

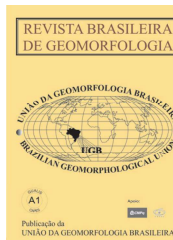


www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 22, nº 1 (2021)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v22i1.1933>



GÊNESE E INSERÇÃO NA PAISAGEM DAS COURAÇAS FERRUGINOSAS (CANGAS) NO MACIÇO DA PEDRA RACHADA, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG

GENESIS AND LANDSCAPE INSERTION OF THE FERRUGINOUS DURICRUST (CANGA) AT PEDRA RACHADA MASSIF, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG

Henrique Amorim Machado

Curso de Agronomia, Universidade do Estado de Minas Gerais

R. Vereador Geraldo Moisés da Silva, s/n, Ituiutaba, Minas Gerais. CEP: 38302-192. Brasil

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6594-6302>

E-mail: henriquegeo@hotmail.com

Fábio Soares de Oliveira

Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais

Av. Antônio Carlos, 662, Belo Horizonte, Minas Gerais. CEP: 31.270-901. Brasil

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1450-7609>

E-mail: fabiosolos@gmail.com

Cristiane Valéria de Oliveira

Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais

Av. Antônio Carlos, 662, Belo Horizonte, Minas Gerais. CEP: 31.270-901. Brasil

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9615-8915>

E-mail: crisval_oliveira@yahoo.com.br

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):

09/05/2020

Aceito (Accepted):

05/10/2020

Palavras-chave:

Fácies de Alteração; Couraças Ferruginosas; Cangas; Condicionamento Geomorfológico; Micromorfologia.

Keywords:

Alteration Facies; Ferruginous Duricrust; Cangas; Geomorphological Conditioning; Soil Micromorphology.

Resumo:

A identificação de fácies de alteração é um instrumento importante para a compreensão da gênese de produtos do intemperismo. Quando associadas ao relevo, podem fornecer relevantes informações sobre a evolução da paisagem. Este estudo objetivou identificar as variações faciológicas no manto de alteração dos itabiritos na área da Pedra Rachada, Quadrilátero Ferrífero, MG, compreendendo a gênese da couraça ferruginosa (canga) e sua inserção na paisagem local. Foram coletadas amostras para a caracterização macro e micromorfológica. Também foram realizados estudos microquímicos e mineralógicos por DRX. Os resultados indicaram a presença das fácies, da base para o topo, a partir do itabirito (F1): fácies placoidal (F2), fácies placoidal fragmentada (F3), fácies placoidal fragmentada desorganizada (F4 e F5), fácies couraça ou canga estruturada (R1 a R4) e fácies couraça ou canga *stricto sensu* (F6). A associação das fácies permite considerar um perfil laterítico composto pelas zonas saprolíticas, canga estruturada e canga não estruturada. A formação do manto de alteração ocorreu com forte influência lito-estrutural, principalmente o mergulho das rochas. Essas estruturas são fossilizadas pela canga estruturada, com a crista da Serra caindo no mesmo sentido. Contudo, a evolução biogeoquímica da canga não estruturada foi capaz de mudar a topografia, tornando a superfície aplainada.

Abstract:

The identification of alteration facies is an important tool for understanding the weathering products genesis. When associated with relief, they can provide relevant information about the landscape evolution. This study aimed to identify the physiological variations along the weathering mantle of itabirites in the Pedra Rachada massif, Quadrilátero Ferrífero, MG, comprising the genesis of the ferruginous duricrusts and its insertion in the local landscape. Samples were collected for macro and micromorphological characterization. Micro-chemical and XRD analysis were also carried out. The results indicated the presence of facies, from the bottom to the top, from the weakly altered itabirite (F1): placoidal (F2), fragmented placoidal (F3), disorganized fragmented placoidal (F4 and F5), structured duricrust or canga (R1 to R4) and non-structured (stricto sensu) duricrust or canga (F6). The association of the facies allows us to consider a lateritic profile composed of the saprolitic, structured and non-structured cangas zones. The weathering mantle formation occurred with a strong litho-structural influence, mainly the dip of the rock layers. These structures are fossilized by the structured canga, with the crest of the Serra falling in the same direction. However, the biogeochemical evolution for the non-structured canga was able to change the topography, making the flattened surface.

1. Introdução

As formações ferríferas do Quadrilátero Ferrífero (QF), porção central do estado de Minas Gerais, estão presentes no Grupo Itabira, uma das unidades geológicas de maior concentração de ferro no mundo. Dentre tais rochas, destacam-se os itabiritos, cujas características químicas e mineralógicas singulares têm exercido forte influência no desenvolvimento da paisagem desta região, desde o final do Proterozóico (DORR II, 1964; BARBOSA; RODRIGUES, 1965; SALGADO, 2006).

Enquanto a petrologia e evolução destas rochas são amplamente discutidas pela literatura científica (WEGGEN; VALETON, 1990; LAGOEIRO, 1998; ROSIÈRE; CHEMALE JUNIOR, 2000; SPIER, *et al.*, 2007), sua alteração sob condições supergênicas carecem de maior refinamento, sobretudo na relação genética existente entre estes materiais e a formação de couraças ferruginosas (RAMANAIDOU, 2009), materiais esses que foram na literatura brasileira conhecidos como cangas (DORR II, 1964).

Couraças ferruginosas são produtos de um longo processo de intemperismo, resultando em um material endurecido, com teores médios de Fe_2O_3 em torno de 40-60 %, podendo atingir dezenas de metros de espessura, sendo comumente encontradas em ambientes tropicais (NAHON, 1986; TARDY, 1997). Os itabiritos, por sua natureza primariamente ferruginosa, são rochas com grande potencial para a formação de couraças (SAMAMA, 1986).

Duas hipóteses principais explicam a alteração dos itabiritos no QF e consequente formação de couraças ferruginosas. A primeira destaca o trabalho precursor do nível freático em reduzir e mobilizar o ferro dentro do saprolito e concentrá-lo conforme a influência da configuração geomorfológica da área (DORR, 1964;

BARBOSA; RODRIGUES, 1965). A segunda descreve uma alteração dos itabiritos impulsionada pela litoestrutura, onde o acentuado mergulho das camadas facilita a entrada de água e o avanço da saprolitização, mesmo em grandes profundidades, promovendo uma dissolução congruente, lixiviando a sílica ou os carbonatos e gerando, como produto final, um material fortemente estável às condições superficiais (VARAJÃO *et al.*, 1996; MONTEIRO *et al.*, 2014). Ainda que distintas, essas hipóteses não são concorrentes e couraças associadas a ambos os processos podem ser identificadas no QF.

Mantos de alteração contendo couraças ferruginosas foram investigados em diversas áreas do QF (DORR II, 1964; BARBOSA; RODRIGUES, 1965; SPIER *et al.*, 2007; MONTEIRO *et al.*, 2014; BARROS, 2015). Na maioria deles, os estudos foram realizados considerando furos de sondagem e exposições de cavas de mineração. Em algumas áreas, entretanto, a própria evolução geomorfológica expõe o manto de alteração, revelando as distintas morfologias. Dentre esses ambientes, estão as frentes de retração de escarpas, ao longo dos alinhamentos de serras e hog-backs. Barbosa e Rodrigues (1965) citam, por exemplo, que as vertentes sul da Serra do Curral mostram uma superfície estrutural constituída pelo andar ferrífero do Supergrupo Minas com o um revestimento encouraçado. A couraça ferruginosa está presente no topo e reverso dessas áreas, com grau de conservação muito variado devido à intensidade da dissecação da drenagem regional e da maneira como ocorreu o encouraçamento. É fato que as couraças mais coesas, no topo, sustentam os relevos mais altos. Entretanto, uma vez degradadas e erodidas, a erosão encontra caminho para a exposição dos níveis subjacentes, que, por vezes, se fragmentam em matacões que são transportados para cotas altimétricas inferiores.

Neste contexto se insere a Pedra Rachada, um maciço localizado na porção leste do conjunto da Serra do Curral, próximo a um setor conhecido como Serra da Piedade, área de grande relevância por seus valores geológicos, geográficos, históricos e culturais (RUCHKYS *et al.*, 2009). O relevo da área é marcado por um forte controle estrutural, e mesmo não sendo conhecidos estudos específicos de geologia estrutural na Pedra Rachada, é provável que a área esteja inserida no contexto da estrutura definida por Alves (1961) como tendo a geometria de um sinclinal (Sinclinal Piedade). Ainda que seja uma área conhecida para a prática esportiva da escalagem, o manto de alteração exposto, incluindo as couraças no topo, não haviam sido objeto de investigação, até o momento.

O objetivo deste estudo foi identificar as variações faciológicas ao longo do manto de alteração dos itabiritos na área da Pedra Rachada, compreendendo a gênese

da couraça ferruginosa e sua inserção na paisagem local. Além de contribuir para expandir o conhecimento sobre a gênese e evolução destes materiais, este estudo permite relacionar o manto de alteração estudado às outras áreas do QF, compondo um quadro regional dos atributos morfológicos das couraças ferruginosas.

2. Materiais E Métodos

2.1 Área de Estudo

A Pedra Rachada está localizada na extremidade oriental da borda norte do QF, no conjunto da Serra do Curral, a aproximadamente dez quilômetros da Serra da Piedade (Figura 1). Situa-se entre os municípios de Sabará e Santa Luzia, com acesso pelo centro histórico de Sabará ou pela BR-381, cuja entrada situa-se a 2 km antes do distrito de Ravena, ambas com trecho final em estrada vicinal.

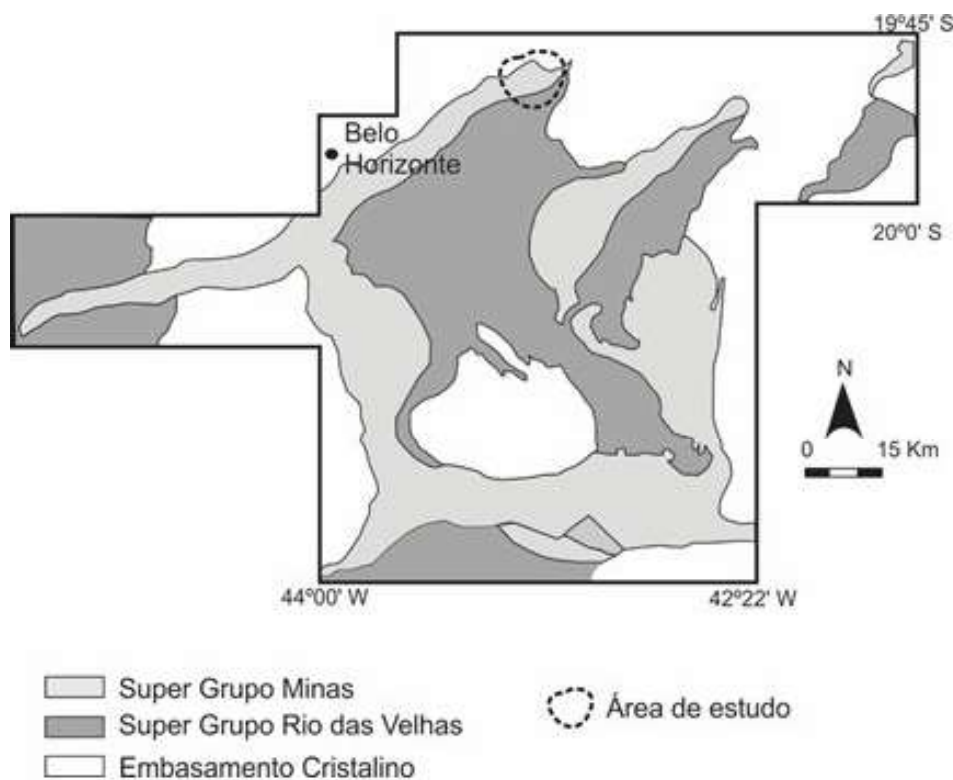


Figura 1 - Localização da área de estudo – Pedra Rachada – no Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais. Fonte: adaptado de BALTAZAR - *et al.*, 2005.

A litologia da área de estudo é constituída basicamente pelos itabiritos da Formação Cauê, Grupo Itabira (Figura 2), ocorrendo entre as cotas altimétricas 1250 e 1355 m, constituindo a crista que delimita o topo da paisagem, área selecionada para este estudo. Abaixo da cota de 1250 m, ocorrem rochas do Grupo Nova Lima

a sul e Piracicaba / Sabará a norte (SCLIAR,1992), que possuem um padrão de relevo colinoso. O piso regional da paisagem está nas rochas dos Complexos Belo Horizonte e Caeté, representando um desnível de aproximadamente 450 m com o topo da Pedra Rachada. É justamente neste topo que as couraças são observadas.

Scliar (1992), estudando uma área próxima, destacou que essas podem atingir espessuras de até 15m na região.

A vegetação na Pedra Rachada é caracterizada por grande contraste existente entre a área de ocorrência dos itabiritos e das demais rochas. Duas unidades podem ser reconhecidas: (i) campos rupestres ferruginosos herbáceos, com pouca participação do estrato arbustivo nas áreas de afloramentos rochosos, e manchas de vegetação de maior porte em bolsões de solos espacialmente restritos, compondo típicos mosaicos de campos rupestres ferruginosos (JACOBI; CARMO, 2012) e, (ii) Floresta Estacional Semidecidual intercalada com Cerrado, nas rochas do Grupo Nova Lima e embasamento, que caracterizam a área como uma zona ecotonal.

Para a identificação das variações faciológicas do manto de alteração associado ao itabirito, foi delimita-

do um transecto que perpassa a vertente NE da Serra, onde ocorre uma bacia hidrográfica de ordem zero, e a crista, que possui um caimento sentido SW aparentemente controlado pelo mergulho da rocha (Figura 2). Inicialmente essas variações foram descritas nos afloramentos disponíveis. A partir disso, foram coletadas amostras de mão representativas, novamente descritas (cores, constituintes, arranjos entre constituintes) em laboratório com o auxílio de lupa monocular (10x). No total, foram coletadas 6 amostras na vertente NE (F1 a F6) e quatro na crista (R1 a R4). A partir das variações macromorfológicas identificadas (afloramento em campo e amostras de mão) e dos seus atributos analíticos, conforme parâmetros descritos a seguir, foram sistematizadas as fácies de alteração seguindo proposta de Meunier e Velde (1979).

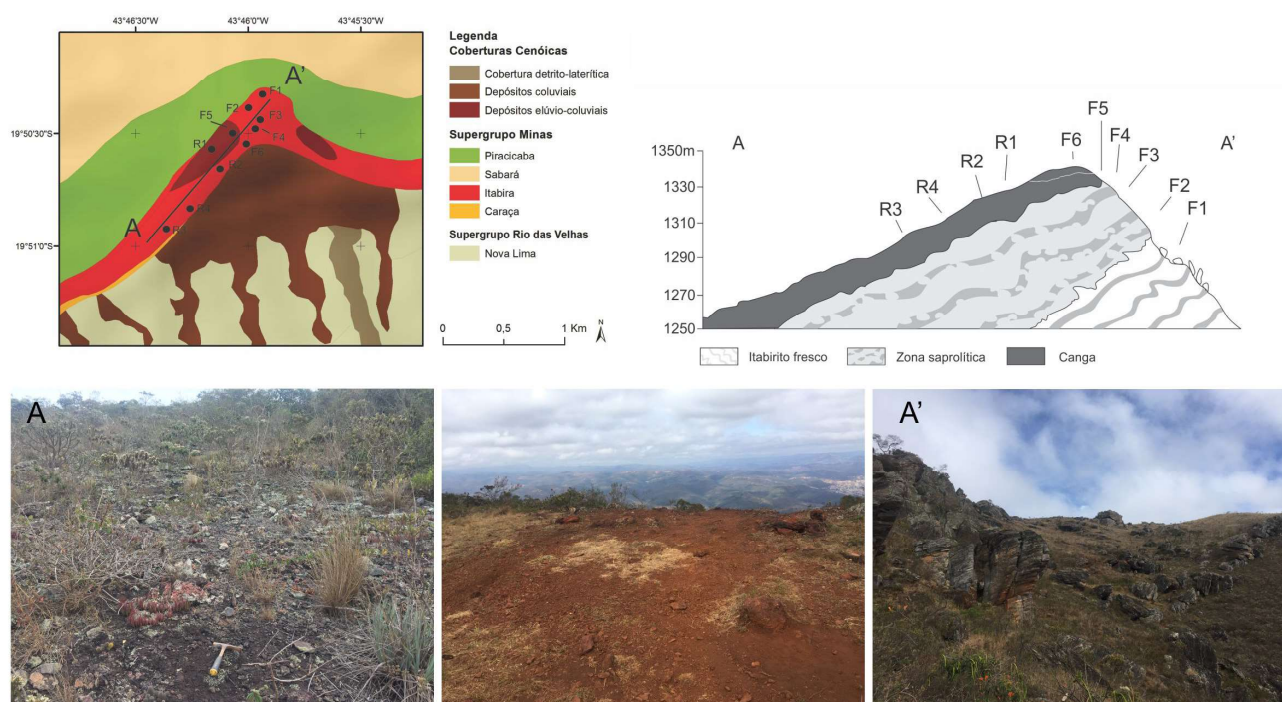


Figura 2 – Grupos litológicos, perfil topográfico e localização das amostras na área de estudo. Couraça ferruginosa recoberta por campos rupestres ferruginosos no reverso (A), topo da Pedra Rachada (T), blocos e afloramentos de itabiritos no front (A')

2.2 Análises micromorfológicas, mineralógicas e microquímicas

A partir das amostras de mão foram realizadas caracterizações micromorfológicas, mineralógicas e microquímicas. Para a caracterização micromorfológica, foram confeccionadas lâminas delgadas e polidas nas dimensões de 1,8 x 30 x 40 mm no departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto. A

caracterização foi realizada em microscópio trinocular da marca Zeiss, modelo Axiophot, luz transmitida e refletida, com câmera fotográfica acoplada realizadas no LABTEC Rochas - CPMTCC-UFMG. Foi utilizada a terminologia de Stoops (2003) para a caracterização das microestruturas e termos específicos do estudo de sistemas de alteração propostos em Nahon (1991) e Delvigne (1998).

A caracterização mineralógica foi realizada por difratometria de raios-x (DRX). Foram selecionadas distintas feições (núcleo interno de rochas menos alteradas, córtex de alteração, cimento, etc), separados fisicamente com uma broca metálica, posteriormente moídos em almofariz de ágata. Foi realizada análise das amostras não orientadas num Difratorômetro X'Pert Panalytical com radiação de $\text{CuK}\alpha$, no intervalo de 2 a $70^\circ 2\theta$. Os difratogramas foram interpretados no Software X'Pert High Score Plus e através de padrões da literatura (BRINDLEY; BROWN, 1980).

A caracterização microquímica foi realizada em seções previamente descritas em microscópio petrográfico. Foi utilizada a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com sensores EDS (*energy dispersive X-ray detector*) e a Microsonda Eletrônica. Para as análises com o sensor EDS, seções finas metalizadas com carbono foram observadas em MEV da marca FEI, modelo QUANTA 3D, do Centro de Microscopia da UFMG, e para a Microsonda Eletrônica, com sensor WDS, foi utilizado um equipamento da marca

JEOL, modelo JXA8230 – Superprobe, do Laboratório de Microanálises do Departamento de Geologia da UFOP. As leituras foram feitas com aceleração de 15 Kv e corrente de 20 nA. Com o EDS foram produzidos mapas microquímicos, e com o WDS análises pontuais. Foram utilizados os padrões da coleção Ian Steele e considerados os elementos Fe, Al, Si, C e O. Os teores foram reportados em óxidos (% em peso).

3. Resultados

3.1 Fácies de alteração

Foram reconhecidas na Pedra Rachada diferentes fácies de alteração que associam as couraças ferruginosas ao itabirito (Figura 3). Além do itabirito (F1), ocorrem fácies agrupadas na zona saprolítica que representam estágios de alteração da rocha. São elas: fácies placoidal (F2); fácies placoidal fragmentada (F3); fácies placoidal fragmentada desorganizada (F4 e F5). No topo ocorre a couraça ou canga estruturada (R1 a R4), bem como a couraça ou canga *stricto sensu* (F6).

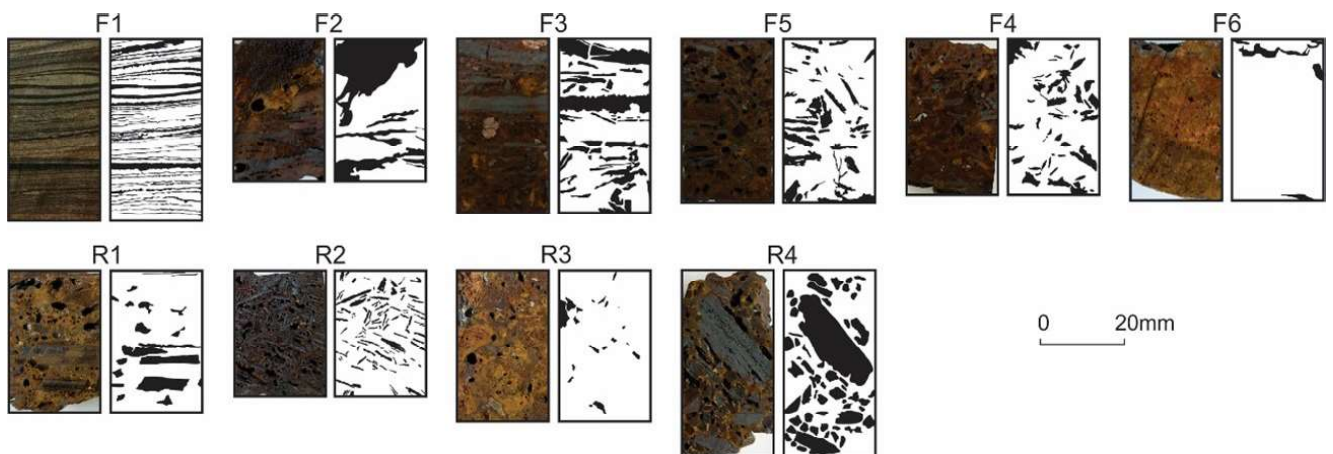


Figura 3 –Variações macromorfológicas observadas na Pedra Rachada, QF. A cor preta nas imagens binarias indicam a presença de placas ferruginosas.

3.1.1 Itabirito (F1)

Trata-se de uma rocha macro e microscopicamente bandada, com alternância de bandas claras e escuras (Figura 3 e Figura 4). As bandas escuras são compostas por minerais opacos, que são óxidos de ferro diversos, com predomínio de hematita e martita, e as bandas claras são compostas por quartzo, principalmente. Essa organização e composição os enquadra como quartzo-itabiritos, consideradas as rochas ferruginosas mais comuns do QF (DORR II, 1964).

No interior das bandas claras existem óxidos de ferro intercalados com os grãos de quartzo, e vice-versa, demonstrando que a definição de banda se dá pelo predomínio de um determinado mineral, e não por sua presença exclusiva. As bandas escuras possuem 95 % de minerais opacos (óxidos) e 5 % de quartzo. Nas bandas claras, ocorre 85 % de quartzo e 15 % de óxidos. A espessura das bandas escuras pode variar de milímetros (2 mm) a centímetros (10 cm), o mesmo ocorrendo nas bandas claras, de 50 mm a 6 cm. Por vezes, as bandas se encontram horizontais, indicando

laminação, porém é muito comum a presença de dobras e micro-falamentos, representativos, conforme Rosière e Chemale Jr (2000), de rochas anquimetamórficas como produto de diagênese e compactação diferencial. Algumas das bandas formam sigmoides incipientes, indicadores de cisalhamento.

A textura da rocha é granoblástica. O quartzo é ané-

drico, apresentando contatos retos a ondulados e junção triplíce. Essas superfícies de contato são bem fechadas entre si. Contudo, nas bandas claras é possível observar a dispersão de ferro, marcada por um material de cor vermelho-amarelada. Esse material sugere a alteração dos próprios óxidos de ferro, e sinaliza a circulação de fluidos de alteração intempérica no interior dessas bandas.

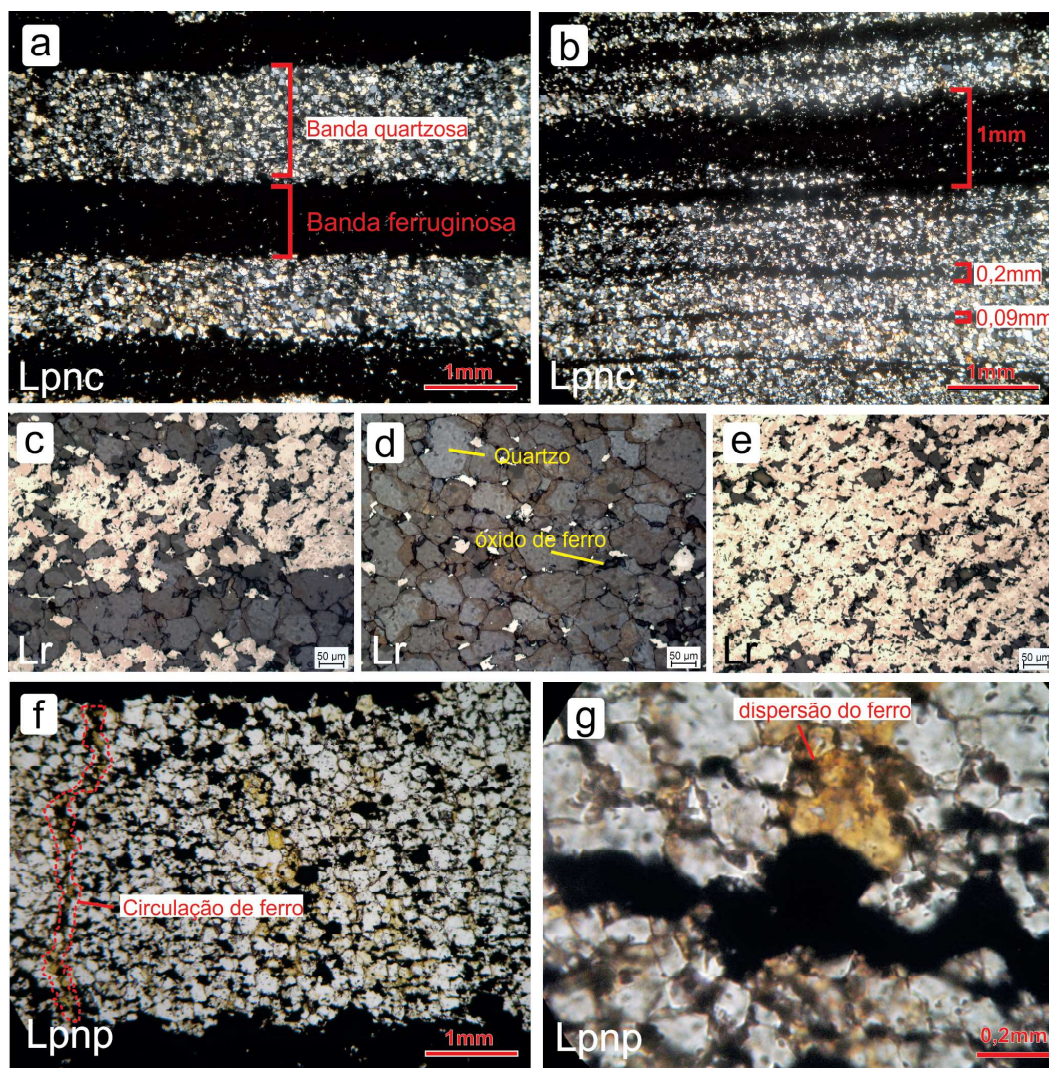


Figura 4 – Fotomicrografias em luz polarizada com nicois cruzados (Lpnc) e luz refletida (Lr) da amostra F1 – itabirito fresco – Pedra Rachada, QF, MG.

3.1.2 Fácies itabirito alterado (F2, F3, F4 e F5)

A fácies F2 ocorre em contato com o itabirito. Trata-se de material caracterizado por placas ferruginosas (Figuras 3 e 5), de coloração escura (preto a preto-avermelhado), brilho metálico, espessura milimétrica a centimétrica, compostas por minerais opacos, representados por hematita e martita e, aparentemente, specularita, com pouco quartzo. Estes últimos encon-

tram-se bastante fraturados, com aspecto ruiforme e fraturas preenchidas por óxidos de ferro. A porosidade é predominantemente cavitária, sendo que no interior de alguns poros é possível observar diminutos grãos de quartzo, sugerindo que a origem do poro pode ter relação com a sua dissolução. No interior das placas, os poros estão desconectados, isolados em cavidades de tamanho milimétrico. Entre elas, os poros são maiores,

e parecem resultar da coalescência das cavidades. Essa coalescência ocorre paralela às placas, isolando-as umas das outras. A amostra F2 corresponde a um material com muita semelhança com F1, com textura granoblástica, quartzo anédrico e feições que sugerem a alteração dos óxidos de ferro primários da rocha.

No interior das placas e mesmo entre elas é possível observar um material fino de coloração vermelho-amarelada, cujo comportamento óptico em luz transmitida e refletida indica a presença da goethita. Esse material parece estar ligado à alteração das placas ferruginosas, evoluindo conjuntamente com o aumento da porosidade. Muitas vezes, este material é observado ligando algumas placas, ocupando o fundo matricial na forma de um cimento.

Os aspectos morfológicos apresentados em F2 sugerem a alteromorfização do bandamento original dos

itabiritos. As placas de ferro identificadas correspondem às bandas ferruginosas compostas por minerais opacos, ao passo que as zonas mais porosas entre elas sugerem a alteração isovolumétrica das bandas claras compostas por quartzo. O pouco conteúdo de quartzo indica que sua alteração foi intensa, considerando que a presença de bandas claras no itabirito era comum. Materiais semelhantes foram descritos no QF sob a alcunha de “chapinha” (DORR, 1964; ROSIÈRE; CHEMALE JR, 2000), nos quais os autores consideraram que a preservação parcial das bandas ocorre após a lixiviação e remoção mecânica dos minerais de ganga, principalmente do quartzo. Rosière *et al.* (2008) descreveram esse processo também em meio hipogênico, associado à percolação de fluidos hidrotermais que removem os minerais de ganga (quartzo ou carbonatos) e produzem acumulações de óxidos de ferro compactas.

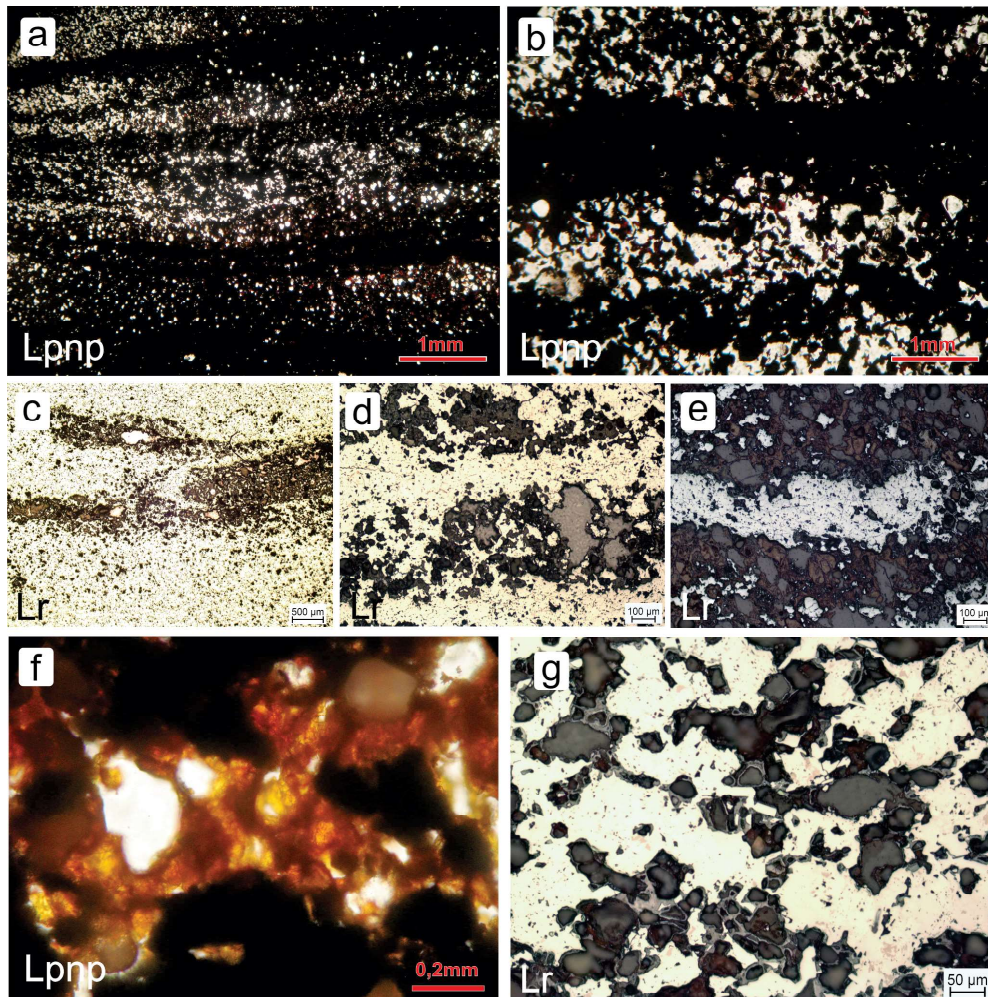


Figura 5 – Fotomicrografias em luz polarizada com nicóis paralelos (Lpnp) e luz refletida (Lr) da amostra F2 – fácies placoidal – Pedra Rachada, QF, MG.

A amostra F3 ocorre em posição topográfica superior a F2, com certa semelhança de materiais, caracterizados pelas mesmas placas ferruginosas de cor escura. Contudo, em algumas porções as placas estão mais fragmentadas, desajustadas umas em relação às outras (Figura 6), sugerindo sua fragmentação mecânica e rearranjo interno. A composição das placas é a mesma, e o cimento de coloração vermelho-amarelada ocorre de duas maneiras: no interior das placas associado à expansão dos poros e entre elas.

Tal como em F2, é possível associar a formação

deste cimento à alteração dos óxidos de ferro primários da rocha, já que ambos ocorrem em contatos descontínuos, com fragmentos residuais da placa imersos no material vermelho-amarelado. Algumas porções das seções delgadas revelam, sob luz refletida, a presença de feições nodulares com fragmentos da placa ferruginosa, de composição hematítica, envolvido por um córtex goethítico. Esse arranjo tem sido comumente observado em materiais ferruginosos submetidos às condições redox suficientes para a transformação dos óxidos em hidróxidos de ferro (NAHON, 1991).

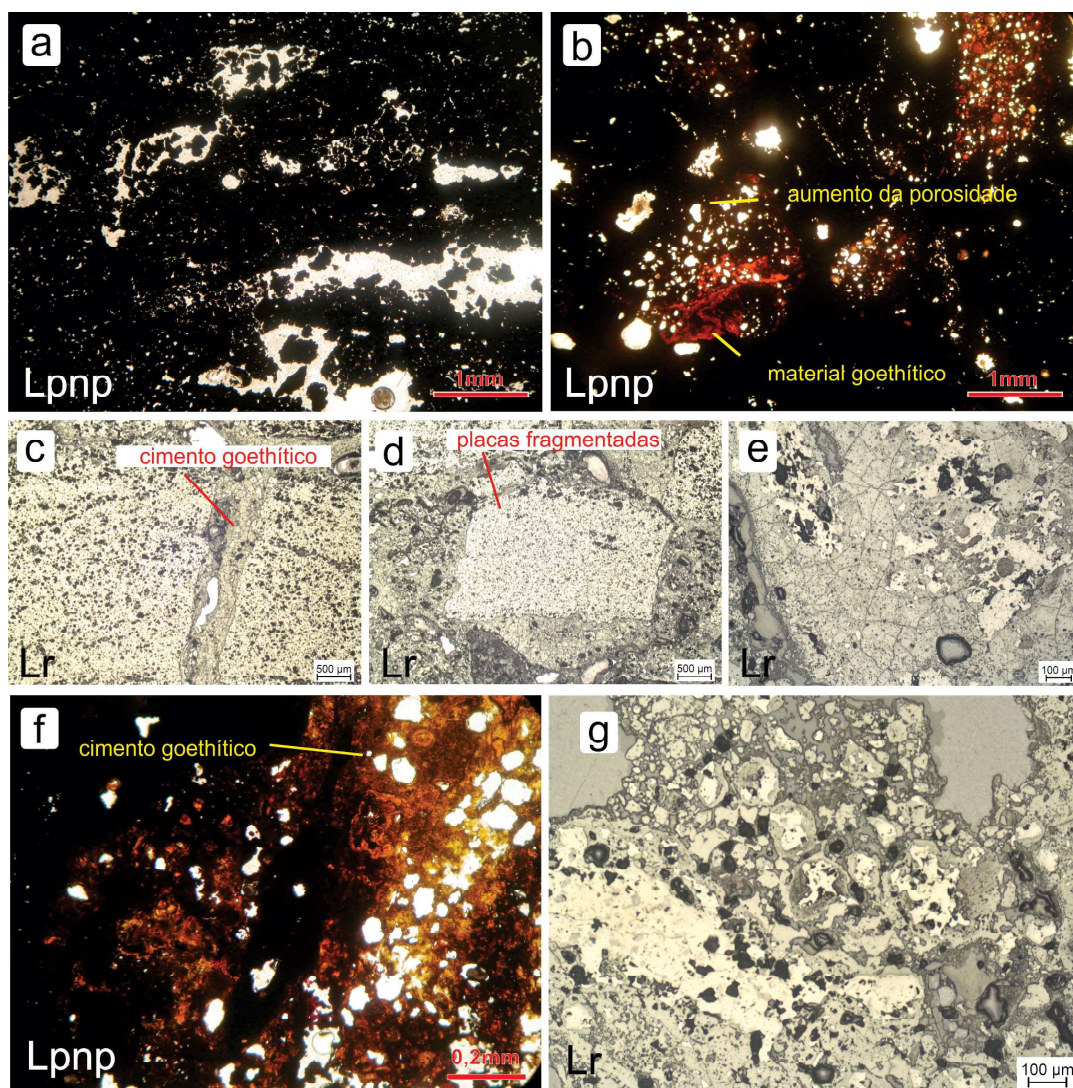


Figura 6 – Fotomicrografias em luz polarizada com nicois paralelos (Lpnp) e luz refletida (Lr) da amostra F3 – fácies placoidal fragmentada – Pedra Rachada, QF, MG

As variações morfológicas F4 (Figuras 3 e 7) e F5 (Figuras 3 e 8) foram descritas como um estágio mais avançado que F3, no qual a perda da orientação preferencial das placas ferruginosas ocorre por sua fragmentação progressiva e remobilização mecânica,

além do aumento da degradação química e formação do cimento. A porosidade interna cavitária, antes isolada, evolui para poros planares e de bordas irregulares, ao mesmo tempo que o cimento goethítico torna-se mais abundante. A porosidade aumenta no interior das placas,

potencializando a percolação das soluções responsáveis por sua degradação. De maneira geral, o bandamento original dos itabiritos ainda se encontra alteromorfo pelas placas, mas de maneira sutil, já que essas não estão mais orientadas na mesma direção. Essas mudanças são acompanhadas por um estágio mais avançado de martitização dos cristais de hematita, seguida por sua transformação em goethita nas bordas.

O progresso das alterações físicas e químicas sugere mudanças morfológicas em algumas placas, principalmente as de menor tamanho. A alteração das bordas faz com que as placas se tornem subarredondadas e, em alguns casos, arredondadas. Essas mudanças não são generalizadas e dependem do grau de alteração das placas, muito variável ao longo das amostras.

Duas feições em F4 e F5 sinalizam para a remo-

bilização e reprecipitação dos óxidos de ferro. A primeira diz respeito ao preenchimento denso completo de cavidades porosas por um material de coloração alaranjada, com laminações concêntricas com trama birrefringente do tipo crescente. Essas feições são tipicamente iluviais (STOOPS, 2003) e sugerem iluviação do ferro, ainda que dentro do próprio perfil. A segunda feição, também reconhecida como um preenchimento, envolve a cimentação no interior dos poros de grãos de quartzo caoticamente organizados, igualmente apresentando microlaminações sin-deposicionais. Essas feições associadas aos aspectos morfológicos já descritos indicam que essas variações morfológicas experimentaram a produção e movimentação de compostos na rocha alterada criando novos constituintes e organizações entre eles.

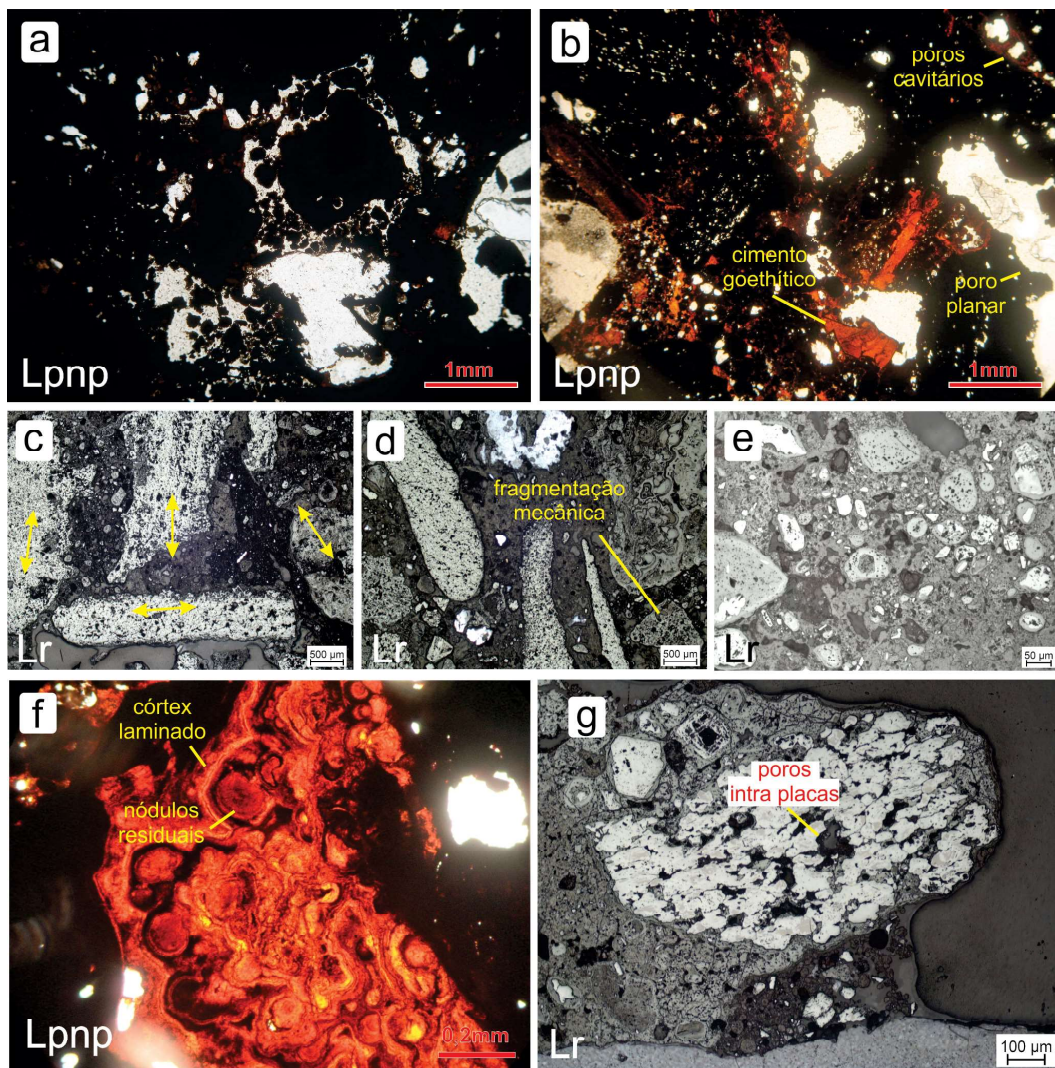


Figura 7 – Fotomicrografias em luz polarizada com nicois paralelos (Lpnp) e luz refletida (Lr) da amostra F4 – fácies placoidal fragmentada desorganizada – Pedra Rachada, QF, MG.

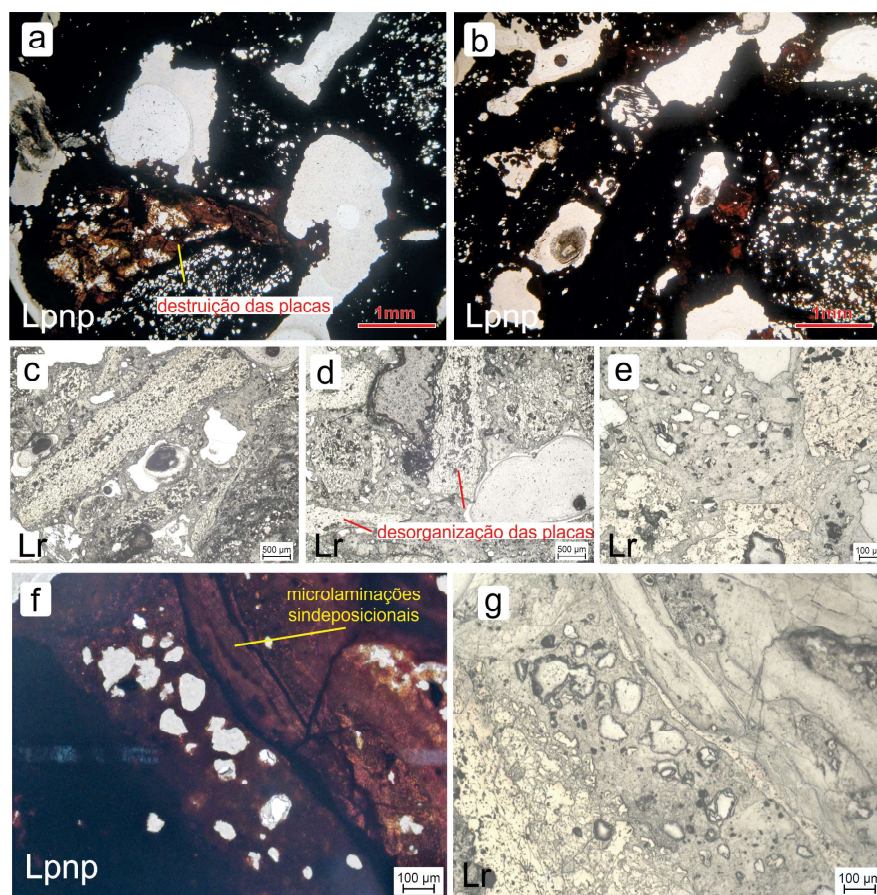


Figura 8 – Fotomicrografias em luz polarizada com nicois paralelos (Lpnp) e luz refletida (Lr) da amostra F5 – fácies placoidal fragmentada desorganizada – Pedra Rachada, QF, MG.

3.1.3 Fácies couraça ferruginosa ou canga estruturada (R1, R2, R3 e R4)

As amostras R1 a R4 representam variações morfológicas, sobretudo na relação entre placas ferruginosas mais preservadas, fragmentos de placas ferruginosas degradadas, cimento goethítico e quantidade residual de quartzo. Contudo, todas compartilham dos mesmos constituintes e podem ser, em conjunto, agrupadas como couraças ferruginosas ou cangas estruturadas.

R1 é uma couraça constituída pelas placas ferruginosas escurecidas, com brilho metálico, compostas por hematita, martita e especularita (Figuras 3 e 9). As placas e os grãos de quartzo residuais são cimentados por goethita. Algumas zonas concentram mais quartzo, com tamanhos areia fina a média, formato angular a subangular, muito fraturado, ruiforme e com preenchimento por material ferruginoso. O quartzo e os demais constituintes grossos encontram-se bastante envolvidos pelo cimento. Essas zonas com maior quantidade de quartzo foram interpretadas como residuais de bandas claras mais espes-

sas, não degradadas totalmente. As placas encontram-se bastante alteradas e mostram relações morfológicas com o cimento que as envolve.

R2 (Figuras 3 e 10) se caracteriza como couraça constituída por placas mais finas, com presença de hematita e especularita. Ocorrem desde placas mais alongadas e bem orientadas, até placas de menor tamanho e caóticas. O cimento goethítico é pouco abundante, estando as placas num arranjo clasto-suportado. Aparentemente, essa couraça deriva de uma zona do itabirito com bandamento mais fino, principalmente das bandas escuras.

R3 (Figuras 3 e 11) e R4 (Figuras 3 e 12) apresentam a mesma organização e composição de R2, exceto pelo fato de possuírem, respectivamente, placas medianas a grossas, milimétrica a centimétricas (Figura 11 – c). Diferenciam-se também pela presença de placas e grãos de quartzo mais arredondados, bem como um arranjo caótico destes últimos (Figura 11 – e), que sugere preenchimento sedimentar dos espaços inter placas. O cimento é mais abundante em R3. Trata-se da variedade morfológica com os maiores grãos de quartzo em toda a sequência.

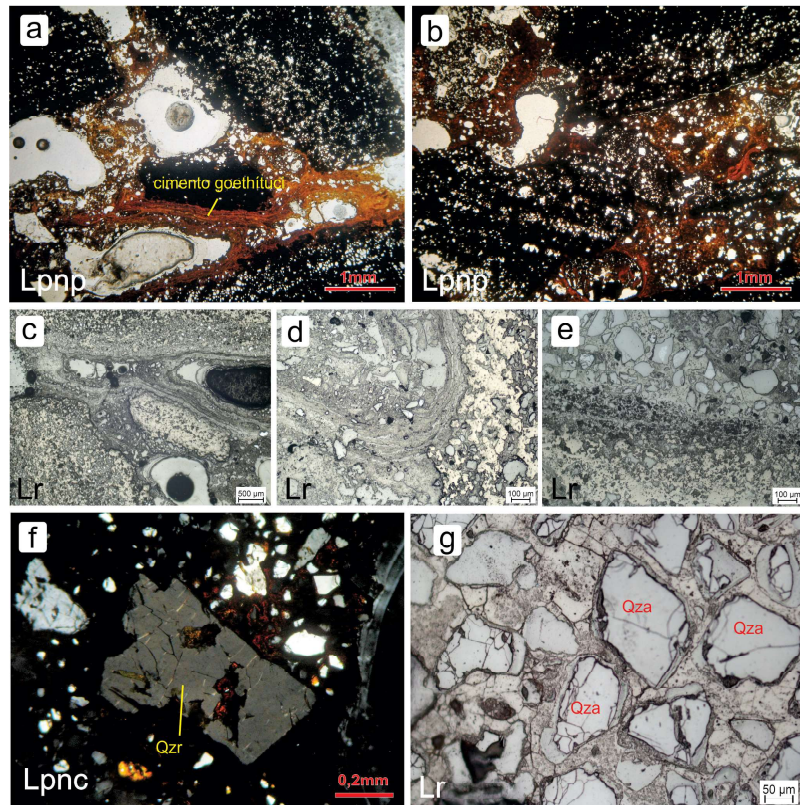


Figura 9 – Fotomicrografias em luz polarizada com nicois paralelos (Lpnp), cruzados (Lpnc) e luz refletida (Lr) da amostra R1, Quartzo ruiforme (Qzr), Quartzo angular no tamanho areia fina (Qza) – couraça ou canga estruturada – Pedra Rachada, QF, MG.

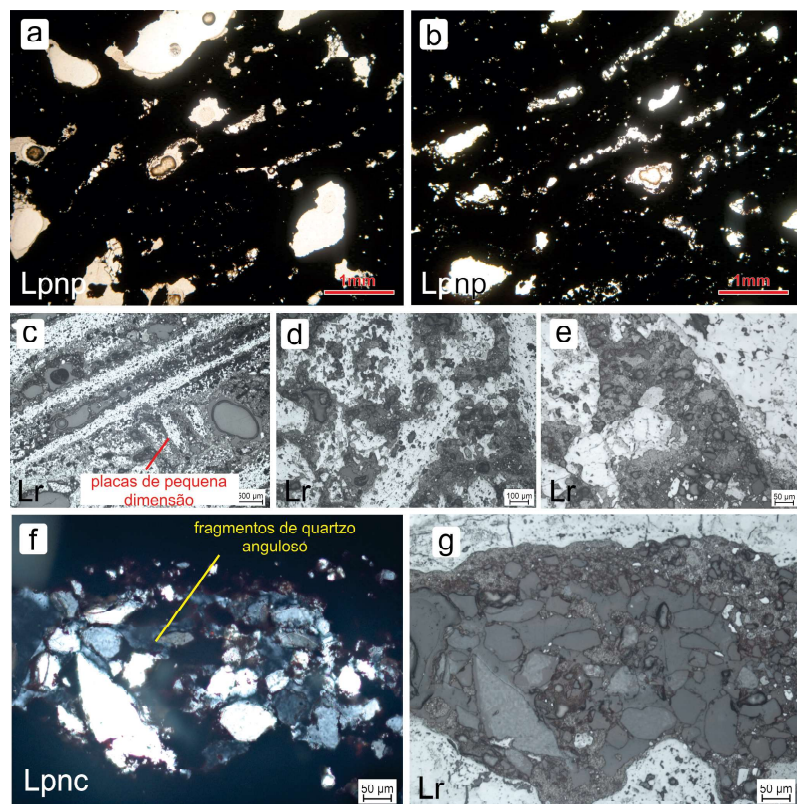


Figura 10 – Fotomicrografias em luz polarizada com nicois paralelos (Lpnp) e luz refletida (Lr) da amostra R2 – couraça ou canga estruturada – Pedra Rachada, QF, MG.

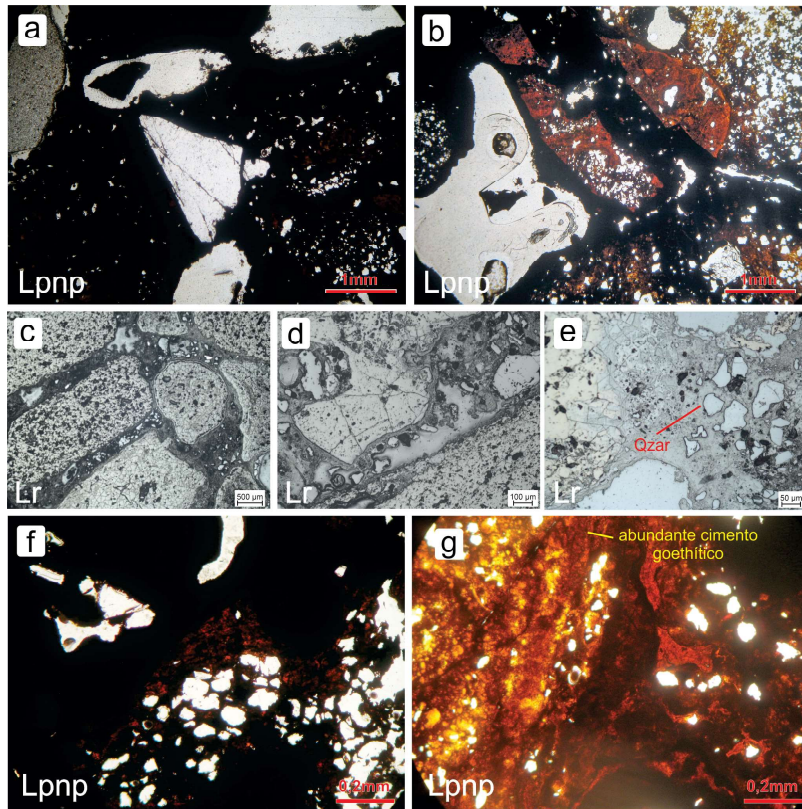


Figura 11 –Fotomicrografias em luz polarizada com nicóis paralelos (Lpnp), cruzados (Lpnc) e luz refletida (Lr) da amostra R3, Quartzo arredondado (Qzar) – couraça ou canga estruturada – Pedra Rachada, QF, MG.

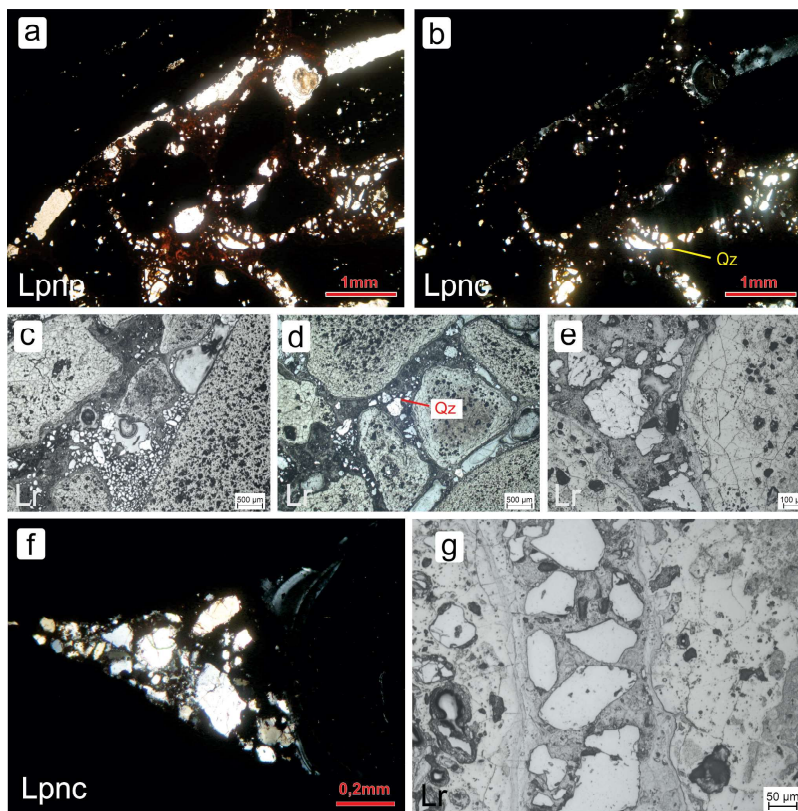


Figura 12 –Fotomicrografias em luz polarizada com nicóis paralelos (Lpnp), cruzados (Lpnc) e luz refletida (Lr) da amostra R4, Quartzo entre placas (Qz) – couraça ou canga estruturada – Pedra Rachada, QF, MG.

3.1.4 Fácies couraça ferruginosa não estruturada ou canga stricto sensu (F6)

A amostra F6 ocorre associada à canga estruturada em áreas com maior adensamento da vegetação e relevo plano e é caracterizada pela perda da estrutura da rocha (Figuras 3 e 13), sendo a primeira fácies nitidamente aloterítica reconhecida. É formada por fragmentos arredondados de material ferruginoso (composição goethita), alguns resíduos de placas ferruginosas (composição hematítica) bastante degradadas, poucos grãos de quartzo e fragmentos detríticos minerais de hematita e martita, unidos entre si pelo cimento goethítico. A mudança na composição do material tem impactos diretos na sua coloração. Trata-se de uma couraça mais amarelada a

avermelhada, com zonas e pontuações escurecidas. De maneira geral, apresenta aspecto globular, com porções arredondadas e circulares.

Os poros são abundantes e de formato ameboidal, ocorrendo principalmente no interior do cimento, o que sinaliza para sua origem pedogênica. Isso é, ao contrário das demais tipologias em que parte da porosidade estava no interior das placas ferruginosas ou entre elas, na amostra F6 os poros representam os espaços não ocupados pelo cimento ou ainda os espaços moldados por esse através da recimentação do ferro. Ocorrem também poros planares que individualizam blocos arredondados a subarredondados do material (Figura 13 – d), não passíveis de serem incorporados na seção delgada por causa do seu tamanho.

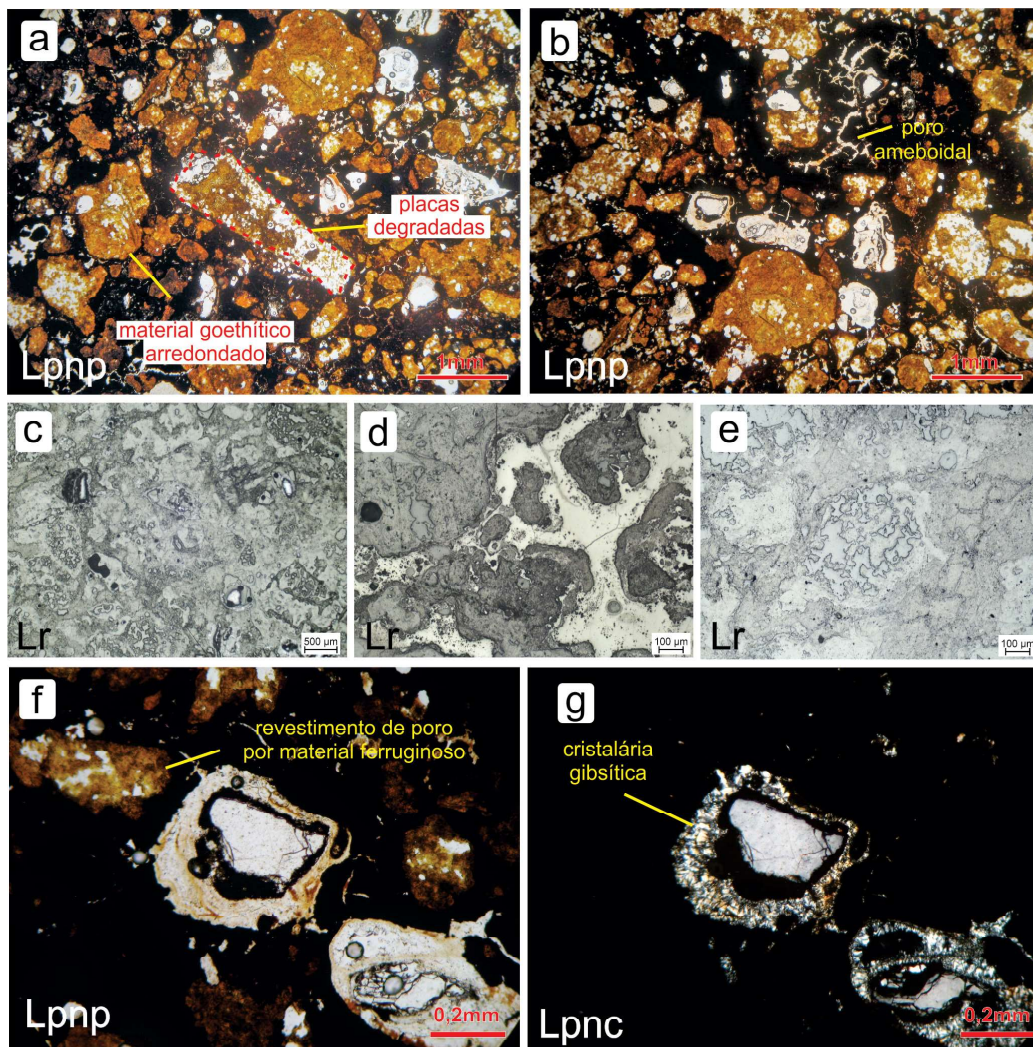


Figura 13 – Fotomicrografias em luz polarizada com nicois paralelos (Lpnp), nicois cruzados (Lnpc) e luz refletida (Lr) da amostra F6 – couraça ou canga stricto sensu – Pedra Rachada, QF, MG.

F6 apresenta feições de remobilização do Fe e sua reprecipitação, incluindo o revestimento e preenchimento de poros e revestimento de grãos e fragmentos (Figura 13 – f). Também foram observadas feições de revestimento dos poros do tipo cristalárias (Figura 13 – g), de composição gibsítica, representada por pequenos cristais dentilhados, cuja superfície de crescimento é a parede do próprio poro. Essas feições indicam remobilização do alumínio, e normalmente, atestam a degradação das cangas (BEAUVAIS, 2009), cuja a perda e lixiviação do ferro pode fazer com que o alumínio reprecipite na forma de caolinita, caso o processo envolva a ressilicificação do sistema, ou de gibbsita, quando a atividade da sílica for baixa (BOULANGÉ, 1984; VARAJÃO; BOULANGÉ; MELFI, 1990; OLIVEIRA *et al.*, 2013).

3.2 Composição química e mineralógica das fácies

As imagens de elétrons retroespalhados e os mapas microquímicos (Figura 14) confirmam a composição

ferruginosa das bandas escuras do itabirito e placas, geneticamente associadas. O P e Ti acompanham o Fe, concentrando-se nas bandas e placas. O Al ocorre principalmente no cimento e em alguns casos, como no itabirito, encontra-se disperso, não apresentando padrão definido a partir da detecção do sensor. O Si nas couraças ocorre como feições discretas, quais sejam grãos de quartzo envoltos por cimento ferro-aluminoso ou isolados entre as placas.

Considerando a composição química por Microsonda Eletrônica (WDS), são apresentados os resultados para as bandas ferruginosas dos itabiritos, amostra F1 (Material Suplementar 1A), placas, córtex de alteração e cimento entre as placas para as amostras F3 (Material Suplementar 1B) e F4 (Material Suplementar 1C) e feições diversificadas para a amostra de canga *stricto sensu* F6 (Material Suplementar 1D). O objetivo da análise é verificar através dos atributos químicos, as relações genéticas aventadas morfologicamente.

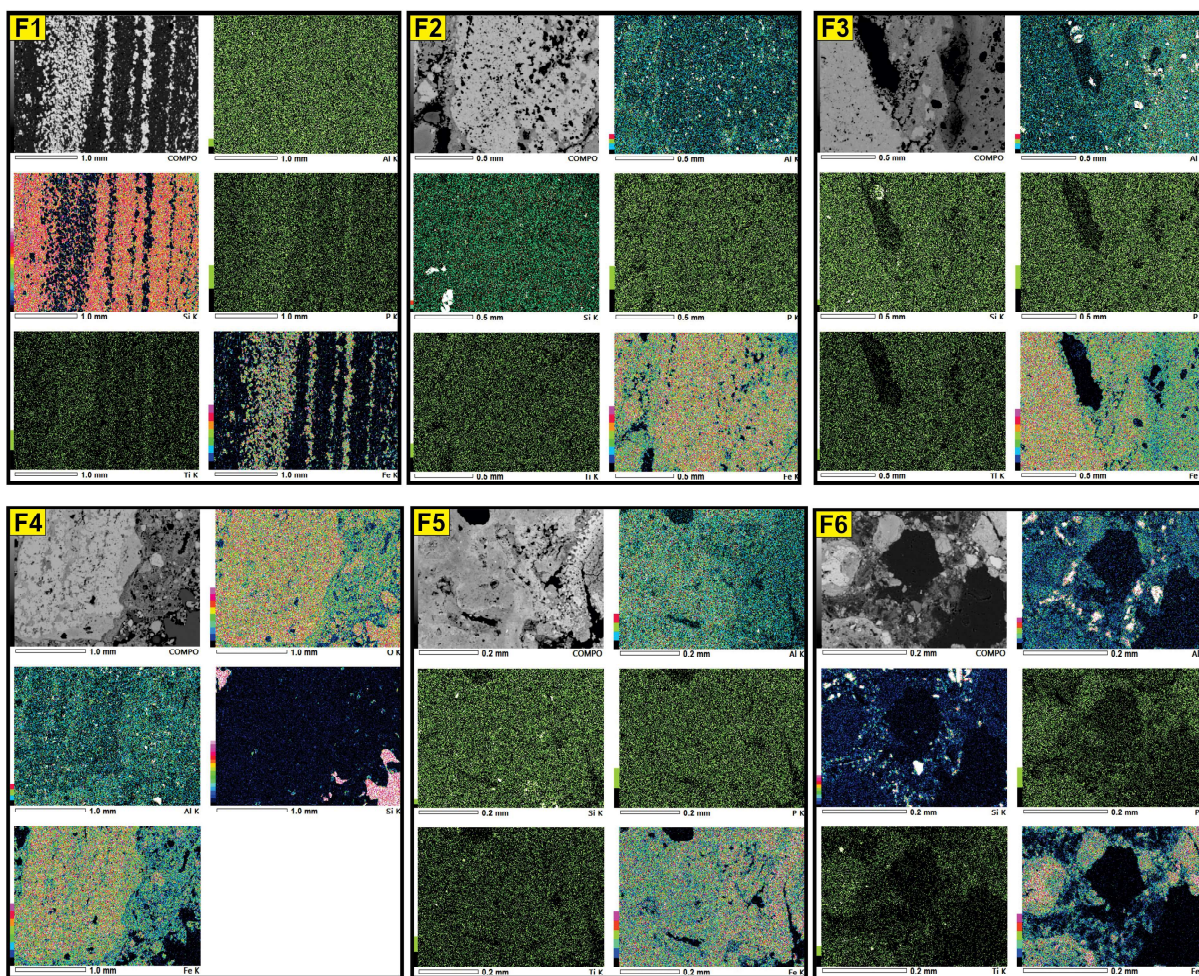


Figura 14 – Mapas microquímicos obtidos com sonda EDS acoplada em MEV de feições selecionadas das variações morfológicas das amostras coletadas na Pedra Rachada, QF, MG.

No itabirito, o conteúdo de ferro nas bandas escuras é, em média, de 90,5%, com teores próximos de zero para todos os demais elementos. Essa composição reflete a presença da hematita, seja de origem metamórfica, ou aquela associada à alteração de magnetitas (martita, kenomagnetita). Quando analisado nas placas das amostras F3 e F4, o teor de ferro tem uma ligeira queda, respectivamente para 87,8% e 88%. Esse comportamento reitera a relação genética entre placas e bandas, onde as primeiras são interpretadas como produto da alteromorfofização das segundas. Considerando os demais elementos químicos, as placas mantêm os teores próximos de zero, sem apresentar um aumento expressivo no conteúdo de Al e Ti, por exemplo.

A composição química do material fino vermelho-amarelado, aqui tratado como cimento, difere-se das bandas e placas ferruginosas. Ainda que ferruginoso, os teores são mais baixos que nas placas, com média de 64,3% em F3 e 59,3% em F4. Essa diminuição do ferro é acompanhada pelo aumento da participação do alumínio na composição. Em F3, o conteúdo médio de Al no cimento é de 6,6% e em F4 de 5,9%. Os valores de titânio também são maiores no cimento em comparação com as placas.

Considerando as zonas de interseção entre as placas e o cimento, denominada de córtex de alteração das placas, o conteúdo médio de Fe foi de 76,11% em F3 e 73,09% em F4. O Al, por sua vez, ocorre em valores médios de 3,3% e 4,9%, respectivamente, nas mesmas amostras, F3 e F4. Isso confirma que as zonas de borda das placas marcam a fase intermediária da sua transformação no cimento; cujo processo envolve a perda de ferro e o enriquecimento relativo em alumínio. Assim, enquanto o termo “placas ferruginosas” é adequado para as feições lito-herdadas das bandas ferruginosas da rocha, o termo cimento ferro-aluminoso pode ser utilizado para tratar do produto da transformação das placas mediante avanço dos processos intempéricos.

A canga *stricto sensu*, como expressão máxima do intemperismo, possui um conteúdo de ferro ainda menor que as fácies da zona saprolítica. O conteúdo é, em média, de 57,6% considerando a análise de 44 pontos distintos. Em conformidade com o que foi observado, há na canga um aumento do conteúdo de alumínio, 6,3%.

Samana (1986) encontrou teores de ferro na comparação entre itabiritos e seus produtos de alteração que sinalizam o enriquecimento relativo nas primeiras

fases (de 30-40% em peso no itabirito para 40-45% no minério, ou saprolito, associado), e enriquecimento relativo e absoluto nas fases posteriores, formando um minério mais enriquecido, da ordem de 60-65% de Fe. A canga, por sua vez, teria uma redução do ferro para 57%, fato interpretado pelo autor como uma consequência da remobilização do ferro para posições inferiores, responsável por enriquecer os materiais subjacentes.

Monteiro *et al.* (2014), entretanto, alertou para o fato do conteúdo de ferro na canga ser o reflexo da dinâmica de dissolução e reprecipitação de goethita ao longo do tempo, não representando, necessariamente, uma perda para os níveis inferiores. De fato, por se tratar de uma análise pontual, inspirada em feições com variações composicionais sinalizadas pelas imagens de elétrons retroespalhados, os resultados apresentados não podem ser utilizados para inferir sobre ganhos e perdas no processo de formação dos materiais estudados. Contudo, como são análises químicas pontuais, seus teores refletem a composição mineral, tornando possível algumas comparações. Por exemplo, na sequência F1 – F3 – F4 – F6, o que se observa é uma redução do ferro com aumento de alumínio, acompanhada por um fechamento cada vez menor das análises; reflexo provável da presença de mais água na estrutura do mineral analisado. Assim, os resultados demonstram uma transição óxidos de ferro – hidróxidos de ferro muito bem marcada no processo evolutivo das couraças analisadas. Essa transformação é corroborada pelas análises mineralógicas por DRX, onde a hematita foi o principal mineral identificado nas placas e no cimento. Além da hematita, foi identificada também a goethita (Figura 15).

4. Discussão

A variação morfológica observada na Pedra Rachada revela aspectos importantes sobre a gênese das couraças ferruginosas a partir dos itabiritos. Em primeiro lugar, considerando as fácies encontradas, sua caracterização e associações, é possível reconhecer a presença de três zonas, sendo elas: i) zona saprolítica; ii) zona couraça ou canga estruturada e iii) zona couraça ou canga *stricto sensu*. A primeira zona ocorre em contato com o itabirito e inclui as fácies F2 a F5. A segunda ocorre sobre a zona saprolítica e inclui as fácies R1 a R4. A última, por sua vez, inclui apenas a fácies F6, associada ao topo plano. A existência dessas zonas permite o reconhecimento de um perfil laterítico (Figura 16).

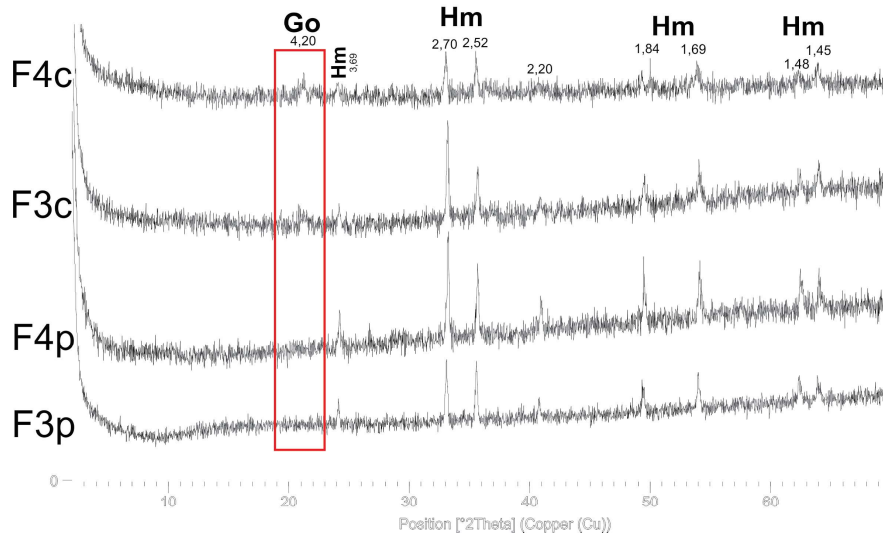


Figura 15 – Difratomogramas de Raios-x representativos de placas e cimento entre placas das amostras F3 e F4 - Pedra Rachada, QF, MG. - No difratograma, p = placa e c = córtex de alteração da placa. Go = goethita; Hm = hematita



Figura 16 – Representação esquemática das fácies que compõem o perfil laterítico na Pedra Rachada, QF, MG.

O intemperismo do itabirito se inicia a partir do esvaziamento geoquímico aparentemente com forte controle estrutural, principalmente dos mergulhos das camadas, que são superiores a 40°. Esse esvaziamento está registrado na base do transecto estudado, preservando no sopé os afloramentos da rocha menos alterada. Muito provavelmente ela foi exposta quando da retração da escarpa pela erosão

e formação da bacia de primeira ordem que caracteriza a vertente NE, o que levou também à queda de blocos e à formação de um campo de matacões (BRASILIANSE, 2016). Os blocos e afloramentos presentes apresentam uma distribuição equilibrada entre os bandamentos de sílica e ferro, com registros de muitas dobras e cisalhamentos que remetem a um contexto geológico mais antigo.

Conforme o aumento da altitude, as bandas silicosas vão desaparecendo; o que evidencia a dissolução preferencial do quartzo e enriquecimento supergênico de ferro (EICHLER, 1967 apud ALKIMIM, 2014). Deste modo, o itabirito apresenta aspecto cavernoso, resultado da retirada das bandas ricas em sílica e preservação relictual das bandas ferruginosas. Esse nível representa uma alteração isovolumétrica e, por isso, pode ser entendido como saprolito isalterítico. Até mesmo onde o itabirito encontra-se dobrado, as estruturas são mantidas, motivo pelo qual a alteromorfização parece coordenar a alteração supergênica.

Muitas questões relacionadas à dissolução preferencial da sílica podem ser colocadas. Em primeiro lugar, o quartzo é um mineral resistente e tido como um dos menos vulneráveis à alteração intempérica (GOLDISH, 1938). Nos itabiritos, contudo, ele representa o primeiro mineral a ser alterado. Isso porque, mesmo sendo resistente, sua dissolução não é impossível e está relacionada a um conjunto de condições particulares. Dentre elas está a passagem de soluções de alteração extremamente alcalinas ou extremamente ácidas, capazes de desestabilizar a sílica. Conforme Buck, Korndörfer e Datnoff (2010), a solubilidade da sílica na forma de quartzo é de 6,5 mg/L. Na faixa de pH entre 2-9 a sílica apresenta sua menor solubilidade. Assim, para uma dissolução efetiva do quartzo, o pH deve assumir valores menores que 2 ou maiores que 8, 9 (LAZZERINI; BONOTTO, 2014; GOMES; FURTADO; SOUSA, 2018). Contudo, o aumento da temperatura das soluções pode aumentar as faixas de solubilidade. Como produto da dissolução, ocorre a formação do ácido sílico, H_4SiO_4 .

Outro fator advogado na literatura para explicar a dissolução da sílica e sua lixiviação é a permanência de condições de drenagem eficiente (NAHON, 1991, TARDY 1997). Nesta visão, a sílica seria constantemente removida, desde que mantidas as condições de percolação contínua. Esse parece ser um fator importante para explicar como as bandas quartzosas são pioneiramente alteradas nos itabiritos. Isto é, dado o controle estrutural e os mergulhos profundos apresentados, é de se esperar que a passagem de soluções de alteração seja contínua nestas rochas, removendo constantemente a sílica, ao passo que a permanência de oxigênio livre garante que as condições oxidantes mantenham o ferro. Além disso, a abertura da porosidade nas bandas quartzosas deve ser mais fácil que nas bandas ferruginosas, garantindo que essas sejam inicialmente as zonas preferenciais de circulação da água. Conforme observado, as bandas quartzosas também apresentam minerais ferruginosos que, ao serem

alterados, liberam prótons capazes de promover a ferrólise.

A ferrólise é um processo pedogenético (BRINKMAN, 1970) capaz de criar condições físico-químicas que desestabilizam os minerais, como as argilas silicatadas, por exemplo. Uma vez atuando sobre o quartzo, ela pode contribuir para a dissolução das bordas dos grãos, abrindo o espaço de contato entre os mesmos e permitindo a passagem das soluções de alteração. Essa circulação das soluções vai se ampliando na medida em que ocorre a dissolução da sílica, até que a circulação ocorra em velocidade suficiente para também provocar sua remoção física. A presença de quartzo ruíniforme nos itabiritos e fácies isalterítica e a presença de aglomerados de grãos de quartzo entre as placas, como se estivessem sendo fisicamente movimentados, corroboram com este fato.

A partir do terço médio da vertente, próximo ao topo, as bandas ferruginosas passam a ser fragmentadas, desorganizadas, degradadas quimicamente e recimentadas. A matriz cimentante, também ferruginosa, porém mais goethítica, ocupa os vazios deixados pela saída da sílica, ou envolve grãos de quartzo residuais. Na medida em que o fragmento das placas e a cimentação se intensificam, consideramos ter a transição entre a zona saprolítica e a canga estruturada. A estrutura do bandamento da rocha ainda é parcialmente percebida, sendo a presença das placas as evidências que nos permitem fazer a relação genética entre elas. Esse conjunto morfológico se aproxima da canga estruturada definida por Dorr II (1964) e por isso consideramos ser um bom termo para designá-las. Por evidenciar feições morfológicas ainda muito relacionadas com a rocha, porém sem a conservação dos volumes, a canga estruturada representa a transição entre os microssistemas de alteroplasmação e pedoplasmação (DELVIGNE, 1998) ou a transição entre os níveis isalterítico e aloterítico (NAHON, 1991; TARDY; ROQUIN, 1992).

A continuidade do intemperismo sobre a fácies canga estruturada rompe com o aspecto placoidal e marca a passagem para o nível aloterítico típico. O aspecto globular da matriz cimentante não reproduz a forma placoidal das bandas itabiríticas, fazendo com que, no final deste processo, as bandas de ferro originais do itabirito sejam transformadas em uma matriz endurecida de ferro com formas arredondadas e suaves. Algumas placas residuais ocorrem, mas sempre de menor tamanho, mais degradadas e caóticas. Essa fácies é enriquecida em poros arredondados ameboidais, bem como feições de preenchimento e revestimento, demonstrando que os processos de dissolu-

ção e reprecipitação dos óxidos e hidróxidos de ferro são dinâmicos e vem se processando *in situ* a partir da fácies subjacente. O arredondamento é mais geoquímico que físico, e o material encontrado no topo da Pedra Rachada pode ser considerando uma canga típica, aqui denominada *stricto sensu*.

Diferentemente do modelo de perfil laterítico típico (NAHON, 1991; TARDY, 1997), a couraça formada na Pedra Rachada não possui as facies friável do horizonte mosqueado. O perfil identificado também se diferencia daquele encontrado em outras áreas do QF, em que sobre o itabirito ocorrem em níveis muito espessos (às vezes, com mais de 400 m) de um saprolito friável (SAMANA, 1986; SPIER *et al.*, 2007; MONTEIRO *et al.*, 2014). Conforme Samama (1986), o perfil laterítico sobre as formações ferríferas bandadas, ou sobre itabirito, seria composto, da base para o topo, por i) rocha não alterada; ii) formação ferrífera com enriquecimento residual (relativo) de Fe; iii) minério de ferro com enriquecimento residual e absoluto e iv) canga. A presença da canga no topo é interpretada como reflexo do avançado grau de alteração dos itabiritos, bem como a proteção dos níveis subjacentes contra a erosão é atribuída à resistência mecânica oferecida por ela (MONTEIRO *et al.*, 2014).

A passagem do itabirito diretamente para um material já endurecido e com remoção muito intensa da sílica pode estar relacionada às condições geomorfológicas - estruturais, em que o mergulho das rochas, mais intenso em áreas como a Pedra Rachada, pode ter gerado condições de dessilicificação mais fortes e mais rápidas que em outros setores. Tais condições favorecem a ocorrência do processo de ultraferralização (PEDRO, 1964). Além disso, é provável que por atuação hidrotermal em condições hipogênicas (ROSIÈRE *et al.*, 2008) esses itabiritos já representem um corpo mais enriquecido em ferro, o que demandaria estudos petrogenéticos e estruturais mais específicos na área. Além disso, o pacote de itabirito na área parece ser menos espesso que em outras áreas do QF, o que pode ter relação direta com a maneira como esse responde à alteração.

De fato, a transformação dos itabiritos diretamente em cangas reitera a natureza evolutiva dessa rocha no ambiente supergênico. A canga, por sua vez, exerce forte controle estrutural da topografia e se comporta como material resistente à erosão. Diferenças foram observadas no controle exercido pela cangas estrutural e *stricto sensu* na Pedra Rachada. Enquanto a primeira concorda com o mergulho das camadas da rocha, e fossiliza a crista da serra

conforme esse caimento, a canga *stricto sensu* exerce controle topográfico distinto, deixando a superfície topográfica plana. É muito comum a descrição no QF de superfícies de cimeira planas capeadas por cangas, ainda que as rochas subjacentes estejam com camadas sob forte mergulho. Entendemos que as transformações geoquímicas que obliteram as estruturas da rocha, nos sucessivos processos de cimentação e recimentação do ferro, com forte participação da atividade biológica (MONTEIRO *et al.*, 2014), fazem com que a superfície adquira a topografia aplainada, mostrando que a inserção destes materiais ocorre num sistema de retroalimentação, em que relevo e materiais evoluem concomitante e se influenciam mutuamente.

5. Considerações Finais

Diferentes variações morfológicas, ou fácies de alteração, foram reconhecidas na formação de couraças ferruginosas a partir de itabiritos no maciço da Pedra Rachada, QF, MG. São elas: fácies placoidal, fácies placoidal fragmentada, fácies placoidal fragmentada desorganizada, fácies canga estruturada e fácies canga *stricto sensu*.

A associação das fácies de alteração identificadas mostra a existência de um perfil laterítico composto pelas zonas saprolítica, com o itabirito alterado, e as zonas de couraças ou cangas, estruturada e não estruturada.

Nas zonas saprolítica e canga estruturada, os processos incluem dessilicificação intensa, ultraferralização, alteromorfoses, alteroplasmação, dissolução e recimentação do ferro. Na zona de canga *stricto sensu* os processos de dissolução e reprecipitação do ferro se intensificam, ocorrendo a pedoplasmação e perda das estruturas.

As cangas representam materiais fortemente resistentes à erosão e se inserem na paisagem da área de estudo com controles distintos. As cangas estruturadas fossilizam o mergulho das rochas e influem as cristas da Serra com caimentos que, aparentemente, reproduzem esses mergulhos. As cangas *stricto sensu* exercem um controle distinto, e por causa da perda do controle estrutural da rocha pelo avanço das alterações geoquímicas, influem na determinação de uma topografia plana.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) Projeto APQ-00695-17, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

(CNPq) e também agradecem ao programa de pós graduação em Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Referências Bibliográficas

ALKMIM, A.A. **Investigação geoquímica e estratigráfica da Formação Ferrífera Cauê na porção centro-oriental do Quadrilátero Ferrífero, MG.** Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais), Departamento de Geologia – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2014.

ALVES, B. P. Sumário sobre estratigrafia e estrutura das quadrículas de Caeté e Serra da Piedade. **Publicação da Sociedade de Intercâmbio Cultural e Estudos Geológicos**, Ouro Preto: SICEG 1, p. 257-260., 1961.

BALTAZAR, O.F.; BAARS, F.J.; LOBATO, L.M.; REIS, L.B.; ACHTSCHIN, A.B.; BERNI, G.V.; SILVEIRA, V.D. **Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero na Escala 1:50000** – nota explicativa. CODEMIG, Belo Horizonte, 2005.

BARBOSA, G.V. **O manto de alteração no sudoeste do Quadrilátero Ferrífero.** Tese (Livre Docência Geografia Física), Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, Universidade Federal de Minas Gerais, 1960.

BARBOSA, G.V.; RODRIGUES, D.M.S. O Quadrilátero Ferrífero e seus problemas geomorfológicos. **Boletim Mineiro de Geografia**, n.10 e 11, 1965.

BARROS, L.F.P. **Implicações geomorfológicas e paleoambientais de registros sedimentares fluviiais do Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais.** Tese (Doutorado em Geografia). Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

BEAUVAIS, A. Ferricrete biochemical degradation on the rainforest-savannas boundary of Central African Republic. **Geoderma**, v.150, p.379-388, 2009.

BOULANGÉ, B. Les formations bauxitiques latéritiques de Côte d'Ivoire. Les facies, leur transformation, leur distribution et l'évolution du modelé. **Travaux et Documents**, p.175-341, 1984.

BRASILIANSE, R.P. **Geoambientes e solos da Pedra Rachada, Sabará/MG.** Monografia (Bacharelado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

BRINDLEY, G.W., BROWN, G. **Crystal structures of clay**

minerals and their X-ray identification. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland Monograph, v.5, 1980.

BRINKMAN, R. Ferrololysis, a hydromorphic soil forming process. **Geoderma**, v. 3, p. 199-206, 1970.

BUCK, G.B.; KORNDÖRFER, G.H.; DATNOFF, L.E. Extractors for estimating plant available silicon from potential silicon fertilizer sources. **Journal of Plant Nutrition**, v. 34, 2010.

DELVIGNE, J. **Atlas of Micromorphology of Mineral Alteration and Weathering.** Canadian Mineralogist Special Publication, Mineralogical Association of Canada, Ottawa, 495p, 1998.

DORR II, J.V.N. Supergene iron ores of Minas Gerais, Brazil. **Econ. Geology**. v.59, p.1203-1240, 1964.

GOLDISH, S. S. A study in rock weathering, **Journal of Geology**, v. 46, p. 17-58, 1938.

GOMES, L.S.; FURTADO, A.C.R.; SOUZA, M.C. A sílica e suas particularidades. **Rev. Virtual Quim.**, v. 10 (4), p. 1018-1038, 2018.

JACOBI, C.M.; CARMO, F.F. **Diversidade florística nas cangas do Quadrilátero Ferrífero.** Belo Horizonte: Código Editora, 2012.

LAGOEIRO, L.E. **Mecanismos de deformação e orientações cristalográficas preferenciais em tectonitos de Formação Ferríferas – Quadrilátero Ferrífero, MG.** Tese (Doutorado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

LAZZERINI, F.T.; BONOTTO, D.M. O silício em águas subterrâneas do Brasil. **Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas**, v. 36, p. 161, 2014.

MEUNIER, A., VELDE, B. Weathering mineral facies in altered granites: the importance of local small-scale equilibria. **Min. Mag.** v.43, p.261 – 268, 1979.

MONTEIRO, H.S.; VASCONCELOS, P.M.; FARLEY, K.A.; SPIER, C.A.; MELLO, C.L. (U–Th)-He geochronology of goethite and the origin and evolution of cangas. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v.131, p.267-289, 2014.

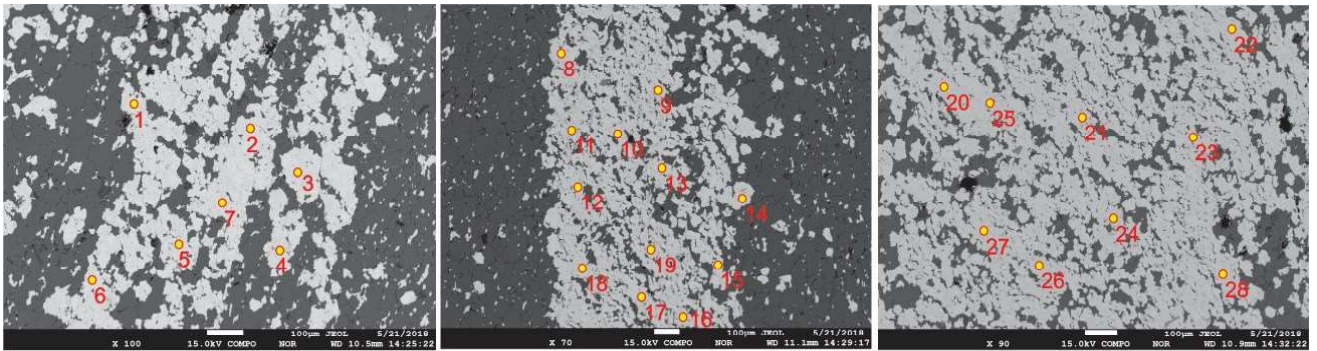
NAHON, D.B. **Introduction to the petrology of soils and chemical weathering.** New York: Wiley-Interscience, 313p., 1991.

NAHON, D. Evolution of Iron Crusts in Tropical Landscapes. IN: COLMAN, S.M.; DETHIER, D.P. **Rates of Chemical Weathering of Rocks and Minerals**, London: Academic Press, p.169-191, 1986.

- OLIVEIRA, F.S.; VARAJÃO, A.F.D.C.; VARAJÃO, C.A.C.; BOULANGÉ, B. A comparison of properties of clay minerals in isalteritic and in degraded facies. **Clay Minerals**, 48, p. 697–711, 2013.
- PEDRO, G. Contribution a l'étude expérimentale de alteration geochimique des roches cristallines. Part 1. **Ann. Agron.** v.15, 1964 85-191.
- RAMANAIDOU, E.R. Genesis of lateritic iron ore from banded iron-formation in the Capanema mine (Minas Gerais, Brazil). **Australian Journal Earth Science**, v.56, p.605–620, 2009.
- ROSIÈRE, C.A., SPIER, C.A., RIOS, F.J., SUCKAU, V.E. The itabirites of the Quadrilátero Ferrífero and related highgrade iron ore deposits: an overview. **Reviews in Economic Geology**, v. 15, p. 223-254, 2008.
- ROSIÈRE, C.A.; CHEMALE JUNIOR, F. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero – Uma visão geral e discussão. **Geonomos**, v.8,n.2, p.27-43, 2000.
- RUCHKYS, U.A.; RENGER, F.E.; NOCE, C.M; MACHADO, M.M.M. Serra da Piedade, Quadrilátero Ferrífero, MG – da lenda do Sabarabuçu ao patrimônio histórico, geológico, paisagístico e religioso. IN: WINGE, M.; SCHOBENHAUS, C; BERBET-BORN, M.; QUEIROZ, E.T.; CAMPOS, D.A.; SOUZA, C.R.G; FERNANDERS, A.C.S. **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. Brasília. CPRM. 2009
- SALGADO, A. A. R. **Estudo da evolução do relevo do Quadrilátero Ferrífero, MG - Brasil, através da quantificação dos processos erosivos e denudacionais**. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais), Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Université Paul Cezanne - AixMarseille III, 2006.
- SAMAMA, J.C. Ore Fields and Continental Weathering. Van Nostrand Reinhold, 1986
- SCLIAR, C. Geologia. IN: DUARTE, R.H. (coord.). **Serra da Piedade**. Belo Horizonte: CEMIG, 1992.
- SPIER, C.A.; OLIVEIRA, S.M.B.de.; SIAL, A.N.; RIOS, F.J. Geochemistry and genesis of the banded iron formations of the Cauê Formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **Precambrian Research**, v.152, p.170-206, 2007.
- STOOPS, G.. **Guideline for the Analyses and Description of Soil and Regolith Thin Sections**. SSSA. Madison, 2003.
- TARDY, Y. **Petrology of Laterites and Tropical Soils**. Balkena Publishers, 1997
- TARDY, Y.; ROQUIN, C. Geochemistry and evolution of lateric landscapes. In: MARTINI, I.P.; CHESWORTH, W. (eds) **Weathering, soils and paleosols**. Amsterdam-London-New York-Tokyo: ELSEVIER, p.407-436, 1992.
- VARAJÃO, A.F.D.C., BOULANGÉ, B., MELFI, A.J. Caracterização morfológica, mineralógica e química das fácies estruturais da jazida de caulinita de Vargem dos Óculos, Quadrilátero Ferrífero, MG. **Revista Brasileira de Geociências**, v.20, p.75-82, 1990.
- VARAJÃO, C.A.C., RAMANAIDOU, E., MELFI, A.J., COLIN, F., NAHON, D. Martitização: alteração supergênica da magnetita. **Revista Escola de Minas**, v.50, n.3, p.18-20, 1996.
- WEGGEN, J.B.G; VALETON, I.H.I. Polygenetic lateritic iron ores on BIF's in Minas Gerais/Brazil. **Geologische Rundschau**, v.79, n.2, p.301-318, 1990.

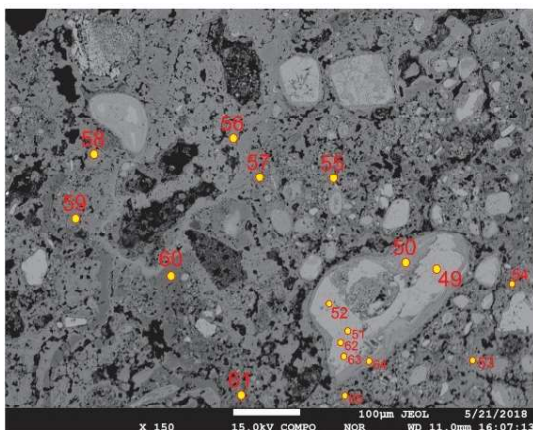
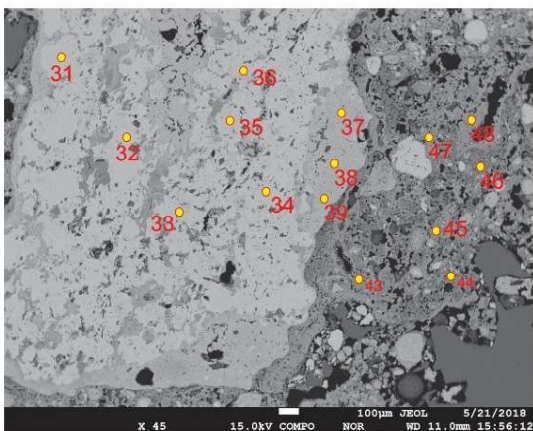
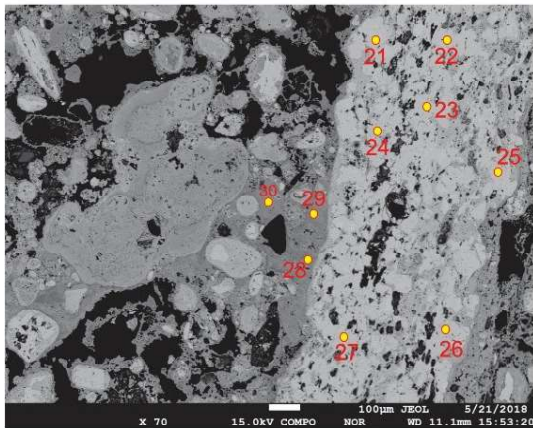
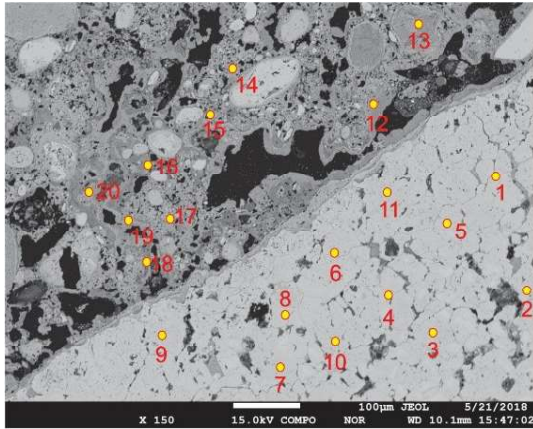
MATERIAL SUPLEMENTAR 1 - Análises químicas pontuais obtidas com WDS em Microsonda Eletrônica de sítios representativos das amostras de couraças ferruginosas da Pedra Rachada, QF, MG.

A – Amostra F1 – Itabirito



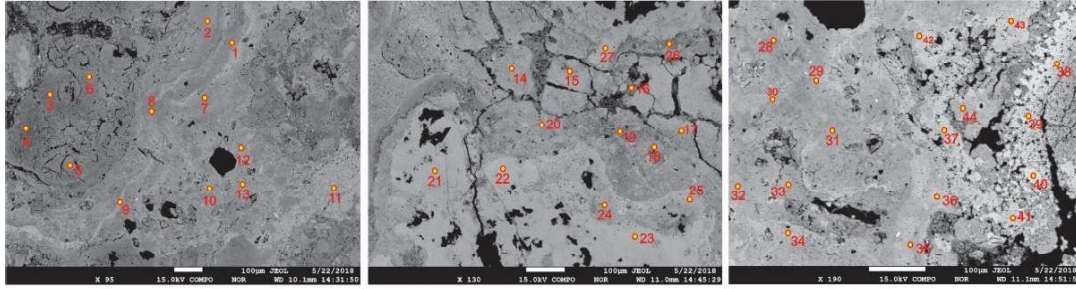
Point	Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	K ₂ O	MnO	Total
1	0,021	0,219	0,043	0	89,946	0,004	0,007	0,01	0,017	90,267
2	0,036	0,082	0,065	0	89,207	0	0,033	0,002	0,01	89,435
3	0,027	0,18	0,233	0	89,704	0,004	0,018	0,006	0,008	90,18
4	0,026	0,271	0,035	0	90,277	0	0,003	0,013	0,026	90,651
5	0	0,245	0,056	0,033	88,441	0,025	0,024	0,006	0	88,83
6	0	0,438	0,093	0,047	90,483	0,003	0,022	0,008	0	91,094
7	0,032	0,058	0,027	0	89,151	0,003	0,028	0,001	0	89,3
8	0,076	0,42	0,145	0,027	91,496	0	0,052	0,003	0	92,219
9	0,033	0,13	0,035	0	90,928	0,012	0,001	0,006	0,032	91,177
10	0	0,375	0,071	0,017	90,688	0	0,006	0	0,016	91,173
11	0,019	0,043	0,14	0	89,293	0,07	0	0,006	0,021	89,592
12	0,035	0,012	0,017	0	93,128	0,006	0,022	0	0	93,22
13	0,053	0,109	0,247	0	92,578	0,01	0	0,003	0,001	93,001
14	0,016	0,119	0,043	0	92,867	0,006	0	0	0	93,051
15	0,028	0,039	0,047	0,008	91,312	0,091	0,018	0,004	0	91,547
16	0,041	0,178	0,025	0,014	90,794	0,009	0	0	0,027	91,088
17	0,043	0,272	0,026	0,009	88,903	0,038	0,002	0,003	0	89,296
18	0,049	0,666	0,209	0	88,948	0,013	0,023	0,025	0	89,933
19	0,019	0,061	0,012	0,014	91,41	0,065	0,034	0	0	91,615
20	0	0,426	0,097	0	91,348	0,015	0,016	0	0,002	91,904
21	0	0,135	0	0	90,453	0,034	0,023	0,011	0,022	90,678
22	0	0,183	0,052	0	91,63	0,004	0,023	0,004	0	91,896
23	0,011	0,48	0,317	0,121	90,079	0,063	0,01	0	0	91,081
24	0	0,176	0,058	0,029	89,946	0,049	0,007	0	0,023	90,288
25	0,061	0,604	0,26	0,001	91,482	0,022	0,012	0,002	0	92,444
26	0,055	1,289	0,884	0,483	88,374	0	0,018	0,017	0	91,12
27	0,041	0,196	0,032	0	88,721	0,012	0,005	0	0	89,007
28	0,037	0,318	0	0	91,213	0	0	0	0	91,568
Minimum	0	0,012	0	0	88,374	0	0	0	0	88,83
Maximum	0,08	1,29	0,88	0,48	93,13	0,09	0,05	0,03	0,03	93,22
Average	0,03	0,28	0,12	0,03	90,46	0,02	0,02	0,01	0,01	90,95
DP	0,02	0,26	0,17	0,09	1,31	0,03	0,01	0,01	0,01	1,24

C - Amostra F4 – Fácies Placoidal Fragmentada Desorganizada.



Point	Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	K ₂ O	MnO	Total
1	0,009	0,241	0,061	0,022	87,437	0,012	0,003	0,001	0,031	87,817
2	0,018	0,825	0,49	0	85,025	0,186	0,065	0,009	0	86,618
3	0	0,941	0,295	0	86,963	0	0,029	0,002	0,01	88,24
4	0	0,409	0,203	0	88,665	0,008	0,001	0,009	0	89,295
5	0	0,363	0,208	0,045	87,382	0,024	0,001	0	0	88,023
6	0,013	0,233	0,224	0	89,153	0,037	0	0	0,028	89,688
7	0,031	0,616	0,161	0,015	86,579	0,013	0,049	0,011	0	87,475
8	0	0,606	0,555	0	87,148	0,214	0,021	0	0	88,544
9	0	0,23	0,145	0	88,569	0	0,017	0,01	0	88,971
10	0,071	0,75	0,333	0,03	86,366	0,062	0,014	0,001	0	87,627
11	0,042	0,298	0,159	0,009	88,524	0,071	0	0,004	0,021	89,128
21	0	0,047	0	0	91,358	0,027	0,036	0	0,028	91,496
22	0	0,164	0,106	0	88,483	0,007	0,002	0	0	88,762
23	0	0,36	0,902	0,021	88,32	0,029	0,022	0,004	0	89,658
24	0	0,073	0,097	0,023	88,764	0,392	0,185	0	0,001	89,535
25	0	0,144	0,173	0,001	87,998	0,053	0	0	0	88,369
26	0,029	0,152	0,112	0,026	89,324	0,044	0,003	0,015	0,015	89,72
27	0	0,192	0,151	0,003	88,047	0,032	0,043	0,004	0	88,472
31	0	0,191	0,017	0,017	89,818	0	0,011	0,007	0	90,061
32	0,042	0,144	0,182	0,006	87,846	0,009	0	0,01	0	88,239
33	0,025	0,029	0,312	0	88,434	0	0,018	0,001	0,015	88,834
34	0,039	0,705	0,773	0,099	88,073	0,074	0,033	0,018	0	89,814
35	0,008	0,032	0,07	0,023	88,64	0,056	0,001	0,007	0	88,837
36	0,001	0,049	0,151	0,013	88,625	0,026	0,009	0	0	88,874
49	0	0,155	0,051	0,008	89,857	0,044	0	0,005	0	90,12
51	0	0,161	0,294	0,007	87,298	0,064	0,015	0,009	0,07	87,918
52	0,006	0,216	0,287	0	88,138	0,07	0,012	0,003	0,014	88,746
62	0	0,136	0,606	0,011	88,684	0,051	0,018	0	0	89,506
63	0,048	0,106	0,06	0,006	88,403	0,069	0,01	0,009	0,019	88,73
Minimum	0	0,029	0	0	85,025	0	0	0	0	86,618
Maximum	0,071	0,941	0,902	0,099	91,358	0,392	0,185	0,018	0,07	91,496
Average	0,01	0,30	0,25	0,01	88,20	0,06	0,02	0,00	0,01	88,87
DP	0,02	0,26	0,22	0,02	1,20	0,08	0,04	0,01	0,02	0,97
Cortex de alteração da placa										
20	0,021	0,238	2,971	0	70,226	0,468	0,03	0,006	0,011	73,971
37	0,032	0,185	3,575	0	77,893	0,391	0,027	0,013	0,014	82,13
38	0,046	0,199	3,959	0	76,619	0,511	0,039	0,009	0	81,382
39	0,077	0,213	3,967	0,015	76,99	0,495	0,018	0	0	81,775
40	0,028	0,208	3,882	0,035	77,297	0,545	0,02	0,003	0,058	82,076
41	0,029	0,266	3,68	0	77,52	0,736	0,009	0,01	0,021	82,271
42	0,01	0,271	6,44	0,022	68,632	0,489	0,011	0,003	0,006	75,884
50	0,018	0,3	7,909	0,017	66,511	0,363	0,035	0,007	0	75,16
64	0	0,333	7,791	0,015	66,103	0,182	0,016	0	0,076	74,516
Minimum	0	0,185	2,971	0	66,103	0,182	0,009	0	0	73,971
Maximum	0,077	0,333	7,909	0,035	77,893	0,736	0,039	0,013	0,076	82,271
Average	0,03	0,25	4,91	0,01	73,09	0,46	0,02	0,01	0,02	78,80
DP	0,02	0,05	1,92	0,01	5,10	0,15	0,01	0,00	0,03	3,76
Cimento entre placas										
12	0,009	0,221	5,572	0,033	61,319	0,789	0,027	0	0	67,97
13	0,027	0,217	9,746	0,057	61,282	0,467	0,061	0	0,037	71,894
14	0,023	0,232	4,442	0,037	70,955	0,453	0,085	0,002	0,01	76,239
15	0,074	0,709	4,504	0,005	57,477	0,775	0,076	0,005	0,01	62,53
16	0,012	0,25	6,021	0,014	63,572	0,165	0,018	0	0	70,052
17	0,016	0,275	3,896	0	69,867	0,518	0,028	0,007	0	74,607
18	0,1	0,317	4,572	0	67,925	0,455	0,027	0,008	0,044	73,448
19	0,004	0,256	5,48	0,011	62,891	0,526	0,043	0,012	0	69,223
28	0	0,2	5,802	0	55,945	0,091	0,008	0	0	62,046
29	0,008	0,155	5,697	0,034	59,023	0,036	0,005	0,002	0,007	64,967
30	0,055	0,139	5,622	0,011	61,376	0,067	0,016	0	0,03	67,316
43	0,03	0,24	4,861	0,024	60,186	1,039	0,02	0	0	66,4
44	0	0,224	6,649	0,039	50,96	1,854	0	0,004	0	59,73
45	0	0,229	6,065	0,004	47,724	0,933	0,032	0,003	0,037	55,027
46	0	0,13	6,808	0,019	56,347	6,798	0,005	0,013	0,019	70,139
47	0	0,199	5,482	0,019	60,064	0,464	0,032	0,001	0	66,261
48	0	0,235	4,594	0	70,821	0,667	0,037	0	0	76,354
53	0	0,276	4,916	0,05	64,051	0,997	0,019	0,008	0,004	70,321
54	0,029	0,203	2,647	0,026	38,8	0,354	0	0,005	0	42,064
55	0	0,207	6,825	0,037	61,934	0,513	0,055	0,007	0,025	69,603
56	0,03	0,288	3,874	0,01	52,994	0,336	0	0,007	0,037	57,576
57	0	0,326	7,899	0,042	63,248	0,655	0,051	0	0,027	72,248
58	0	0,143	7,229	0,051	53,119	1,333	0,016	0	0,021	61,912
59	0,045	0,201	5,144	0,003	53,982	0,804	0,019	0,005	0	60,203
60	0,019	0,095	6,656	0,026	48,897	0,17	0,001	0,004	0,02	55,888
61	0,014	0,207	5,183	0,003	58,951	0,554	0,028	0,004	0	64,944
65	0	0,256	4,583	0	67,352	0,564	0,021	0,012	0	72,788
66	0,034	0,339	5,667	0,007	65,413	1,252	0,007	0	0,004	72,723
Minimum	0	0,095	2,647	0	38,8	0,036	0	0	0	42,064
Maximum	0,1	0,339	9,746	0,057	70,955	6,798	0,085	0,013	0,044	76,354
Average	0,02	0,22	5,59	0,02	59,52	0,83	0,02	0,00	0,01	66,23
DP	0,02	0,06	1,39	0,02	7,47	1,24	0,02	0,00	0,01	7,63

D - Amostra F6 – Couraça ou Canga stricto sensu.



Point	Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	K ₂ O	MnO	Total
1	0,044	0,533	8,399	0,034	53,901	0,132	0,035	0,004	0	63,082
2	0,003	0,471	4,904	0,018	57,899	0,302	0,04	0,007	0	63,644
3	0	0,483	4,774	0	45,057	1,732	0,088	0,009	0,045	52,188
4	0,045	0,347	4,426	0,027	37,356	1,79	0,105	0,008	0,004	44,108
5	0,017	0,587	6,784	0,003	54,156	1,075	0,082	0,002	0,019	62,725
6	0,028	0,599	5,508	0,01	55,84	1,079	0,07	0,005	0,036	63,175
7	0,041	0,494	3,941	0	61,558	0,388	0,041	0	0	66,463
8	0,008	0,434	4,921	0	60,467	0,354	0,024	0,003	0	66,211
9	0	0,448	3,784	0	64,602	0,367	0,039	0	0	69,24
10	0	0,458	5,536	0,039	60,209	0,303	0,11	0,004	0,009	66,668
11	0,017	0,496	2,946	0,014	72,598	0,626	0,029	0	0	76,726
12	0,046	0,506	5,843	0	60,629	0,319	0,023	0,004	0,032	67,402
13	0,009	0,477	4,224	0	69,661	0,317	0,057	0,006	0	74,751
14	0,022	0,532	4,247	0,001	58,512	0,976	0,089	0,01	0,003	64,392
15	0,017	0,483	3,057	0	54,322	0,933	0,096	0	0,013	58,921
16	0,017	0,422	1,522	0,047	20,872	0,424	0,069	0,012	0	23,385
17	0,019	0,633	2,778	0	61,682	0,839	0,059	0,016	0,035	66,061
18	0,025	0,527	4,238	0	52,235	0,359	0,064	0,007	0,018	57,473
19	0,03	0,496	4,395	0	44,662	0,701	0,067	0	0	50,351
20	0	0,513	4,192	0,002	48,738	0,318	0,076	0,001	0	53,84
21	0	0,434	8,424	0,006	60,4	0,115	0,067	0,008	0	69,454
22	0	0,384	8,49	0	61,652	0,172	0,047	0,001	0,037	70,783
23	0	0,414	8,032	0,021	60,488	0,175	0,051	0,009	0,005	69,195
24	0,005	0,42	11,43	0,001	57,409	0,237	0,058	0	0	69,56
25	0,018	0,467	11,231	0,005	56,944	0,232	0,072	0,002	0	68,971
26	0,04	0,387	5,032	0,01	35,875	0,19	0,077	0	0,001	41,612
27	0,124	0,475	8,834	0	58,727	0,534	0,064	0,002	0,023	68,783
28	0	0,447	10,546	0	46,859	0,257	0,056	0,001	0,044	58,21
29	0,037	0,449	9,685	0,005	53,789	0,263	0,056	0	0	64,284
30	0,013	0,397	10,837	0,01	56,552	0,286	0,056	0,007	0,029	68,187
31	0	0,412	10,315	0	52,277	0,234	0,07	0	0,018	63,326
32	0,066	0,428	10,206	0,013	51,273	0,171	0,091	0	0,01	62,258
33	0,005	0,521	10,959	0,021	56,509	0,25	0,073	0,002	0,008	68,348
34	0,021	6,362	12,025	0,043	54,832	0,168	0,046	0,02	0,007	73,524
35	0,013	0,463	9,149	0,045	59,971	0,139	0,057	0,001	0,016	69,854
36	0,005	0,557	6,68	0,028	65,952	2,004	0,029	0,006	0,033	75,294
37	0	0,584	5,269	0,017	68,851	0,355	0,051	0,005	0,005	75,137
38	0	0,599	2,625	0	70,495	0,361	0,07	0,005	0,005	74,16
39	0,044	0,691	2,427	0,026	71,481	0,369	0,028	0,004	0,024	75,094
40	0,013	0,776	3,131	0,026	72,701	2,007	0,058	0,013	0	78,725
41	0,041	0,543	5,83	0	66,577	0,303	0,076	0,004	0	73,374
42	0,031	0,509	5,89	0,009	69,142	0,242	0,045	0,007	0,03	75,905
43	0,019	0,579	4,441	0,043	70,202	0,304	0,056	0,002	0,016	75,662
44	0,009	0,579	3,05	0	60,082	0,548	0,063	0,004	0,001	64,336
Minimum	0	0,347	1,522	0	20,872	0,115	0,023	0	0	23,385
Maximum	0,124	6,362	12,025	0,047	72,701	2,007	0,11	0,02	0,045	78,725
Average	0,02	0,632	6,249	0,012	57,591	0,528	0,061	0,005	0,012	65,11
DP	0,02	0,89	2,95	0,01	10,33	0,50	0,02	0,00	0,01	10,53