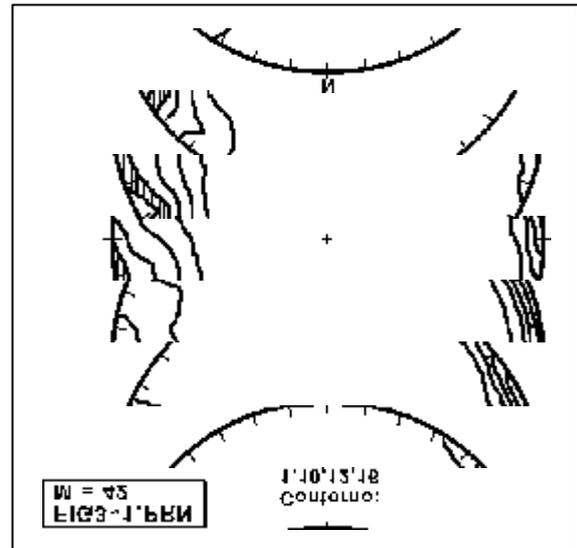
**Figura 20:** Estereogramas Schmidt Lambert construídos com os dados levantados no afloramento da Vila Madalena.

### Afloramento de Pirapora do Bom Jesus

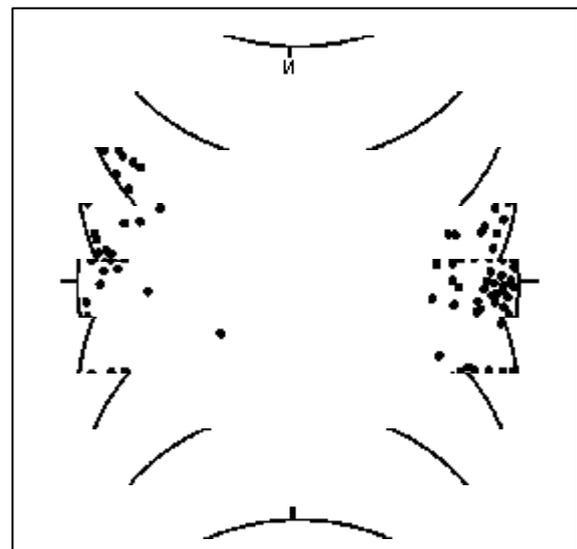
O estereograma construído a partir dos dados de juntas e fraturas recolhidos em campo (Figura 21) apresenta orientação principal NNE-SSW, com mergulhos altos ( $90^{\circ}$  e  $65^{\circ}$ ) e espaçamentos decimétricos. O resultado do estereograma Schmidt Lambert confeccionado a partir dos dados obtidos em campo (Figura 21) coincide com o estereograma para clivagem de crenulação S3 de Bergmann (1988), baseado em levantamentos estruturais realizados em rochas do grupo São Roque (Figura 22). No entanto, não apresenta coincidência com os resultados de Bistrich (1982), também em rochas do grupo São Roque (Figura 23). Isto talvez se explique pelo fato destes dados serem representativos de feições regionais ou por eles serem oriundos de estruturas relacionadas a eventos distintos.

O estereograma representativo dos pólos da superfície “dobrada” exibe distribuição preferencial E-W (Figuras 24 e 25) e apesar da dispersão exibida no diagrama, defi-

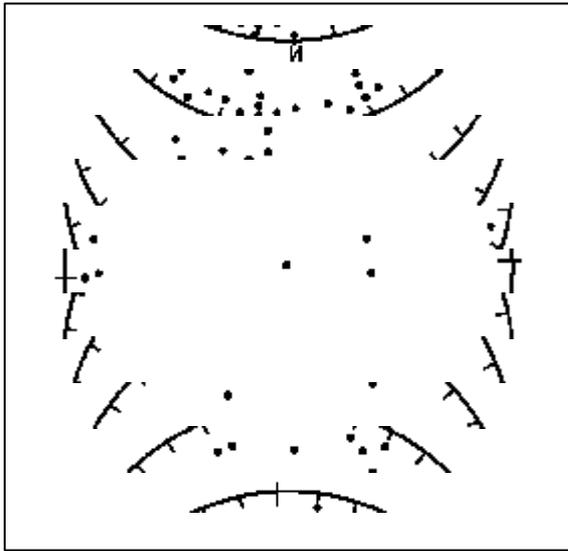
ne uma guirlanda com eixo geométrico construído S13W/4<sup>o</sup>. Tal tipo de dobramento não corresponde a nenhum padrão estrutural apresentado em trabalhos realizados por outros pesquisadores em rochas do Grupo São Roque. Os estereogramas resultantes das projeções dos polos das superfícies “dobradas” também exibem maiores concentrações de pólos no eixo E-W, dispondo-se em círculo mínimo, configurando assim geometria de dobras cônicas (Stauffer, 1964 *apud* Hobbs *et al.*, 1976).



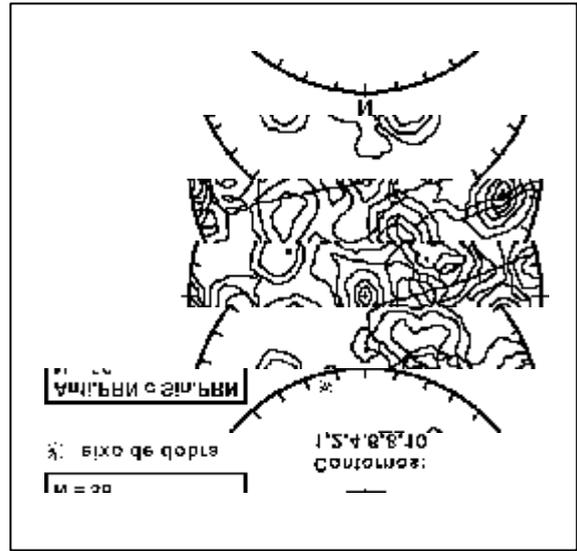
**Figura 21:** Estereograma das fraturas do afloramento de Pirapora.



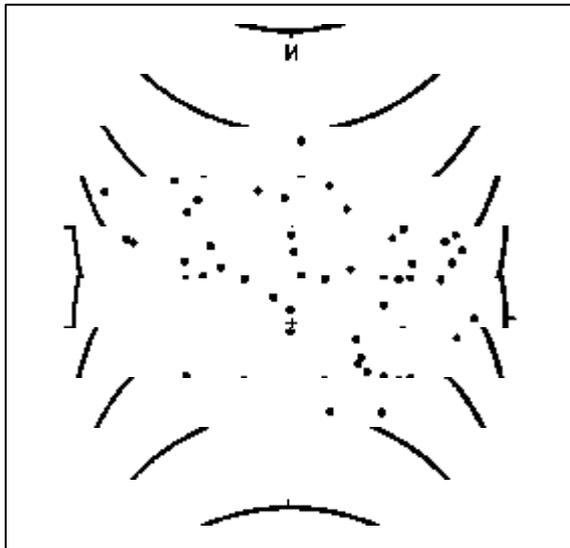
**Figura 22:** Estereograma da clivagem S3 de crenulação de Bergmann (1988).



**Figura 23:** Estereograma da clivagem de crenulação de Bistrich (1982).



**Figura 25:** Curvas de contorno e guirlanda com Eixo construído para os dados da Figura 24.



**Figura 24:** Estereograma de Schmidt-Lambert para os pólos dos flancos de dobras do afloramento.

## DISCUSSÃO

Simplificadamente, a composição mineral das crostas ferruginosas e dos sedimentos encaixantes são semelhantes. As diferenças observadas ficam por conta de grãos de quartzo parcialmente corroídos com evidência de dissolução. Esta feição de corrosão provém da dissolução da sílica promovida pela degradação química dos materiais, responsável também pela concentração de hidróxidos de ferro (ferralitização).

Em seção delgada, grãos, nódulos e litorelíquias estão cimentados por goethita nas crostas ferruginosas e por caolinita nos sedimentos encaixantes. Reconhece-se como volumes principais os produtos secundários formados pela remobilização e concentração de hidróxidos de ferro. Como volumes secundários, hidróxidos de alumínio e argilas, ocorrem como recobrimentos, nódulos e preenchimento de poros e de fissuras.

Os diagramas geoquímicos sugerem origem comum para as crostas ferruginosas a partir dos sedimentos encaixantes. A diferença exibida reflete-se apenas no empobrecimento de  $Fe_2O_3$  e enriquecimento de  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  e elementos alcalinos na matriz, inverso do que foi notado nas crostas. Tal aspecto sugere origem para as crostas a partir da cimentação de óxidos e hidróxidos de ferro remobilizados da própria rocha encaixante durante deslo-

camento descendente do nível hidrostático, razão pela qual a matriz é menos ferruginosa e guarda componentes originais da rocha como elementos alcalinos e alumínio, enquanto as crostas são horizontes intensamente ferruginizados (30 a 50 % de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), na forma de óxidos, hidróxidos e sílica (20 a 50 %).

Havendo crostas ferruginosas, o sedimento encaixante está deferruginizado. Esta feição é observada em campo e comprovada com base nos resultados analíticos obtidos nos materiais coletados nas duas áreas.

As crostas arqueadas, observadas no afloramento da Vila Madalena, originaram-se a partir da migração de hidróxidos de ferro a partir da deposição de sucessivas “frentes de precipitação” destes hidróxidos. Dentre as condições químicas que permitem a solubilidade de ferro incluem a permanência no estágio de valência  $2^+$ . Esta condição somente é obtida em ambiente redutor sob condições de pH ácido. Como está evidenciada a mobilidade do ferro nas áreas estudadas, conclui-se que em determinado momento estas áreas encontraram-se sob estas condições. Fator que pode ter corroborado para esta condição pode ter sido a elevada precipitação pluviométrica, juntamente com a remobilização de ácidos húmicos provenientes da decomposição de matéria orgânica do horizonte superficial do solo. A migração de fluxos d’água descendentes em direção ao nível hidrostático (NH), conduziram ferro e outros elementos solubilizados para porções inferiores do perfil de alteração. Sob condições favoráveis de precipitação, “frentes de oxidação” formaram-se dando origem à zonas de deposição de hidróxidos de ferro. Este processo repete-se a cada novo período de precipitação pluviométrica mais intensa de formação das crostas dobradas. Suguio & Barbour (1969) consideram que as deposições de hidróxidos de ferro possuem forma de arcos ou leques a partir de frentes de deposição. Estas ao encontrarem obstáculos representados pela diferença de permeabilidade dos sedimentos ou pela interceptação de outras “frentes” adjacentes acabam “deformando-as”.

Em Pirapora do bom Jesus, a linha de fragmentos de couraça (*stone line*) observada na porção NE do afloramento (Figura 1), formada pela degradação e desmantelamento físico da couraça ferruginosa superior, representa evidência clara de campo de que houve soerguimento do relevo local.

Em conexão com esta evidência, supõe-se que eventos tectônicos recentes reativaram os sistemas de falhas regionais (Taxaquara, Jundiuvira e Romeiros) produzindo os sistemas de fraturas (G1, G2, G3 e G4), observadas em Pirapora (Figura 26 - Estágio 1). As fraturas dos grupos G1, G2 e G3 teriam direcionado o fluxo d’água para o interior das mesmas, visto que a rocha mãe é pouco per-

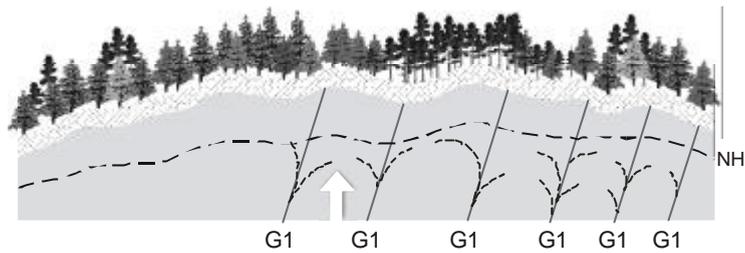
meável e a existência de fraturas proporciona maior permeabilidade, permitindo assim maior percolação de água e passagem de materiais lixiviados pelas mesmas.

Diante da ascensão topográfica, o nível hidrostático (NH) passa a ser rebaixado em relação ao relevo. Períodos de maior umidade (chuvoso) conduzem o NH a porções superiores e, nas secas, a porções inferiores. No entanto, o movimento relativo do NH era sempre descendente. Desta forma, óxidos e hidróxidos de ferro da rocha original foram remobilizados e concentrados em zonas mais profundas do perfil de alteração. Este movimento relativo permitiu que hidróxidos de ferro e, secundariamente, hidróxidos de alumínio e argilas fossem precipitados ao longo das fraturas (F) dos grupos G1 e G2, observadas em Pirapora (Figura 4). Crostas ferruginosas oblíquas às fraturas foram formadas a partir de estrutura tipo “pena” (cone de rebaixamento gerado pela ascensão do relevo (Figura 26 – Estágio inicial). O conjunto formado pela junção dessas estruturas caracteriza a feição de “dobras”, que aparece no afloramento de Pirapora (Figura 26 – Estágios 2 e 3). Posteriormente, crostas ferruginosas “dobradas” antigas foram cortadas por falhas (G4) (Figura 4, F7, F10 e F11 e Figura 26 – Estágio 4), provavelmente relacionadas a último evento de reativação do sistema de falhas acima mencionado.

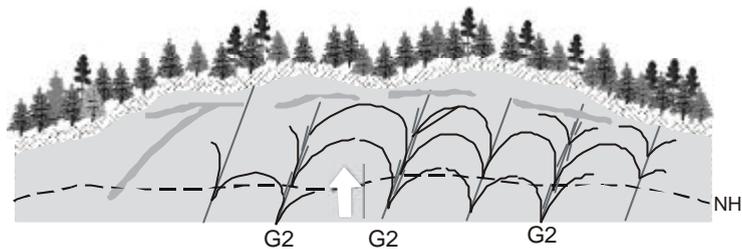
## CONCLUSÕES

As crostas ferruginosas apresentam organização textural, composição química e mineral semelhantes, embora estejam encaixadas em litologias distintas. Isto sugere que as crostas sejam horizontes mais ferruginizados, originados a partir da cimentação por óxidos e hidróxidos de ferro provenientes dos próprios sedimentos encaixantes. Mineralogicamente, as crostas ferruginosas não fogem a regra geral quanto a composição mineral, sendo constituídas por goethita, o hidróxido de ferro mais comum nestes materiais.

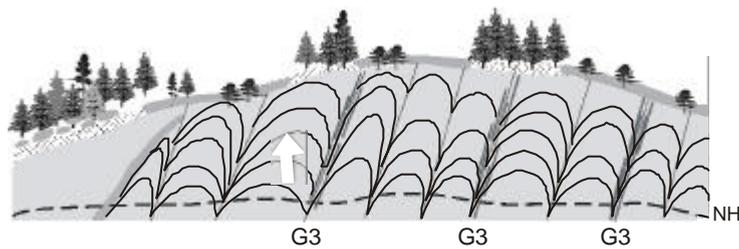
Não foi encontrada qualquer relação geométrica entre “dobras” das crostas ferruginosas de Vila Madalena e as dobras regionais. As dobras encontradas nas crostas ferruginosas de Pirapora do Bom Jesus não exibem relações diretas com os padrões tectônicos de dobras descritas regionalmente (Bistrich, 1982; Bergmann, 1988). Vale ressaltar a importância das fraturas instaladas por provável reativação tectônica (Quaternária) de sistemas de falhas regionais, as quais geraram deformação em depósitos sedimentares na porção centro oriental do Estado de São Paulo (Riccomini, 1995). Estas estruturas teriam propiciado o condicionamento do fluxo d’água para seu interior,



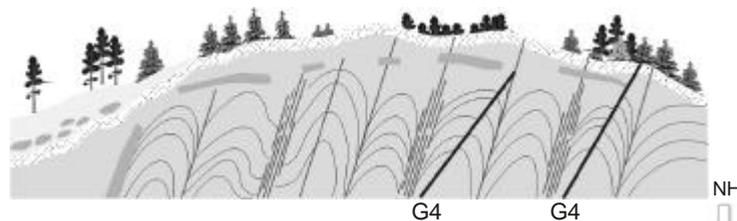
ESTÁGIO INICIAL - Implantação das fraturas do grupo G1, com ascensão do relevo. Primeiro evento neotectônico.



ESTÁGIO 2 - Reativação das fraturas do grupo G1, formando o grupo G2 (fraturas múltiplas). Segundo evento neotectônico. Início de formação das crostas dobradas.



ESTÁGIO 3 - Formação de novas fraturas similares ao grupo G1, gerando o grupo G3 e intensificando as fraturas múltiplas (grupo G3). Terceiro evento neotectônico. Desenvolvimento máximo das crostas de superfície e das crostas dobradas.



ESTÁGIO 4 - Último evento neotectônico com instalação das falhas do grupo G4.

**Figura 26:** Esquema evolutivo das crostas deformadas de Pirapora do Bom Jesus, baseado na proposta de origem geoquímica para estas estruturas. NH compreende o posicionamento do nível hidrostático no decorrer da evolução das crostas.

originando as crostas ferruginosas “dobradas”.

As crostas ferruginosas são de origem genuinamente geoquímica, formadas por processos de remobilização e concentração de óxidos e hidróxidos de ferro e, secundariamente, de hidróxidos de alumínio e diferentes argilo-minerais, em resposta ao deslocamento descendente do nível hidrostático (NH).

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido pela FAPESP no projeto de Auxílio à Pesquisa nº 97/00764-6.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMBROSI, A. ; NAHON, D. (1986) Petrological and geochemical differentiation of lateritic iron crust profiles. **Chemical Geology**, v. 57, p. 371-393.
- BEAUVAIS, A. ; COLIN, F. (1993) Formation and transformation process of iron duricrust systems in tropical humid environment. **Chemical Geology**, v.106, p. 77-101.
- BERGMANN, M. (1988) **Caracterização estratigráfica e estrutural da seqüência vulcano-sedimentar do Grupo São Roque, na região de Pirapora do Bom Jesus**. São Paulo, 155p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- BISTRICH, C. A. (1982) **Geologia do Sinclínório de Pirapora, SP**. São Paulo, 92p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- GOUDIE, A. (1973) **Duricrusts in tropical and subtropical landscapes**. Oxford, Clarendon. 174p.
- HOBBS, B.E. ; MEANS, W.D. ; WILLIAMS, P.F. (1976) **An outline of structural geology**. New York, John Wiley. 571p.
- RICCOMINI, C. (1995) **Tectonismo gerador e deformador dos depósitos pós-gondwanicos da porção centro oriental do Estado de São Paulo e áreas vizinhas**. São Paulo, 100p. Tese (Livre-Docência) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- SÍGOLO, J. B. ; OHNUMA, C. S. (1996) Provável modelo de origem e evolução dos horizontes ferruginosos da Bacia de São Paulo com base na geoquímica de superfície. **Boletim. Instituto de Geociências. Série Científica**, n. 27, p.137-149.
- SUGUIO, K.; BARBOUR, A. P. (1969) Morfologia e gênese das estruturas limoníticas dos sedimentos da Bacia de São Paulo. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 41, n. 2, p.161-180.