



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**GEOLOGIA E GEOMETALURGIA DOS MINÉRIOS DE
FOSFATO NA BASE DO MANTO DE INTEMPERISMO DA
MINA DO BARREIRO, ARAXÁ**

**TESE DE DOUTORADO
Nº 126**

CARLA BERTUCCELLI GRASSO

**Área de Concentração: Geologia Econômica e Prospecção
Orientador: Prof. Dr. José Affonso Brod - IG/UnB, UFG
Co-Orientador: Prof. Dr. Carlos Cordeiro Ribeiro - UFG**

**Banca Examinadora:
Prof. Dr. José Affonso Brod – UnB (orientador)
Prof^a. Dr^a. Natalia Hauser – UnB
Prof. Dr. Nilson Francisquini Botelho – UnB
Prof^a. Dr^a. Maria Cristina Motta de Toledo – USP
Prof. Dr. Reiner Neumann – CETEM**

**BRASÍLIA/DF
2015**

*À minha querida avó Cida (in memoriam):
Seu sorriso de incentivo,
Suas batalhas vitoriosas,
E nossas saudades.*

*Eu te ofereço esta flor,
Uma rosa amarela.*

AGRADECIMENTOS

Aos Pais Celestiais, por me agradecerem com a concretização deste sonho. Ao meu caríssimo orientador José Affonso Brod, que confiou em minha capacidade e sempre manteve essa confiança; por seu incentivo, por sua disposição em estar ao meu lado, por sempre me mostrar uma nova forma de pensar e, é claro, por toda a bagagem que tem me transmitido em dez anos de convívio repletos de aprendizado. À Vale Fertilizantes, por permitir o desenvolvimento desta pesquisa. À estimada Evangelina Maria Apparicio, com quem eu tive a boa sorte de encontrar pelo caminho, a partir de quando foi sendo contruída uma relação de amizade e também profissional; sem sua compreensão, incentivo e admiração eu não sei ao certo como teria chegado até aqui. Ao Vicente Lobo, por ter me inserido no Projeto Sílico-Carbonatado de Araxá, e me autorizado a dar início a este trabalho. Aos professores Nilson Francisquini Botelho e Maria Emilia Schutesky Della Giustina, por suas contribuições durante o desenvolvimento deste trabalho e que, conhecendo as minhas dificuldades de conciliar a tese com o trabalho na empresa, estiveram confiantes e dispostos a ajudar. Ao Luiz Antônio Fonseca de Barros, experiente engenheiro de processo mineral, a quem eu devo a maior parte do aprendizado desse ramo da ciência; agradeço por sua paciência e disposição constante, mantendo-se firme no propósito de desenvolver meus conhecimentos nessa área. À Angela Avelar, que em momento algum hesitou em me ajudar; por sua boa vontade, presença firme, conhecimento de mineralogia e tranquilidade transmitidos. Ao Eliomar Ferreira, pelos ensinamentos de caracterização tecnológica e engenharia de processo mineral. De uma forma geral, a todos os membros do Projeto Sílico-Carbonatado, pela troca de conhecimentos e vivências. Ao Reginaldo Medeiros, que coloriu esse período difícil com amor e com sua companhia, paciência maior do que eu esperava, e pelos precisos conselhos fornecidos a mim em momentos críticos do andamento deste trabalho, conselhos que só poderiam ser fornecidos por alguém com a capacidade de restaurar a cadência à medida que as dificuldades surgem. À Taiane Schaedler Prass, pelos estudos de modelagem estatística e por sua dedicada atenção com minhas incansáveis dúvidas. À consultora e professora Lília San't Agostino, por seus extensos ensinamentos na área de caracterização mineral. Ao Luciano Capponi, pelas discussões enobecedoras. Ao Carlos Cordeiro Ribeiro, por suas contribuições. Ao José Luiz Cardoso, pelos entusiasmados esclarecimentos sobre os fertilizantes. À minha mãe, irmã, sobrinho, pai, irmão e família, pelo amor, incentivo e orgulho perenes. À União Estrela Guia, meu alicerce, e aos irmãos, pela rica amizade. Àqueles que por minha limitação de memória não estão citados aqui, mas que contribuíram com o êxito deste trabalho, deixo aqui registrado o meu profundo agradecimento.

RESUMO

Os complexos plutônicos da Província Ígnea do Alto Paranaíba possuem as maiores reservas brasileiras de fosfato, além das maiores reservas mundiais de nióbio, jazidas de classe mundial de monazita e anatásio, e depósitos importantes de vermiculita, barita, magnetita. A mina de fosfato do Barreiro, no complexo de Araxá, tem sido lavrada há quatro décadas. O minério inicialmente explotado foi uma porção oxidada e mais homogênea, localizada na parte superior do manto de intemperismo. Com o aprofundamento da cava, a lavra aproximou-se da rocha fresca, acarretando diminuição dos teores dos minérios e, conseqüentemente, queda de rendimento mássico, o que gerou impactos significativamente negativos na produção de concentrados fosfáticos. As operações em Araxá possuem crescente necessidade de beneficiar os minérios da base do manto de intemperismo, de forma a ampliar a vida útil da mina do Barreiro. Tais minérios possuem características fortemente associadas aos seus protolitos, devido à aproximação com a rocha fresca. O estudo de geologia foi iniciado com o reconhecimento dos protolitos. Observou-se uma associação estreita entre rochas bebedouríticas, foscoríticas e carbonatíticas, que foram classificadas em macrogrupos de acordo com as principais associações observadas em campo e em testemunhos de sondagem. O estudo da evolução mineralógica foi feito por macrogrupo de protolitos nos distintos horizontes da base do manto de intemperismo. O minério na rocha alterada possui uma assembleia de minerais primários complexa, e quantidades pouco expressivas de minerais supergênicos. O minério micáceo de base é caracteristicamente livre de carbonatos e apresenta maiores quantidades de minerais supergênicos, como anatásio, goethita, quartzo e filossilicatos interestratificados, comparativamente à rocha alterada. No minério micáceo de topo, diopsídio e flogopita foram completamente eliminados e a assembleia de minerais supergênicos torna-se mais expressiva. O comportamento geometalúrgico dos minérios estudados é fortemente dependente de seus respectivos protolitos e horizontes de intemperismo. Análises estatísticas multivariadas por principais componentes e regressão linear foram utilizadas para elaboração de modelos geometalúrgicos. O comportamento geometalúrgico, uma vez considerado no planejamento de lavra, subsidia a área de engenharia de processos na busca de melhorias ou adequações operacionais e de processo mineral para obtenção de melhores rendimentos mássicos e recuperações metalúrgicas de P_2O_5 . Os modelos geometalúrgicos foram aplicados em modelos de blocos tridimensionais, de forma que as variáveis geometalúrgicas e suas variações tornam-se espacialmente definidas e podem ser utilizadas no planejamento de lavra, para obtenção de resultados que melhor se adequem aos planos de produção de concentrados fosfáticos e fertilizantes.

ABSTRACT

The plutonic complexes of the Alto Paranaíba Igneous Province contain the largest Brazilian reserves of phosphate, in addition to the world's largest reserves of niobium, world-class deposits of monazite and anatase and important vermiculite, barite and magnetite deposits. The Barreiro phosphate mine, in the Araxá complex, has been exploited during the last four decades. The ore initially mined was an strongly oxidized, relatively homogeneous portion of the top of the weathering profile. With the deepening of the pit, mining approached the fresh rock, leading to decreasing ore grades and decline of mass recovery, which led to significant negative impacts on the production of phosphate concentrate. The operations at Araxá have a growing need to process ores from the base of weathering profile in order to extend the life of mine. This type of ore has characteristics strongly dependent on the fresh-rock protoliths (proto-ores). This geological study started with the recognition of protoliths. There is a close association between bebedourite, phoscorite and carbonatite rocks, which were classified into macrogroups according to the main associations observed in the field and in drill core. The study of the mineralogical evolution was carried out on each protolith macrogroups at different horizons within the base of the weathering profile. The altered rock has a complex assembly of primary minerals, and no significant quantities of supergene minerals. The lower micaceous ore is characteristically free of carbonates and has greater amounts of supergene minerals such as anatase, goethite, quartz and interstratified phyllosilicates. In the upper micaceous ore, diopside and phlogopite were completely eliminated and the assembly of supergene minerals becomes more expressive. The geometallurgical behavior of the studied ores is heavily dependent on their protoliths and weathering horizons. Multivariate statistical analyses of principal components and linear regression were used to elaborate geometallurgical models. The geometallurgical behavior, once considered in mine planning, subsidizes the process engineering in the quest for improvements or operational and ore-processing adjustments for achieving better mass and P_2O_5 recoveries. The geometallurgical models were applied in a three dimensional block model, so that the geometallurgical variables and their variations become spatially defined and can be used in mining engineering, for results best suited to phosphate concentrates and fertilizers production plans.

ÍNDICE

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	21
1.1. INTRODUÇÃO	22
1.2. OBJETIVOS	23
1.3. SÉRIES PETROGENÉTICAS EM COMPLEXOS ALCALINO-CARBONATÍTICOS	24
1.4. ORIGEM E EVOLUÇÃO DOS MAGMAS CARBONATÍTICOS	28
1.5. MINERALIZAÇÕES ASSOCIADAS A COMPLEXOS CARBONATÍTICOS.....	30
1.6. DEPÓSITOS DE FOSFATO EM COMPLEXOS CARBONATÍTICOS BRASILEIROS...	32
1.7. O MANTO DE INTEMPERISMO EM COMPLEXOS CARBONATÍTICOS	38
1.8. O COMPLEXO DE ARAXÁ	42
1.9. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINÉRIOS	48
1.10. A GEOMETALURGIA	53
1.11. O BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO FOSFÁTICO	57
1.12. FERTILIZANTES NPK.....	60
1.13. MATERIAIS E MÉTODOS.....	63
CAPÍTULO II - OS PROTOLITOS DO BARREIRO	67
2.1. INTRODUÇÃO.....	68
2.2. SÉRIE BEBEDOURÍTICA	68
2.3. SÉRIE CARBONATÍTICA	76
2.4. SÉRIE FOSCORÍTICA	83
2.5. MACROGRUPOS DE PROTOLITOS	88
CAPÍTULO III - A BASE DO MANTO DE INTEMPERISMO.....	90
3.1. INTRODUÇÃO.....	91
3.2. NOMENCLATURA PRATICADA NAS OPERAÇÕES DE FOSFATO DA PROVÍNCIA	93
3.3. CARACTERIZAÇÃO MINERAL DE TESTEMUNHOS DE SONDADEGEM	95
3.4. EVOLUÇÃO GEOQUÍMICA DA BASE DO MANTO DE INTEMPERISMO	108
3.5. CARACTERIZAÇÃO MINERAL DE AMOSTRAS VOLUMÉTRICAS	117
3.6. GÊNESE DA MINERALIZAÇÃO DE APATITA DE ARAXÁ.....	136

CAPÍTULO IV - GEOMETALURGIA	141
4.1 INTRODUÇÃO.....	142
4.2 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE TESTEMUNHOS DE SONDAGEM.....	143
4.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS MULTIVARIADAS	183
4.4 MODELO GEOMETALÚRGICO 3D	233
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES	243
5.1 CONCLUSÕES.....	244
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	249
LISTA DE ANEXOS	261

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.1: Classificação das rochas da série ijolítica, segundo Le Maitre (2002). 25
- Figura 1.2: Classificação das rochas da série bebedourítica, segundo Brod et al. (2004). 26
- Figura 1.3: Classificação das rochas da série foscorítica, segundo Yegorov (1993). 27
- Figura 1.4: Diagrama de classificação química para carbonatitos, segundo Woolley e Kempe (1989). 28
- Figura 1.5: Localização dos complexos alcalino-carbonatíticos com depósitos de fosfato no Brasil. 33
- Figura 1.6: Mapa geológico da Província Ígnea do Alto Paranaíba (APIP). Adaptado de Oliveira et al. (2004), com a localização dos complexos plutônicos alcalino-carbonatíticos. 36
- Figura 1.7: Mapa geológico do Complexo de Araxá (modificado de Silva et al., 1979). 45
- Figura 1.8: Mapa da mina do Barreiro com a localização dos testemunhos de sondagem amostrados nesta tese (círculos azuis). A linha marrom representa o limite do domo de Araxá; as linhas cinza são as curvas de nível da mina do Barreiro. Coordenadas métricas locais. 63
- Figura 2.1: Composição mineralógica dos bebedouritos da mina do Barreiro. (A) Diagrama de classificação modificado de Brod et al. (2004) mostrando as amostras estudadas de bebedouritos (círculos verdes) e anfibólio bebedouritos (círculos vermelhos) e os campos de bebedouritos evoluídos (em azul) e bebedouritos primitivos (em rosa) de Tapira (Brod, 1999) e Salitre I (Barbosa et al., 2012a); olivina perovskititos (em amarelo) e dunitos (em verde) de Serra Negra (Grasso, 2010). (B) Composição modal das amostras estudadas. Outros: pirita, anatásio, clorita e serpentina. 70
- Figura 2.2: Características texturais e mineralógicas macroscópicas dos bebedouritos flogopitizados. A) Amostra AB67 100 m: bebedourito flogopitizado médio, cortado por veios milimétricos de carbonato; B) Amostra SC35 68 m: bebedourito grosso, formado por diopsídio, magnetita e apatita cumulus; C) Amostra CMA-BAR-DH-157 25.7 m: bebedourito flogopitizado com olivina cumulus milimétrica, cortado por veios milimétricos a centimétricos de carbonato; D) Amostra CMA-BAR-DH-158 50.80 m: contato entre bebedourito (rocha verde) e carbonatito (rocha branca), marcado por desenvolvimento de tetraferroflogopita metassomática. Ap: apatita; Cbn: carbonatos; Diop: diopsídio; Flog: flogopita; Mag: magnetita; Ol: olivina; TFF: tetraferroflogopita. 71
- Figura 2.3: Características texturais e mineralógicas microscópicas dos bebedouritos. A) Amostra AB67 100 m: fenocristal de olivina serpentinizada, polarizadores paralelos; B) Amostra SC26 79 m: diopsídio cumulus e flogopita subédrica, polarizadores paralelos; C) Amostra SC40 56 m: núcleos preservados de flogopita aluminosa envolvidos por bordas de tetraferroflogopita, polarizadores paralelos; D) Amostra AB67 100 m: bebedouritos cortado por veio submilimétrico de carbonato. Notar que o contato entre o bebedourito e o veio

é marcado por desenvolvimento de tetraferri-flogopita, polarizadores paralelos; E) Amostra CP10 0080 34 m: bandas de carbonato, apatita e de tetraferri-flogopita; a última em contato com olivina, polarizadores paralelos; F) substituição parcial de flogopita por clorita, polarizadores paralelos. Ap: apatita; Cbn: carbonatos; Clo: clorita; Diop: diopsídio; Flog: flogopita; Mag: magnetita; Ol: olivina; TFF: tetraferri-flogopita..... 73

Figura 2.4: Características texturais e mineralógicas macroscópicas dos anfibólio bebedouritos. A) Amostra RD5 62.3 m: anfibólio bebedourito fino, parcialmente alterado; B) Amostra RF9 70.5 m: anfibólio bebedourito fino cortado por veios milimétricos de carbonato. Cbn: carbonatos; Diop: diopsídio; Flog: flogopita; Mag: magnetita; Rich: richterita. 74

Figura 2.5: Características texturais e mineralógicas microscópicas dos anfibólio bebedouritos. A) Amostra RF9 70.5 m: cristais cumulus de diopsídio em contato com bolsões de apatita, polarizadores paralelos; B) Amostra RF9 70.5 m: núcleo preservado de diopsídio, com borda transformada para richterita, polarizadores paralelos; C) Amostra SR09-024 58 m: flogopita intercumulus associada a diopsídio, polarizadores paralelos; D) Amostra RF9 70.5: detalhe de um cristal euédrico de titanita, polarizadores paralelos; E) Amostra RF9 70.5 m: bolsão milimétrico de apatita, polarizadores paralelos; F) Amostra RD5 62.3 m: bebedourito anfibolitizado cortado por dique de carbonato com apatita em suas bordas, polarizadores cruzados. Ap: apatita; Cbn: carbonatos; Diop: diopsídio; Flog: flogopita; Rich: richterita; Tit: titanita. 75

Figura 2.6: Composição mineralógica dos carbonatitos da mina do Barreiro. (A) Diagrama de classificação de Woolley e Kempe (1989) mostrando as amostras de dolomita carbonatito (círculos verdes) e de calcita carbonatitos (círculos vermelhos) e os campos dos dolomita carbonatitos (em azul) e dos calcita carbonatitos (em rosa) de Tapira, Salitre I e Catalão I. Os dados dos carbonatitos da APIP são de Araújo (1996), Brod (1999), Traversa et al. (2001), Gomes e Comin-Chiaramonti (2005), Barbosa (2012b) e Cordeiro et al. (2010). (B) Composição modal das amostras estudadas. CC: calcita carbonatitos; DC: dolomita carbonatitos. TFF: tetraferri-flogopita. Outros: Pirrotita, pirita, monazita, barita e clorita..... 77

Figura 2.7: Características texturais e mineralógicas macroscópicas dos calcita carbonatitos. A) Amostra MS172 110 m: carbonatito fino com expressivo bandamento magmático marcado por magnetita; B) Amostra CMA-BAR-DH-161 26.4 m: porção nelsonítica em calcita carbonatito, formada por magnetita e apatita euédricas e carbonato intersticial. Notar banda centimétrica de apatita. Ap: apatita; Cbn: carbonatos; Mag: magnetita; TFF: tetraferri-flogopita..... 78

Figura 2.8: Características texturais e mineralógicas microscópicas dos calcita carbonatitos. A) Amostra MS 172 110 m: cristais cumulus de apatita arredondados e orientados na direção de fluxo magmático em contato com tetraferri-flogopita, polarizadores paralelos; B) Amostra MS 172 110 m: apatita cumulus alongada em contato com carbonato muito fino, polarizadores paralelos; C) Amostra CMA-BAR-DH161 26.4 m: cristais finos de tetraferri-flogopita associados à banda rica em apatita, polarizadores paralelos; D) Amostra CMA-BAR-DH161 26.4 m: detalhe de um cristal milimétrico de apatita fraturado, polarizadores paralelos; E) Amostra MS 172 110 m: banda com predomínio de apatita alongada e arredondada, orientada na direção do fluxo magmático, polarizadores cruzados; F) Amostra CMA-BAR-DH161 39.9 m: apatita intersticial em contato com cristais subédricos de carbonato, polarizadores cruzados. Ap: apatita; Cbn: carbonatos; TFF: tetraferri-flogopita..... 79

Figura 2.9: Características texturais e mineralógicas macroscópicas dos dolomita carbonatitos. A) Amostra CMA-BAR-DH-151 65.4 m: carbonatito de textura média com bolsões de pirita; B) Amostra CMA-BAR-DH-152 37 m: contato reto entre foscorito (à esquerda, coloração cinza) e carbonatito (à direita, coloração branca). Cbn: carbonatos; Mag: magnetita; Pir: pirita; TFF: tetraferri-flogopita. 80

Figura 2.10: Características texturais e mineralógicas microscópicas dos dolomita carbonatitos. A) Amostra SC06 52 m: carbonato euédrico e apatita grossa, ambos dispersos na rocha, polarizadores cruzados; B) Amostra SC06 52 m: detalhe de um cristal cumulus de tetraferri-flogopita associado à magnetita intercumulus, polarizadores paralelos; C) Amostra SC06 52 m: cristais de apatita com núcleos diferentes das bordas, e magnetita cumulus, polarizadores cruzados; D) Amostra SC06 52 m: magnetita cumulus e pirocloro zonado, polarizadores paralelos; E) Amostra CMA-BAR-DH151 65.4 m: bolsões de barita em formato irregular, associados a carbonatos, polarizadores cruzados; F) amostra SR09-022 128 m: tetraferri-flogopita substituída parcialmente por clorita, polarizadores paralelos. Ap: apatita; Bar: barita; Cbn: carbonatos; Clo: clorita; Mag: magnetita; Pc: pirocloro; TFF: tetraferri-flogopita. 82

Figura 2.11: Composição mineralógica dos foscoritos. (A) Diagrama de classificação de Yegorov (1993) mostrando as amostras de foscoritos ricos em olivina (círculo verde), foscoritos pobres em olivina (círculo vermelho) e nelsonitos (círculo rosa); o campo dos foscoritos de Catalão I, Catalão II e Salitre em laranja (Ribeiro, 2008; Cordeiro, 2011b; Barbosa, 2012b; Palmieri, 2011) e o campo dos cumulados nelsoníticos de Serra Negra em roxo (Grasso, 2010). (B) composição modal das amostras estudadas. FCR: foscorito; NEL: nelsonito. Outros: piritita, clorita e serpentina. 84

Figura 2.12: Características texturais e mineralógicas macroscópicas dos foscoritos. A) Amostra SR9-15 99 m: foscorito rico em olivina, flogopitizado e cortado por veios milimétricos de carbonato; B) Amostra SR9-15 97.2 m: foscorito pobre em olivina, maciço, com textura grossa; C) Amostra CMA-BAR-DH-151 67 m: foscorito pobre em olivina, maciço, com um bolsão centimétrico de dolomita (canto inferior esquerdo), bordado por cristais euédricos de magnetita; D) Amostra CMA-BAR-DH-152 37.4 m: foscorito pobre em olivina, inequigranular, com cristais euédricos de tetraferri-flogopita associados à magnetita, além de apatita e veios milimétricos de carbonato. 85

Figura 2.13: Características texturais e mineralógicas microscópicas dos foscoritos. A) Amostra SR09-15 98 m: fenocristais de olivina preservados, associados à apatita cumulus e à flogopita com bordas alteradas para tetraferri-flogopita, polarizadores paralelos; B) Amostra SR09-15 98 m: fenocristal de olivina cloritizada com borda alterada para tetraferri-flogopita, polarizadores paralelos; C) Amostra CMA-BAR-DH151 67 m: tetraferri-flogopita subédrica, polarizadores paralelos; D) Amostra CMA-BAR-DH152 37.4 m: detalhe de bolsão submilimétrico de apatita, polarizadores cruzados; E) Amostra SC01 35 m: aspecto geral da estrutura maciça do nelsonito, polarizadores paralelos; F) Amostra SC01 35 m: cristais euédricos de pirocloro associados à tetraferri-flogopita cumulus e magnetita cumulus a intercumulus, polarizadores paralelos. Ap: apatita; Cbn: carbonatos; Flog: flogopita; Mag: magnetita; Ol: olivina; Pc: pirocloro; TFF: tetraferri-flogopita. 87

Figura 2.14: Distribuição dos macrogrupos de protolitos na mina do Barreiro. A linha marrom representa o limite do domo de Araxá; as linhas cinza são as curvas de nível da mina do Barreiro. Coordenadas métricas locais. 89

Figura 3.1: Perfil de intemperismo esquemático do Complexo de Catalão I proposto por Oliveira & Imbernon (1998), à esquerda; perfil de intemperismo esquemático de Araxá com as divisões e subdivisões propostas nesta pesquisa, e espessura média, mínima e máxima de cada intervalo, à direita. A feição quadriculada no manto de intemperismo do Barreiro representa a perda gradual das estruturas e texturas da rocha fresca com a evolução do intemperismo. 92

Figura 3.2: Imagens eletrônicas por elétrons retroespalhados dos minerais e suas texturas em amostras de testemunhos de sondagem do macrogrupo de protolito BEB/CC. A) Apatita bem formada, com textura lisa, e cimento de quartzo em fraturas - amostra CMA-BAR-DH149 9 a 20.85 m, rocha alterada; B) Grão de apatita formado por apatita rica em Sr (porções claras) e sem Sr (porções escuras), indicando dissolução parcial da

apatita residual - amostra CMA-BAR-DH149 9 a 20.85 m, rocha alterada; C) Associação entre anatásio, barita e apatita porosa na amostra CMA-BAR-DH156 7.1 a 13.75 m, micáceo de base; D) Aspecto esquelético da goethita - amostra CP10-042 41.55 a 51.55 m, micáceo de base; E) Filossilicato interestratificado com gorceixita formada entre seus planos de clivagem - Amostra CMA-BAR-DH149 0 a 9 m, micáceo de topo; F) Goethita e hollandita formando textura intrincada de recristalização - amostra CMA-BAR-DH149 0 a 9 m, micáceo de topo. An: anatásio; Ap: apatita; Bar: barita; Fil: filossilicato interestratificado; Goe: goethita; Gor: gorceixita; Hol: hollandita; Mag: magnetita; Pc: pirocloro; Qtz: quartzo..... 99

Figura 3.3: Imagens eletrônicas por elétrons retroespalhados dos minerais e suas texturas em amostras de testemunhos de sondagem do macrogrupo de protolito ANF BEB/CC. A) Monazita fina e porosa cortando grão de apatita primária - amostra SR10-034 30 a 43.35 m, rocha alterada; B) Apatita secundária formando cimento entre grãos de quartzo e flogopita - amostra SR10-034 30 a 43.35, rocha alterada; C) Detalhe de um grão de feldspato potássico, com lamelas de feldspato sódico - amostra SR09-038 13.70 a 37.70 m, micáceo de base; D) Quartzo preenchendo interstícios e fraturas formados possivelmente a partir da dissolução de calcita - amostra SR09-038 13.70 a 37.70 m, micáceo de base; E) Grão de richterita com bordas parcialmente corroídas, indicativas de alteração parcial - amostra SR10-034 14 a 30 m, micáceo de topo; F) Forte associação textural entre quartzo e monazita - amostra SR10-034 14 a 30 m, micáceo de topo. Ap: apatita; Diop: diopsídio; Flog: flogopita; K felds: feldspato potássico; Mon: monazita; Na felds: feldspato sódico; Qtz: quartzo; Rich: richterita; Verm: vermiculita..... 101

Figura 3.4: Imagens eletrônicas por elétrons retroespalhados dos minerais e suas texturas em amostras de testemunhos de sondagem do macrogrupo de protolito BEB/DC. A) Associação textural entre anatásio e estroncianita - amostra MB59 71.40 a 84.40 m, rocha alterada; B) gorceixita e apatita com textura fina e porosa - amostra MB59 62.5 a 71.40 m, rocha alterada; C) Provável textura cumulus de diopsídio com apatita intercumulus, cortados por um fino veio de calcita, protegida do intemperismo pelos minerais mais resistentes - amostra CP10-0018 31.70 a 43.40 m, micáceo de base; D) Feição textural reliquiar do protolito, gerada por substituição de flogopita por tetraferroflogopita nas bordas e planos de clivagem - amostra MS118 44,50 a 59,50 m, micáceo de base; E) Apatita secundária formando cimento entre fraturas de grãos primários - amostra MS118 29,50 a 44,50 m, micáceo de topo; F) Associação entre anatásio e goethita indicando possível formação de anatásio a partir da alteração metassomática da ilmenita - amostra MS118 29,50 a 44,50 m, micáceo de topo. An: anatásio; Ap: apatita; Ca: calcita; Calz: calzirtita; Diop: diopsídio; Dol: dolomita; Flog: flogopita; Goe: goethita; Gor: gorceixita; Ilm: ilmenita; Qtz: quartzo; Rich: richterita; Sr-Ap: estrôncio apatita; TFF: tetraferroflogopita; Verm: vermiculita..... 104

Figura 3.5: Imagens eletrônicas por elétrons retroespalhados dos minerais e suas texturas em amostras de testemunhos de sondagem do macrogrupo de protolito FCR/DC. A) Detalhe de um grão euédrico de dolomita proveniente de dolomita carbonatito - amostra SC04 25.8 a 30.8 m, rocha alterada; B) Grão euédrico de dolomita do lado inferior esquerdo da figura, e goethita com aspecto poroso, acima e à direita, produto típico da remobilização de Fe durante o intemperismo - amostra SC04 25.8 a 30.8 m, rocha alterada; C) Grãos de apatita, cujas porções mais escuras, com carência de estrôncio, evidenciam alteração incipiente da apatita. Lado esquerdo da imagem: espaços vazios acentuados no interior dos grãos de filossilicatos interestratificados - amostra SC04 9.3 a 18 m, micáceo de base; D) Apatita secundária formando um cimento entre grãos no centro da imagem - amostra SC04 9.3 a 18 m, micáceo de base; E) Apatita com um aspecto rugoso, na região central da imagem, indica alteração supergênica que libera fósforo - amostra CMA-BAR-DH0160 40 a 49.55 m, micáceo de topo; F) Grão neoformado de óxidos/hidróxidos de Fe - amostra CMA-BAR-DH0160 40 a 49.55 m, micáceo de topo. An: anatásio; Ap: apatita; Ca: calcita; Calz: calzirtita; Diop: diopsídio; Dol: dolomita; Flog: flogopita; Goe: goethita; Gor: gorceixita; Ilm: ilmenita; Qtz: quartzo; Rich: richterita; Sr-Ap: estrôncio apatita; TFF: tetraferroflogopita; Verm: vermiculita..... 107

Figura 3.6: Variação nos conteúdos médios de P_2O_5 , Na_2O , SiO_2 e SrO da apatita por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo..... 108

- Figura 3.7: Variações dos teores médios dos principais óxidos e carbono analisados em amostras de testemunhos de sondagem, por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo..... 116
- Figura 3.8: Mapa da mina do Barreiro com a localização dos pontos de coleta das 5 amostras volumétricas. Cada círculo cheio representa um incremento formador da amostra volumétrica. A linha marrom representa o limite do domo de Araxá; as linhas cinza são as curvas de nível da mina do Barreiro. Coordenadas métricas locais..... 118
- Figura 3.9: Aspectos geológicos de campo das cinco amostras volumétricas. A) Amostra AV-1: BEB/DC no horizonte micáceo de topo cortado por veios de óxidos de manganês, derivados da alteração de dolomita carbonatitos. B) Amostra AV-2: detalhe de BEB/DC no horizonte micáceo de base. A coloração verde é devida à abundância de diopsídio. C) Amostra AV-3: ANF BEB/CC no horizonte micáceo de base com variação no silicato predominante: anfibólio (porção cinza) e flogopita/vermiculita (porção marrom alaranjada). D) Amostra AV-4: BEB/CC no horizonte rocha alterada. Observa-se claramente a relação entre o bebedourito encaixante e os diques de calcita carbonatito associados. E) Amostra AV-5: FCR/DC com magnetita grossa, horizonte rocha alterada, aflorante no piso da mina do Barreiro..... 119
- Figura 3.10: Imagens eletrônicas por elétrons retroespalhados das amostras volumétricas. A) Grão formado por magnetita, apatita, titanita, ilmenita e vermiculita intersticial, amostra AV-1. B) Grão formado por apatita residual com textura lisa, associada a goethita, hollandita e crandallita desenvolvidos nas porções mais porosas do grão, amostra AV-1; C) Filossilicatos interestratificados e flogopita, amostra AV-2. D) Grão característico do horizonte micáceo de base, com estreita relação textural entre apatita, flogopita, anatásio e goethita, amostra AV-2. E) Grão de apatita com fraturas e interstícios preenchidos por goethita, amostra AV-3. F) Grão de apatita com fraturas preenchidas por quartzo, amostra AV-3. Legenda: An: anatásio; Ap: apatita; Cra: crandallita; fil: filossilicato interestratificado; Flog:flogopita; Flog: flogopita; Goe: goethita; Hol: hollandita; Ilm: ilmenita; Mag: magnetita; Qtz: quartzo; Rich: richterita, Tit: titanita; Verm: vermiculita. 126
- Figura 3.11: Imagens eletrônicas por elétrons retroespalhados das amostras volumétricas. A) Cristal de calcita com pequenas exsoluções de estroncianita, indicando recristalização subsolidus, amostra AV-4. B) Grão formado predominantemente por apatita associada a carbonatos, amostra AV4. C) Grão de goethita porosa associada com apatita e barita residuais, e grãos livres de calcita e flogopita, amostra AV-5. D) Grão formado por minerais residuais e bem formados, amostra AV-5. Legenda: Ap: apatita; Bar: barita; Ca: calcita; Dol: dolomita; Est: estroncianita; Flog: flogopita; Goe: goethita; Mag: magnetita..... 131
- Figura 3.12: Gráficos de liberação da apatita por faixa granulométrica das amostras AV-1, AV-2, AV-3, AV-4 e AV-5. A legenda indica as percentagens de partículas monominerálicas de apatita em cada amostra. .. 135
- Figura 3.13: Esquema de evolução de Ribeiro et al. (2014), adaptado para as séries magmáticas no Complexo de Araxá, e suas mineralizações. Em verde: série bebedourítica; em rosa: série foscorítica; em amarelo: série carbonatítica. 140
- Figura 4.1 – Fluxograma da preparação das amostras de testemunhos de sondagem para ensaios de flotação. ROM: minério *run of mine* (minério tal qual). 144
- Figura 4.2 – Fluxograma das etapas de flotação em bancada..... 146

Figura 4.3: Valores médios das variáveis obtidas na etapa de preparação de amostras de testemunhos de sondagem para os ensaios de flotação, por macrogrupo de protólito e horizonte de intemperismo (M_I). Pas_106 T=0: material passante em 106 µm antes da moagem; Massa Grosso: massa da fração não magnética classificada acima de 44 µm; Massa Fino: massa da fração não magnética classificada abaixo de 44 µm; P ₂ O ₅ grosso: P ₂ O ₅ da fração não magnética classificada acima de 44 µm; P ₂ O ₅ fino: P ₂ O ₅ da fração não magnética classificada abaixo de 44 µm.....	150
Figura 4.4: Estatísticas descritivas da alimentação de grossos global (sem separação por grupo M_I). A) Histograma de frequências das massas de ALFG global; B) Histograma de frequência dos teores de P ₂ O ₅ de ALFG global.....	153
Figura 4.5: Diferenças (DIF) entre os conteúdos médios dos principais óxidos na ALFG e ROM por macrogrupo de protólito e horizonte de intemperismo. Valores negativos indicam empobrecimento do óxido na ALFG em relação ao minério ROM, e valores positivos, enriquecimento.....	159
Figura 4.6: Valores médios dos resultados de composição mineralógica obtidos por QEMSCAN para as amostras de alimentação da flotação de grossos (ALFG) provenientes de testemunhos de sondagem, por macrogrupo de protólito e por horizonte de intemperismo.	161
Figura 4.7: A) Histograma de frequências das massas de ALFF global. B) Histograma de frequência dos teores de P ₂ O ₅ de ALFF global.....	162
Figura 4.8: Diferenças entre os conteúdos médios dos principais óxidos em ALFF e ROM por macrogrupo de protólito e horizonte de intemperismo. Valores negativos indicam empobrecimento do óxido na ALFF em relação ao minério ROM, e valores positivos, enriquecimento.....	167
Figura 4.9: Valores médios dos resultados de composição mineralógica obtidos por QEMSCAN pra as amostras de alimentação da flotação de finos (ALFF) provenientes de testemunhos de sondagem, por macrogrupo de protólito e por horizonte de intemperismo.	169
Figura 4.10: Variações dos teores médios dos principais óxidos analisados em amostras de concentrados de grossos (CG), por macrogrupo de protólito e horizonte de intemperismo.	174
Figura 4.11: Variações dos teores médios dos principais óxidos analisados em amostras de concentrados de finos (CF), por macrogrupo de protólito e horizonte de intemperismo.	177
Figura 4.12: Variações de rendimentos mássicos e recuperações metalúrgicas obtidas nos ensaios tecnológicos, por macrogrupo de protólito e horizonte de intemperismo. G: grossos; F: finos.....	182
Figura 4.13: Projeção das variáveis analisadas no plano de coordenadas fator 1 <i>versus</i> fator 2.....	185
Figura 4.14: Autovalores da matriz de covariância.....	186
Figura 4.15: Projeção dos grupos M_I no plano fator 1 <i>versus</i> fator 2. I. Os polígonos rosa delimitam os protólitos. M_I=1, 2, 3, 7, 8 e 9: BEB/CC e BEB/DC; M_I=4, 5 e 6: ANF BEB/CC; M_I=10, 11 e 12:	

FCR/DC. Os polígonos azuis delimitam os horizontes de intemperismo: M_I=1, 4, 7 e 10: horizonte micáceo de topo; M_I=2, 5, 6, 8 e 11: micáceo de base (M_I=6 foi incorporado ao micáceo de base devido ao seu baixo conteúdo de carbonatos); M_I=3, 9 e 12: rocha alterada.....	190
Figura 4.16: Projeção das variáveis utilizadas na segunda análise no plano de coordenadas fator 1 <i>versus</i> fator 2.	191
Figura 4.17: Mapa das assinaturas geoquímicas da primeira principal componente (PC1).....	195
Figura 4.18: Mapa das assinaturas geoquímicas da segunda principal componente (PC2).....	196
Figura 4.19: Valores preditos pelo modelo de regressão linear <i>versus</i> valores observados para o grupo APC_P=1 (BEB/CC e BEB/DC). Linhas roxas pontilhadas: intervalo de confiança de 95%.	204
Figura 4.20: Valores preditos pelo modelo de regressão linear <i>versus</i> resíduos para o grupo APC_P=1 (BEB/CC e BEB/DC).....	205
Figura 4.21: Teste de normalidade para os resíduos dos modelos de regressão linear do grupo APC_P=1 (BEB/CC e BEB/DC). Linha roxa: distribuição normal.	206
Figura 4.22: Valores preditos pelo modelo de regressão linear <i>versus</i> valores observados para o grupo APC_P=2 (ANF BEB/CC). Linhas roxas pontilhadas: intervalo de confiança de 95%.....	209
Figura 4.23: Valores preditos pelo modelo de regressão linear <i>versus</i> resíduos para o grupo APC_P=2 (ANF BEB/CC).....	210
Figura 4.24: Teste de normalidade para os resíduos dos modelos de regressão linear do grupo APC_P=2 (ANF BEB/CC). Linha roxa: distribuição normal.....	211
Figura 4.25: Valores preditos pelo modelo de regressão linear <i>versus</i> valores observados para o grupo APC_P=3 (FCR/DC). Linhas roxas pontilhadas: intervalo de confiança de 95%.....	215
Figura 4.26: Valores preditos pelo modelo de regressão linear <i>versus</i> resíduos para o grupo APC_P=3 (FCR/DC).	216
Figura 4.27: Teste de normalidade para os resíduos dos modelos de regressão linear do grupo APC_P=3 (FCR/DC). Linha roxa: distribuição normal.....	217
Figura 4.28: Valores preditos pelo modelo de regressão linear <i>versus</i> valores observados para o grupo APC_I=1 (MT). Linhas roxas pontilhadas: intervalo de confiança de 95%.....	220
Figura 4.29: Valores preditos pelo modelo de regressão linear <i>versus</i> resíduos para o grupo APC_I=1 (MT).	221

Figura 4.30: Teste de normalidade para os resíduos dos modelos de regressão linear do grupo APC_I=1 (MT). Linha roxa: distribuição normal.....	222
Figura 4.31: Valores preditos pelo modelo de regressão linear <i>versus</i> valores observados para o grupo APC_I=2 (MB). Linhas roxas pontilhadas: intervalo de confiança de 95%.....	225
Figura 4.32: Valores preditos pelo modelo de regressão linear <i>versus</i> resíduos para o grupo APC_I=2 (MB).	226
Figura 4.33: Teste de normalidade para os resíduos dos modelos de regressão linear do grupo APC_I=2 (MB). Linha roxa: distribuição normal.....	227
Figura 4.34: Valores preditos pelo modelo de regressão linear <i>versus</i> valores observados para o grupo APC_I=3 (RA). Linhas roxas pontilhadas: intervalo de confiança de 95%.....	230
Figura 4.35: Valores preditos pelo modelo de regressão linear <i>versus</i> resíduos para o grupo APC_I=3 (RA).	231
Figura 4.36: Teste de normalidade para os resíduos dos modelos de regressão linear do grupo APC_I=3 (RA). Linha roxa: distribuição normal.	232
Figura 4.37: Projeção dos grupos M_I no plano fator 1 <i>versus</i> fator 2 utilizado para carimbar dos atributos de protolito e horizonte de intemperismo no modelo de blocos. A reta vermelha indica o limite aplicado para separação de APC_P=1 e APC_P=2.	234
Figura 4.38: Modelo de recursos da mina do Barreiro com carimbo de APC_I. Cota: 1000 m.....	236
Figura 4.39: Modelo de recursos da mina do Barreiro com valores estimados de P ₂ O ₅ do <i>overflow</i> da deslamagem. Cota: 1000 m.	238
Figura 4.40: Modelo de recursos da mina do Barreiro com valores estimados de P ₂ O ₅ do produto não magnético. Cota: 1000 m.....	239
Figura 4.41: Modelo de recursos da mina do Barreiro com valores estimados de P ₂ O ₅ da fração de grossos. Cota: 1000 m.	240
Figura 4.42: Modelo de recursos da mina do Barreiro com valores estimados de rendimento mássico. Cota: 1000 m.	241

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1: Características químicas dos principais fertilizantes fosfatados comercializados no Brasil (modificado de Dias e Fernandes, 2006).....	62
Tabela 3.1 – Nomenclatura do perfil de intemperismo proposta neste trabalho comparada com as nomenclaturas praticadas nas minas de Catalão I, Tapira e Araxá e a proposta de Oliveira e Imbernon (1998) para Catalão I.....	94
Tabela 3.2: Assembléias mineralógicas por macrogrupo de protolito e unidades da base do manto de intemperismo nas amostras estudadas de testemunhos de sondagem. XXX: presença; X: rara presença. BEB/CC: associação bebedourito/calcita carbonatito; ANF BEB/CC: associação anfibólio bebedourito/calcita carbonatito; BEB/DC: associação bebedourito/dolomita carbonatito; FCR/DC: associação foscorito/dolomita carbonatito. MT: micáceo de topo; MB: micáceo de base; RA: rocha alterada. K feldspato: feldspato potássico; Sr apatita: estrôncio apatita; TFF: tetraferrihogopita; Filos. Interestrat.: filossilicatos interestratificados.	96
Tabela 3.3: Informações geológicas e químicas das amostras de testemunhos de sondagem utilizadas na análise da evolução geoquímica da base do manto de intemperismo, ordenadas por seus respectivos números M_I.	110
Tabela 3.4: Estatísticas descritivas dos principais óxidos analisados por ICP-AES e C, por infravermelho, em amostras de testemunhos de sondagem por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo. M_I: macrogrupo de protolito_intemperismo. N: número de amostras.	115
Tabela 3.5: Horizontes de intemperismo, protolitos e teores químicos das amostras AV-1, AV-2, AV-3, AV-4 e AV-5. BEB/DC: associação bebedourito/dolomita carbonatito; ANF BEB/CC: associação anfibólio bebedourito/calcita carbonatito; BEB/CC: associação bebedourito/calcita carbonatito; FCR/DC: associação foscorito/dolomita carbonatito.....	117
Tabela 3.6: Composição mineralógica geral, obtida por QEMSCAN, das amostras AV-1, AV-2, AV-3, AV-4 e AV-5. Detalhamento adicional feito por MEV-EDS e/ou DRX. Minerais Zr: calzirtita, zirconolita e zircão. Outros: composição híbrida no espectro de EDS.	122
Tabela 3.7 – Composição química global e por fração granulométrica das amostras AV-1, AV-2, AV-3, AV-4 e AV-5, e distribuição dos teores químicos por fração granulométrica. RCP: CaO/P ₂ O ₅	129
Tabela 3.8 – Composição mineralógica geral e por fração granulométrica das amostras volumétricas AV-1, AV-2, AV-3, AV-4 e AV-5. Outros: composição híbrida no espectro de EDS.	132
Tabela 4.1: Estatísticas descritivas dos resultados obtidos na etapa de preparação de amostras de testemunhos de sondagem para os testes de flotação, por grupo de protolitos e intemperismo (M_I). Pas ₁₀₆ T=0: material passante em 106 µm antes da moagem; TM: tempo de moagem; Pas ₁₀₆ µm: material passante em 106 µm após moagem; Massa <i>Over</i> : massa do <i>overflow</i> da deslamagem; Massa <i>Under</i> : massa do <i>underflow</i> da deslamagem; P ₂ O ₅ <i>over</i> : P ₂ O ₅ <i>overflow</i> ; P ₂ O ₅ <i>under</i> : P ₂ O ₅ <i>underflow</i> ; Massa Mag: massa da fração	xvi

magnética; Massa N Mag: massa da fração não magnética; P₂O₅ Mag: P₂O₅ na fração magnética; P₂O₅ N Mag: P₂O₅ na fração não magnética; Massa Grosso: massa da fração não magnética classificada acima de 44 µm; Massa Fino: massa da fração não magnética classificada abaixo de 44 µm; P₂O₅ grosso: P₂O₅ da fração não magnética classificada acima de 44 µm; P₂O₅ fino: P₂O₅ da fração não magnética classificada abaixo de 44 µm. N: número de amostras..... 148

Tabela 4.2: Estatísticas descritivas da massa e do teor de P₂O₅ de ALFG global 153

Tabela 4.3: Estatísticas descritivas dos principais óxidos analisados, e teor de C, para as alíquotas de alimentação da flotação de grossos (ALFG) por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo. N: número de amostras..... 154

Tabela 4.4: Teores médios do minério ROM (*run of mine*) e dos produtos ALFG (alimentação da flotação de grossos) calculados por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo, e respectivas diferenças (DIF) entre ALFG e ROM..... 158

Tabela 4.5: Estatísticas descritivas dos resultados de mineralogia obtidos por QEMSCAN das amostras de alimentação da flotação de grossos (ALFG) provenientes de testemunhos de sondagem, por grupo de protolitos e intemperismo (M_I). Óx Fe: óxidos/hidróxidos de ferro; Flog/verm: flogopita/vermiculita; Pir/anf: piroxênio/anfibólio. N: número de amostras..... 160

Tabela 4.6: Estatísticas descritivas da alimentação de finos (ALFF) global..... 163

Tabela 4.7: Estatísticas descritivas dos principais óxidos analisados, e teor de C, para as alíquotas de alimentação da flotação de finos (ALFF) por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo. N: número de amostras..... 164

Tabela 4.8: Teores médios dos produtos da alimentação da flotação de finos (ALFF) e do minério ROM e respectivas diferenças calculadas por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo. DIF=diferença. 166

Tabela 4.9: Estatísticas descritivas dos resultados de mineralogia obtidos por QEMSCAN das amostras de alimentação da flotação de finos (ALFF) provenientes de testemunhos de sondagem, por grupo de protolitos e intemperismo (M_I). Pir/anf: piroxênio/anfibólio; Flog/verm: flogopita/vermiculita; Óx Fe: óxidos/hidróxidos de ferro. N: número de amostras..... 168

Tabela 4.10: Estatísticas descritivas dos principais óxidos analisados nos concentrados de grossos (CG) por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo. Notar que as amostras dos grupos M_I = 3 e 12 não foram submetidos à etapa de flotação. N: número de amostras..... 173

Tabela 4.11: Estatísticas descritivas dos principais óxidos analisados nos concentrados de finos (CF) por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo. Notar que as amostras dos grupos M_I = 3 e 12 não foram submetidos à etapa de flotação. N: número de amostras..... 176

Tabela 4.12: Estatísticas descritivas dos resultados de recuperações dos testes de flotação, por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo. Rend Mas Prep T: rendimento mássico da preparação total; Rec P₂O₅

Prep T: recuperação metalúrgica de P ₂ O ₅ da preparação total; Enr P ₂ O ₅ Prep T: enriquecimento de P ₂ O ₅ na preparação total; Rec P ₂ O ₅ FLG: recuperação de P ₂ O ₅ da flotação de grossos; Rec P ₂ O ₅ TG: recuperação de P ₂ O ₅ total de grossos; Rec Mas TG: recuperação mássica total de grossos; Rec P ₂ O ₅ FLF: recuperação de P ₂ O ₅ da flotação de finos; Rec P ₂ O ₅ TF: recuperação de P ₂ O ₅ total de finos; Rec Mas TF: recuperação mássica total de finos; Rec P ₂ O ₅ FLGF: recuperação de P ₂ O ₅ da flotação de grossos e finos; Rec P ₂ O ₅ TGF: recuperação de P ₂ O ₅ total de grossos e finos; Rec Mas GF: rendimento mássico total de grossos e finos. N: número de amostras.....	181
Tabela 4.13: Autovalores obtidos na primeira análise por principais componentes.....	187
Tabela 4.14: Correlações entre PC1 e PC2 e variáveis, e contribuição das variáveis. Em negrito destacam-se os valores de correlação mais próximos de 1 ou -1 e as contribuições mais elevadas associadas aos teores de óxidos de ROM.....	188
Tabela 4.15: Características dos grupos APC.	189
Tabela 4.16: Autovalores obtidos na segunda análise por principais componentes.....	191
Tabela 4.17: Correlações entre principais componentes e variáveis, e contribuição das variáveis. Em negrito destacam-se os valores de correlação mais próximos de 1 ou -1 e as contribuições mais elevadas.....	192
Tabela 4.18: Matriz de correlação entre os óxidos do ROM, variáveis de preparação e recuperação mássica total do grupo APC_P=1 (BEB/CC e BEB/DC). <i>Over: overflow; Under: underflow</i> ; Mag: magnético; N Mag: não magnético; G: grossos; F: finos; Rend Mas Tot: rendimento mássico total. Em azul: correlações maiores que 0.70. Em vermelho: correlações menores que -0.70.....	201
Tabela 4.19: Sumário dos modelos de regressão linear obtidos para o grupo APC_P=1 (BEB/CC e BEB/DC). N: número de amostras utilizadas. b: coeficientes do modelo. R: coeficiente de correlação. R ² : coeficiente de determinação.....	202
Tabela 4.20: Resultados do teste de hipóteses Kolmogorov-Smirnov para os resíduos dos modelos de regressão linear do grupo APC_P=1 (BEB/CC e BEB/DC).	206
Tabela 4.21: Matriz de correlação entre os óxidos do ROM, variáveis de preparação e recuperação mássica total do grupo APC_P=2 (ANF BEB/CC). <i>Over: overflow; Under: underflow</i> ; Mag: magnético; N Mag: não magnético; G: grossos; F: finos; Rend Mas Tot: rendimento mássico total. Em azul: correlações maiores que 0.70. Em vermelho: correlações menores que -0.70.....	207
Tabela 4.22: Sumário dos modelos de regressão linear obtidos para o grupo APC_P=2 (ANF BEB/CC). N: número de amostras utilizadas. b: coeficientes do modelo. R: coeficiente de correlação. R ² : coeficiente de determinação.....	208
Tabela 4.23: Resultados do teste de hipóteses Kolmogorov-Smirnov para os resíduos dos modelos de regressão linear do grupo APC_P=2 (ANF BEB/CC).....	211

Tabela 4.24: Matriz de correlação entre os óxidos do ROM, variáveis de preparação e recuperação mássica total do grupo APC_P=3 (FCR/DC). <i>Over: overflow; Under: underflow; Mag: magnético; N Mag: não magnético; G: grossos; F: finos; Rend Mas Tot: rendimento mássico total.</i> Em azul: correlações maiores que 0.70. Em vermelho: correlações menores que -0.70.....	213
Tabela 4.25: Sumário dos modelos de regressão linear obtidos para o grupo APC_P=3 (FCR/DC). N: número de amostras utilizadas. b: coeficientes do modelo. R: coeficiente de correlação. R ² : coeficiente de determinação.....	214
Tabela 4.26: Resultados do teste de hipóteses Kolmogorov-Smirnov para os resíduos dos modelos de regressão linear do grupo APC_P=3 (FCR/DC).....	217
Tabela 4.27: Matriz de correlação entre os óxidos do ROM, variáveis de preparação e recuperação mássica total do grupo APC_I=1 (MT). <i>Over: overflow; Under: underflow; Mag: magnético; N Mag: não magnético; G: grossos; F: finos; Rend Mas Tot: rendimento mássico total.</i> Em azul: correlações maiores que 0.70. Em vermelho: correlações menores que -0.70.	218
Tabela 4.28: Sumário dos modelos de regressão linear obtidos para o grupo APC_I=1 (MT). N: número de amostras utilizadas. b: coeficientes do modelo. R: coeficiente de correlação. R ² : coeficiente de determinação.	219
Tabela 4.29: Resultados do teste de hipóteses Kolmogorov-Smirnov para os resíduos dos modelos de regressão linear do grupo APC_I=1 (MT).....	222
Tabela 4.30: Matriz de correlação entre os óxidos do ROM, variáveis de preparação e recuperação mássica total do grupo APC_I=2 (MB). <i>Over: overflow; Under: underflow; Mag: magnético; N Mag: não magnético; G: grossos; F: finos; Rend Mas Tot: rendimento mássico total.</i> Em azul: correlações maiores que 0.70. Em vermelho: correlações menores que -0.70.	223
Tabela 4.31: Sumário dos modelos de regressão linear obtidos para o grupo APC_I=2 (MB). N: número de amostras utilizadas. b: coeficientes do modelo. R: coeficiente de correlação. R ² : coeficiente de determinação.	224
Tabela 4.32: Resultados do teste de hipóteses Kolmogorov-Smirnov para os resíduos dos modelos de regressão linear do grupo APC_I=2 (MB).	227
Tabela 4.33: Matriz de correlação entre os óxidos do ROM, variáveis de preparação e recuperação mássica total do grupo APC_I=3 (RA). <i>Over: overflow; Under: underflow; Mag: magnético; N Mag: não magnético; G: grossos; F: finos; Rend Mas Tot: rendimento mássico total.</i> Em azul: correlações maiores que 0.70. Em vermelho: correlações menores que -0.70.	228
Tabela 4.34: Sumário dos modelos de regressão linear obtidos para o grupo APC_I=3 (RA). N: número de amostras utilizadas. b: coeficientes do modelo. R: coeficiente de correlação. R ² : coeficiente de determinação.	229

Tabela 4.35: Resultados do teste de hipóteses Kolmogorov-Smirnov para os resíduos dos modelos de regressão linear do grupo APC_I=3 (RA).	232
Tabela 4.36: Características dos grupos APC e limites dos campos no plano fator 1 <i>versus</i> fator 2.	234
Tabela 4.37: Autovalores obtidos pela análise do modelo de blocos da mina do Barreiro por principais componentes.	235
Tabela 4.38: Correlações entre principais componentes e variáveis, e contribuição das variáveis obtidas na análise do modelo de blocos por principais componentes, comparativamente aos resultados obtidos pela segunda análise por principais componentes. Em negrito destacam-se os valores de correlação mais próximos de 1 ou -1 e as contribuições mais elevadas.	237

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO

Complexos alcalino-carbonatíficos originam-se no manto superior e são importantes fontes de diversos tipos de minérios, como fosfato, nióbio, titânio, terras raras, vermiculita, barita e cobre, entre outros. Alguns dos depósitos mais importantes dessas substâncias no mundo são associados a carbonatitos, como, por exemplo, a expressiva reserva de nióbio em Araxá, Brasil, o depósito de bastnaesita de Mountain Pass, EUA, e o depósito de Cu e multi-*commodities* de Palabora, África do Sul (Mariano, 1989).

Depósitos associados a esses complexos são lavrados há décadas utilizando rotas de processo que transformam as matérias-primas em produtos economicamente viáveis. No Brasil, a principal fonte de fosfato para as indústrias químicas e de fertilizantes são as jazidas magmatogênicas, com importante enriquecimento supergênico, associadas a complexos alcalino-carbonatíficos.

Os complexos plutônicos da Província Ígnea do Alto Paranaíba (APIP) são fundamentais nos cenários econômicos brasileiro e mundial, pois contêm as maiores reservas mundiais de nióbio, as maiores reservas brasileiras de fosfato, jazidas de classe mundial de monazita e anatásio, e depósitos importantes de vermiculita, barita, magnetita, além de potencial para cobre e níquel.

Nos complexos de Tapira, Araxá, Catalão I e Catalão II há minas de fosfato e/ou nióbio em operação, quase todas há dezenas de anos. Durante esse período, diversos estudos de geologia econômica e de caracterização tecnológica (Alcover Neto e Toledo, 1993; Lenharo, 1994; Pereira, 1995; Torres e Gaspar, 1995a; Torres e Gaspar, 1995b; Sant'Agostino, 1996; Torres, 1996; Barros, 1997; Oliveira e Imbernon, 1998; Neumann, 1999; Toledo, 1999; Ferrari et al., 2001; Tassinari et al., 2001; Toledo e Pereira, 2001; Toledo et al., 2002; Toledo et al., 2004; Barros, 2005; Pereira et al., 2005; Ribeiro, 2008; Uliana et al., 2009; Cordeiro et al., 2011b; Paiva, 2011; Palmieri, 2011, Ribeiro et al., 2014) foram realizados para ampliar o conhecimento de mineralogia, controles, gênese e geometurgia dos minérios desses complexos.

Na lavra de jazidas de fosfato ígneo, o minério inicialmente explotado foi uma porção relativamente rasa do manto de intemperismo, oxidada e aparentemente homogênea. Com o aprofundamento das cavas, a lavra aproximou-se da rocha fresca, acarretando diminuição dos teores dos minérios, significativas mudanças em suas características físicas e químicas e, conseqüentemente, queda de rendimento mássico, o que gerou impactos significativamente negativos na produção de concentrados fosfáticos. Tais mudanças são uma característica inerente a esse tipo de mineralização, pois o minério é mais heterogêneo e possui maior conteúdo de minerais contaminantes à medida que se aproxima da rocha fresca.

Nesse contexto, o complexo de Araxá apresenta importância peculiar, devido à crescente dificuldade encontrada pelas áreas de engenharia de lavra e processo em produzir concentrados fosfáticos a partir dos minérios heterogêneos próximos à rocha fresca e à crescente necessidade de se atuar com todos os tipos de minérios remanescentes. Dominar o conhecimento da base do manto de intemperismo tem importantes consequências para a vida útil da mina e para a participação do complexo no suprimento da demanda brasileira de insumos para fertilizantes.

As rochas frescas de Araxá foram estudadas por Torres (2008), cujo trabalho fornece diretrizes para o entendimento de sua composição. Os trabalhos de Grasso et al. (2006), Palmieri et al. (2006) e Ribeiro (2008), todos no complexo de Catalão I, mostraram que a mineralização primária condiciona o comportamento dos depósitos supergênicos em escala variável, tanto mais intensamente quanto maior a profundidade. Este fato, juntamente com as características do intemperismo, resulta na formação de distintos tipos de minério, com diferentes respostas metalúrgicas durante o beneficiamento (e.g. Ribeiro, 2008).

Por exemplo, a presença de flogopita nas porções mais profundas do manto de intemperismo acarreta mudanças no comportamento metalúrgico do minério, dada a maior resistência daquele mineral à cominuição, que resulta em maior tempo de moagem e menor eficiência na sua eliminação por deslamagem, comparativamente aos argilominerais, que dominam nas porções superiores. Além disso, parte da flogopita não eliminada pode ser arrastada na flotação, contaminando o concentrado fosfático com Mg, Al e K.

Outro efeito pode ser ilustrado pelos carbonatos, inexistentes ou raros na porção superior do manto de intemperismo, e cada vez mais abundantes com a aproximação da rocha fresca. O minério com carbonato quase não foi lixiviado no intemperismo e, portanto, tem menor fator de enriquecimento supergênico e mais baixo teor de P_2O_5 , alcançando menor rendimento mássico. Além disso, minérios com carbonato têm características metalúrgicas distintas, e o carbonato é um contaminante importante no processo de concentração mineral.

1.2. OBJETIVOS

O presente trabalho pretende contribuir com o conhecimento sobre a geologia e a geometalurgia dos minérios da base do manto de intemperismo da mina do Barreiro, em Araxá, MG, utilizando dados de campo, petrográficos, mineralógicos, geoquímicos e geometalúrgicos.

Os objetivos específicos são:

- Caracterizar os minérios da base do manto de intemperismo de Araxá, dos pontos de vista geológico, mineralógico e químico, relacionando-os com a distribuição da mineralização primária e com a profundidade no perfil de alteração intempérica;
- Determinar o comportamento metalúrgico dos diferentes minérios e avaliar as consequências das variações protolíticas e intempéricas para o beneficiamento mineral;
- Elaborar modelos geometalúrgicos e aplicá-los em modelos de blocos tridimensionais.

1.3. SÉRIES PETROGENÉTICAS EM COMPLEXOS ALCALINO-CARBONATÍTICOS

Três principais tipos de magma (silicático, carbonático e fosfático) são descritos em complexos carbonatíticos, embora nem sempre todos ocorram juntos. As relações entre esses magmas são muito complexas, envolvendo processos petrogenéticos diversos, geralmente multifásicos e recorrentes, como cristalização fracionada, imiscibilidade de líquidos, desgaseificação e metassomatismo. Cada tipo de magma pode gerar diferentes produtos durante a sua evolução, definindo séries petrogenéticas distintas.

Dentre os magmas silicáticos, o tipo de série petrogenética que ocorrerá depende fundamentalmente da afiliação geoquímica. Uma das séries silicáticas mais comuns em complexos carbonatíticos é a ijolítica, que corresponde às rochas plutônicas derivadas da diferenciação de magmas parentais nefeliníticos. Por outro lado, um número mais restrito de ocorrências, associadas a magmas alcalinos ultrapotássicos, como kamafugitos, caracteriza-se pela presença dos equivalentes plutônicos que formam a série bebedourítica. Quando os carbonatitos estão associados a rochas exclusivamente félsicas, como sienitos, torna-se mais difícil estabelecer uma distinção entre as linhagens sódica e potássica.

Nas seções abaixo são detalhados os sistemas de classificação das séries petrogenéticas mais relevantes para os complexos alcalino-carbonatíticos brasileiros.

1.3.1 *Série Ijolítica*

As rochas da série ijolítica são essencialmente compostas por nefelina e clinopiroxênio, e classificadas em função das variações modais entre estes constituintes (figura 1.1). Esta série é importante nos complexos carbonatíticos da Província de Ponta Grossa, como Jacupiranga, por exemplo, mas seus membros não foram, até o momento, reconhecidos na Província Ígnea do Alto Paranaíba.



Figura 1.1: Classificação das rochas da série ijolítica, segundo Le Maitre (2002).

1.3.2 *Série Bebedourítica*

Tröger (1928) definiu bebedourito como um clinopiroxenito rico em perovskita, com cerca de 54% de diopsídio, 21% de flogopita, 14% de perovskita, 10% de minerais opacos e quantidades acessórias de apatita, feldspato potássico e olivina. A área tipo do bebedourito é a Serra do Salitre (MG), ou seja, o complexo alcalino-carbonatítico de Salitre, na APIP. Presentemente, bebedouritos foram identificados em todos os complexos da Província. Embora a composição típica descrita por Tröger contenha pouco mais de 50% de diopsídio, estudos recentes sobre bebedouritos na APIP (Brod, 1999; Ribeiro, 2008; Grasso, 2010; Barbosa et al., 2012a) mostram que muitas das suas variações petrográficas envolvem uma mineralogia variada, em que nenhum mineral atinge mais de 50 % modal. Por exemplo, em diversos bebedouritos de Salitre e Tapira, apatita é uma fase essencial, e não acessória. A classificação de bebedouritos não é uma tarefa simples, tendo em vista sua composição modal muito variável e envolvendo minerais que não fazem parte dos esquemas de classificação usuais. Brod et al. (2004) sugeriram um diagrama para classificação de bebedouritos da APIP, reproduzido na figura 1.2.

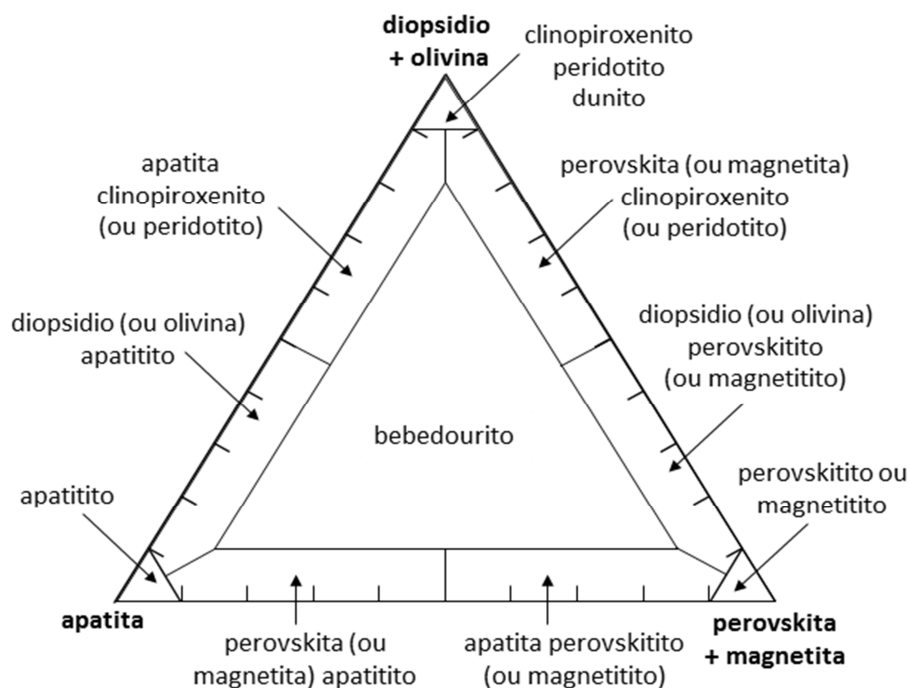


Figura 1.2: Classificação das rochas da série bebedourítica, segundo Brod et al. (2004).

No presente trabalho o termo bebedourito é aplicado no sentido de Brod (1999) e Barbosa et al. (2012a), que consideram essas rochas como cumulados com composição modal variável.

1.3.3 Série Foscorítica

O sistema de classificação de rochas da série foscorítica proposto por Yegorov (1993) se baseia no conteúdo modal de apatita, magnetita e olivina. Krasnova et al. (2004a) propuseram modificar esta classificação para incluir outros silicatos magnesianos, como diopsídio ou flogopita, que deveriam ser somados ou substituir a olivina. Esta classificação incorporaria um maior número de rochas, mas Cordeiro et al. (2010) e Barbosa et al. (2012c) argumentam que o tipo de silicato presente é importante para determinar o estágio evolutivo e que a proposta de Krasnova et al. (2004a) dificulta essa avaliação. Pela mesma razão, optou-se por utilizar aqui a proposta original de Yegorov (1993), conforme o diagrama da figura 1.3.

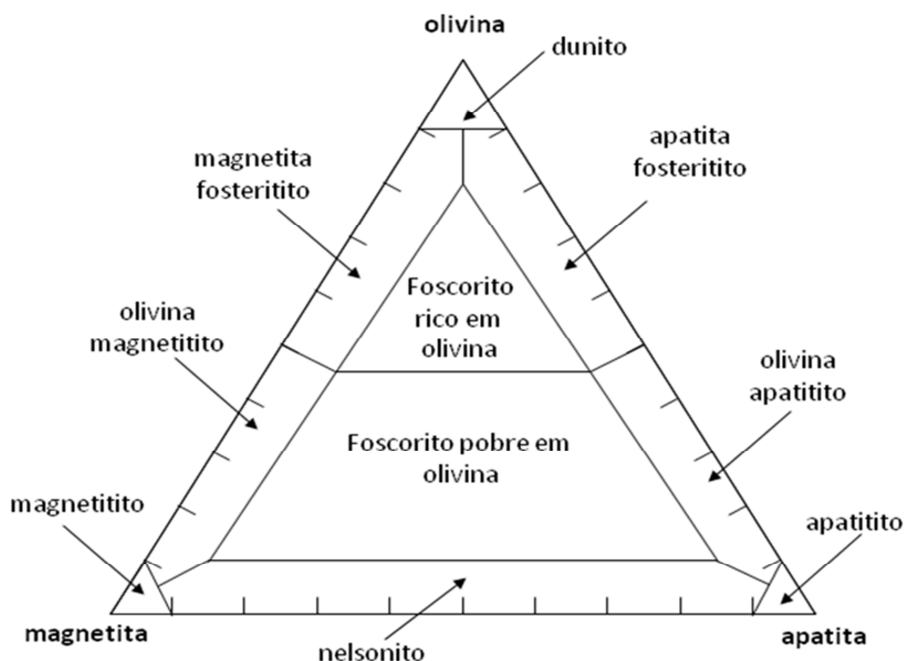


Figura 1.3: Classificação das rochas da série foscorítica, segundo Yegorov (1993).

1.3.4 Série Carbonatítica

Carbonatitos são classificados com base no carbonato predominante (Le Maitre, 2002). Assim, rochas com mais de 50% de carbonato, nas quais a calcita é predominante, são classificadas como calcita carbonatito. Regra similar se aplica a carbonatitos com predomínio de dolomita. Duas exceções notáveis são os carbonatitos formados por carbonatos alcalinos, denominados natrocarbonatitos, e os formados predominantemente por ankerita e/ou siderita, denominados ferrocarbonatitos. Na impossibilidade de identificar o carbonato, Woolley e Kempe (1989) recomendam a utilização de critérios químicos para classificar os carbonatitos (figura 1.4).

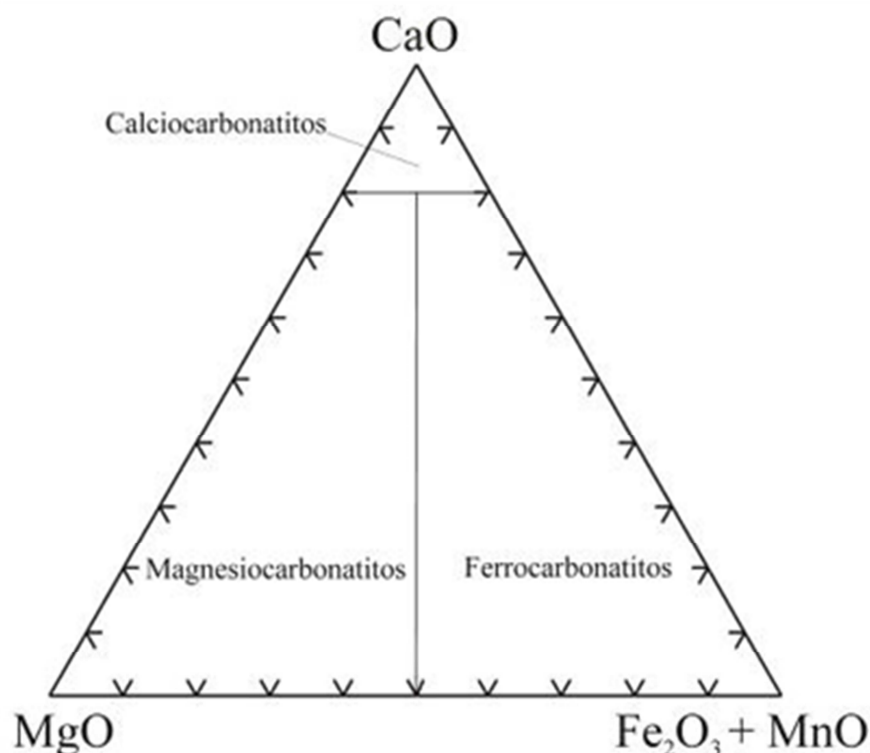


Figura 1.4: Diagrama de classificação química para carbonatitos, segundo Woolley e Kempe (1989).

1.4. ORIGEM E EVOLUÇÃO DOS MAGMAS CARBONATÍTICOS

Existem três origens principais de magmas carbonatíticos: como produto inicial de fusão parcial de um manto portador de uma pequena proporção de carbonatos, como produto final de diferenciação de um líquido silicático contendo carbonato dissolvido, ou por imiscibilidade de líquidos em um sistema carbonático – silicático (Hall, 1996).

1.4.1 Origem dos carbonatitos no manto (carbonatitos primários)

Os carbonatitos primários ocorrem como corpos isolados e sem uma necessária associação com rochas alcalinas silicáticas. Woolley e Kjarsgaard (2008) apontam que poucos carbonatitos no mundo correspondem a carbonatitos primários. Por outro lado, a grande quantidade de carbonatitos espacialmente associados com rochas silicáticas alcalinas sugere a geração dos carbonatitos por cristalização fracionada ou imiscibilidade de líquidos a partir de um magma silicático rico em CO_2 .

1.4.2 *Cristalização Fracionada*

Cristalização fracionada é um processo de diferenciação magmática que corresponde à progressiva cristalização e remoção de minerais, a partir de um magma parental, com a queda de temperatura. As fases minerais fracionadas podem se concentrar e formar cumulos de diversas composições, por processos variados, como assentamento gravitacional de minerais mais densos ou flotação de minerais menos densos do que o magma residual, acumulação de cristais nas paredes da câmara magmática, filtragem do magma residual bombeado por pressão, ou concentração de minerais em bandas devido ao fluxo hidráulico de um magma contendo cristais em suspensão (Hall, 1996).

Evidências texturais como estrutura bandada e segregações de apatita, silicatos e óxidos mostram que o magma carbonatítico pode dar origem a cumulos, que muitas vezes são minérios ou proto-minérios de apatita ou pirocloro, por exemplo.

1.4.3 *Imiscibilidade de líquidos*

A imiscibilidade de líquidos envolve a separação de um magma originalmente homogêneo em duas frações líquidas que podem coexistir mas não voltam à condição original de um único líquido homogêneo. A imiscibilidade entre líquidos silicático e carbonatítico desempenha importante papel na gênese dos carbonatitos (Beccaluva et al., 1992; Lee e Wyllie, 1998b; Brod, 1999; Ruberti et al., 2002; Ribeiro et al., 2005c; Comin-Chiaramonti et al., 2007; Barbosa et al., 2012b, entre outros). Kjarsgaard e Hamilton (1989) propõem que a imiscibilidade é o principal processo no desenvolvimento tanto dos carbonatitos quanto das rochas silicáticas associadas, e que pode explicar a origem de muitos tipos de carbonatitos mais facilmente que qualquer outro processo.

Em termos gerais, um magma silicático com alguma quantidade de carbonato dissolvido se enriquece neste componente pela progressiva cristalização de silicatos, óxidos e fosfatos, levando à saturação e separação de um líquido carbonático imiscível. Em rochas alcalinas, esse processo é às vezes evidenciado por glóbulos (ocelos) de carbonatos numa matriz silicática e vice-versa, ou ainda por inclusões microscópicas de líquidos silicáticos e carbonáticos (*melt inclusions*) coexistindo dentro de cristais (Hall, 1996).

Durante a imiscibilidade, muitos elementos químicos concentram-se preferencialmente em um dos dois líquidos conjugados, o que pode levar à formação de depósitos minerais.

1.4.4 Desgaseificação e Metassomatismo

Metassomatismo é um processo de alteração e/ou transformação química de uma rocha pela ação de uma fase fluida reativa, que resulta na entrada e/ou saída de componentes químicos da rocha, com modificação de seus minerais.

A altas pressões, a quantidade de voláteis dissolvida no magma pode ser alta, mas com a ascensão do magma a pressão diminui e o magma desgaseifica-se. Os voláteis exsolvidos reagem com a rocha encaixante, provocando alterações metassomáticas.

Nos complexos carbonatíticos da APIP a intrusão de carbonatitos nas rochas silicáticas ultramáficas gerou zonas de reação cuja espessura varia de poucos centímetros a dezenas de metros, onde as rochas ultramáficas primárias foram convertidas em flogopititos (Brod, 1999; Brod et al., 2004; Ribeiro, 2008). Em complexos como Catalão I, a intensidade desse processo resultou na flogopitização completa de grandes áreas de rochas ultramáficas (Grasso et al., 2006; Palmieri et al., 2006), enquanto em complexos como Tapira e Salitre, esse efeito é menos intenso (Brod, 1999; Barbosa et al., 2012c).

1.5. MINERALIZAÇÕES ASSOCIADAS A COMPLEXOS ALCALINO-CARBONATÍTICOS

Carbonatitos e rochas alcalinas associadas são enriquecidos em elementos incompatíveis, como Ba, Nb, ETR, Sr, Ta, Th, U e Zr. Alguns dos mais conhecidos ou potenciais depósitos de Cu, Nb, ETR, fluorita, fosfato e vermiculita estão associados a carbonatitos. Neles estão incluídos o depósito de Nb de Araxá (Brasil), o depósito de bastnaesita de Mountain Pass (Estados Unidos) e o depósito de Cu e *multi-commodities* de Palabora (África do Sul). Os principais minerais de interesse econômico são a apatita (P), pirocloro (Nb), monazita, bastnaesita e florencita (ETR), barita (Ba), anatásio, rutilo e brookita (Ti), magnetita (Fe) e vermiculita (Mariano, 1989).

Mineralização de fosfato em complexos carbonatíticos pode estar relacionada com a apatita primária presente na rocha fresca, como nos carbonatitos de Jacupiranga (Gaspar, 1989) ou nos foscoritos da Província de Kola (Wall e Zaitsev, 2004), ou com a concentração supergênica a partir de rochas ricas em apatita, como nos depósitos residuais de fosfato da APIP. Neste último caso, a mineralização primária (magmática) precursora do depósito supergênico pode estar contida em

carbonatitos e foscritos, como em Catalão, Salitre e Araxá (Ribeiro, 2008; Barbosa et al., 2012a; Torres, 1996) ou em rochas silicáticas, como os bebedouritos de Tapira (Brod et al., 2004).

Carbonatitos e rochas alcalinas são as maiores fontes de Nb no mundo (Mariano, 1989). Nb pode estar presente em pequenas quantidades em diversos minerais, como perovskita, rutilo e titanita, ou ocorrer como elemento maior em acessórios, como pirocloro, ferrocolumbita e wohlerita. Nos complexos de Araxá e Catalão, o pirocloro se concentrou no manto de alteração, produzindo depósitos residuais (Silva, 1986; Fava, 2001; Filho et al., 2005; Palmieri, 2011).

Os depósitos de ETR em complexos carbonatíticos ocorrem principalmente por atividade hidrotermal com ou sem concentração supergênica subsequente (Imbernon et al., 1994; Ribeiro et al., 2005b; Yang et al., 2009). O depósito de Bayan Obo, na China, é o maior do mundo. Desde 1950, ele tem sido lavrado principalmente para Fe, tendo como sub-produto ETR (Yang and Woolley, 2006). Os principais minerais portadores de ETR nesse depósito são a bastnaesita e a monazita. As ocorrências Maoniuping e Weishan foram lavradas para ETR desde os anos 1980. A ocorrência Maoniuping é também um depósito de ETR tipo *world class* e é a principal fonte de produção na China (Yang et al., 2009). A mineralização de bastnaesita-parisita em Mountain Pass, Estados Unidos, é a segunda maior do mundo e um caso raro de concentração de minerais primários de ETR em carbonatitos evoluídos (Mariano, 1989). Araxá apresenta concentrações de ETR no manto de intemperismo. Em Catalão I ocorre mineralização de ETR em foscritos e flogopititos intemperizados, em silexitos e em carbonatitos primários com monazita de origem metassomática (Ribeiro, 2008).

Outras mineralizações associadas a complexos alcalino-carbonatíticos incluem barita, encontrada em todos os estágios de evolução de um carbonatito, mas concentrada nos estágios tardios, cristalizando-se diretamente de um líquido carbonatítico ou a partir de fluidos carbohidrotermais de baixa temperatura, ou ainda como produto supergênico; fluorita, que é um mineral acessório comum nos carbonatitos cujas concentrações econômicas estão relacionadas à atividade hidrotermal tardia (Mariano, 1989); anatásio, concentrado no manto de intemperismo sobre rochas ricas em perovskita, geralmente na porção bebedourítica dos complexos alcalino-carbonatíticos (Ribeiro, 2008); vermiculita, derivada do intemperismo químico de concentrações magmáticas ou metassomáticas de flogopita; cobre, cuja única mineralização econômica significativa em carbonatitos situa-se no complexo de Palabora, África do Sul (Eriksson, 1989), formada por bornita primária disseminada nos carbonatitos e calcopirita tardia, concentrada em fraturas.

1.6. DEPÓSITOS DE FOSFATO EM COMPLEXOS ALCALINO-CARBONATÍTIOS BRASILEIROS

No Brasil há pelo menos vinte complexos alcalino-carbonatíticos. Existe uma interessante correlação entre idade e localização dos complexos alcalino-carbonatíticos brasileiros. A maior parte dos complexos no norte do país é de idade Pré-cambriana (Angico dos Dias, Maicuru, Mutum), enquanto os das regiões sudeste e sul são Cretácios, como, por exemplo, os complexos alcalino-carbonatíticos da Província Ígnea do Alto Paranaíba, Barra do Itapirapuã, Jacupiranga, Anitápolis etc. Todavia, apenas alguns desses complexos possuem depósitos econômicos de fosfato e, destes, uma quantidade muito limitada possui minas em operação. Neste tópico serão abordados os complexos portadores de depósitos de fosfato (figura 1.5).

Angico dos Dias, no município de Campo Alegre de Lourdes, NNW do estado da Bahia, próximo à fronteira com o Piauí, é um dos poucos complexos alcalino-carbonatíticos Paleoproterozoicos brasileiros. A idade da intrusão foi calculada em 2011 ± 6 Ma, pelo método U-Pb em zircão e baddeleyita de carbonatitos (Silva et al., 1988). Os carbonatitos formam dois corpos principais com direção geral N20E e mergulhos predominantes para NW, com ângulos inferiores a 45° (Lapin et al., 1999). As rochas alcalinas estão alojadas no embasamento gnáissico-migmatítico Arqueano do cinturão de dobramentos Brasileiro na margem nordeste do Cráton São Francisco. Por estarem alojados em zonas de falha e apresentarem disposição concordante às rochas encaixantes, prolongando-se paralelamente à estruturação geral do cinturão móvel, carbonatitos deste tipo foram denominados por Lapin et al. (1999) como carbonatitos lineares de cinturões móveis. A intrusão desses corpos é interpretada como anterior à estabilização do cinturão móvel e correspondente à fase pré-orogênica. A maior parte do complexo é composta por sienitos e carbonatitos, além de raros piroxenitos. Os contatos entre sienitos e carbonatitos são geralmente caracterizados por uma zona de transição. A textura magmática original raramente está preservada, em virtude de deformação e metamorfismo em fácies xisto verde (Antonini et al., 2003). O depósito de fosfato de Angico dos Dias é encontrado tanto no espesso manto de intemperismo desenvolvido sobre os dois corpos carbonatíticos, quanto nos próprios carbonatitos frescos (Silva et al., 1988). As reservas de fosfato supergênico foram calculadas em 12.5 milhões de toneladas com teor médio de 15.4% de P₂O₅ (Filho e Moraes, 2001). A empresa Galvani efetua a exploração do minério supergênico de fosfato, desde 2005.

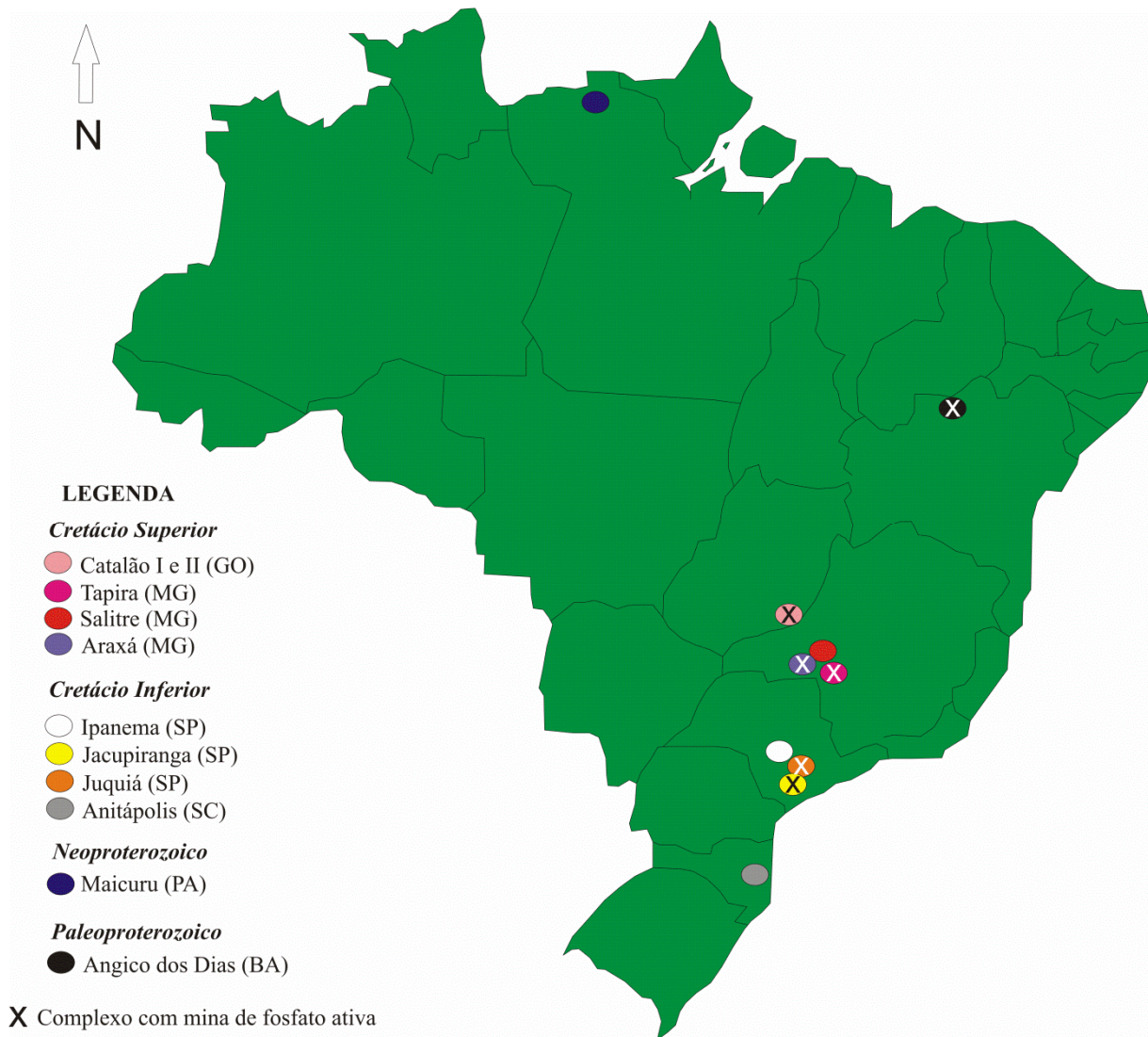


Figura 1.5: Localização dos complexos alcalino-carbonatíficos com depósitos de fosfato no Brasil.

O complexo alcalino-carbonatítico de Maicuru, no município de Monte Alegre, Pará, tem idade Neoproterozoica (590 Ma) e está alojado em gnaisses de composição tonalítica a granodiorítica e em granitos do Cráton das Guianas (Lemos e Gaspar, 1998). É aproximadamente elíptico, com eixos maior e menor de 9 e 6 km, respectivamente. É composto por piroxenitos, com quantidades subordinadas de dunitos, sienitos, traquitos, carbonatitos, glimmeritos e apatititos (Costa et al, 1991; Lemos e Gaspar, 1998). Numerosos veios de apatititos e carbonatitos cortam os piroxenitos que, em contato com os carbonatitos, estão metassomatizados (Costa et al., 1991; Lemos e Quadros, 1992; Lemos e Gaspar, 2002b). Clinopiroxenitos de composição kamafugítica foram reconhecidos em adição às ocorrências subordinadas de carbonatito e foscorito (Lemos e Gaspar, 1984; Lemos e Gaspar, 2002a). De acordo com Rezende (2001), Maicuru abriga o maior depósito de fosfato já descoberto na Amazônia, com reserva estimada de 200 milhões de toneladas de minério residual com teor médio de 15% de P_2O_5 .

As províncias ígneas alcalinas do sul do Brasil estão distribuídas em três grupos cronológicos principais: Cretácio Inferior, Cretácio Superior e Paleógeno. Os complexos alcalino-carbonatíticos do Cretácio Inferior encontram-se principalmente ao longo do lineamento Uruguai (Anitápolis e Sapucaí), Arco de Ponta Grossa (Barra do Itapirapuã, Jacupiranga, Juquiá) e Serra do Mar (raros diques carbonatíticos, e.g. Itanhaém). Os do Cretácio Superior concentram-se ao longo do lineamento Iporá - Alto Paranaíba (Província Alcalina de Goiás: Santo Antônio da Barra; Província Ígnea do Alto Paranaíba: Catalão I e II, Serra Negra, Salitre, Araxá, Tapira), do Arco de Ponta Grossa (Mato Preto), lineamento Taiúva-Cabo Frio e lineamento Uruguai (Lages). Os do Paleógeno estão distribuídos ao longo do lineamento Taiúva-Cabo Frio (Província Ígnea da Serra do Mar). Apenas Santo Antônio da Barra representa ocorrências de carbonatito efusivo. Este raramente está preservado, assim como as rochas alcalinas extrusivas associadas (Comin-Chiaramonti et al., 2007).

O complexo de Anitápolis localiza-se na região leste de Santa Catarina. Aflora numa depressão circular de cerca de 6 km² e é formado por flogopita piroxenitos e apatita-biotita piroxenitos, rodeados por ijolitos e nefelina sienitos, alojados em rochas granito-gnáissicas do embasamento Paleoproterozoico. Raros diques de melanefenilitos e nefelinitos cortam o complexo. Diques e veios de carbonatito ocorrem espalhados pelo complexo, associados aos piroxenitos (Comin-Chiaramonti et al., 2002). Datações K/Ar indicaram a idade de 151.8 ± 7.0 Ma (Sonoki e Garda, 1988). A reserva de fosfato foi estimada por Vergara (1980, *apud* Ferrari, 2000) em 330 milhões de toneladas com teor médio de 6.5 % de P₂O₅.

O complexo alcalino-carbonatítico de Jacupiranga localiza-se cerca de 240 km a sudoeste da cidade de São Paulo. É uma intrusão oval com cerca de 65 km² alojada no embasamento Pré-Cambriano. De acordo com Gaspar e Wyllie (1983a), o complexo é formado por um *plug* carbonatítico central alojado no jacupiranguito e composto por cinco intrusões, além de diques de alvikito e beforsito. Bordas de reação no contato entre carbonatitos e jacupiranguitos foram geradas a partir das reações com os fluidos carbonatíticos, levando à formação de anfibólio, flogopita e olivina, além de bandas carbonáticas (Gaspar e Wyllie, 1983a,b; Morbidelli et al., 1995; Brod et al., 2001). Datações K/Ar indicaram a idade de 133.8 ± 3.9 Ma (Sonoki e Garda, 1988). O depósito supergênico de apatita, situado no manto de intemperismo desenvolvido sobre os carbonatitos, foi lavrado de 1938 até sua completa exaustão na década de 60; atualmente, o depósito em carbonatito fresco está sendo explotado pela empresa Vale Fertilizantes. As reservas remanescentes desse depósito estão estimadas em 110 milhões de toneladas com teor médio de 5.2% (Relatório Anual Vale, 2014).

O complexo alcalino-carbonatítico de Ipanema localiza-se 140 km a oeste da cidade de São Paulo. Tem forma circular, com área de 13 km², e é formado principalmente por glimmeritos, sienitos, shonkinitos, além de veios e diques de carbonatito (Toledo e Souza, 1991; Florêncio e Toledo, 1997). Foram descritos, também, fenitos nas bordas do complexo. A idade K/Ar obtida foi de 124.9 ± 9.5 Ma (Sonoki e Garda, 1988). As reservas totais de fosfato são de 120 milhões de toneladas com teor médio de 6,7% de P₂O₅ (Born, 1989).

O complexo de Juquiá (Becalluva et al., 1992) ocupa cerca de 14 km² e está localizado 150 km a sudoeste da cidade de São Paulo, no município de Registro. É uma intrusão circular, com 5 km de diâmetro, centrada no corpo carbonatítico Morro do Serrote. Olivina clinopiroxenitos dominam o setor nordeste e olivina álcali gabros ocorrem como lentes nos piroxenitos. Nefelina sienitos ocorrem principalmente na porção sudoeste do complexo e também como corpos isolados no morro Casa da Pedra. Sienodioritos ocorrem exclusivamente na borda sul, em contato com o embasamento gnáissico. Ijolitos, com transições para melteigitos e urtitos, envolvem o núcleo carbonatítico e são limitados a norte por clinopiroxenitos e a sul por nefelina sienitos. Diques basaníticos a fonotefríticos e fonolíticos ocorrem principalmente alojados em piroxenitos e nefelina sienitos. O embasamento gnáissico apresenta-se fenitizado. Datações K/Ar indicaram idade de 134.0 ± 1.6 Ma (Sonoki e Garda, 1988). As reservas de fosfato no manto de intemperismo sobre os carbonatitos foram estimadas em 18 milhões de toneladas com teor médio de 10% de P₂O₅ (Gomes et al., 1990) e são atualmente explotadas pela empresa Socal.

A Província Ígnea do Alto Paranaíba (APIP) está situada ao longo do arco homônimo. Formada no Cretácio Superior, no oeste de Minas Gerais e sudeste de Goiás, é uma das províncias ultrapotássicas mais volumosas do mundo, com o alojamento de grande número de rochas alcalinas ultramáficas (figura 1.6). Estas rochas ocorrem sob a forma de diques, *pipes*, veios, diatremas e complexos plutônicos, além de lavas e piroclásticas. Os magmas são, principalmente, kamafugíticos, além de kimberlíticos e lamproíticos. Nos complexos alcalino-carbonatíticos (Catalão I e II, Serra Negra, Salitre I, II e III, Araxá e Tapira) ocorrem flogopita picritos, dunitos, bebedouritos, sienitos, carbonatitos e foscoritos (Gibson et al., 1995a). As intrusões deformaram as rochas metassedimentares da Faixa Brasília, quase sempre com geração de estruturas dômicas. Todos os complexos têm mineralização de fosfato.

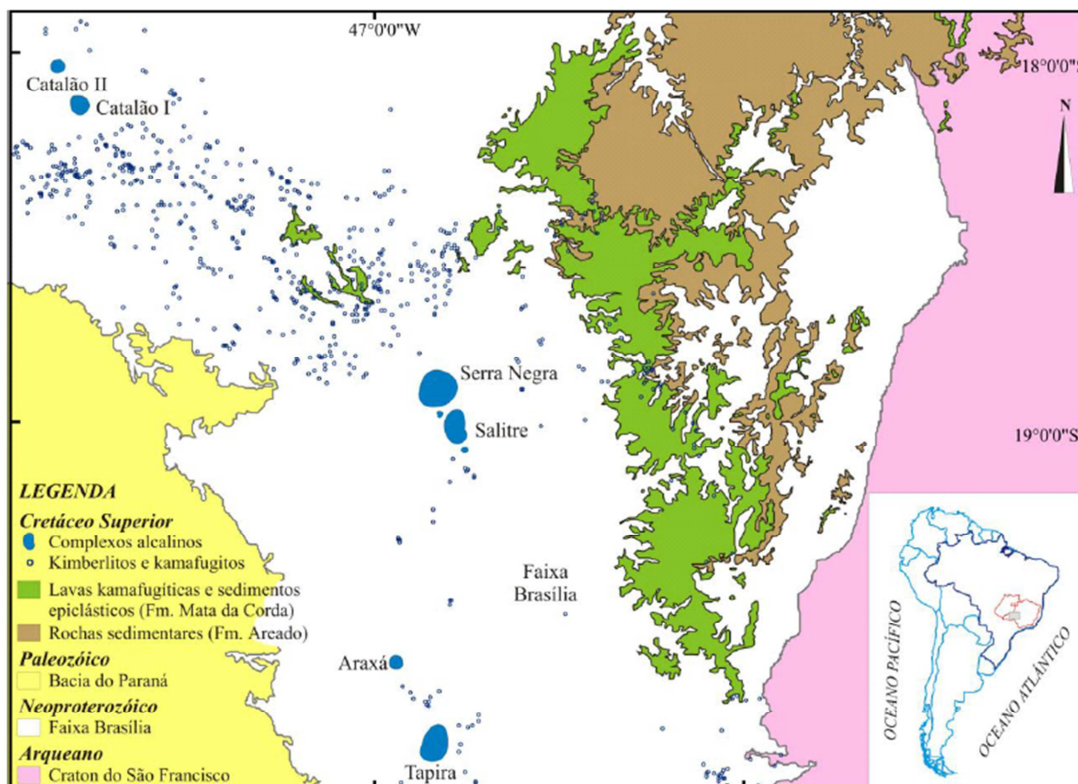


Figura 1.6: Mapa geológico da Província Ígnea do Alto Paranaíba (APIP). Adaptado de Oliveira et al. (2004), com a localização dos complexos plutônicos alcalino-carbonatíticos.

O complexo alcalino-carbonatítico de Tapira, situado cerca de 30 km a sudeste da cidade de Araxá, em Minas Gerais, é o mais meridional de todos os complexos da APIP. Tem forma elíptica, com área de 35 km² (Brod, 1999). É constituído principalmente por piroxenitos (bebedouritos), carbonatitos e foscoritos, e contém importantes depósitos minerais de fosfato e titânio (Brod et al., 2004). A intrusão fenitizou e deformou as encaixantes do Grupo Canastra, com a geração de estrutura dômica. Os efeitos termais e metassomáticos parecem restritos aos quartzitos mais próximos à intrusão. Nas rochas encaixantes próximas ao contato, a interação com os fluidos metassomáticos resultou na formação de piroxênio sódico e feldspato (Brod, 1999). Datações K/Ar apontaram a idade de 85.6 ± 5.1 Ma (Sonoki e Garda, 1988). O depósito de apatita está situado no manto de intemperismo que se desenvolveu principalmente sobre os bebedouritos, e que tem sido explorado desde 1979. Atualmente, as operações estão sob a responsabilidade da empresa Vale Fertilizantes. As reservas remanescentes de fosfato são 679 milhões de toneladas com teor médio de P₂O₅ de 7.6% (Relatório Anual Vale, 2014).

O complexo de Salitre, na região de Patrocínio, Minas Gerais, consiste de três intrusões principais (Barbosa et al., 2012a) – Salitre I, que possui forma oval distorcida, com cerca de 7 km na direção N-S e 5 km na direção E-W, Salitre II, que é um pequeno *plug* (2.5 km²) localizado entre os complexos de Salitre I e Serra Negra, e Salitre III, que forma um pequeno *plug* sem expressão

topográfica a sul de Salitre I. Segundo Barbosa et al. (2012a) Salitre I é formado por três sistemas intrusivos principais. A porção norte do complexo é ocupada por perovskita bebedouritos; a porção sul, por uma segunda intrusão formada por melanita bebedouritos, titanita bebedouritos e diques de sienito representantes dos termos finais da evolução desses bebedouritos; o terceiro sistema é formado por diques anelares e radiais de foscorito e carbonatito na porção centro-norte do complexo. Sienitos foram também descritos por Morbidelli et al. (1997) como representantes do topo da pilha de cumulados. Sonoki e Garda (1988) apresentaram a idade de 86.3 ± 5.7 Ma para Salitre I. O depósito de apatita situa-se no manto de intemperismo, produto de alteração supergênica de foscoritos, bebedouritos e carbonatitos com apatita. As reservas totais de fosfato são 486 milhões de toneladas com teor médio de P_2O_5 de 12.1% (Relatório Anual Vale, 2014).

O complexo de Serra Negra, imediatamente a norte das intrusões de Salitre I, II e III, na região de Patrocínio, MG, é um domo circular, com 10 km de diâmetro, alojado em quartzitos do Grupo Canastra. De acordo com Grasso (2010), Serra Negra é formado por cerca de 70% de dunitos, que ocorrem a partir do contato externo com o quartzito encaixante, até o centro do domo. Nas porções central e norte ocorrem duas intrusões de magnesiocarbonatito circundadas por perovskita bebedouritos. No interior do magnesiocarbonatito setentrional ocorrem duas regiões com predomínio de veios e diques de calciocarbonatito, onde foram identificados apatita calciocarbonatitos que gradam localmente para cumulados foscoríticos bandados. Com menos frequência, cumulados foscoríticos também estão associados aos magnesiocarbonatitos da intrusão setentrional. Diques de traquito porfirítico (Grasso, 2010) e de flogopita picrito (Gibson et al., 1995b; Grasso, 2010) cortam as rochas do complexo. Não foram encontradas indicações de metassomatismo alcalino na encaixante do complexo (Mariano e Marchetto, 1991) que, no entanto, pode estar localmente silicificada. A idade do complexo é de 83.4 Ma (Sonoki e Garda, 1988). O depósito de apatita situa-se no manto de intemperismo, e é produto da alteração supergênica dos carbonatitos com apatita e cumulados foscoríticos.

O complexo de Catalão I situa-se cerca de 20 km a nordeste da cidade de Catalão, em Goiás. É uma intrusão aproximadamente circular, com cerca de 6 km N-S e 5.5 km E-W. Os tipos litológicos incluem carbonatitos, foscoritos, dunitos, bebedouritos, clinopiroxenitos, além de abundantes flogopititos metassomáticos. O centro do complexo é dominado por carbonatito, foscorito e nelsonito, e as porções mais externas, por rochas ultramáficas flogopitizadas. Foscoritos e nelsonitos apresentam um contato brusco e claramente intrusivo com o flogopitito metassomático que também hospeda diferentes estágios de carbonatito (Ribeiro, 2008; Cordeiro et al., 2011b). Tanto os foscoritos quanto os nelsonitos e carbonatitos ocorrem como uma complexa mistura de veios e diques centimétricos a métricos entrecortados (Grasso et al., 2006; Palmieri et al., 2006). A

intrusão do complexo provocou deformação dômica e fenitização dos xistos e quartzitos encaixantes do Grupo Araxá (Ribeiro, 2008). A idade K/Ar obtida foi de 85.0 ± 6.9 Ma (Sonoki e Garda, 1988). O depósito supergênico de apatita tem sido lavrado desde 1982 e, atualmente, pelas empresas Vale Fertilizantes e Anglo American. As reservas remanescentes de fosfato são estimadas em 98 milhões de toneladas a 10.5% de P_2O_5 (Relatório Anual Vale, 2014) somadas a 118 milhões de toneladas a 12.8% de P_2O_5 (*Annual Report* Anglo American, 2013). A existência de depósito de apatita no horizonte de rocha fresca, controlado pelas rochas foscoríticas, foi apontada por Ribeiro (2008), mas até o momento esse depósito primário não está sendo explorado.

O complexo de Catalão II, com idade de 83 Ma (Rb/Sr, Machado Junior, 1992) localiza-se a 8 km do complexo de Catalão I e 15 km a nordeste da cidade de Catalão. É uma intrusão bi-focal, alojada em quartzitos, xistos e filitos do Grupo Araxá e forma um pequeno alto topográfico irregular (18 km^2), alongado na direção NE-SW. Suas margens leste e oeste são sinuosas, possivelmente refletindo intrusões independentes (Machado Junior, 1992). Palmieri (2011) descreveu a porção sul do complexo como sendo formada por enxames de diques de apatita nelsonito, calciocarbonatito, nelsonito e magnesiocarbonatito, encaixados em filitos e anfibolitos fenitizados. Descreve também um *sill* ou pequena câmara acamadada em profundidade, onde ciclos rítmicos mostram a evolução dos nelsonitos para os calciocarbonatitos por cristalização fracionada. É frequente a fenitização no contato entre a encaixante e a intrusão (Machado Junior, 1992). As reservas de fosfato supergênico são 18 milhões de toneladas com teor médio de 12.6% de P_2O_5 e, na rocha fresca, 35 milhões de toneladas com teor médio de 8.5% de P_2O_5 (*Annual Report* Anglo American, 2013). A empresa Anglo American explora minério de nióbio desse complexo.

O complexo de Araxá, objeto de estudo desta pesquisa, será detalhadamente descrito no item 1.8.

1.7. O MANTO DE INTEMPERISMO EM COMPLEXOS ALCALINO-CARBONATÍTICOS

Os complexos alcalino-carbonatíticos brasileiros estão amplamente cobertos por espessos mantos de intemperismo, nos quais localizam-se diversos tipos de depósitos minerais residuais, como os de fosfato e nióbio, ou supergênicos, como os de anatásio, vermiculita, barita, entre outros.

O manto de intemperismo desenvolvido sobre o complexo de Ipanema (Florêncio e Toledo, 1997) é produto da alteração de rochas glimeríticas e apatíticas. Os autores identificaram a evolução dos minerais primários em direção a minerais secundários típicos do intemperismo em clima

tropical: o anfibólio (hastingsita) altera-se para goethita em pseudomorfos; a biotita passa por estágios intermediários de filossilicatos interestratificados de biotita-vermiculita até chegar à composição de vermiculita, seguida de evolução para caulinita nas porções mais evoluídas do perfil. A magnetita dissolve-se parcialmente, e a apatita altera-se para wavellita. Apatita secundária foi observada em quantidades restritas. A partir da identificação da mineralogia primária e secundária, os autores propuseram um itinerário geoquímico dos principais elementos: na alteração da biotita e do anfibólio ocorre a lixiviação de K_2O e MgO , com aportes de Al_2O_3 e Fe_2O_3 que resultam em argilominerais e produtos ferruginosos. A alteração de apatita diretamente para wavellita, sem fases transicionais do grupo da plumbogummita, indica lixiviação total de CaO e aporte de Al_2O_3 . A porção mais superior do perfil de intemperismo (saprolito aloterítico) é formada por goethita, caulinita e wavellita; geoquimicamente, é rica em óxidos residuais (Fe_2O_3 , Al_2O_3 e, em parte, SiO_2). P_2O_5 é raro, o que indica sua lixiviação após a formação dos fosfatos secundários. Florêncio e Toledo (1997) identificam como peculiaridade do complexo de Ipanema o papel do intemperismo na gênese do depósito de apatita, que foi apenas o de tornar a rocha friável, sem promover o enriquecimento residual da apatita, como identificado na maioria dos outros mantos de intemperismo desenvolvidos sobre complexos alcalino-carbonatíticos.

A jazida residual de fosfato associada ao carbonatito de Juquiá (Alcover Neto e Toledo, 1993) é um importante exemplo de jazida desenvolvida predominantemente a partir da alteração de carbonatitos, uma vez que as rochas alcalinas silicáticas ocorrem em quantidades subordinadas nesse complexo. Cinco fácies foram descritas no perfil intempérico desse complexo: carbonatito em início de alteração, isalterito inicial, isalterito evoluído, zonas alteradas de transição e materiais aloteríticos. O estágio inicial da alteração do carbonatito caracteriza-se por dissolução parcial de dolomita e conservação total da apatita primária. O isalterito inicial caracteriza-se por ausência de carbonatos, boa conservação de apatita primária e pirocloro, alteração parcial da magnetita, e os seguintes minerais secundários: óxidos/hidróxidos de ferro e manganês, apatita, fosfato de terras raras e fosfatos aluminosos. O isalterito evoluído é caracterizado por importante dissolução da apatita. As zonas alteradas de transição são associações entre as rochas silicáticas encaixantes e os carbonatitos, ricas em apatita primária e formadas também por caulinita, crandallita, goethita, óxidos/hidróxidos de ferro e manganês, e quartzo. Os materiais aloteríticos são caracterizados por intensa ferruginização e presença de caulinita e fosfatos aluminosos.

O processo de lateritização do carbonatito de Juquiá foi caracterizado por Alcover Neto e Toledo (1993) como sendo associado a soluções lixiviantes com baixa concentração de silício e alumínio, conforme evidenciado pela baixa concentração desses elementos nos minerais neoformados, que é devida, por sua vez, à baixa concentração desses elementos no protolito. Os

autores propuseram a divisão do processo de lateritização em dois estágios: um estágio inicial, com predomínio de dissolução de carbonatos e águas percolantes ricas em HCO_3^- e com pHs alcalinos, inadequadas à dissolução da apatita; e um estágio posterior, no qual após a dissolução total dos carbonatos as soluções perdem o caráter alcalino e a apatita é amplamente dissolvida. A rara presença de fosfatos secundários aluminosos no manto de alteração derivado de carbonatitos evidencia a carência em alumínio no protolito. Por outro lado, os fosfatos aluminosos ocorrem de forma abundante no manto de intemperismo desenvolvido sobre as rochas alcalinas silicáticas da zona de transição.

Oliveira e Imbernon (1998) caracterizaram detalhadamente o manto de intemperismo de Catalão I como sendo formado por produtos de alteração de foscoritos flogopitizados e cortados por diques de carbonatitos, que evoluem gradualmente à rocha alterada, seguido de saprolito isalterítico e saprolito aloterítico. A rocha alterada é o horizonte no qual a rocha fresca começa a ser alterada, porém há preservação parcial dos carbonatos. Geoquimicamente, apresenta um pequeno enriquecimento em Fe_2O_3 e TiO_2 e empobrecimento em K_2O comparativamente à rocha fresca. O isalterito é caracterizado pela ausência de carbonatos, que acarreta a maior concentração residual de apatita de todo o perfil intempérico, e pela presença de goethita, quartzo e pequenas quantidades de fosfatos aluminosos do grupo da plumbogummita. Após a dissolução total dos carbonatos, o ambiente torna-se mais ácido, propício à desestabilização da apatita. Geoquimicamente, é caracterizado por baixos conteúdos de MgO e SiO_2 e elevados de P_2O_5 e CaO . A apatita no horizonte saprolítico isalterítico quase não apresenta indícios de alteração, mostrando texturas similares às observadas nas apatitas da rocha fresca. Nas porções mais superiores desse horizonte, no entanto, a superfície das apatitas pode apresentar feições de corrosão, que indicam dissolução incipiente. O manto de intemperismo evolui, então, para o saprolito aloterito, caracterizado pela dissolução completa da apatita e formado também por goethita, gorceixita e quartzo. Geoquimicamente, é o horizonte marcado por conteúdos elevados de Fe_2O_3 e TiO_2 . Todo o P_2O_5 ocorre sob a forma de fosfatos aluminosos secundários. Por fim, a cobertura é formada por caulinita, goethita, quartzo, fosfatos aluminosos e anatásio. Nesse horizonte, os conteúdos de SiO_2 e Al_2O_3 são elevados e Fe_2O_3 é menor do que o observado no saprolito aloterito.

Oliveira e Imbernom (1998) definiram precisamente os horizontes de intemperismo de Catalão, mas apontaram que a grande heterogeneidade litológica dos protolitos pode dificultar comparações diretas entre suas composições e os produtos de alteração.

O processo de intemperismo de Catalão é laterítico, caracterizado pela perda de Ca, Mg, K e Si, e acumulação de Fe e Ti. P apresenta um comportamento particular, sendo concentrado nos horizontes intermediários sob a forma de apatita. Após a desestabilização da apatita, o P é

parcialmente lixiviado do perfil intempérico e parcialmente incorporado em fosfatos aluminosos neoformados.

Posteriormente, Ribeiro (2008) propôs uma individualização de tipos de minério de fosfato em Catalão a partir dos horizontes de intemperismo descritos por Oliveira e Imbernon (1998), com critérios geoquímicos. Da base para o topo, distinguiu os minérios sílico-carbonatado e os seguintes minérios contidos no horizonte isalterítico: micáceo de base, micáceo médio, micáceo de topo, micáceo oxidado e oxidado. Adicionalmente, foram distinguidos o aloterito e a cobertura, estéreis para fosfato.

O minério sílico-carbonatado ocorre no horizonte de rocha alterada e é formado por calcita, dolomita, apatita, flogopita, magnetita, ilmenita, perovskita, e quantidades subordinadas de vermiculita, óxidos/hidróxidos de ferro e argilominerais. É caracterizado quimicamente por conteúdos de $P_2O_5 > 5\%$, $MgO > 6\%$, relação $CaO/P_2O_5 \geq 1.6$. De acordo com Ribeiro (2008), essa relação é amplamente utilizada em Catalão por indicar a presença de carbonatos (relações próximas de 1.6 ou maiores) e fosfatos secundários (relações menores que 1.3). Apesar de ser classificado como minério, o sílico-carbonatado não é, ainda, utilizado comercialmente.

O minério micáceo de base situa-se na base do horizonte saprolito isalterítico. É formado por apatita, flogopita, magnetita e ilmenita, quantidades menores de anatásio, vermiculita, óxidos/hidróxidos de ferro e argilominerais, além de restos de calcita e dolomita. Geoquimicamente, é caracterizado por conteúdos de $P_2O_5 \geq 5\%$, MgO entre 3.5 e 6.0% e relação CaO/P_2O_5 entre 1.45 e 1.60.

O minério micáceo médio situa-se acima do micáceo de base e é formado por apatita, flogopita, magnetita, ilmenita, magnetita, anatásio, vermiculita, óxidos/hidróxidos de ferro e argilominerais, sendo que restos de calcita e dolomita podem ainda estar presentes. É caracterizado geoquimicamente por conteúdos de $P_2O_5 \geq 5\%$, MgO entre 2.5 e 3.5% e relação CaO/P_2O_5 entre 1.35 e 1.45.

O minério micáceo de topo situa-se acima do micáceo médio e é formado por apatita, magnetita, ilmenita, anatásio, óxidos/hidróxidos de ferro, argilominerais e vermiculita. Geoquimicamente é caracterizado por conteúdos de $P_2O_5 \geq 5\%$, MgO entre 1.5 e 2.5% e relação CaO/P_2O_5 entre 1.32 e 1.35.

O minério micáceo oxidado ocorre acima do micáceo de topo e é formado por apatita, fosfatos secundários aluminosos, magnetita, ilmenita, anatásio, óxidos/hidróxidos de ferro, argilominerais e restos de vermiculita. Caracterizado geoquimicamente por conteúdos de $P_2O_5 \geq 5\%$, MgO entre 0.5% e 1.5 e relação CaO/P_2O_5 entre 1.25 e 1.35.

O minério oxidado ocorre acima do micáceo oxidado e é formado por apatita, fosfatos secundários aluminosos, magnetita, ilmenita, anatásio, óxidos/hidróxidos de ferro e argilominerais. Caracterizado geoquimicamente por conteúdos de $P_2O_5 \geq 5\%$, $MgO < 0.5\%$ e relação CaO/P_2O_5 entre 0.5 e 1.25.

1.8. O COMPLEXO DE ARAXÁ

1.8.1 Contexto Geológico

A região de Araxá está estruturada em uma dobra sinformal regional denominada sinforma de Araxá (Simões e Navarro 1996), cuja linha de charneira apresenta direção aproximada N 70° W com caimento suave para NW. Seer (1999) descreve a tectonoestratigrafia da região como sendo formada por três lascas tectônicas alóctones separadas por zonas de cisalhamento que configuram falhas de empurrão. Na lasca inferior, ocorrem as rochas do Grupo Canastra (conjunto de metassedimentos detríticos, em grande parte carbonosos e com fácies carbonatadas subordinadas). Esta, por sua vez, cavalga o Grupo Bambuí, uma cobertura autóctone do Cráton do São Francisco, situada a leste. A lasca tectônica intermediária reúne as rochas do Grupo Ibiá. Empurrada sobre esta, ocorre a lasca tectônica superior que engloba as rochas do Grupo Araxá, que são um conjunto predominantemente meta-ígneo máfico-ultramáfico e subordinadamente metassedimentar, intrudido por granitóides ricos em pegmatitos.

O Grupo Ibiá compreende um conjunto de metassedimentos detríticos metamorfisados em fácies xisto verde baixo, que se distribui a sul, leste e norte da cidade de Araxá. Seus litotipos principais são calcifilito, quartzo-filito, filito e quartzito micáceo com foliação bem desenvolvida. É comum a presença de veios de quartzo e carbonato paralelos à foliação principal, com espessuras geralmente centimétricas, dobrados e rompidos. Com exceção do quartzito, as demais rochas apresentam coloração verde a verde acinzentada quando frescas, e rosadas quando intemperizadas. O calcifilito e o quartzo-filito apresentam maior distribuição espacial e diferenciam-se apenas pela presença de carbonato no primeiro. Estão arranjados como ritmitos, cujas lâminas têm espessuras milimétricas a centimétricas. Os ritmitos gradam para filitos verde-acinzentados e para quartzitos finos micáceos em direção ao topo estratigráfico. O bandamento do calcifilito e do quartzo-filito é dado por variações composicionais ora predominando quartzo, feldspato, carbonato e mica branca nas bandas mais claras, ora clorita e minerais opacos nas bandas mais escuras. Em geral, as bandas são descontínuas lateralmente e o tamanho dos grãos, submilimétrico. Os feldspatos são,

principalmente, plagioclásio e, subordinadamente, ortoclásio. O plagioclásio pode constituir clastos imersos em matriz fina, ou então aparece junto aos agregados de quartzo e carbonato, quando também ocorre como grãos de tamanhos similares a esses. Feldspato potássico, distribuído ao longo de alguns horizontes associados com grãos quebrados e arredondados de turmalina, granada e zircão, circundados pela foliação, indicam sua origem detrítica. De acordo com Seer et al. (2000), esta mineralogia reflete a composição das áreas fonte, já que foram detectadas bandas com grãos detríticos. Deste modo, o bandamento composicional reflete o acamamento sedimentar original, marcado por intercalações de siltitos e arenitos finos a muito finos com argilitos e lembram laminações plano-paralelas de ritmitos.

O Grupo Ibiá é a unidade geológica de mais baixo metamorfismo na sinforma de Araxá, alcançando, no máximo, a zona da clorita da fácies xisto verde. As unidades Canastra e Araxá alcançaram, pelo menos, a zona da granada da fácies xisto verde, e determinações da composição de anfibólio e plagioclásio demonstram que as rochas metamáficas do Grupo Araxá alcançaram a fácies anfibolito (Seer, 1999). Como a unidade Ibiá está posicionada entre duas unidades com metamorfismo mais elevado, delas separada por zonas de cisalhamento, os autores supõe que, durante o evento metamórfico principal, ela estava em posição crustal mais rasa e, portanto, espacialmente afastada daquelas, uma vez que não foram encontradas transições nas paragêneses metamórficas.

1.8.2 Geologia do complexo alcalino-carbonatítico de Araxá

O complexo alcalino-carbonatítico de Araxá, situado cerca de 6 km da cidade de Araxá, MG, é circular, com 4.5 km de diâmetro, está alojado em seqüências metassedimentares Neoproterozóicas do Grupo Ibiá (Seer et al., 2000). A intrusão desse complexo, datada de 89.4 ± 10.1 Ma (Sonoki e Garda, 1988), desenvolveu fraturas radiais na encaixante, deformando-a em estrutura dômica (Traversa et al., 2001).

O complexo está metassomatizado e é formado por flogopititos cortados por *necks*, *plugs* e veios carbonatíticos, veios e diques de apatitito, nelsonito, magnetitito, e de barita (Torres, 1996). Está coberto por um espesso manto de intemperismo com espessura de até 230 m (Rodrigues e Lima, 1984). A presença de veios e vênulas de carbonatitos e foscoritos e sua associação com o depósito de fosfato de Araxá foi reconhecida também por Issa Filho et al. (1984). Traversa et al. (2001) descreveram o complexo de Araxá como sendo formado por um núcleo carbonatítico e por

uma complexa rede de diques radiais e concêntricos, assim como veios menores. Adicionalmente, aqueles autores descreveram rochas ricas em mica, foscoritos e lamprófiros.

De acordo com Silva et al. (1979), o carbonatito principal possui forma arredondada, com aproximadamente 2 km de diâmetro, e situa-se no centro do complexo (figura 1.7). Aqueles autores constataram que os carbonatitos ocorrem principalmente como um sistema complexo de diques e veios, de alguns milímetros a vários metros de espessura, cortando flogopititos metassomáticos (referidos, na época, como glimmeritos). Silva (1986) reconheceu diversas fases de injeção de líquido carbonatítico, responsável pela brechação das encaixantes alcalinas. O principal tipo de carbonatito no complexo é dolomítico, de granulação média a grossa. Este carbonatito pode conter ainda quantidades subordinadas de calcita, ankerita, barita, apatita, magnetita, perovskita, pirita, flogopita, anfibólio sódico, isokita, bariopirocloro e estroncianita, entre outros (Silva et al. 1979; Issa Filho et al., 1984). Subordinadamente, diques de calcita carbonatitos ocorrem na porção NW do complexo.

Os foscoritos de Araxá ocorrem na parte central do domo e apresentam granulação fina a grossa, cor escura e grande variação modal dos seus principais constituintes: magnetita, apatita, flogopita e carbonatos (Issa Filho et al., 1984; Silva, 1986).

Uma auréola com predomínio de rochas silicáticas cortadas por diques de carbonatito foi descrita por Silva et al. (1979) entre a zona central rica em carbonatitos e o anel de quartzitos fenitizados. Estas rochas, classificadas originalmente como glimmeritos (Silva et al., 1979; Issa Filho et al., 1984), são marrom escuras, finas a grossas, constituídas por flogopita com quantidades menores de dolomita, magnetita e apatita. Geralmente estão brechadas e cortadas por carbonatito e podem conter, ainda, restos preservados de olivina e diopsídio. São formadas como produto de metassomatismo alcalino sobre bebedouritos, e a designação flogopitito tem sido preferida para elas (e.g. Brod et al., 2000, 2001, 2004; Grasso et al., 2006; Palmieri et al., 2006; Barbosa et al., 2012a) em detrimento do termo glimmerito, que deve ser reservado para rochas ígneas (e.g. Le Maitre, 2002).

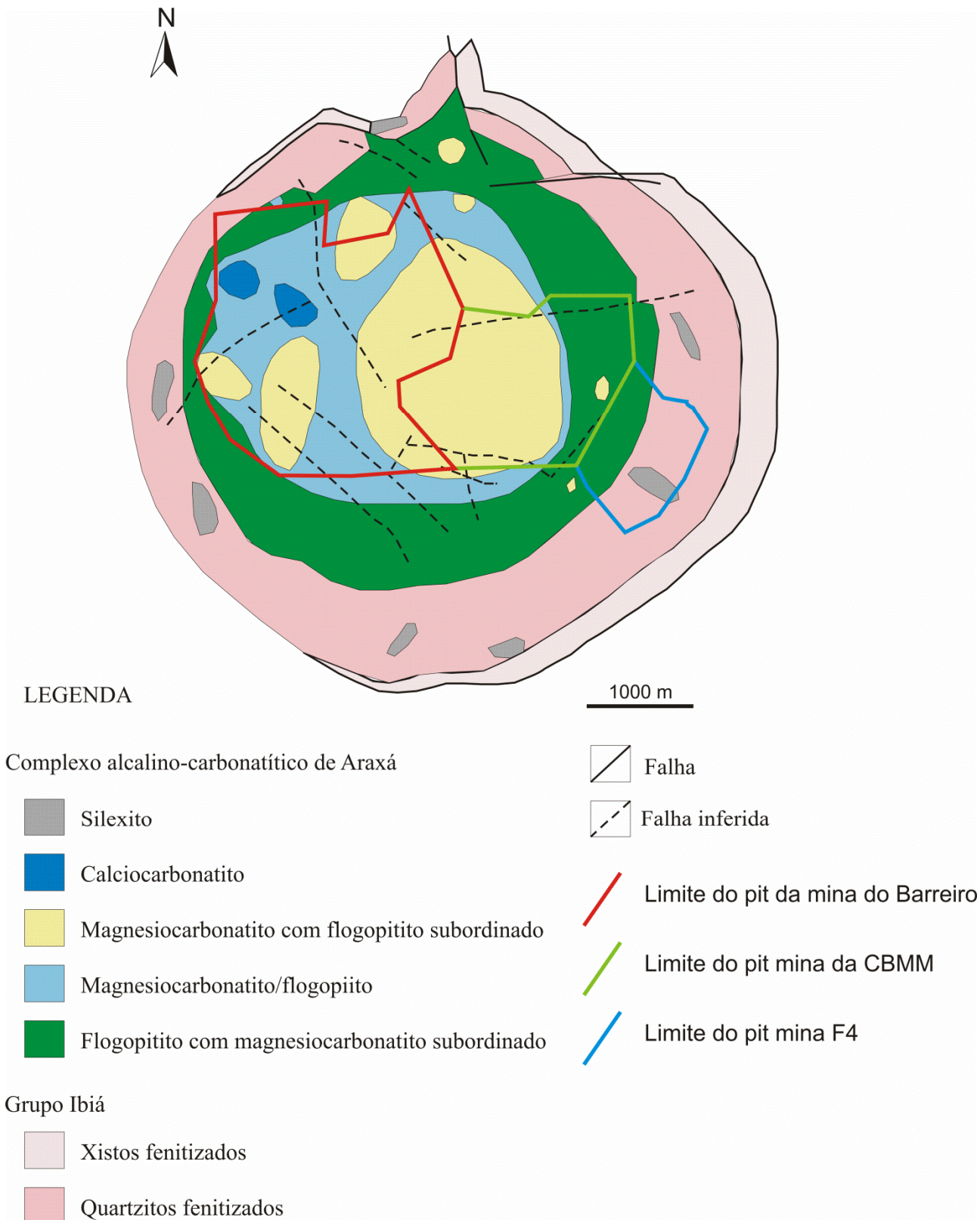


Figura 1.7: Mapa geológico do Complexo de Araxá (modificado de Silva et al., 1979).

Torres (1996) descreveu afloramentos de frente de lavra da mina do Barreiro. Em sua análise, os flogopititos constituem a principal unidade aflorante na área, são formados por flogopita,

carbonato, olivina, magnetita e apatita, e cortados por veios e vênulas de material carbonatítico. Dois tipos de carbonatitos foram descritos por aquele autor, o carbonatito em forma de *plug* composto por carbonatos, apatita e flogopita, e o carbonatito em forma de veios centimétricos a decimétricos, formados por carbonato, pirita e barita acessória. Veios de magnetita, apatita, barita, veios silicificados e apatitas botrioidais também foram descritos nas frentes de lavra observadas pelo autor.

Outro estudo petrográfico de detalhe foi realizado por Torres (2008) em amostras de testemunhos de sondagem da mina do Barreiro. Esse autor descreveu quatro grupos de rocha: os wehrlitos, constituídos essencialmente por olivina e piroxênio, encontrados na maioria dos furos descritos pelo autor; os bebedouritos, constituídos por diopsídio, flogopita, magnetita, apatita e perovskita, interpretados como uma porção parcialmente preservada da intensa flogopitização a que foram submetidas as rochas do complexo; os flogopititos, formados por flogopita, carbonato, olivina, magnetita e apatita e que são, segundo o autor, a principal unidade aflorante na frente de lavra; carbonatitos predominantemente calcíticos, com dolomita subordinada, além apatita e flogopita, alojados nas rochas ultramáficas em forma de *plugs* e *stocks*; e, por fim, foscoritos formados essencialmente por apatita, magnetita e um silicato magnésiano (flogopita, olivina, piroxênio), além de carbonato acessório, que cortam os carbonatitos e as rochas silicáticas. Ressalta-se que a predominância de carbonatitos calcíticos em Araxá apontada por Torres (2008) não corresponde às observações de Silva et al. (1979) e Issa Filho et al. (1984), cujas descrições apontam os dolomita carbonatitos como o principal tipo de carbonatito em Araxá.

O depósito de fosfato de Araxá é formado por concentração supergênica de apatita (Grossi Sad e Torres, 1976; Issa Filho et al., 1984; Braga e Born, 1988; Silva, 1986; Kamitani e Hirano, 1990; Torres e Gaspar, 1995; Torres et al., 2005). Suas reservas residuais foram calculadas em 131 Mt de minério supergênico com teor médio de 11.6% de P_2O_5 (Relatório Anual Vale, 2014).

1.8.3 A mina do Barreiro

O complexo de Araxá (figura 1.7) é historicamente conhecido por suas reservas de nióbio e fosfato. A lavra do fosfato no Barreiro foi iniciada pela Arafertil na década de 1970 (Silva e Saito, 2010), enquanto a lavra do nióbio remonta a meados da década de 1950 (Tavares, 2010), pela CBMM na porção central do complexo. Em 2010, a Vale Fertilizantes abriu um novo *pit* de fosfato, a leste do *pit* da CBMM, denominado F4.

O depósito de fosfato do Barreiro foi descoberto em 1939 pelo Instituto Agrônomo de Campinas (Valente, 2004) e desde 1948 há registro de pesquisa geológica. As operações de lavra foram iniciadas em 1973 e, a partir de 2002, as pesquisas para detalhamento da jazida e adensamento da malha de sondagem foram intensificadas (Tavares, 2010). Esse último autor contabilizou um total de 289 furos de sonda realizados na mina do Barreiro na fase de pré-operação, de 1945 a 1972, equivalentes a 24.936 m de testemunhos de sondagem, 781 furos de sonda na fase de operação de 1973 a 2001, equivalentes a 54.707 m de testemunhos, e 604 furos de sonda de 2002 a 2010, equivalentes a 45.960 m de testemunhos.

Historicamente, os horizontes de intemperismo têm sido individualizados na mina do Barreiro (Braga et al., 2010), assim como nas demais minas de fosfato do Alto Paranaíba (Grasso et al., 2006; Ribeiro, 2008), como um subsídio fundamental ao planejamento e operação de lavra e ao beneficiamento mineral (item 3.2). A descrição abaixo se refere aos horizontes de intemperismo do Barreiro descritos por Torres (1996). Nota-se que o referido trabalho não abordou a rocha alterada, horizonte de intemperismo que ocorre imediatamente acima da rocha fresca.

O horizonte de saprolito grosso, definido entre as cotas 990 e 1010 m da mina do Barreiro, é formado por flogopita, vermiculita, magnetita, apatita e carbonato. Veios de apatita fresca ocorrem em abundância. Geoquimicamente, possui teores baixos a intermediários de CO_2 , moderados de MgO e CaO e elevados de P_2O_5 . Torres (1996) pontua que a flogopita e a vermiculita dificultam a concentração da apatita no processo de beneficiamento, e por isso esse horizonte não havia sido lavrado intensivamente. As características mineralógicas e geoquímicas desse horizonte são similares às características dos minérios micáceos descritos por Ribeiro (2008) para Catalão I.

Horizonte de saprolito fino (1010 a 1060 m), formado por apatita, quartzo, goethita, magnetita parcialmente alterada para goethita e hematita, anatásio, hematita e fosfatos aluminosos secundários. Nos níveis mais superiores foram identificadas adicionalmente caulinita e gibbsita, em quantidades subordinadas, e pseudomorfos de apatita formados por fosfatos aluminosos secundários. Caracterizado geoquimicamente pelo desaparecimento de CO_2 e MgO , é o horizonte lavrado de forma intensiva. As características mineralógicas e geoquímicas desse horizonte são similares às características do minério oxidado descrito por Ribeiro (2008) para Catalão I.

Horizonte laterítico (1060 a 1110 m), bem definido pela presença de goethita, hematita, fosfatos aluminosos secundários, gibbsita, caulinita, anatásio, baixos conteúdos de magnetita e quartzo, e ausência de apatita. As principais características geoquímicas são a ausência de MgO e CaO , baixos conteúdos de SiO_2 , valores intermediários a baixos de P_2O_5 e enriquecimento residual de Fe_2O_3 , Al_2O_3 e BaO . É estéril para apatita.

A compreensão dos horizontes de intemperismo é fundamental para o conhecimento dos tipos de minério, porque esses horizontes são importantes controles de mineralização em complexos carbonatíticos (Ribeiro, 2008). Por outro lado, a descrição dos protolitos vem sendo historicamente realizada nas operações da mina do Barreiro apenas nos afloramentos e testemunhos de sondagem de rocha fresca (Braga et al., 2010). A carência de informações litológicas representa uma grande lacuna no conhecimento geometalúrgico do depósito, uma vez que, para compreender os diferentes tipos de minério, é fundamental associar as características dos níveis de intemperismo com as da rocha fresca.

Por exemplo, espera-se que um minério oxidado contenha mais apatita do que um minério micáceo devido ao maior grau de intemperismo químico e consequente maior lixiviação dos elementos contaminantes. No entanto, um minério oxidado derivado de um flogopitito certamente terá menos apatita do que um minério micáceo derivado de um foscorito. Isto se deve à quantidade original de apatita muito menor no flogopitito, ainda que este tenha passado por um maior grau de enriquecimento supergênico comparativamente ao minério derivado de foscorito. A presença de carbonato, seja como constituinte da rocha mineralizada propriamente dita, seja na forma de diques de carbonatito, também afeta de maneira importante os teores do minério residual, uma vez que todo o carbonato é lixiviado já na transição de rocha alterada para isalterito micáceo.

1.9. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINÉRIOS

A caracterização tecnológica de minérios compreende o estudo de suas propriedades físicas, químicas, físico-químicas e mineralógicas, conduzida de forma objetiva e voltada para o aproveitamento industrial. É uma etapa prévia aos estudos de processo mineral, inserida no contexto das investigações tecnológicas para exploração do minério, visando avaliar recursos minerais como matéria-prima para indústrias de transformação (metalúrgica, química, diversas), ou menos frequentemente para aplicação direta. É um estudo orientado pelas exigências da área de processo mineral, de forma a fornecer informações sobre as características do minério, correlacionando-as com seu comportamento no beneficiamento e gerando dados para avaliar as condições de adequação do minério às especificações desejadas. O conhecimento do minério permite melhor direcionamento do processo mineral e indica a qualidade esperada dos produtos (Sant' Agostino, 1996).

Diversos trabalhos na área de caracterização tecnológica já foram realizados em minérios dos complexos da Província do Alto Paranaíba (Sant' Agostino, 1996; Barros, 1997; Tassinari et al., 2001; Barros, 2005; Uliana et al., 2009; Paiva et al., 2011, entre outros).

Uma importante referência sobre os métodos e aplicações da caracterização tecnológica de minérios é o trabalho de Neumann et al. (2002), a partir do qual foram extraídas as informações sobre técnicas e aplicações apresentadas a seguir. Os autores abordam de forma prática as questões a serem consideradas na definição dos métodos para se caracterizar uma amostra, tais como mineralogia e demais propriedades do minério, objetivos e abrangência da caracterização, rotas de processamento, disponibilidade de tempo, capacidade analítica e recursos financeiros.

Os autores supracitados sugerem que a caracterização de uma amostra seja executada em estágios interdependentes. O primeiro estágio é o fracionamento da amostra, que facilita a identificação dos minerais pela sua relativa individualização e melhora a quantificação das fases, além de estabelecer algumas propriedades físicas dos minerais, que são úteis para processo. O segundo estágio abrange a identificação das fases, facilitada à medida que os minerais são concentrados no fracionamento. A identificação pode ser feita com diversas técnicas analíticas, como microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura (MEV-EDS) e a difração de raios X (DRX). O terceiro estágio é a quantificação dos minerais. Diversas técnicas podem ser utilizadas para quantificar os minerais e, dependendo dos objetivos do trabalho, pode-se simplificar a variação mineralógica, efetuando agrupamento de minerais em função de sua resposta num determinado processo. O quarto estágio é verificar a liberação dos minerais de interesse em relação aos de ganga. A eficiência da separação das fases de interesse em relação às de ganga, calculada a partir dos dados das três etapas anteriores, e verificada em diversas faixas de tamanho de partículas, é um dos métodos clássicos de se obter o grau de liberação de um minério, assim como a estimativa de liberação por faixa de tamanho em microscópio. Métodos mais modernos, baseados em análise de imagens, fornecem resultados mais precisos e completos.

O fracionamento da amostra facilita a identificação dos minerais, reduz o erro de sua quantificação e fornece informações a respeito de suas propriedades físicas com aplicação direta no desenvolvimento da rota de processamento.

A preparação de amostras inicia-se com uma britagem e moagem a um tamanho de partícula máximo, normalmente denominado *top size*. Este procedimento é necessário para garantir a representatividade da amostra de cabeça e de suas diversas alíquotas. A cominuição da amostra deve evitar a produção de finos.

Após cominuição, a amostra deve ser homogeneizada e quarteada para obtenção das alíquotas para os diferentes ensaios. A quantidade de amostra em cada alíquota depende de sua destinação.

As alíquotas destinadas a fracionamento, identificação da assembleia mineralógica e sua quantificação são classificadas em peneiras, preferencialmente a úmido. A quantidade de peneiras e

a seleção das malhas são determinadas de acordo com o equilíbrio entre a precisão da informação que será obtida, tempo e recursos gastos na execução da caracterização.

A classificação obedece à série *Tyler* completa ou parcialmente, acrescida das peneiras de 325 e 635 malhas (44 e 20 μm , respectivamente), que fornecem maior resolução nas frações mais finas. O termo “finos” de uma caracterização se refere ao passante na peneira de malha mais fina, geralmente abaixo de 44, 37 ou 20 μm (325, 400 ou 635 malhas, respectivamente). Depois de peneiradas, as amostras são secas e pesadas.

A separação magnética mais usada em caracterização é o separador magnético isodinâmico Frantz, composto por uma calha vibratória com inclinações variáveis nos seus sentidos longitudinal e transversal, localizada entre, e muito próxima, a dois eletroímãs de corrente regulável, que definem a densidade de fluxo do campo magnético. A separação dos minerais é função do campo, da inclinação lateral da calha, da velocidade de escoamento das partículas, da sua inclinação longitudinal, da intensidade da vibração e da quantidade de material alimentado no funil.

A caracterização mineralógica engloba a identificação dos minerais de minério e de ganga e a sua quantificação.

A identificação dos minerais é baseada em sua composição química, estrutura e propriedades físicas. Para a caracterização, normalmente se trabalha em escala microscópica. Os métodos mais empregados para identificação dos minerais nesta escala são as microscopias óptica e eletrônica, e a difração de raios X.

O trabalho em lupa ou microscópio estereoscópico permite análise das amostras em grão, sem necessidade de se montar seções polidas ou delgadas. Os minerais são identificados por cor, brilho, hábito, clivagens e fratura. Esse tipo de análise é padrão na análise preliminar de uma amostra, para identificação de minerais mais comuns, avaliação do tamanho dos cristais e estimativa visual de tamanho de liberação. O microscópio estereoscópico também é importante na identificação de recobrimentos ferruginosos ou outras formas de alteração superficial dos grãos não visíveis por técnicas mais sofisticadas, como microscopia eletrônica de varredura.

A quantificação de fases em lupa e microscópio estereoscópico pode ser feita por estimativa visual e catação das fases com posterior pesagem. As microscopias ópticas de luz transmitida, para minerais transparentes, e de luz refletida, para minerais opacos, são provavelmente os métodos de identificação de minerais mais tradicionais.

A petrografia em seções delgadas é a melhor maneira de se identificar silicatos, que apresentam grande similaridade composicional ou estrutural e, portanto, dificuldades para sua identificação por MEV/EDS ou DRX, mas que são facilmente identificáveis ao microscópio óptico. A quantificação das fases, por outro lado, é mais restrita. A metalografia em seções polidas, por

outro lado, é excelente para identificar minerais opacos, mas os minerais transparentes em geral não podem ser resolvidos por esta técnica. Se na amostra a ser analisada coexistirem minerais transparentes e opacos, há necessidade de complementação da análise, e as seções delgadas e polidas permitem análise sequencial em luz transmitida e refletida.

A difração de raios X (DRX) é outra das ferramentas básicas para caracterização mineralógica de minérios. O método baseia-se na interação de ondas na frequência de raios X com os planos de repetição sistemática do retículo cristalino. A Lei de Bragg fornece a base teórica do método: $\lambda = 2d \sin\theta$, onde λ é o comprimento de onda da fonte de raios X utilizado, d são as distâncias interplanares e θ é o ângulo da reflexão. Um conjunto das diversas distâncias interplanares d é típica para cada mineral, e estão tabuladas em diversas referências, sendo a mais difundida e utilizada a do ICDD (*International Center for Diffraction Data*). As intensidades relativas dos picos são muito afetadas por orientação preferencial na preparação das amostras, pela superposição de picos de diferentes fases, pela variação da composição dos minerais, e outros fatores. Além disto, a intensidade e a largura dos picos dependem muito da cristalinidade das fases. A simples comparação de altura ou da integral da área dos picos não representa quantificação nem permite comparação quantitativa das fases.

Outro equipamento fundamental à caracterização de minérios é o microscópio eletrônico de varredura (MEV), principalmente se estiver acoplado a um espectrômetro de dispersão de energia (EDS) para permitir a determinação de elementos químicos em pontos de até 2 μm de diâmetro. O funcionamento do MEV é baseado na interação de um feixe de elétrons finamente colimado com a amostra. Para aplicações gerais, as imagens mais comuns são as de elétrons secundários, produzidos pela interação do feixe com os átomos presentes na amostra. Estas imagens são excelentes para topografia, e provavelmente a sua maior aplicação para tecnologia mineral é verificar a morfologia de minerais. Contudo, em tecnologia mineral as imagens mais importantes são as de elétrons retroespalhados (*backscattered electrons - BSE*), que são os elétrons do feixe que se chocam com as eletrosferas dos átomos, são arremessados de volta e detectados num detetor que circunda a abertura inferior da coluna de elétrons. Nestas imagens, o nível de cinza é proporcional ao número de elétrons, e conseqüentemente ao peso atômico médio em cada pixel da imagem. Com essa técnica é possível, portanto, separar as fases pela resposta do detetor, o seu nível de cinza. Se o MEV dispõe de EDS, a identificação dos minerais é imediata pela sua composição química, eventualmente complementada pelo conhecimento prévio da amostra. Se a amostra não for naturalmente condutora, deve receber um recobrimento. O mais comum é o de carbono vaporizado de um filamento ou eletrodo. O carbono apresenta um único pico no espectro de EDS, portanto sua interferência nas microanálises é pouco significativa.

A quantificação dos minerais é geralmente bem mais complexa que sua qualificação, e fortemente dependente da mineralogia da amostra e dos recursos analíticos disponíveis. Nesta etapa, é fundamental estabelecer as reais necessidades do projeto, dado que uma quantificação mais simplificada, com maior erro e/ou agrupando um conjunto dos minerais, pode ser satisfatória. Os procedimentos de quantificação comumente aplicados são cálculos estequiométricos a partir de análise química e da composição mineralógica da amostra, método de Rietveld e análise de imagens, sendo normal a combinação de dois ou mais métodos. A análise pode também ser parcial, quando apenas alguns minerais de minério ou de ganga interessam, prática amplamente utilizada em acompanhamento de processo mineral.

O grau de liberação é a proporção do mineral útil nas partículas. As associações entre o mineral útil e os minerais de ganga interferem diretamente na granulometria de liberação do minério e determinam a granulometria a partir da qual ocorre a individualização de partículas monominerálicas do mineral de interesse.

O espectro de liberação é a distribuição da composição de partículas de uma população. Partículas formadas por apenas uma fase mineral denominam-se partículas liberadas, enquanto as formadas por mais do que uma fase mineral denominam-se partículas compostas. O estudo de grau de liberação procura conhecer a distribuição da composição, ou seja, quantas partículas são gangas liberadas, quantas são de mineral de minério liberado e quantas são compostas. A liberação é uma característica muito importante na eficiência dos processos de separação, mas o estudo do espectro de liberação não é uma atividade simples.

Partículas em amplas faixas de tamanho não devem ser montadas juntas, devido à dificuldade em se gerar imagens com magnificação apropriada para todos os tamanhos de partículas simultaneamente. Desbaste deve ser feito antes do polimento, de forma que as primeiras camadas de partículas sejam descartadas, evitando-se uma orientação preferencial das partículas. O objetivo é obter uma seção tal que qualquer partícula da população revele a sua estrutura interna em diferentes leituras, gerando-se, dessa forma, um plano de secionamento randômico. As amostras polidas devem ser recobertas com carbono e as imagens devem ser geradas em número estatisticamente considerável, com níveis adequados de contraste e brilho, ajustando-os previamente. É fundamental que se compare as imagens geradas após processamento com a imagem original, certificando-se de que não foram perdidas informações importantes.

A caracterização tecnológica é realizada em escala de laboratório. A agilidade decorrente dessa escala, associada ao nível de conhecimento fornecido sobre a matéria-prima, torna a caracterização tecnológica uma ferramenta imprescindível para a avaliação, exploração e utilização

adequadas dos minérios. Possibilita, ainda, a redução de prazos e custos na fase de desenvolvimento de processo (Sant' Agostino, 1996).

1.10. A GEOMETALURGIA

A geometalurgia é o ramo da ciência que integra informações provenientes de diversas áreas, tais como geologia, mineralogia, metalogenia, caracterização tecnológica, lavra, beneficiamento mineral e parâmetros econômicos, com objetivo de conhecer e compreender a variabilidade metalúrgica de um tipo de minério e direcionar a lavra e o beneficiamento para otimizar os ganhos de um empreendimento de mineração. A integração dos dados pode ser feita de diversas formas, sendo que comumente é feita com a construção de modelos geometalúrgicos tridimensionais que mostram a distribuição dos parâmetros modelados, de forma a apoiar o planejamento e a otimização da lavra e do beneficiamento mineral.

A geometalurgia ajuda a compreender os efeitos e as interações da geologia e da mineralogia no desempenho metalúrgico; é a compreensão da variabilidade de parâmetros metalúrgicos a partir de informações de mineralogia, protolitos e teores. A distribuição dos protolitos, da mineralogia e as alterações intempéricas do minério influenciam os parâmetros metalúrgicos obtidos em amostras submetidas a testes metalúrgicos, e o uso desse conhecimento é essencial para otimizar a modelagem e o planejamento (Lorenzen e Barnard, 2011).

A geometalurgia busca identificar medidas diretas ou *proxies* para rendimento, recuperação e qualidade do concentrado a partir de dados macroscópicos a microscópicos (Dunham e Vann, 2007). Os autores consideram as variáveis geometalúrgicas com extrema importância, por direcionarem custos e receitas de um projeto. No entanto, a sua estimativa espacial é complexa e requer uma consideração especial - ao contrário dos teores, tanto as *proxies* quanto as medidas absolutas de variáveis geometalúrgicas não são necessariamente aditivas e, portanto, exigem cuidadosos critérios geoestatísticos. Em alguns casos, os modelos devem prever valores extremos dos atributos geometalúrgicos ao invés de médias.

O potencial da geometalurgia para otimizar os resultados da indústria está diretamente relacionado à sua característica multidisciplinar. Uma vez formadora de elos entre as disciplinas, evita que aspectos importantes de distintas áreas sejam desconsiderados, fornecendo meios para a implementação de uma indústria mais eficaz (Vann et al., 2011). No entanto, os mesmos autores argumentam que a abordagem multidisciplinar também representa a maior ameaça para o sucesso da geometalurgia, devido a diversos fatores. Primeiramente, entendem que a geometalurgia tem

evoluído na esfera técnica principalmente por colaborações de geólogos e engenheiros metalurgistas e que, em muitos casos, as dimensões de negócios não têm sido incorporadas, e que os pontos de vista de avaliação financeira e de risco também precisam ser assimilados. Os autores defendem que, até que tais medidas sejam integradas na prática, o real valor da geometurgia não pode ser plenamente demonstrado. Citam-se os engenheiros de minas como profissionais diretamente interessados na entrega de resultados geometúrgicos, porque estes interferem nos planos de lavra. Contudo, apesar da forte interface, tais profissionais têm estado às margens ou mesmo ausentes do desenvolvimento da geometurgia. Esta é uma lacuna grande, pois a interação com a área de planejamento de lavra tem potencial para gerar novas demandas à área de geometurgia, formando um ciclo de melhoria. Os autores pontuam, ainda, que o ponto de vista abordado no nível executivo deve ser incorporado à linguagem e ao pensamento da geometurgia para que modelos geometúrgicos sejam considerados em tomadas de decisões estratégicas do negócio. Finalmente, os autores consideram que a confiança, a precisão e a exatidão do desempenho previsto a partir de modelos geometúrgicos impulsionam o desenvolvimento de métodos reforçados de reconciliação.

Carência na abordagem interdisciplinar nas atividades de mineração também foi tema abrangido por Lipton (2002). De acordo com aquele autor, o início da operação de diversos novos projetos de mineração induz à percepção de que a mineração possui baixo risco. No entanto, é comum que novas minas apresentem dificuldades quando a real variabilidade do minério torna-se visível durante o comissionamento do empreendimento. Nesta fase, o impacto de recuperações metalúrgicas inferiores às idealizadas, rendimentos mássicos reduzidos ou maiores consumos de reagentes e energia, por exemplo, podem ser catastróficos para o retorno econômico. Três razões para o fraco desempenho de projetos de mineração foram abordadas por Lipton (2002): escassa avaliação de risco antes dos estudos de viabilidade, amostragem inadequada para os testes metalúrgicos e variabilidade do minério ROM (*run of mine*, ou minério tal qual). O autor entende que uma característica subjacente a essas questões é a falta de interação entre geólogos, engenheiros de minas, metalurgistas e de processo. Os geólogos precisam estar mais conscientes sobre as questões de processamento de minério e a quantidade de informações que devem ser consideradas durante a estimativa de recursos minerais; engenheiros metalurgistas precisam de uma maior compreensão da variabilidade do minério ROM em termos de todas as características que influenciam a operação da mina; engenheiros de minas, por sua vez, precisam determinar a variabilidade do minério em curto prazo no planejamento de mina, de modo que a qualidade do minério esteja de acordo com as especificações necessárias para o beneficiamento. Uma sobreposição entre essas disciplinas e a responsabilidade mútua entre essas áreas podem contribuir significativamente para que problemas técnicos sejam melhor entendidos e solucionados,

estimativas de produção melhoradas e riscos comerciais, reduzidos. O referido trabalho sugere, portanto, uma abordagem multidisciplinar consistente na análise dos depósitos minerais. O autor exemplifica a prática de responsabilidade mútua citando os relatórios de reservas minerais que, segundo ele, deveriam ser assinados tanto por geólogos quanto por engenheiros metalurgistas, de minas e de processo mineral.

Um compêndio de informações na área de geometurgia foi apresentado por Beniscelli (2011). De acordo com esse trabalho, a geometurgia é uma atividade interdisciplinar que estuda as relações de causa e efeito entre as variáveis geológicas e metalúrgicas relevantes em toda a cadeia de valor do negócio de mineração. O objetivo fundamental da geometurgia é agregar valor econômico para a mineração, fornecendo informações em tempo útil e conhecimento das variáveis relevantes metalúrgicas representadas por seus modelos espaciais. Deste modo, a geometurgia permite obter o melhor de um projeto, otimizar e apoiar os planos de produção e identificar e avaliar as oportunidades de negócio de mineração. Os benefícios da geometurgia são a obtenção de um *design* ideal de mineração, diminuindo o custo para o desenvolvimento de um projeto de mineração; apoiar e otimizar a curto e longo prazo os planos de produção; identificar e minimizar os impactos ambientais; detectar e quantificar oportunamente impurezas e/ou produtos secundários; minimizar a variabilidade do processo; garantir a qualidade dos produtos; orientar a gestão de negócios para o produto final.

A geometurgia deve ser considerada em todas as fases de um projeto de mineração, desde a exploração, durante as fases iniciais, até o desenvolvimento, operação e encerramento do projeto, tornando-se uma atividade dinâmica e permanente do negócio.

A base para a modelagem geometúrgica é a atribuição de parâmetros metalúrgicos em um volume específico de um depósito mineral em função do conhecimento adquirido através de caracterização geológica, mineralógica, química e física e tecnológica.

Uma abordagem geometúrgica para predição de parâmetros de desempenho que influenciam o beneficiamento mineral foi apresentada por Macmillan et al. (2011) para o depósito de Olympic Dam, Austrália. O objetivo principal dessa abordagem foi prever o consumo de ácido sulfúrico, utilizado na lixiviação de concentrados de flotação e rejeitos. A previsão da demanda de ácido é importante para garantir a disponibilidade do circuito de lixiviação. Os principais minerais consumidores de ácido, por sua vez, são siderita, clorita e sericita. Um programa de estudos geometúrgicos envolvendo análises químicas, mineralógicas e ensaios metalúrgicos foi realizado em diversos tipos de minério, cujos resultados permitiram desenvolver relações entre mineralogia, metalurgia e química. Assim, os principais minerais consumidores de ácido puderam ser rastreados. Sabe-se que os parâmetros metalúrgicos necessitam ser inseridos no modelo de bloco para que

possam ser utilizados pelas áreas de planejamento de mina e beneficiamento. Contudo, diferentemente dos dados químicos, que são mais facilmente obtidos na indústria, dados mineralógicos e metalúrgicos são mais caros e demorados. A abordagem alternativa empregada em Olympic Dam foi o desenvolvimento de um conjunto de algoritmos para estimativa da mineralogia a partir dos resultados químicos dos minérios. Tais algoritmos foram calibrados utilizando as informações de mineralogia obtidas no programa de ensaios geometalúrgicos, permitindo o cálculo da quantidade de minerais para mais de 1.5 milhões de amostras analisadas quimicamente. A partir da estimativa dos minerais, tornou-se possível prever os valores de consumo de ácido em cada bloco do modelo. O referido algoritmo pode ser utilizado de forma a minimizar respostas indesejáveis na planta de beneficiamento e é um produto característico da geometalurgia, que visa prever problemas potenciais de processamento, de forma que esses possam ser habilmente mitigados.

Ribeiro (2008) elaborou um complexo modelo geometalúrgico das mineralizações de fosfato, titânio e terras-raras do complexo de Catalão I. De acordo com aquele autor, o depósito de fosfato é controlado por veios, apófises, *plugs* e bolsões de foscorito, hospedados em corpos maciços de bebedourito metassomatizado (flogopitito). Em rocha fresca, a apatita é dominante nos foscoritos e ocorre disseminada ou em veios e bolsões, nos flogopititos. Outro controle fundamental são os horizontes de intemperismo desenvolvidos sobre a mineralização primária. Os principais efeitos do intemperismo foram a concentração residual da apatita derivada de diferentes litotipos, a eliminação dos carbonatos na zona de minério, o desenvolvimento de um anel elevado de rochas encaixantes resistentes, propiciando a formação de um manto de intemperismo espesso, e a homogeneização do depósito apesar das heterogeneidades litológicas. No entanto, o intemperismo também teve efeitos negativos, destacando-se a formação de apatita secundária contaminada por gangas indesejáveis tais como óxidos/hidróxidos de ferro e terras raras, formando superfícies desfavoráveis aos processos de flotação, que acarretam perdas no processo de concentração da apatita.

A caracterização geometalúrgica do depósito de apatita de Catalão (Ribeiro, 2008) foi desenvolvida com a aplicação de técnicas estatísticas univariadas, bivariadas, multivariadas e geoestatística. A estatística univariada e bivariada permitiu conhecer as características básicas do depósito do ponto de vista químico, metalúrgico e mineralógico; a análise estatística por principais componentes revelou assinaturas geoquímicas/geometalúrgicas, com a combinação de dados analíticos, parâmetros de processo, litológicos e mineralógicos; a geoestatística revelou uma estrutura anisotrópica do depósito na direção NW, coincidente com a direção das falhas regionais que controlam as intrusões carbonatíticas da Província Ígnea do Alto Paranaíba. Por fim, a presença

de dois sistemas anisotrópicos associados aos foscoritos no nível mais profundo do manto de intemperismo revelou a existência de duas gerações de foscoritos, uma relacionada ao depósito de fosfato e outra, ao depósito de nióbio.

Em Araxá, a geometurgia tem um propósito simultaneamente ambicioso e sustentável. É ambicioso por ter objetivo de viabilizar a lavra e o beneficiamento mineral de uma parte considerável da jazida num cenário de exaustão de minério oxidado, com o qual são obtidos os melhores resultados de produção. A base do manto de intemperismo está exposta na mina do Barreiro, situação extremamente favorável do ponto de vista de custos de produção devido à baixa relação estéril/minério. Viabilizar a lavra e o beneficiamento do minério da base do manto de intemperismo irá aumentar a vida útil do empreendimento mineiro de Araxá, onde está situada a maior fábrica de fertilizantes de baixa concentração do Brasil. O propósito é sustentável pelos mesmos motivos, pois a lavra e o beneficiamento dos minérios da base do manto de intemperismo irão utilizar as estruturas de produção já instaladas; o minério irá alimentar usinas que já estão em funcionamento, em áreas com licenças ambientais já aprovadas. Ou seja, é a continuidade natural do empreendimento e um grande passo no desenvolvimento tecnológico do ramo dos fosfatos, considerando-se também que os minérios da base do manto de intemperismo estão próximos da rocha fresca, que será o desafio geometúrgico seguinte.

Compreender a relação entre as características dos protolitos, da mineralogia e das alterações intempéricas no desempenho metalúrgico do minério da base do manto de intemperismo da mina do Barreiro é o objetivo principal desta pesquisa que busca, junto às demais áreas envolvidas neste desafio, alcançar resultados industriais favoráveis à sua utilização.

1.11. O BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO FOSFÁTICO

1.11.1 O Processo de Concentração da Apatita

O beneficiamento do minério fosfático é composto por diversas operações unitárias. O circuito de beneficiamento das diversas usinas de fosfato ígneo é, de uma forma geral, bastante semelhante, e as variações ocorrem principalmente devido a diferenças na escala de produção e nas especificações dos produtos finais. Neste item será apresentado o circuito de beneficiamento da usina 312 do Complexo Mineroquímico de Araxá, cujas informações foram extraídas dos relatórios internos denominados ‘Descritivos de Processos - Complexo Mineroquímico de Araxá’ (2011) e

‘Relatório do teste industrial com o minério micáceo da área prioritária da mina do Barreiro – Araxá’ (2015).

Após a lavra, o minério é enviado ao sistema de britagem, que é composto por duas etapas. A primeira é equipada com um britador de mandíbulas de 90 x 120 cm e a segunda, com britador com granulometria de saída equivalente a 95% passante (P95) em 2.5 polegadas.

O minério britado é empilhado no pátio de homogeneização, que possui 400 m de comprimento, por um *stacker*. A capacidade de retomagem de minério é de 420 t/h (base seca).

A primeira etapa de moagem é realizada em moinho de barras. Em seguida, a magnetita é extraída por quatro separadores magnéticos de baixa intensidade. O produto não magnético alimenta a pré-classificação, composta por duas etapas: a primeira, formada por três ciclones de 26 polegadas e a segunda, por dois ciclones de 20 polegadas.

O *underflow* da pré-classificação é direcionado à classificação da moagem de bolas, e o *underflow* da classificação alimenta o moinho de bolas.

O *overflow* da pré-classificação são as lamas naturais, que alimentam a os circuitos de deslamagem (denominados 6ª e 9ª deslamagem).

O produto da classificação da moagem de bolas alimenta a deslamagem da etapa de grossos, composta por duas etapas de ciclonagem com ciclones de 20 polegadas. A segunda etapa é alimentada com o *underflow* da primeira, e o *overflow* da segunda etapa alimenta a primeira etapa. O *overflow* da primeira etapa alimenta a deslamagem de finos gerados. O *underflow* da segunda etapa alimenta o condicionamento do circuito de grossos.

O condicionamento é feito em duas partes: na primeira condiciona-se o depressor (fubá gelatinizado com soda cáustica) e, na segunda parte, o coletor. Após o condicionamento iniciam-se as etapas de flotação por colunas, processo de separação mineral atuante nas distintas características de superfície entre minerais com variados graus de hidrofobicidade. Partículas mais hidrofóbicas são menos ávidas por água, enquanto as partículas hidrofílicas são mais ávidas.

Partículas naturalmente hidrofílicas podem se transformar em hidrofóbicas através da adsorção de reagentes coletores. A utilização de reagentes tem como objetivo atuar na seletividade do processo de forma a ajustar o pH do sistema, controlar o estado de dispersão das partículas na polpa, facilitar e tornar mais seletiva a ação do coletor e tornar um ou mais minerais hidrofílicos e imunes à ação do coletor, de forma a deprimi-los nas colunas de flotação.

O minério condicionado em forma de polpa com 35% de sólidos alimenta a etapa *rougher* da flotação, com sistemas de recirculação e a aeração através de borbulhadores.

O concentrado *rougher* alimenta uma caixa de polpa que direciona o fluxo para a etapa *cleaner*.

O rejeito *rougher* alimenta a etapa de ciclonagem. O *overflow* desta etapa é direcionado para o espessador de água recirculada. O *underflow* do ciclone alimenta o condicionamento da etapa de flotação *scavenger*. O concentrado *scavenger* retorna para etapa *rougher* e o rejeito, após adensado, é direcionado à barragem. O concentrado *cleaner* é o produto final da flotação. Antes de alimentar a filtragem, o concentrado *cleaner* passa por duas etapas de classificação para extração de finos e adequação da porcentagem de sólidos.

O rejeito *cleaner* retorna à alimentação da etapa *rougher*.

Os circuitos de deslamagem e flotação de finos gerados e naturais são praticamente idênticos. A deslamagem é constituída por duas etapas de ciclonagem. A segunda etapa é alimentada com o *underflow* da primeira, e o *overflow* da segunda etapa retorna à alimentação da primeira etapa.

O *underflow* da segunda etapa de deslamagem alimenta o condicionamento do circuito de finos.

As flotações dos finos gerados e dos finos naturais são feitas em circuitos separados. Os concentrados das duas flotações são direcionados ao espessador de concentrados finos, denominados FCA (*Fine Concentrated Apatite*).

O concentrado de etapa da flotação *cleaner* de grossos alimenta a classificação da filtragem. O *underflow* é direcionado ao filtro de mesa, e o *overflow* junta-se ao filtrado para alimentação da reclassificação. O *underflow* da reclassificação é direcionado ao circuito de espessamento/filtragem do FCA.

O concentrado de grossos filtrado denomina-se GCA (*Gross Concentrated Apatite*) e é pesado e transportado ao pátio de estocagem. O GCA pode passar pela etapa de secagem. Uma vez seco, é armazenado em silos e está pronto para expedição ou consumo interno.

Os concentrados finos provenientes das flotações de finos naturais e finos gerados e o *underflow* da reclassificação do circuito de grossos alimentam o espessador. O *underflow* do espessador é bombeado para a alimentação do filtro, gerando um produto com 17% de umidade.

O FCA úmido é armazenado em galpão e/ou a céu aberto, para ser posteriormente expedido ou consumido em Araxá.

1.11.2 A Fabricação de Fertilizantes de Baixa Concentração

O processo de fabricação de fertilizantes é formado pelas etapas de acidulação e granulação (Descritivos de Processos - Complexo Mineraloquímico de Araxá, 2011).

As unidades de acidulação recebem o GCA seco para moagem em moinho de pêndulos. O GCA moído alimenta o tanque de repolpagem, entrando em contato com a água para formar uma polpa, que é, por sua vez, bombeada ao reator para reagir com ácido sulfúrico concentrado (98.5%) e formar o Superfosfato Simples (SSP), liberando gases que são lavados antes de serem descartados pela chaminé. A razão H_2SO_4 /rocha, denominada RA, é de 0,6.

Durante a reação do concentrado fosfático com o ácido sulfúrico, forma-se ácido fluorídrico (HF) que reage com a sílica proveniente dos silicatos do concentrado fosfático, originando o tetrafluoreto de silício (SiF_4). Este, por sua vez, entra em contato com a água durante a lavagem de gases, resultando em uma solução de ácido fluossilícico, comercializado na concentração de 20% de H_2SiF_6 .

O SSP produzido na forma de pó é enviado ao galpão de estocagem, no qual as reações entre o ácido sulfúrico e o concentrado fosfático continuam até o ponto de cura para, então, ser utilizado nas unidades de granulação ou comercializado. O SSP enviado às unidades de granulação é transformado em granulado com utilização de vapor, água bruta e água ácida. Ainda na granulação, pode ser adicionado N ao produto via amônia anidra.

Após granulado, o produto passa pela secagem, cujo gás é aquecido por uma fornalha. Os produtos fabricados nesta planta são os fertilizantes com razão N:P:K 00.19.00, 00.20.00 e 03.17.00. A expedição dos produtos finais é realizada por meio de caminhões.

1.12. FERTILIZANTES NPK

Os fertilizantes fornecem nutrientes ao solo com a finalidade de manter ou ampliar seu potencial produtivo e sua utilização é fundamental para o aumento da produtividade da agricultura (Dias e Fernandes, 2006). São formados por macronutrientes, necessários em doses relativamente altas, como carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e/ou enxofre, ou micronutrientes, necessários em doses menores, como boro, cloro, cobre, ferro, manganês, molibdênio, zinco, sódio, silício e cobalto.

Do ponto de vista do processo produtivo, o nitrogênio (N), o fósforo (P) e o potássio (K) são os mais importantes, daí a fórmula básica dos fertilizantes, NPK, que indica as percentagens de nitrogênio na forma de N elementar, de fósforo na forma de pentóxido de fósforo, P_2O_5 , e de potássio na forma de óxido de potássio, K_2O . Os demais nutrientes não têm expressão econômica na indústria de fertilizantes por serem utilizados em quantidades muito pequenas (Dias e Fernandes, 2006).

O nitrogênio é um importante componente das proteínas e da clorofila, e, portanto, primordial no aumento da produtividade agrícola (Dias e Fernandes, 2006). Obtido a partir do ar, necessita de ser transformado em amônia por ser inerte na forma de gás elementar. Pode ser utilizado na forma de nitrato de amônia, nitrato de sódio, nitrofosfatos, fosfato de amônia e uréia (Chaves, 2010). O fósforo é responsável pelos processos vitais das plantas, pelo armazenamento e utilização de energia, por promover o crescimento das raízes e melhorar a qualidade dos grãos, além de acelerar o amadurecimento dos frutos (Dias e Fernandes, 2006). A apatita é o principal mineral portador de fósforo e ocorre tanto em minérios de origem ígnea quanto sedimentar. No segundo caso, costuma ser criptocristalina e denomina-se colofana. A baixa solubilidade da apatita acarreta a necessidade de solubilizá-la para que o fósforo possa ser aproveitado pelas plantas. Isso é feito por reações químicas, com a sintetização de outro fosfato de alta solubilidade (Chaves, 2010). O potássio é responsável pelo equilíbrio de cargas nas células vegetais (Dias e Fernandes, 2006) e é obtido principalmente do cloreto de potássio, que ocorre como minério em depósitos sedimentares (Chaves, 2010).

O Brasil é o quarto consumidor mundial de fertilizantes NPK, utilizando 9% do total, atrás da China (48%), Índia (23%) e Estados Unidos (20%) (Kulaif e Fernandes, 2010).

Em todos os ramos e segmentos brasileiros da cadeia de NPK existem insuficiências no mercado, com grande quantidade de importações (92% da demanda de K, 75% de N e 48% de P) que reflete a falta de autonomia e consequente subordinação ao mercado internacional. A dependência externa é agravada pelo fato de que a taxa de crescimento anual da demanda brasileira tem superado a média mundial (Rodrigues et al., 2010).

1.12.1 O Fósforo

Os recursos mundiais de fosfato aproximam-se de 16 bilhões de toneladas (USGS, 2010). Marrocos contém as maiores reservas mundiais (36.5%), ao lado de China (23.7%), Jordânia (9.6%), África do Sul (9.6%) e Estados Unidos (7.0%). O Brasil ocupa a sexta posição no *ranking* mundial, com reservas oficialmente aprovadas pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, ano base 2008) de 4.76 Bt, equivalentes a 2.2% das reservas globais de fosfato. As reservas brasileiras concentram-se principalmente nos estados de Minas Gerais (67.9%), Goiás (13.8%) e São Paulo (6.1%). Santa Catarina, Ceará, Pernambuco, Bahia, Paraíba e Tocantins compartilham as 12.2% restantes.

A produção mundial de rochas fosfáticas é cerca de 158 Mt por ano (USGS, 2010). O *ranking* mundial de países produtores obedece à ordem: China (34.9%), Estados Unidos (17.3%), Marrocos (15.2%), Rússia (5.7%) e Tunísia (4.4%). O Brasil ocupa novamente a sexta posição, responsável por 4.0% da produção mundial, concentrada nos complexos alcalino-carbonatíficos de Tapira, Araxá e Catalão (Rodrigues et al., 2010).

A produção brasileira de rocha fosfática localiza-se nas regiões sudeste e centro-oeste, próxima aos principais mercados consumidores, e os preços desta *commodity* no Brasil tendem a refletir os preços internacionais. O uso principal (68%) da rocha fosfática no Brasil é na indústria de fertilizantes, mas há, também, um conjunto grande de outras aplicações, como a alimentação animal e as indústrias químicas (Ogasawara et al., 2010). A tabela 1.1 apresenta as características químicas dos principais fertilizantes fosfatados comercializados no Brasil.

Tabela 1.1: Características químicas dos principais fertilizantes fosfatados comercializados no Brasil (modificado de Dias e Fernandes, 2006).

Produto	P ₂ O ₅ (%)	P ₂ O ₅ (%)	Ca (%)	S (%)	N (%)
	CNA+H ₂ O	H ₂ O			
Supersimples	20	13	17	11	
Supertriplo	46	39	10		
MAP	54	44			10.5
DAP	45	38			9

O consumo brasileiro de rocha fosfática aumentou cerca de seis vezes de 1978 a 2008. Entre 1990 e 2007, o consumo *per capita* brasileiro passou de 21.5 para 42 kg/hab/ano, quase três vezes menor do que o dos Estados Unidos, mas duas vezes maior do que o consumo médio *per capita* mundial (Ogasawara et al., 2010). Esses mesmos autores calcularam uma projeção do consumo de rocha fosfática para 2030, considerando três cenários da economia: 1) com 2.3 % de crescimento médio anual, 2) com crescimento médio anual de 4.6%, e 3) com 6.9% de crescimento médio anual. Considerou-se, adicionalmente, o padrão de consumo *per capita* médio dos Estados Unidos como o ponto de saturação do consumo brasileiro. Os resultados mostraram que o consumo chega a mais do que duplicar no cenário 3, duplica no cenário 2 e cresce 70% no cenário 1. A partir desse estudo, os autores concluíram que serão requeridas, em 2030, entre 14 e 20 milhões de toneladas de concentrado fosfático e que, portanto, será necessário um acréscimo de 8 a 14 milhões de toneladas para se atingir a autossuficiência, considerando-se a produção brasileira em 2008 equivalente a 6 milhões de toneladas. A projeção da produção de rocha fosfática para o alcance da autossuficiência até 2015 dar-se-ia com o acréscimo de 4 a 5 milhões de toneladas à produção atual. Para a manutenção dessa autossuficiência, de 2015 até 2030, seria necessário ainda um novo aporte, entre

5 e 10 milhões de toneladas anuais. Se concretizados os investimentos em novos projetos (Patrocínio/MG, Anitápolis/SC, Arraias/TO e Santa Quitéria/CE) e ampliações de empreendimentos já existentes (Tapira/MG, Araxá/MG, Lagamar/MG, Angico Dias/BA e Catalão/GO), há um potencial de acréscimo de 4,3 milhões de toneladas anuais, que subsidiará o país a alcançar a autossuficiência. Neste contexto, os estudos de geologia e geometalurgia dos minérios de fosfato na base do manto de intemperismo do complexo de Araxá visam dar subsídios para torná-los economicamente viáveis, ampliando a vida útil do empreendimento e subsidiando o país à busca da autossuficiência desse importante insumo.

1.13. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram cento e sessenta e seis amostras provenientes de testemunhos de sondagem da mina do Barreiro, cuja localização está ilustrada na figura 1.8. Adicionalmente, estudos de caracterização mineral de detalhe foram realizados com amostras volumétricas da mina do Barreiro, cuja localização está apresentada no Capítulo III.

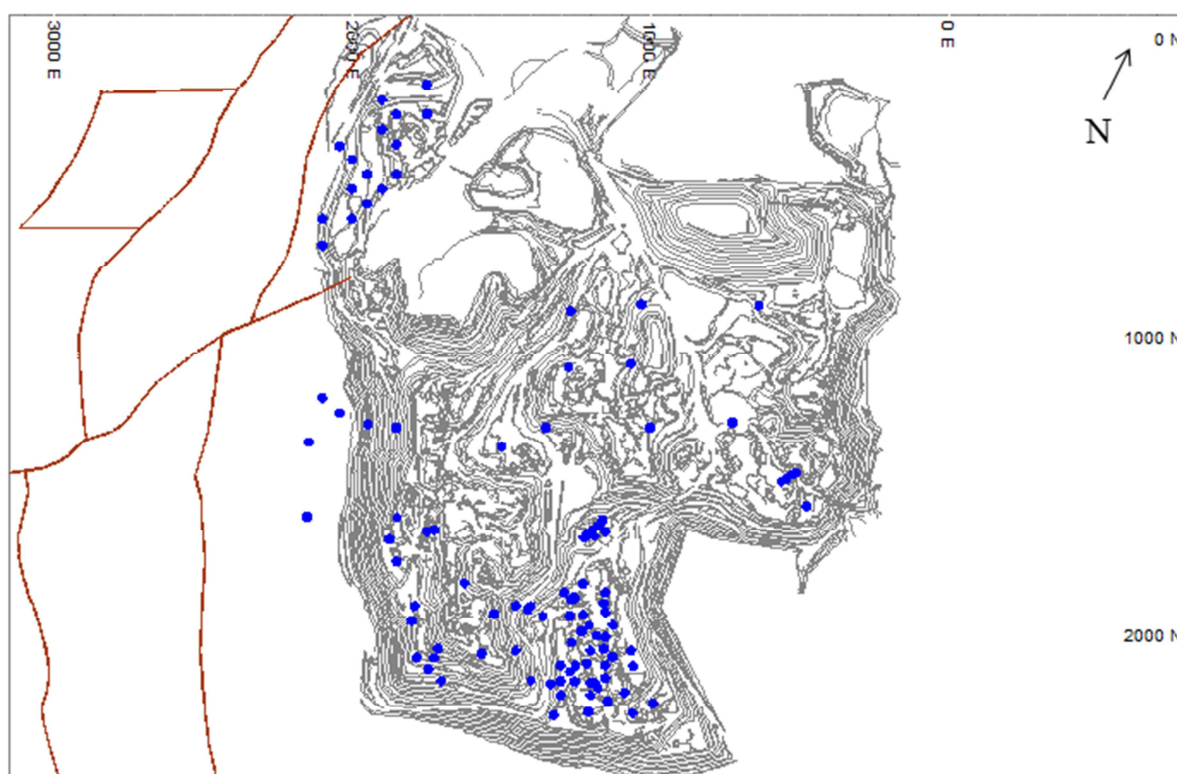


Figura 1.8: Mapa da mina do Barreiro com a localização dos testemunhos de sondagem amostrados nesta tese (círculos azuis). A linha marrom representa o limite do domo de Araxá; as linhas cinza são as curvas de nível da mina do Barreiro. Coordenadas métricas locais.

Os métodos utilizados nesta pesquisa foram:

- Reconhecimento geológico de frentes de lavra

Reconhecimento em campo dos protolitos e horizontes de intemperismo aflorantes na mina do Barreiro, que consistiu no levantamento de mineralogia, texturas, estruturas, protolitos e demais feições de campo relevantes.

- Descrição geológica dos testemunhos de sondagem

Descrição de aspectos como cor, mineralogia, graus de intemperismo e protolitos em testemunhos de sondagem. A seleção dos furos para descrição geológica foi feita considerando-se os testemunhos de sondagem ainda preservados nos galpões de sondagem da Vale Fertilizantes e contidos na cava final de recursos da mina do Barreiro.

- Amostragem de testemunhos de sondagem

As amostras de testemunhos de sondagem foram formadas por intervalos contínuos próximos de 10 m de comprimento e $\frac{1}{4}$ do diâmetro total do testemunho (aproximadamente entre 3 e 4 cm) em um mesmo nível intempérico e mesmo protolito.

- Amostragem volumétrica na mina

Coleta de amostras com cerca de 2 t cada, com objetivo de caracterizar as variações mineralógicas e químicas dos principais minérios da base do manto de intemperismo atualmente aflorantes.

- Petrografia macroscópica e por microscopia óptica de luz transmitida e refletida

Descrição das características mineralógicas e texturais e determinação da composição modal em seções delgadas polidas, no Laboratório de Caracterização Mineral da Vale Fertilizantes com uso de microscópio petrográfico de luz transmitida da marca Leica, modelo DM4500 P, e lupa binocular Leica, modelo M205 C. A análise dos minerais opacos foi realizada no Laboratório de Mineralogia do Centro de Desenvolvimento Mineral da Vale S.A (CDM), com microscópio petrográfico de luz transmitida e refletida Zeiss, modelo Axioskop 40.

- Determinação da composição química do minério

Análises químicas por uma combinação de fluorescência de raios X, ICP-AES (*Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy*) e infravermelho. Os espectrômetros de raios X da Vale Fertilizantes são modelo Axios. O analisador de C por infravermelho da Vale Fertilizantes é da marca Quimitron, modelo QCS-2010. Os ICP-AES do CDM são da marca Varian, modelos VISTA-PRO e 725-ES. A fluorescência de raios X do CDM é da PANalytical modelo Axios Minerals. Os analisadores de C por infravermelho do CDM são da marca LECO, modelos CS844 e SC-144DR.

- Caracterização mineralógica por difratometria de raios X com o método do pó

As análises de difração de Raios X foram realizadas em difratômetro X'Pert PRO MPD (PW 1775) da Panalytical, equipado com tubo de Raios X cerâmico e anodo de Co, filtro de $K\beta$ de ferro e detector X'Celerator do CDM. As condições instrumentais foram: varredura de 4 a 70° em 2θ , 40 kV, 40 mA, passo de 0,02 (2θ) e tempo de contagem de 20 s; amostra em movimentação circular com frequência de 1 rotação/s. O *software* e o banco de dados utilizados para interpretação dos difratogramas foram o Panalytical HighScore Plus e o ICDD PDF 2003, respectivamente.

- Caracterização mineralógica por MEV, EDS e QEMSCAN

Observações texturais e microanálises foram realizadas no CDM com MEV (microscopia eletrônica de varredura) FEG (*field emission gun*) FEI com alto vácuo de alta resolução equipado com espectrômetro de dispersão de energia (EDS, *energy dispersive x-ray detector*) Oxford - Inca Energy e operado com tensão 15 kV, *spot size* 4.5 (adimensional) e tempo de contagem de 30 segundos. A metalização das amostras foi feita com carbono na evaporadora Jeol modelo JEE 420, e a espessura da película de carbono nas seções foi de aproximadamente 30 nm. As imagens foram geradas por elétrons retroespalhados (*BSE, backscattered electrons*).

Dados adicionais foram obtidos pelo sistema automatizado de análise de imagem QEMSCAN (*Quantitative Evaluation of Materials by Scanning Electron Microscopy*) 650, composto por MEV FEI Quanta 650 operando com fonte de tungstênio, modo alto vácuo, 25 kV de aceleração do feixe e 10 nA de corrente na amostra, e dois espectrômetros por dispersão de energia (EDS) tipo SDD Bruker XFlash 5030. As análises envolveram levantamento de mineralogia, feições texturais, associações mineralógicas, tamanho e tipo de partículas e grau de liberação mineral.

- Caracterização Tecnológica

Os estudos de caracterização tecnológica foram realizados no Laboratório de Processo do CDM e envolveram as etapas de moagem, deslamagem, separação magnética de baixo campo e ensaios de flotação. O objetivo desses estudos foi obter índices de processo de concentração da apatita, tais como tempo de moagem, massas e teores dos produtos da deslamagem, da separação magnética e da flotação, rendimento mássico e recuperações de P_2O_5 na preparação, na flotação e total.

- Tratamento estatístico dos dados

Técnicas de análise estatística descritiva visando descrever os dados e suas distribuições; análise por principais componentes (APC), para reduzir o número de variáveis analisadas pela identificação das variáveis mais importantes; regressão múltipla, para determinar as inter-relações

das variáveis e fazer previsões do comportamento geometalúrgico do minério a partir de variáveis conhecidas.

- Tratamento computacional

Os resultados foram tratados com o *software Statistica* 12.0 para análises univariadas, bivariadas, multivariadas e elaboração de modelos estatísticos; o *software ArcGis* 10.2 foi utilizado na confecção de mapas temáticos; o *software Studio 3* versão 3.21 foi utilizado para análise espacial dos dados e geração de um modelo geometalúrgico tridimensional.

- Elaboração de modelos geometalúrgicos

Consolidação de diversos parâmetros geometalúrgicos na forma de modelos estatísticos e modelos de blocos tridimensionais para aplicação na lavra e no beneficiamento mineral.

CAPÍTULO II - OS PROTOLITOS DO BARREIRO

2.1. INTRODUÇÃO

Os protolitos do Barreiro apresentam variações litológicas e mineralógicas que refletem uma estreita relação entre as rochas das séries magmáticas bebedourítica, carbonatítica e foscorítica, assim como observado também nos demais complexos da APIP (Brod et al., 2004; Ribeiro, 2008; Grasso e Brod, 2009; Grasso, 2010; Palmieri, 2011; Barbosa et al., 2012a). Os minérios da base do manto de intemperismo, por sua vez, possuem características mineralógicas, texturais e estruturais muito próximas das características de seus protolitos, devido à menor intensidade do intemperismo químico atuante naquele nível.

O reconhecimento e a compreensão dos protolitos dos minérios da base do manto de intemperismo são, também, de fundamental importância do ponto de vista geometalúrgico, pois permitem conhecer as características mineralógicas herdadas por aqueles minérios.

Neste Capítulo aborda-se a petrografia dos protolitos do Barreiro realizada em trinta e sete amostras de rochas frescas provenientes de testemunhos de sondagem. As amostras serão discutidas por cada série magmática identificada no Barreiro: série bebedourítica, série carbonatítica e série foscorítica.

2.2. SÉRIE BEBEDOURÍTICA

Rochas da série bebedourítica são os protolitos mais abundantes na mina do Barreiro. Os bebedouritos originais estão flogopitizados, em intensidade variável, por metassomatismo potássico. Observa-se ampla variação modal na quantidade de apatita, olivina, diopsídio, flogopita, magnetita, perovskita e carbonato, além de titanita acessória. Tetraferroflogopita, anatásio, anfibólio, serpentina e clorita são produtos de alteração metassomática.

A figura 2.1 A ilustra a composição das rochas da série bebedourítica em termos do silicato essencial (diopsídio + olivina), fosfato (apatita) e óxido (magnetita + perovskita), conforme sugerido por Brod et al. (2004). No caso dos bebedouritos de Araxá, no entanto, a magnetita é muitas vezes uma fase intercumulus, e não foi considerada no vértice dos óxidos. As rochas estudadas variam entre dunitos, apatita peridotitos, apatita clinopiroxenitos, perovskita clinopiroxenitos, bebedouritos, olivina apatititos, perovskita apatititos e apatititos.

No presente trabalho, todas as amostras da série bebedourítica serão agrupadas num grupo denominado bebedouritos (BEB), com exceção de três amostras que possuem alta proporção modal

de anfíbólio e ocorrem numa região específica da mina, na borda noroeste do domo de Araxá. Estas três amostras foram agrupadas sob a designação de anfíbólio bebedouritos (ANF BEB).

Quando comparadas com rochas dos complexos de Tapira, Salitre I e Serra Negra (Brod, 1999; Barbosa et al., 2012a; Grasso, 2010), a maior parte dos bebedouritos e anfíbólio bebedouritos de Araxá apresenta semelhanças modais com os bebedouritos mais evoluídos de Tapira e Salitre. Em menores quantidades, as amostras de dunitos e parte das amostras de bebedouritos aproximam-se da composição de bebedouritos mais primitivos de Tapira, Salitre I e Serra Negra (figura 2.1 A).

A figura 2.1B sumariza a composição modal das rochas da série bebedourítica estudadas.

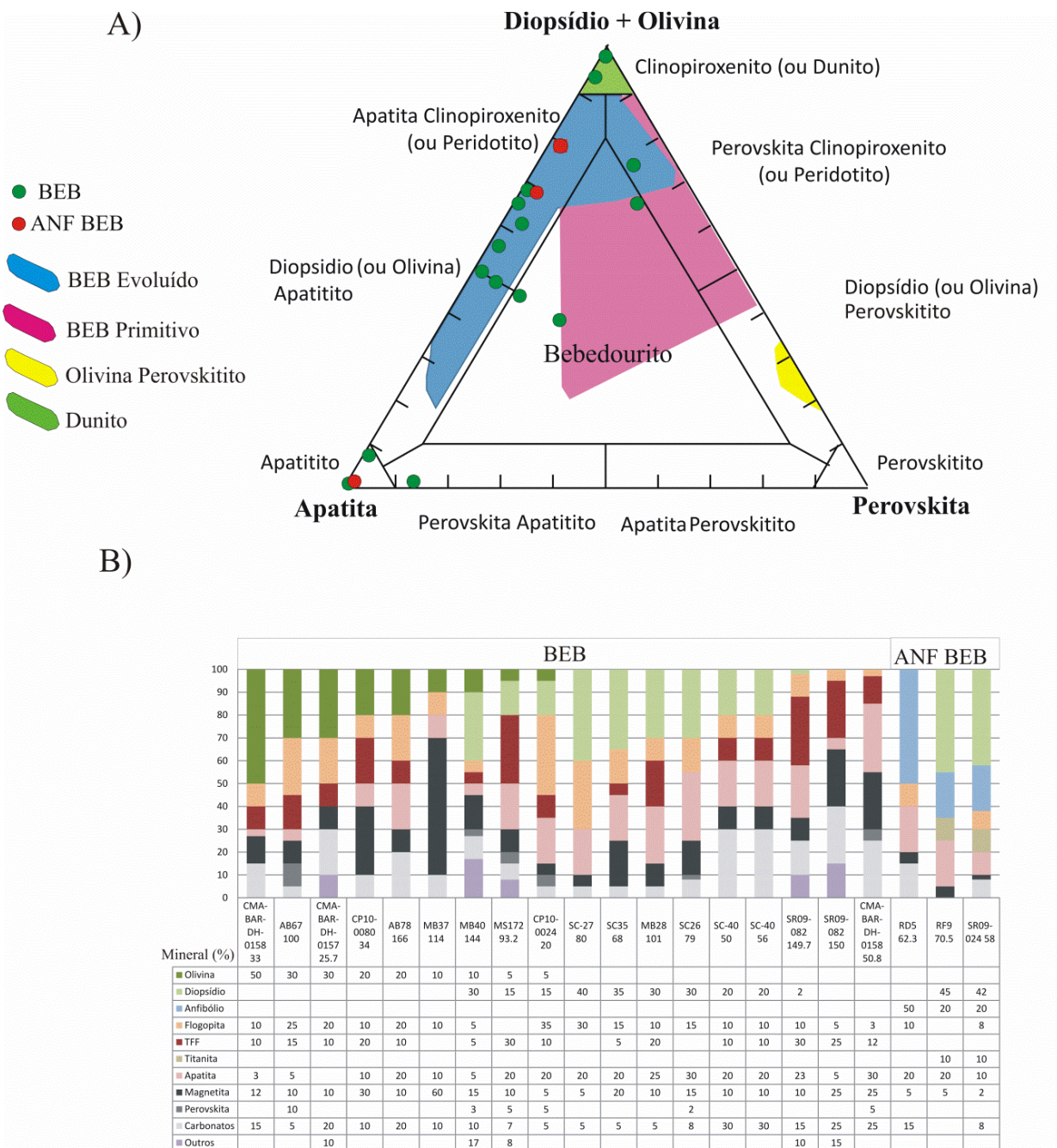


Figura 2.1: Composição mineralógica dos bebedouritos da mina do Barreiro. (A) Diagrama de classificação modificado de Brod et al. (2004) mostrando as amostras estudadas de bebedouritos (círculos verdes) e anfibólio bebedouritos (círculos vermelhos) e os campos de bebedouritos evoluídos (em azul) e bebedouritos primitivos (em rosa) de Tapira (Brod, 1999) e Salitre I (Barbosa et al., 2012a); olivina perovskititos (em amarelo) e dunitos (em verde) de Serra Negra (Grasso, 2010). (B) Composição modal das amostras estudadas. Outros: pirita, anatásio, clorita e serpentina.

2.2.1 Bebedouritos

Os bebedouritos são rochas de cor cinza a marrom escuro, maciças e com textura inequigranular variando de média a grossa, cortadas por veios de carbonato com espessuras submilimétricas a centimétricas e diques de carbonatito com espessuras de centímetros a alguns metros. Características texturais e mineralógicas macroscópicas dos bebedouritos flogopitizados são ilustradas na figura 2.2.

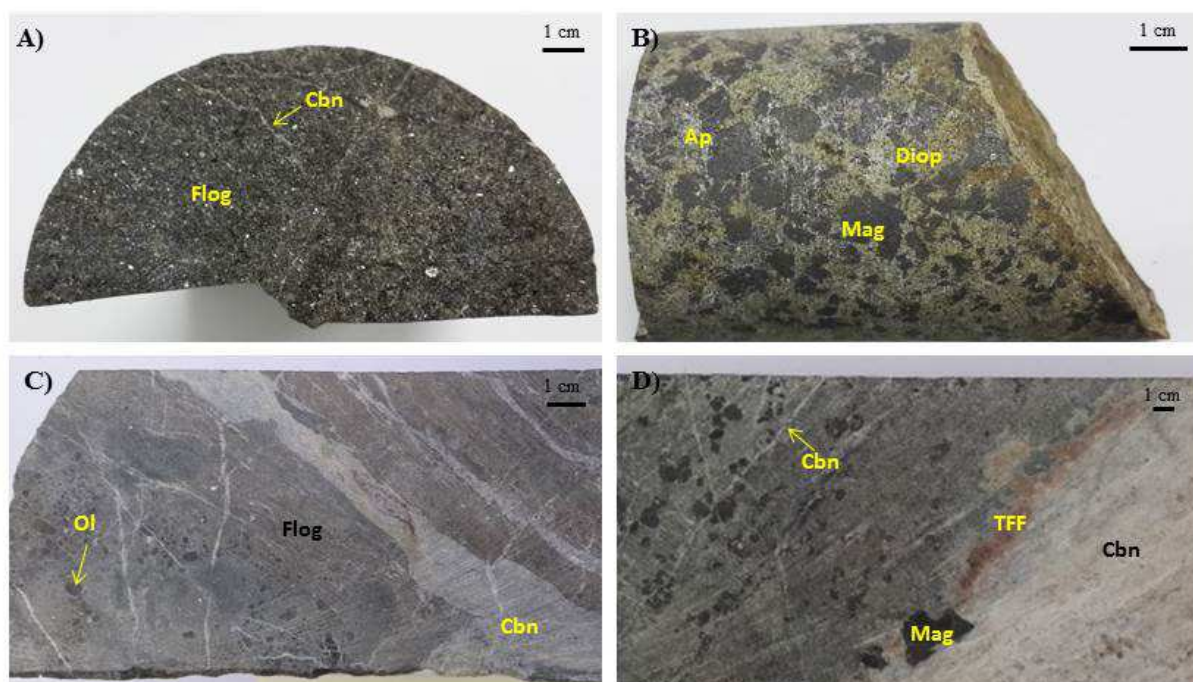


Figura 2.2: Características texturais e mineralógicas macroscópicas dos bebedouritos flogopitizados. A) Amostra AB67 100 m: bebedourito flogopitizado médio, cortado por veios milimétricos de carbonato; B) Amostra SC35 68 m: bebedourito grosso, formado por diopsídio, magnetita e apatita cumulus; C) Amostra CMA-BAR-DH-157 25.7 m: bebedourito flogopitizado com olivina cumulus milimétrica, cortado por veios milimétricos a centimétricos de carbonato; D) Amostra CMA-BAR-DH-158 50.80 m: contato entre bebedourito (rocha verde) e carbonatito (rocha branca), marcado por desenvolvimento de tetraferroflogopita metassomática. Ap: apatita; Cbn: carbonatos; Diop: diopsídio; Flog: flogopita; Mag: magnetita; Ol: olivina; TFF: tetraferroflogopita.

Olivina ocorre como fase cumulus, dispersa na rocha ou formando bandas irregulares. Pode chegar a ser fenocristal (figura 2.3 A), alcançando 1.3 mm. Está transformada para flogopita em intensidade variável, e às vezes completamente pseudomorfizada por uma massa muito fina não identificável opticamente. Suas bordas sempre estão alteradas em contato com carbonato intersticial. São comuns inclusões de apatita euédrica de até 0.7 mm.

O diopsídio ocorre como fase cumulus, euédrico, com tamanho médio de 1 mm, verde claro a quase incolor, com bordas irregulares. Pode conter inclusões de apatita arredondada. Está

parcialmente transformado para flogopita metassomática muito fina, sendo raros os cristais completamente preservados (figura 2.3 B).

A flogopita ocorre de duas formas: (a) grossa (até 2 mm), cumulus a intercumulus, euédrica a subédrica, dispersa na rocha, geralmente com bordas de tetraferroflogopita (figura 2.3 C), ou (b) tetraferroflogopita fina (0.05 mm, figura 2.3 D) a muito fina, vermelha, substituindo a flogopita, nos interstícios de grãos de apatita e no contato entre o bebedourito e veios de carbonato (figura 2.3 D). Em alguns casos a tetraferroflogopita está alterada para clorita.

A apatita ocorre como cristal cumulus, euédrico ou com contornos arredondados (figura 2.3 C), desde muito fina (submilimétrica) a mais de 3 mm, disseminada ou formando bolsões milimétricos. Mais raramente ocorre na forma de veios de até 0.7 mm de espessura. Tem fraturas comumente preenchidas por carbonato intersticial.

Magnetita é predominantemente intercumulus (figura 2.3 D) e, menos frequente, cumulus; também pode formar cristais grossos de até 3 mm, poiquilíticos, com inclusões de flogopita e, menos frequentemente, apatita. Geralmente está associada à flogopita e ao diopsídio.

Perovskita (0.2 a 2 mm) ocorre como mineral cumulus disseminado, comumente associado à flogopita e à magnetita; mais raramente acumula-se em pequenos bolsões. Geralmente possui bordas alteradas para anatásio.

O carbonato é predominantemente intersticial, anédrico, disseminado pela rocha. É comum ocorrer em abundantes veios de espessura submilimétrica (figura 2.3 D) que podem conferir à rocha um aspecto brechado. Nesse caso, os cristais geralmente são mais grossos, alcançando 0.1 mm. Localmente formam bandas que alcançam alguns milímetros de espessura, associadas com bandas de apatita e tetraferroflogopita (figura 2.3 E).

Ilmenita é rara e forma textura em treliça, possivelmente representando exsoluções em planos octaédricos de antigos cristais de magnetita.

Granada rica em titânio foi observada raramente, formando coroas em torno de cristais de perovskita.

Pirita é um acessório comum, euédrica, disseminada ou em veios.

Clorita, com coloração verde forte, substitui parcialmente a tetraferroflogopita a partir da borda até o núcleo (figura 2.3 F).

O anatásio forma massas muito finas de cristais euédricos, disseminados na rocha, substituindo parcial ou completamente a perovskita.

Serpentina forma massas finas substituindo cristais de olivina e, possivelmente, também de diopsídio.

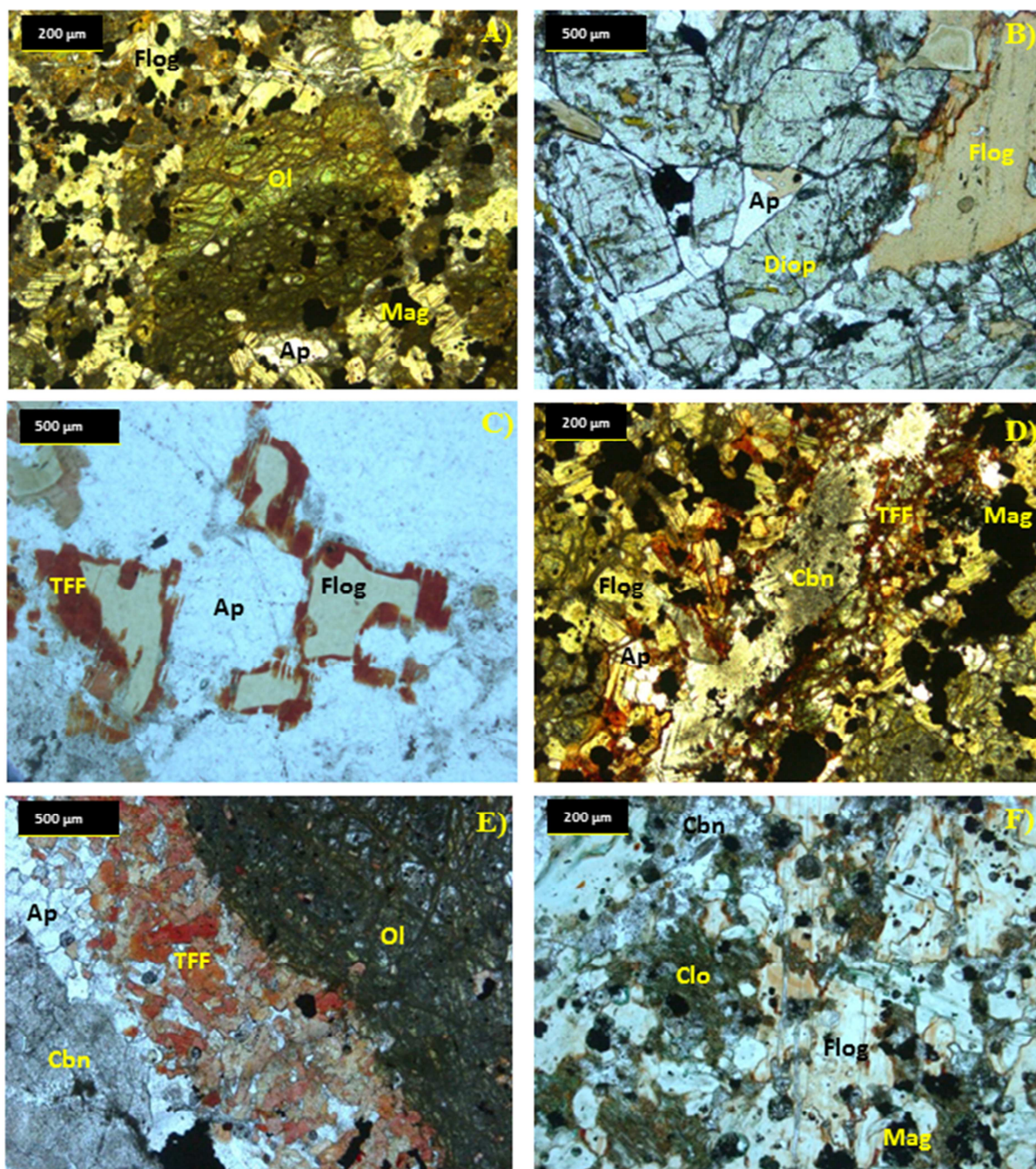


Figura 2.3: Características texturais e mineralógicas microscópicas dos bebedouritos. A) Amostra AB67 100 m: fenocristal de olivina serpentinizada, polarizadores paralelos; B) Amostra SC26 79 m: diopsídio cumulus e flogopita subédrica, polarizadores paralelos; C) Amostra SC40 56 m: núcleos preservados de flogopita aluminosa envolvidos por bordas de tetraferroflogopita, polarizadores paralelos; D) Amostra AB67 100 m: bebedouritos cortado por veio submilimétrico de carbonato. Notar que o contato entre o bebedourito e o veio é marcado por desenvolvimento de tetraferroflogopita, polarizadores paralelos; E) Amostra CP10 0080 34 m: bandas de carbonato, apatita e de tetraferroflogopita; a última em contato com olivina, polarizadores paralelos; F) substituição parcial de flogopita por clorita, polarizadores paralelos. Ap: apatita; Cbn: carbonatos; Clo: clorita; Diop: diopsídio; Flog: flogopita; Mag: magnetita; Ol: olivina; TFF: tetraferroflogopita.

2.2.2 Anfibólio Bebedouritos

Os anfibólio bebedouritos são rochas maciças, de cor cinza esverdeada clara a escura, finas a grossas, maciças, cortadas por finos veios de carbonato e, localmente, por diques carbonatíficos. Além da abundante presença de anfibólio, diferem de BEB também pela ausência de olivina e perovskita. Características texturais e mineralógicas macroscópicas dos anfibólio bebedouritos são ilustradas na figura 2.4.

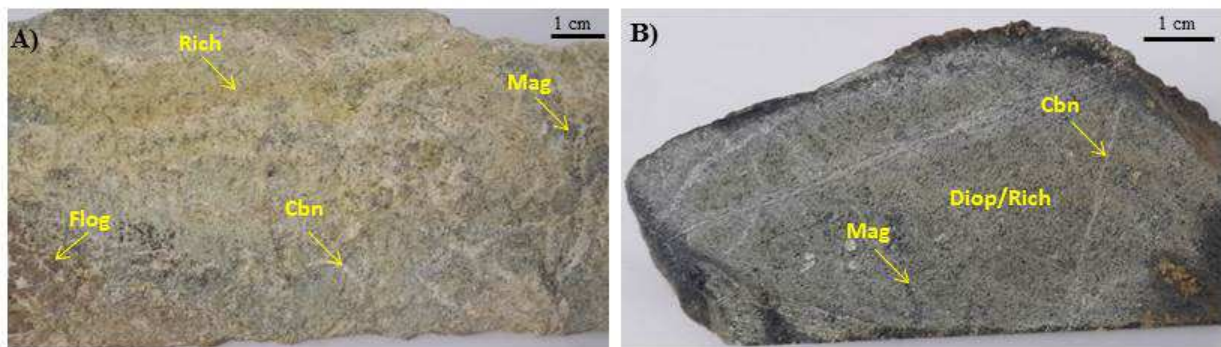


Figura 2.4: Características texturais e mineralógicas macroscópicas dos anfibólio bebedouritos. A) Amostra RD5 62.3 m: anfibólio bebedourito fino, parcialmente alterado; B) Amostra RF9 70.5 m: anfibólio bebedourito fino cortado por veios milimétricos de carbonato. Cbn: carbonatos; Diop: diopsídio; Flog: flogopita; Mag: magnetita; Rich: richterita.

O diopsídio é uma fase cumulus (figura 2.5 A), de coloração verde forte, variando de 0.2 a 2.5 mm. Bordas alteradas para anfibólio (figura 2.5 B) são frequentes.

A flogopita tende a ser fina (0.05 mm), mas localmente pode atingir 1 mm; possui caráter predominantemente intercumulus (figura 2.5 C).

Titanita é um mineral cumulus, euédrico, disseminado pela rocha, alcançando 2.5 mm de comprimento (figura 2.5 D).

A apatita é um mineral cumulus, euédrico, arredondado, de 0.3 a 1 mm, e às vezes mostra um caráter intercumulus comparativamente ao diopsídio. Forma uma textura granular e geralmente ocorre em bolsões (figura 2.5 E). Às vezes tem fraturas preenchidas por veios de carbonato ou por flogopita. Pode também estar parcialmente corroída por carbonato.

A magnetita é fina (0.1 mm), anédrica, geralmente associada à titanita.

Carbonato é fino e intersticial ou em veios, monominerálicos ou com carbonato e apatita (figura 2.5 F).

Richterita é muito fina e ocorre em substituição parcial (figura 2.5 B) ou completa do diopsídio, como produto de metassomatismo. Ocorre também formando amplas massas na rocha,

nas quais não se identifica o mineral original (figura 2.5 F). Apesar de ser um mineral frequente em bebedouritos do Barreiro, não é comum nas descrições de outros complexos da Província.

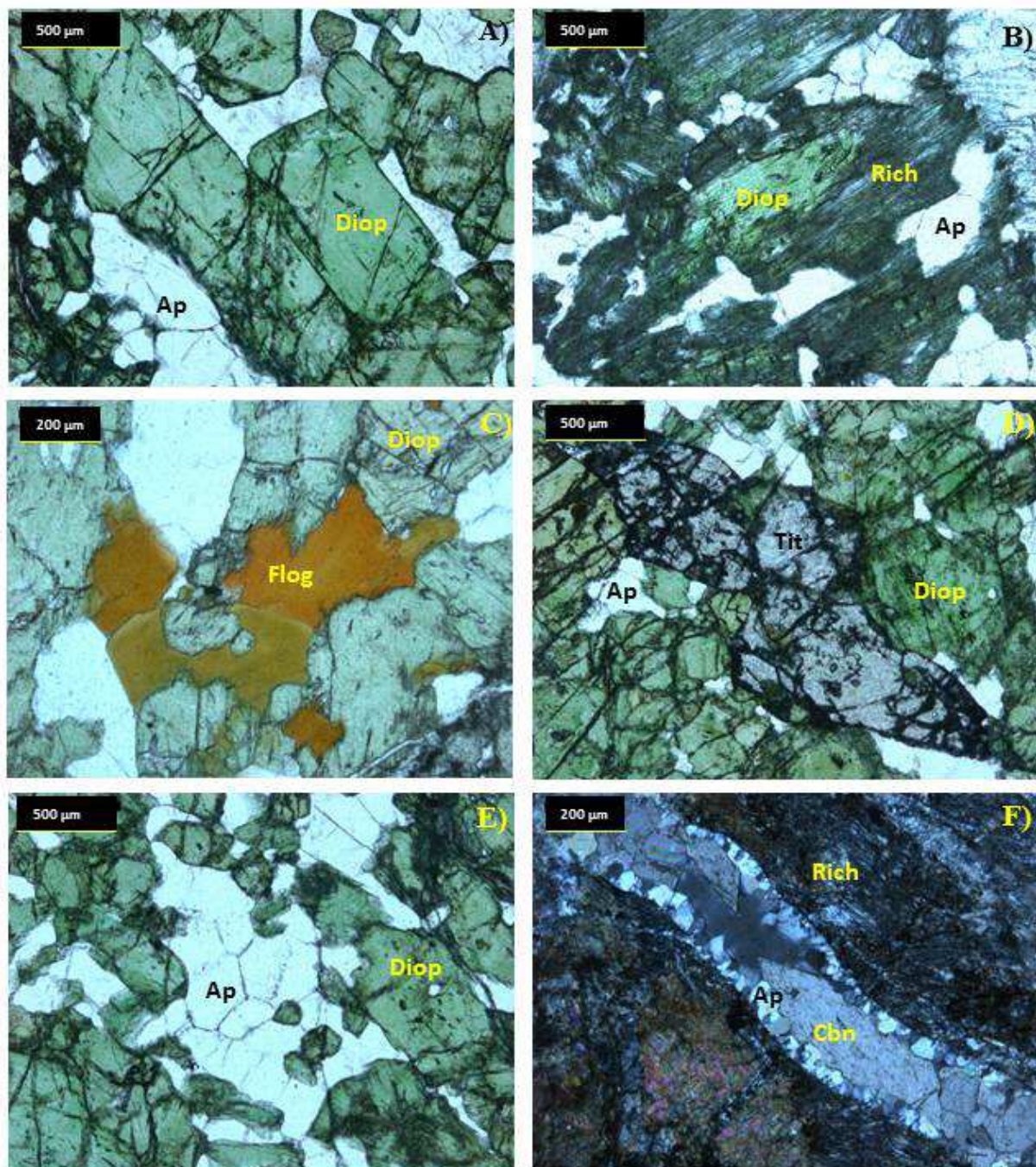


Figura 2.5: Características texturais e mineralógicas microscópicas dos anfibólio bebedouritos. A) Amostra RF9 70.5 m: cristais cumulus de diopsídio em contato com bolsões de apatita, polarizadores paralelos; B) Amostra RF9 70.5 m: núcleo preservado de diopsídio, com borda transformada para richterita, polarizadores paralelos; C) Amostra SR09-024 58 m: flogopita intercumulus associada a diopsídio, polarizadores paralelos; D) Amostra RF9 70.5: detalhe de um cristal euédrico de titanita, polarizadores paralelos; E) Amostra RF9 70.5 m: bolsão milimétrico de apatita, polarizadores paralelos; F) Amostra RD5 62.3 m: bebedourito anfibolitizado cortado por dique de carbonato com apatita em suas bordas, polarizadores cruzados. Ap: apatita; Cbn: carbonatos; Diop: diopsídio; Flog: flogopita; Rich: richterita; Tit: titanita.

2.3. SÉRIE CARBONATÍTICA

Os carbonatitos ocorrem amplamente distribuídos na mina do Barreiro, predominantemente como diques com espessuras de centímetros a dezenas de metros, encaixados nos bebedouritos. Minoritariamente, ocorrem sob a forma de *plugs*.

As amostras de carbonatitos estudadas foram classificadas como dolomita carbonatitos (DC) e calcita carbonatitos (CC), de acordo com a classificação proposta por Le Maitre (2002).

A composição dos carbonatitos estudados em comparação com outros carbonatitos da Província está ilustrada no diagrama de classificação ternário da figura 2.6 A. Os calcita carbonatitos são bastante restritos em composição, comparativamente aos calcita carbonatitos dos complexos de Catalão I, Tapira e Salitre I, e apresentam semelhanças químicas com os calcita carbonatitos mais puros daqueles complexos. Os dolomita carbonatitos apresentam uma dispersão no conteúdo de MgO maior que a observada nos demais dolomita carbonatitos da Província.

A figura 2.6 B apresenta a composição modal das amostras estudadas.

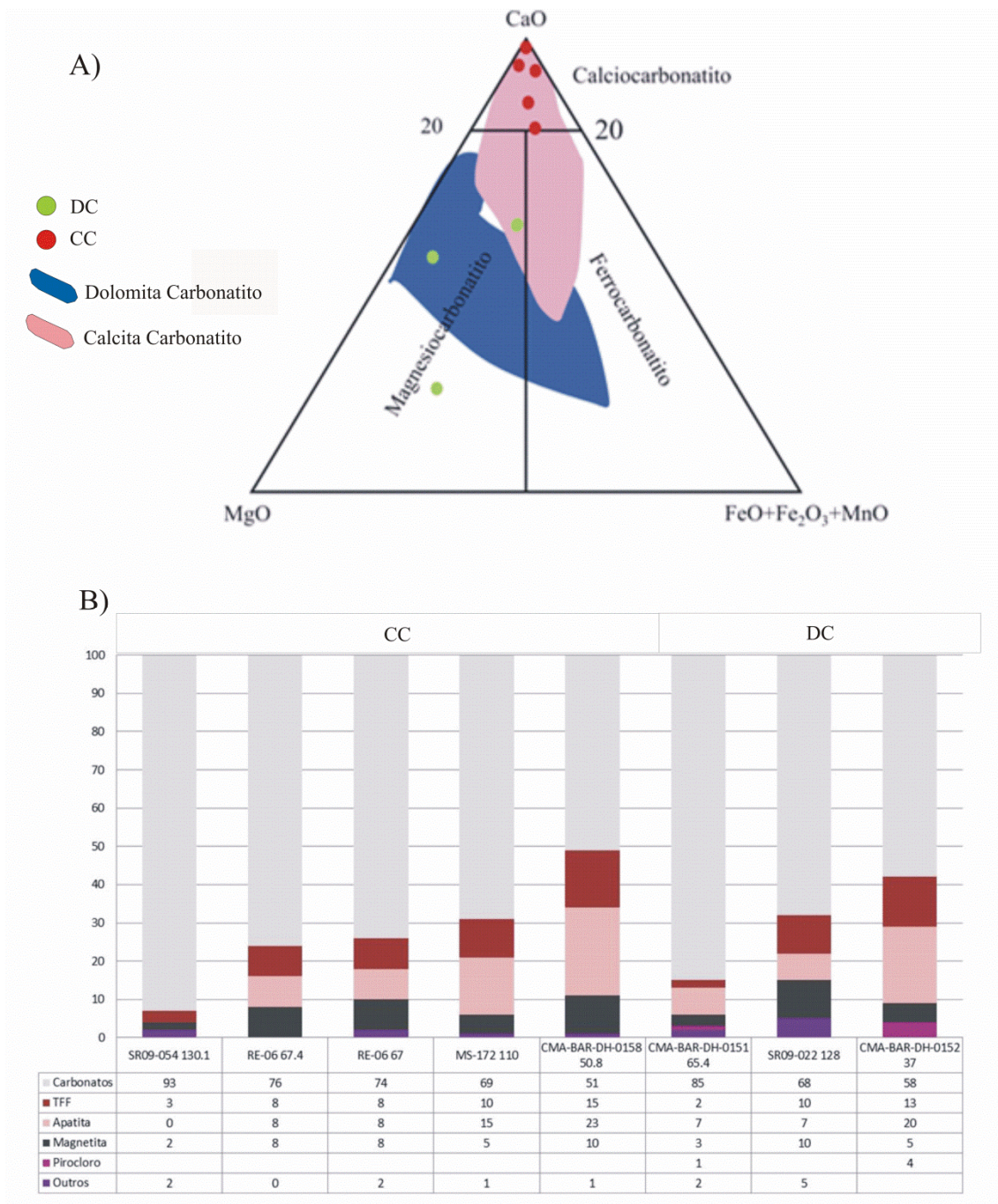


Figura 2.6: Composição mineralógica dos carbonatitos da mina do Barreiro. (A) Diagrama de classificação de Woolley e Kempe (1989) mostrando as amostras de dolomita carbonatito (círculos verdes) e de calcita carbonatitos (círculos vermelhos) e os campos dos dolomita carbonatitos (em azul) e dos calcita carbonatitos (em rosa) de Tapira, Salitre I e Catalão I. Os dados dos carbonatitos da APIP são de Araújo (1996), Brod (1999), Traversa et al. (2001), Gomes e Comin-Chiaramonti (2005), Barbosa (2012b) e Cordeiro et al. (2010). (B) Composição modal das amostras estudadas. CC: calcita carbonatitos; DC: dolomita carbonatitos. TFF: tetraferroflogopita. Outros: Pirrotita, pirita, monazita, barita e clorita.

2.3.1 Calcita Carbonatitos

Os calcita carbonatitos ocorrem como diques alojados nos bebedouritos do Barreiro, principalmente na região noroeste/oeste do domo. Essas rochas possuem quantidades bastante variáveis de carbonatos, principalmente calcita e, subordinadamente, dolomita, e de apatita; adicionalmente, possuem quantidades razoáveis de magnetita e tetraferrihogopita. São brancos, maciços ou com bandamento magmático acentuado bem marcado pela magnetita; chegam a desenvolver, por vezes, cumulos nelsoníticos grossos. Características texturais e mineralógicas macroscópicas dos calcita carbonatitos são ilustradas na figura 2.7.

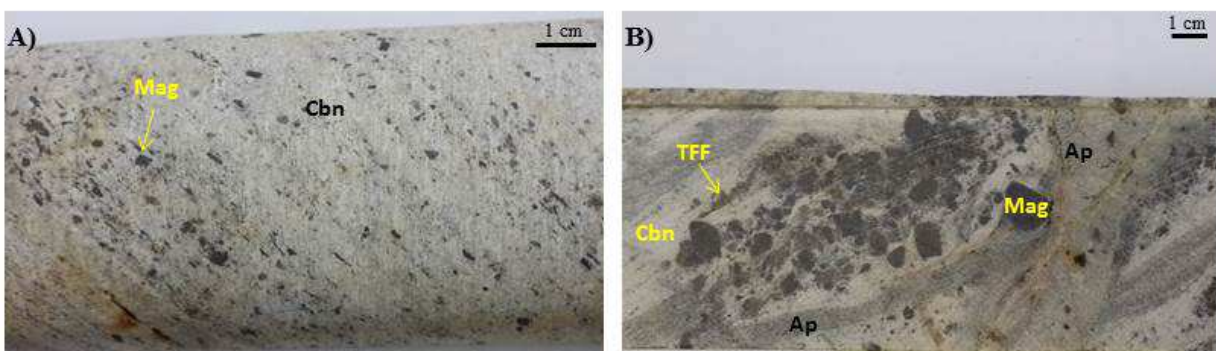


Figura 2.7: Características texturais e mineralógicas macroscópicas dos calcita carbonatitos. A) Amostra MS172 110 m: carbonatito fino com expressivo bandamento magmático marcado por magnetita; B) Amostra CMA-BAR-DH-161 26.4 m: porção nelsonítica em calcita carbonatito, formada por magnetita e apatita euédricas e carbonato intersticial. Notar banda centimétrica de apatita. Ap: apatita; Cbn: carbonatos; Mag: magnetita; TFF: tetraferrihogopita.

Os cristais de carbonato são anédricos a subédricos, variam de muito finos (0.05 mm) a grossos (0.8 mm), de intersticiais a dispersos na rocha.

A flogopita ocorre somente sob a forma de tetraferrihogopita cumulus a intercumulus, vermelha escura (figuras 2.8 A, B e C), com pleocroísmo variando de forte a fraco, formando bolsões (figuras 2.8 A e B), variando de 0.06 a 1.3 mm, ou dispersa (figura 2.8 C). Pode estar fraturada por veios de carbonatos.

A apatita é bem formada, alongada, com contornos arredondados (figuras 2.8 A a E), variando de 0.2 a 2 mm; ocorre dispersa na rocha, formando bolsões, bandas monominerálicas orientadas pelo fluxo magmático (figura 2.8 E) e veios submilimétricos. Também foi observada apatita intersticial (figura 2.8 F).

Magnetita cumulus a intercumulus, (0.05 mm), euédrica a subédrica respectivamente, ocorre dispersa na rocha ou orientada segundo a direção de fluxo magmático. Às vezes apresenta bordas irregulares.

Pirrotita (0.5 mm) e pirita (1.5 a 3 mm) são euédricos e possuem caráter acessório. Pirita ocorre também formando finos veios.

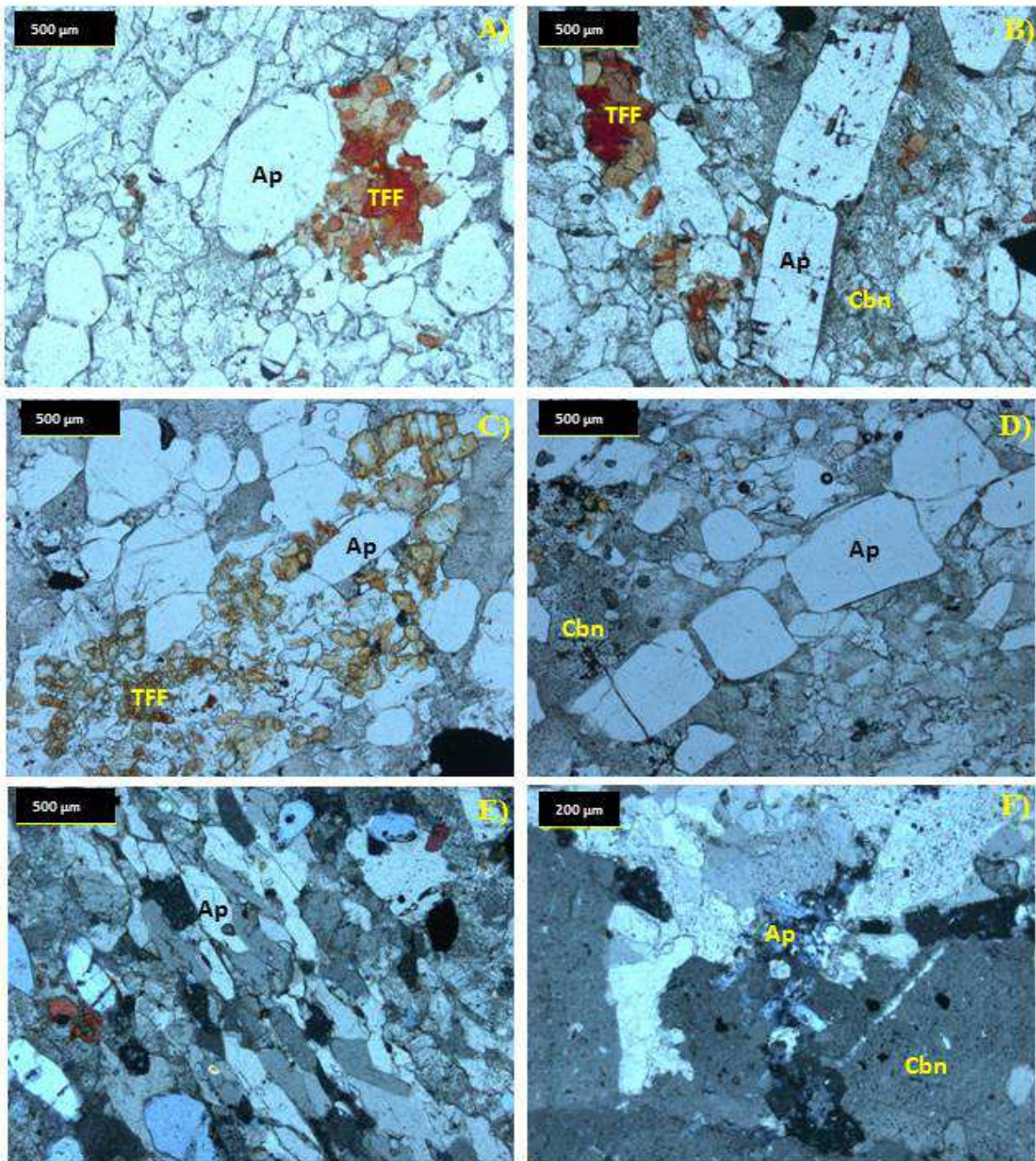


Figura 2.8: Características texturais e mineralógicas microscópicas dos calcita carbonatitos. A) Amostra MS 172 110 m: cristais cumulus de apatita arredondados e orientados na direção de fluxo magmático em contato com tetraferriphlogopita, polarizadores paralelos; B) Amostra MS 172 110 m: apatita cumulus alongada em contato com carbonato muito fino, polarizadores paralelos; C) Amostra CMA-BAR-DH161 26.4 m: cristais finos de tetraferriphlogopita associados à banda rica em apatita, polarizadores paralelos; D) Amostra CMA-BAR-DH161 26.4 m: detalhe de um cristal milimétrico de apatita fraturado, polarizadores paralelos; E) Amostra MS 172 110 m: banda com predomínio de apatita alongada e arredondada, orientada na direção do fluxo magmático, polarizadores cruzados; F) Amostra CMA-BAR-DH161 39.9 m: apatita intersticial em contato com cristais subédricos de carbonato, polarizadores cruzados. Ap: apatita; Cbn: carbonatos; TFF: tetraferriphlogopita.

2.3.2 Dolomita Carbonatitos

Os dolomita carbonatitos ocorrem como diques alojados tanto em bebedouritos quanto em foscoritos. São rochas de cor branca, com textura fina a grossa, maciças ou com bandamento magmático. É comum o desenvolvimento de auréolas de metassomatismo no contato entre os dolomita carbonatito e suas encaixantes. De maneira semelhante aos calcita carbonatitos, possuem conteúdos de carbonatos e de apatita bastante variáveis entre as amostras e quantidades baixas de magnetita e tetraferrihogopita. Pirocloro é pirita são os principais minerais acessórios.

Características texturais e mineralógicas macroscópicas dos dolomita carbonatitos estão ilustradas na figura 2.9.

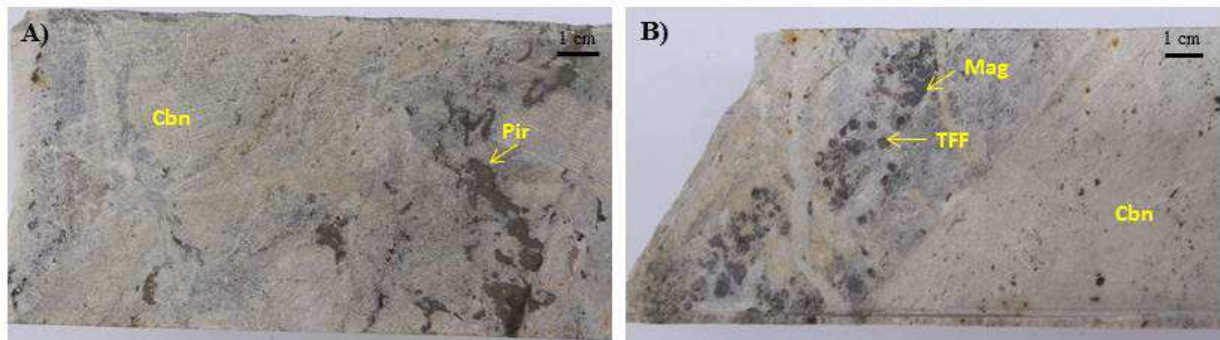


Figura 2.9: Características texturais e mineralógicas macroscópicas dos dolomita carbonatitos. A) Amostra CMA-BAR-DH-151 65.4 m: carbonatito de textura média com bolsões de pirita; B) Amostra CMA-BAR-DH-152 37 m: contato reto entre foscorito (à esquerda, coloração cinza) e carbonatito (à direita, coloração branca). Cbn: carbonatos; Mag: magnetita; Pir: pirita; TFF: tetraferrihogopita.

Os cristais de carbonato ocorrem sob duas formas: grossos (0.5 a 1 mm), variando de euédricos a subédricos (foto 2.10 A) ou intersticial, intercumulus.

A tetraferrihogopita (figuras 2.10 B) ocorre como cristal cumulus, euédrica, vermelho forte e com forte pleocroísmo, atingindo 0.2 mm.

A apatita ocorre sob duas formas: grossa, dispersa pela rocha (até 0.6 mm, figura 2.10 A), em grãos alongados euédricos a arredondados, ou, raramente, fina (0.05 mm), em veios submilimétricos. Também foram observados cristais de apatita com núcleos arredondados e bordas de apatita formadas num estágio magmático posterior (figura 2.10 C).

Magnetita cumulus, euédrica e dispersa na rocha (figuras 2.10 C e D), varia de 0.1 a 0.45 mm. Parte dos cristais possui aspecto intercumulus (figura 2.10 B), preenchendo interstícios entre apatita e carbonatos. Associada com tetraferrihogopita e pirocloro.

Pirita possui caráter acessório, forma veios irregulares e também ocorre dispersa na rocha, euédrica, alcançando 0.3 mm.

Pirocloro varia de 0.1 a 0.5 mm, possui coloração esverdeada, é bem formado e disseminado na rocha; às vezes possui um núcleo marrom e borda esverdeada (figura 2.10 D). Foram observados também veios formados por pirocloro com 0.2 mm de espessura.

Barita, de caráter acessório, varia de 0.1 a 0.5 mm, é intercumulus e forma bolsões irregulares associados aos carbonatos (figura 2.10 E).

Clorita ocorre substituindo parcial a completamente a tetraferroflogopita (figura 2.10 F).

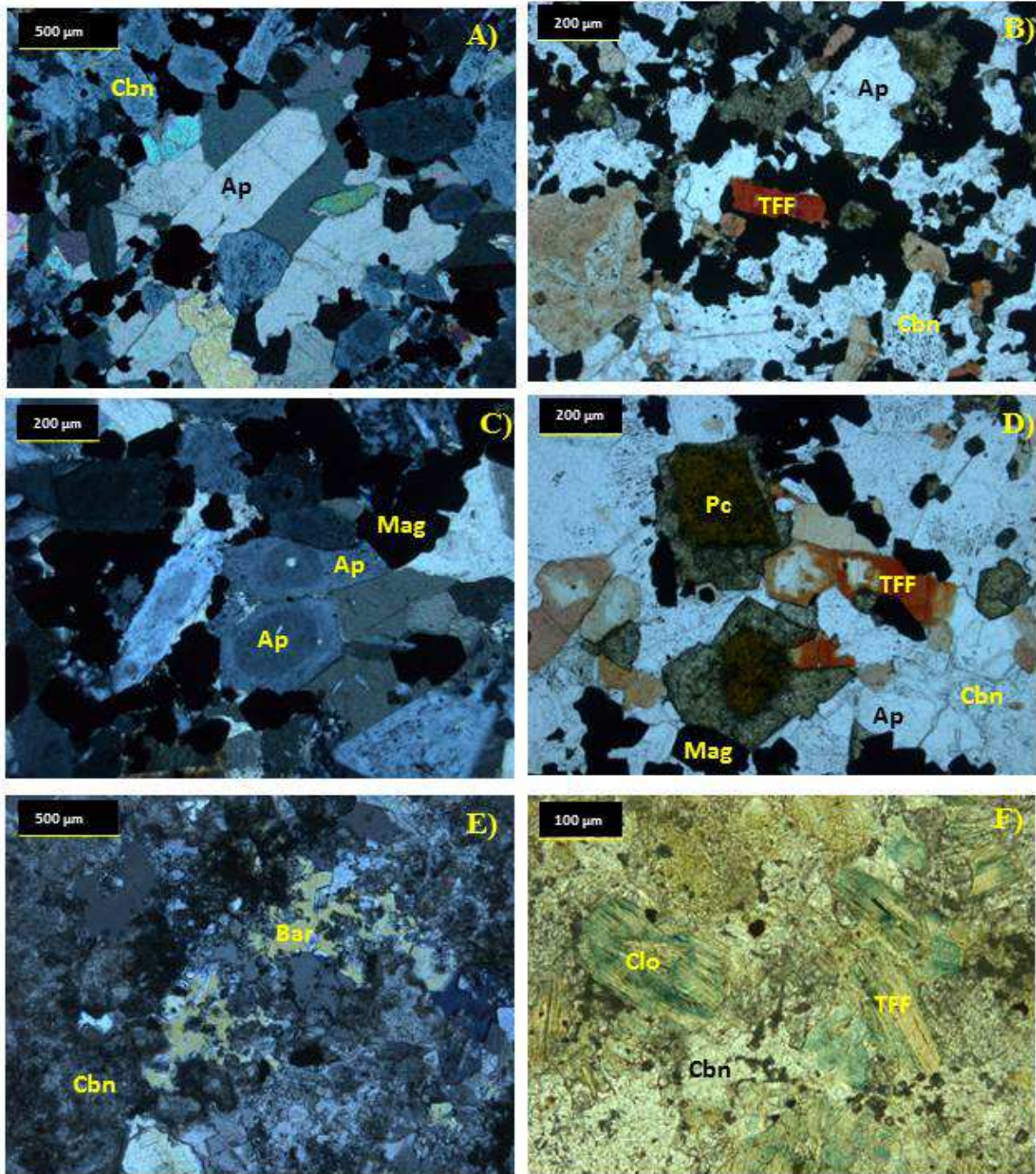


Figura 2.10: Características texturais e mineralógicas microscópicas dos dolomita carbonatitos. A) Amostra SC06 52 m: carbonato euédrico e apatita grossa, ambos dispersos na rocha, polarizadores cruzados; B) Amostra SC06 52 m: detalhe de um cristal cumulus de tetraferrihogopita associado à magnetita intercumulus, polarizadores paralelos; C) Amostra SC06 52 m: cristais de apatita com núcleos diferentes das bordas, e magnetita cumulus, polarizadores cruzados; D) Amostra SC06 52 m: magnetita cumulus e pirocloro zonado, polarizadores paralelos; E) Amostra CMA-BAR-DH151 65.4 m: bolsões de barita em formato irregular, associados a carbonatos, polarizadores cruzados; F) amostra SR09-022 128 m: tetraferrihogopita substituída parcialmente por clorita, polarizadores paralelos. Ap: apatita; Bar: barita; Cbn: carbonatos; Clo: clorita; Mag: magnetita; Pc: pirocloro; TFF: tetraferrihogopita.

2.4. SÉRIE FOSCORÍTICA

Os foscoritos ocorrem principalmente na região nordeste da mina do Barreiro e consistem de diques encaixados predominantemente em carbonatitos e, subordinadamente, em bebedouritos. São rochas de coloração cinza escura, textura fanerítica média a grossa, estrutura geralmente maciça ou com bandamento magmático, cortadas por numerosos veios de carbonatos. São rochas caracterizadas por ampla variação modal na quantidade de apatita, olivina, flogopita e magnetita, além de carbonato intersticial. Tetraferroflogopita e clorita são produtos da alteração metassomática, enquanto pirocloro e pirita são as principais fases acessórias observadas. Os foscoritos estão fortemente metassomatizados, como pode ser constatado a partir da alteração de olivina e flogopita para tetraferroflogopita e feições de alteração no contato entre os minerais da rocha e os veios de carbonato.

De acordo com a classificação proposta por Yegorov (1993), as rochas analisadas são foscorito, nelsonito, olivina apatitito e magnetita forsteritito e situam-se no mesmo campo de classificação das demais rochas da série foscorítica da Província (figura 2.11 A). O cumulado nelsonítico descrito, associado a calcita carbonatito (figura 2.7 B), situa-se no mesmo campo de classificação dos cumulados nelsoníticos associados a carbonatitos de Serra Negra (Grasso, 2010).

Nessa pesquisa, optou-se por agrupar as rochas da série foscorítica em três categorias relacionadas à quantidade de olivina, de forma a se obter um parâmetro de evolução genética: foscoritos ricos em olivina (FCR ricos em olivina), mais primitivos, foscoritos pobres em olivina (FCR pobres em olivina), mais evoluídos, e nelsonitos (NEL), termos finais da série foscorítica. A composição modal das amostras estudadas está apresentada na figura 2.11 B.

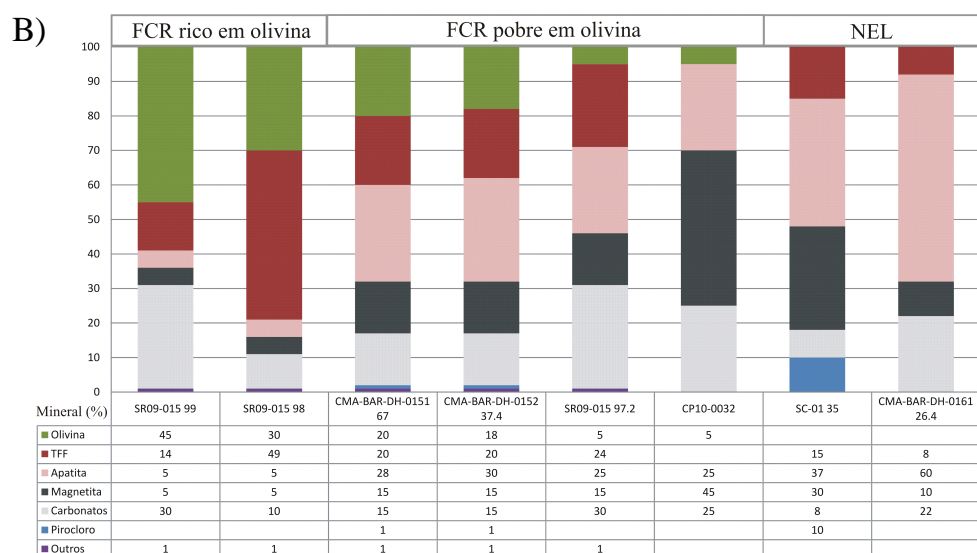
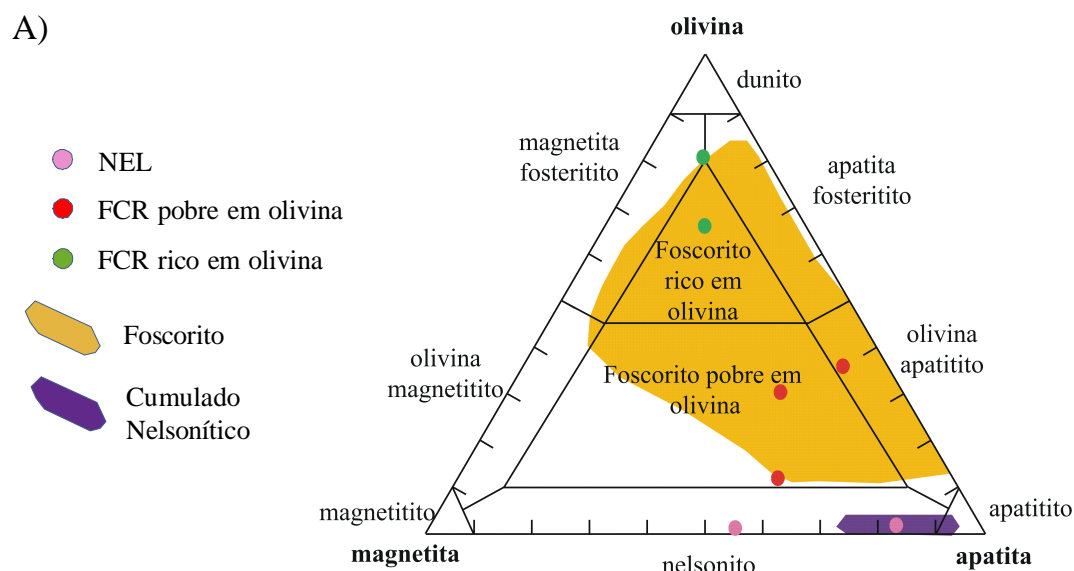


Figura 2.11: Composição mineralógica dos foscorititos. (A) Diagrama de classificação de Yegorov (1993) mostrando as amostras de foscorititos ricos em olivina (círculo verde), foscorititos pobres em olivina (círculo vermelho) e nelsonitos (círculo rosa); o campo dos foscorititos de Catalão I, Catalão II e Salitre em laranja (Ribeiro, 2008; Cordeiro, 2011b; Barbosa, 2012b; Palmieri, 2011) e o campo dos cumulados nelsoníticos de Serra Negra em roxo (Grasso, 2010). (B) composição modal das amostras estudadas. FCR: foscoritito; NEL: nelsonito. Outros: pirita, clorita e serpentina.

As características texturais macroscópicas das amostras das rochas da série foscorítica são ilustradas na figura 2.12.

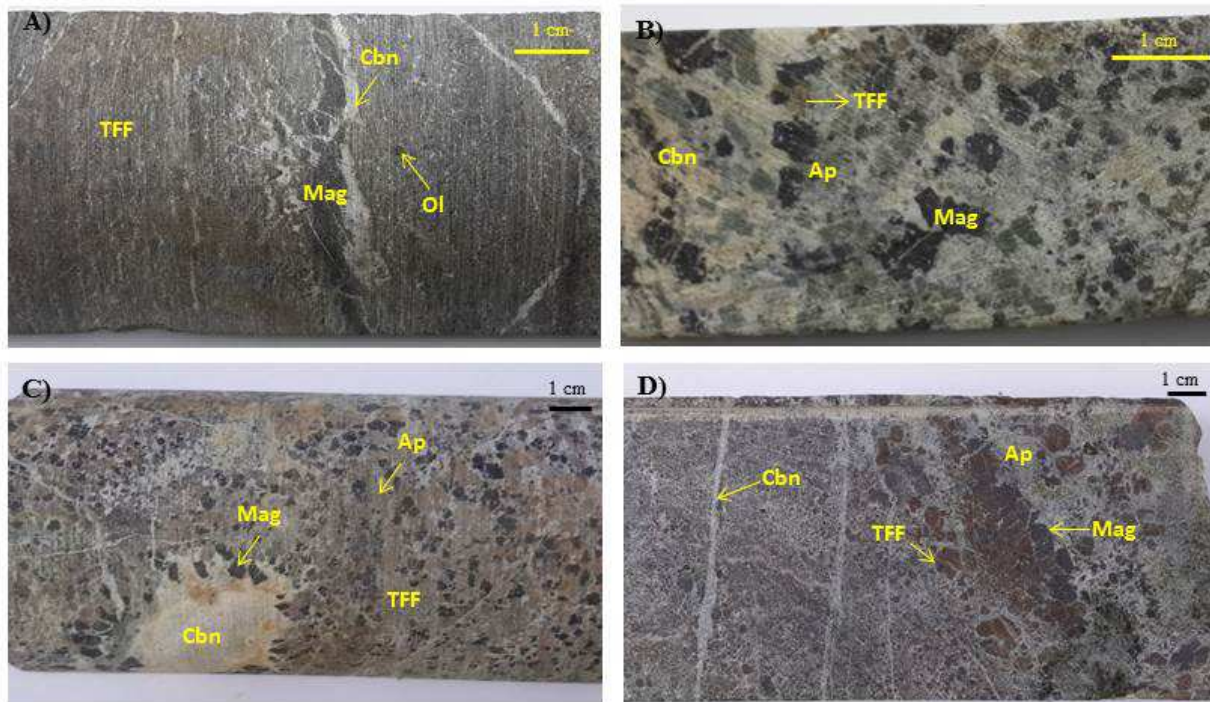


Figura 2.12: Características texturais e mineralógicas macroscópicas dos foscoritos. A) Amostra SR9-15 99 m: foscorito rico em olivina, flogopitizado e cortado por veios milimétricos de carbonato; B) Amostra SR9-15 97.2 m: foscorito pobre em olivina, maciço, com textura grossa; C) Amostra CMA-BAR-DH-151 67 m: foscorito pobre em olivina, maciço, com um bolsão centimétrico de dolomita (canto inferior esquerdo), bordado por cristais euédricos de magnetita; D) Amostra CMA-BAR-DH-152 37.4 m: foscorito pobre em olivina, inequigranular, com cristais euédricos de tetraferriphlogopita associados à magnetita, além de apatita e veios milimétricos de carbonato.

A olivina ocorre como fenocristais e pode estar preservada (figura 2.13A) ou alterada, substituída por clorita no núcleo e tetraferriphlogopita nas bordas (figura 2.13 B). Possui contornos arredondados e alcança até 4 mm. Apatita fina é uma inclusão comum.

A tetraferriphlogopita ocorre principalmente como cristal cumulus, euédrica, varia de muito fina (0.02 mm) a 1 mm, apresenta forte pleocroísmo (figura 2.13 C) e geralmente está associada à magnetita. Também ocorre formando bordas de reação em núcleos preservados de flogopita aluminosa (figura 2.13 A).

A apatita ocorre como prismas com terminações arredondadas, longos a curtos, disseminada pela rocha, variando de 0.2 a 0.9 mm, em veios (figura 2.13 D), bolsões ou dispersas na rocha (figura 2.13 E). Foram observados veios submilimétricos de apatita cortando olivina.

A magnetita ocorre dispersa na rocha, varia de 0.4 a 2 mm, possui caráter cúmulus a intercumulus (figura 2.13 E e F), às vezes apresenta bordas corroídas e/ou caráter poiquilítico e pode estar cortada por veios de carbonato.

O carbonato ocorre principalmente sob a forma intersticial (figura 2.13 D) e também em veios de 0.2 mm de espessura, que costumam conter apatita arredondada. Menos frequentemente são encontrados cristais bem formados associados à apatita.

Pirocloro alcança 10% do total dos minerais da amostra SC01 35 m, classificada como nelsonito. É euédrico (figura 2.13 E e F), disseminado pela rocha e associado à magnetita e à tetraferroflogopita; atinge 1 mm.

A pirita é fina e ocorre disseminada pela rocha ou em veios milimétricos.

A clorita é produto de alteração metassomática da tetraferroflogopita, formando massas muito finas.

Serpentina muito fina ocorre localmente associada à olivina, como produto de alteração metassomática.

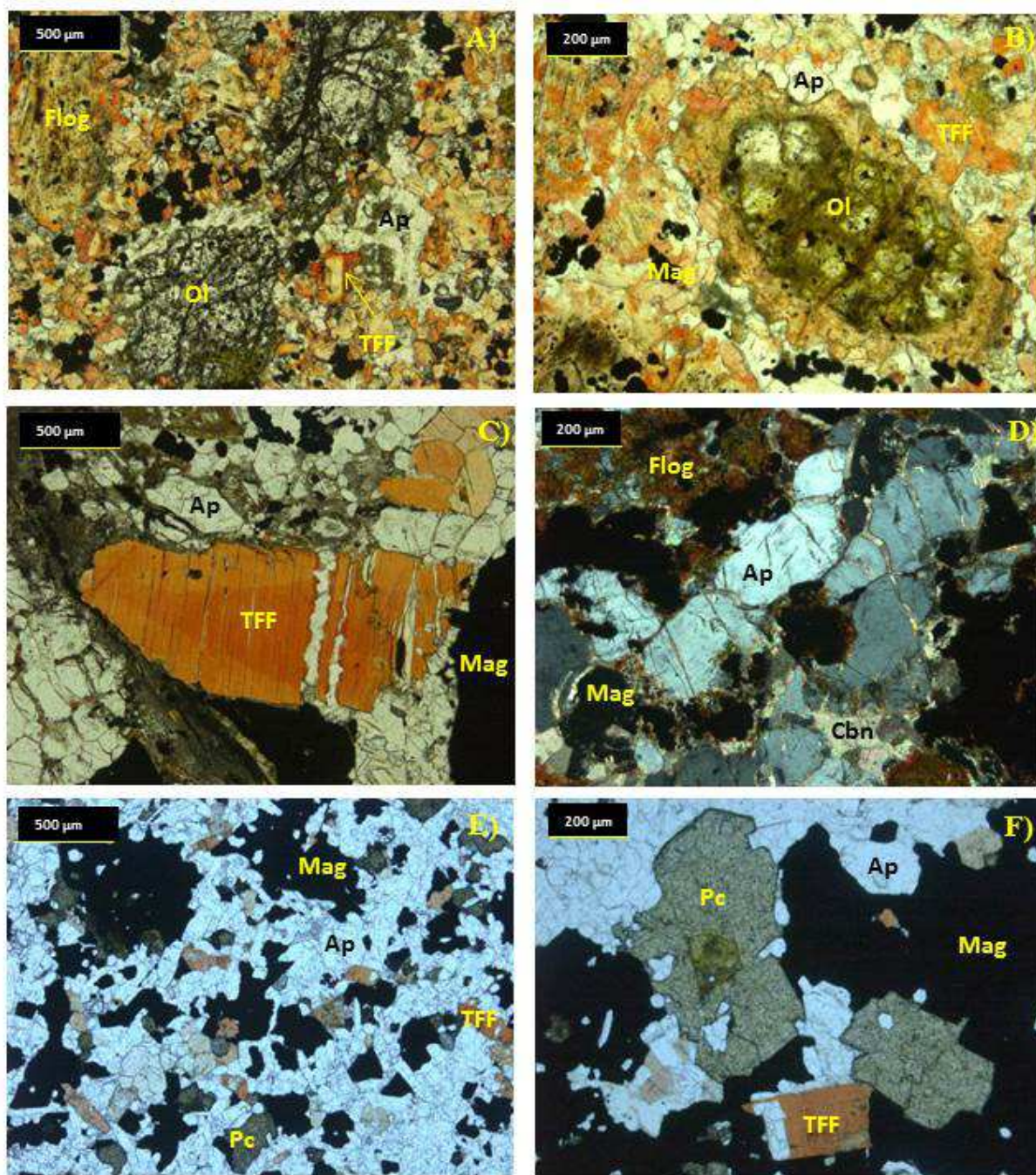


Figura 2.13: Características texturais e mineralógicas microscópicas dos foscritos. A) Amostra SR09-15 98 m: fenocristais de olivina preservados, associados à apatita cumulus e à flogopita com bordas alteradas para tetraferri-flogopita, polarizadores paralelos; B) Amostra SR09-15 98 m: fenocristal de olivina cloritizada com borda alterada para tetraferri-flogopita, polarizadores paralelos; C) Amostra CMA-BAR-DH151 67 m: tetraferri-flogopita subédrica, polarizadores paralelos; D) Amostra CMA-BAR-DH152 37.4 m: detalhe de bolsão submilimétrico de apatita, polarizadores cruzados; E) Amostra SC01 35 m: aspecto geral da estrutura maciça do nelsonito, polarizadores paralelos; F) Amostra SC01 35 m: cristais euédricos de pirocloro associados à tetraferri-flogopita cumulus e magnetita cumulus a intercumulus, polarizadores paralelos. Ap: apatita; Cbn: carbonatos; Flog: flogopita; Mag: magnetita; Ol: olivina; Pc: pirocloro; TFF: tetraferri-flogopita.

2.5. MACROGRUPOS DE PROTOLITOS

Cinco tipos principais de protolitos foram identificados na mina do Barreiro: bebedouritos (BEB), anfibólio bebedouritos (ANF BEB), calcita carbonatitos (CC), dolomita carbonatitos (DC) e foscoritos (FCR). No entanto, esses tipos litológicos não ocorrem individualizados na mina do Barreiro, e sim estreitamente associados na forma de *stockworks* de diques, similares aos observados na jazida de fosfato de Catalão I (Grasso et al., 2006; Palmieri et al., 2006; Ribeiro, 2008; Cordeiro et al., 2011b).

Essa estreita associação entre os protolitos decorre da baixa viscosidade dos líquidos magmáticos a partir dos quais os carbonatitos e foscoritos se formaram (e.g. Treiman 1989), uma vez que seus grupos aniônicos fundamentais ($[\text{CO}_3]^{2-}$ e $[\text{PO}_4]^{3-}$, respectivamente) não podem formar polímeros. Esses líquidos de baixa viscosidade escoam facilmente ao longo de fraturas preexistentes, formando complexas redes de veios e diques entrelaçados, de espessuras variadas.

Devido às complexas relações de contato entre esses litotipos, propõe-se neste trabalho o seu agrupamento em quatro macrogrupos de protolitos (figura 2.14), de acordo com a predominância de associações observada em campo e em testemunhos de sondagem: associação de bebedourito e calcita carbonatito (BEB/CC), associação de anfibólio bebedourito e calcita carbonatito (ANF BEB/CC), associação de bebedourito e dolomita carbonatito (BEB/DC) e associação de foscorito e dolomita carbonatito (FRC/DC).

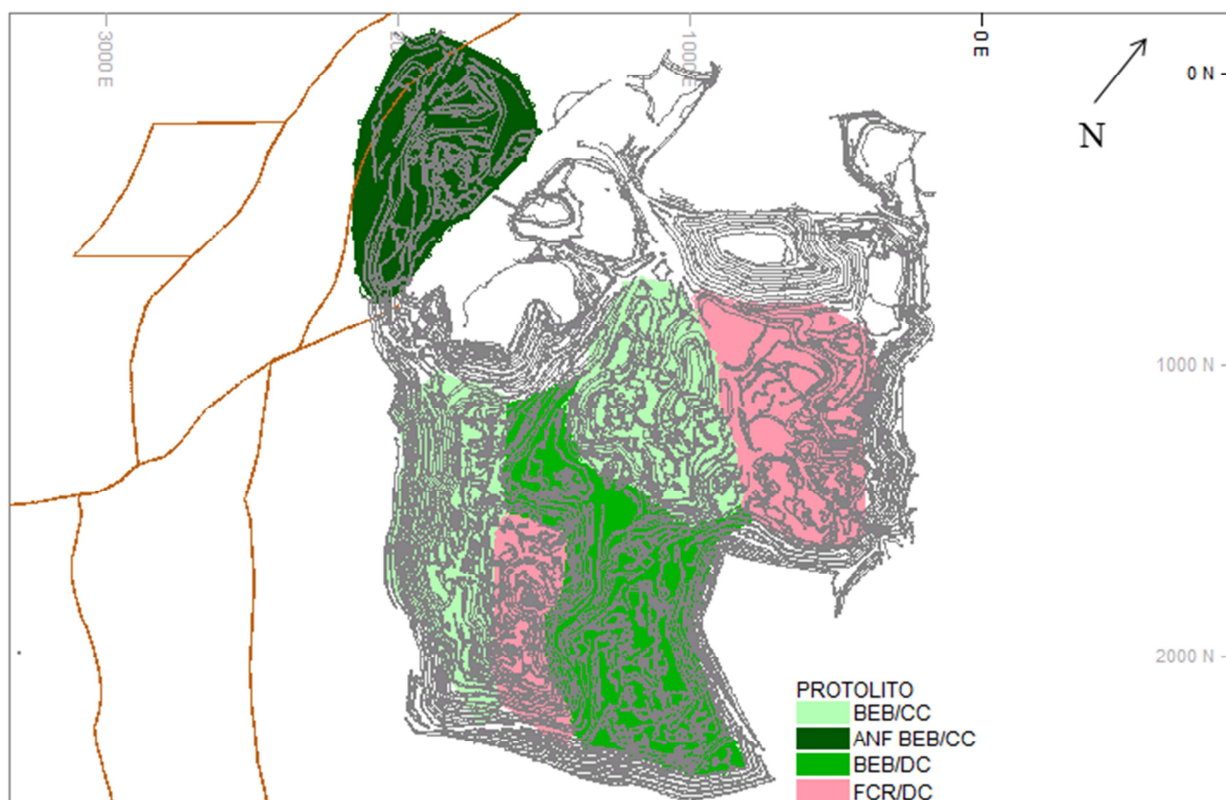


Figura 2.14: Distribuição dos macrogrupos de protolitos na mina do Barreiro. A linha marrom representa o limite do domo de Araxá; as linhas cinza são as curvas de nível da mina do Barreiro. Coordenadas métricas locais.

Os macrogrupos apresentam distribuição espacial bem definida: BEB/CC ocorre nas regiões sudoeste a norte da mina; ANF BEB/CC, na borda noroeste da mina, próximo ao limite do domo de Araxá; BEB/DC, na região sudeste, e FCR/DC, predominantemente na região nordeste e, minoritariamente, na região sul. Essa distribuição reflete o amplo predomínio de BEB na mina do Barreiro, presença de CC nas regiões mais próximas da borda do domo e FCR e DC nas regiões mais próximas do centro do domo de Araxá.

CAPÍTULO III - A BASE DO MANTO DE INTEMPERISMO

3.1. INTRODUÇÃO

Do mesmo modo que o reconhecimento dos protolitos, o grau de intemperismo químico é um controle fundamental da mineralização de fosfato. As divisões do manto de intemperismo refletem a sua evolução: enquanto o minério da rocha alterada ocorre na porção mais profunda da base do manto, em contato com a rocha fresca e preserva carbonatos e micas, o minério micáceo ocorre entre os horizontes de rocha alterada e oxidado, diagnosticado principalmente presença de micas e ausência de carbonatos.

A definição dos horizontes de intemperismo de Araxá foi feita a partir da descrição geológica de furos de sonda preservados e completos, isto é, que interceptaram todos os níveis intempéricos, com a qual foram determinadas as seguintes divisões, já utilizadas também por outros autores (Oliveira e Imbernon, 1998; Toledo, 2000; Toledo et al., 2004; Ribeiro, 2008): rocha fresca, rocha alterada, isalterito, aloterito e cobertura, sendo que o isalterito foi subdividido, da base para o topo, em micáceo de base, micáceo de topo e oxidado. Diversos autores propuseram critérios de distinção entre essas divisões. Por exemplo, Oliveira e Imbernon (1998) utilizam critérios mineralógicos e texturais, mas não distinguem subdivisões do isalterito. Ribeiro (2008) complementa essa abordagem utilizando como critério principal a composição química de rocha total para distinguir subdivisões no manto de intemperismo. Grasso et al. (2006) aplicam critérios descritivos de campo com esse mesmo objetivo.

Nesta tese, a divisão do manto de intemperismo de Araxá é baseada, em um momento inicial, em Oliveira e Imbernon (1998). O isalterito é então subdividido com base nos critérios de campo de Grasso et al. (2006), com algumas adaptações para o caso de Araxá. A figura 3.1 apresenta o perfil de intemperismo esquemático da mina do Barreiro, com as divisões e subdivisões propostas nesta pesquisa, e a espessura de cada intervalo.

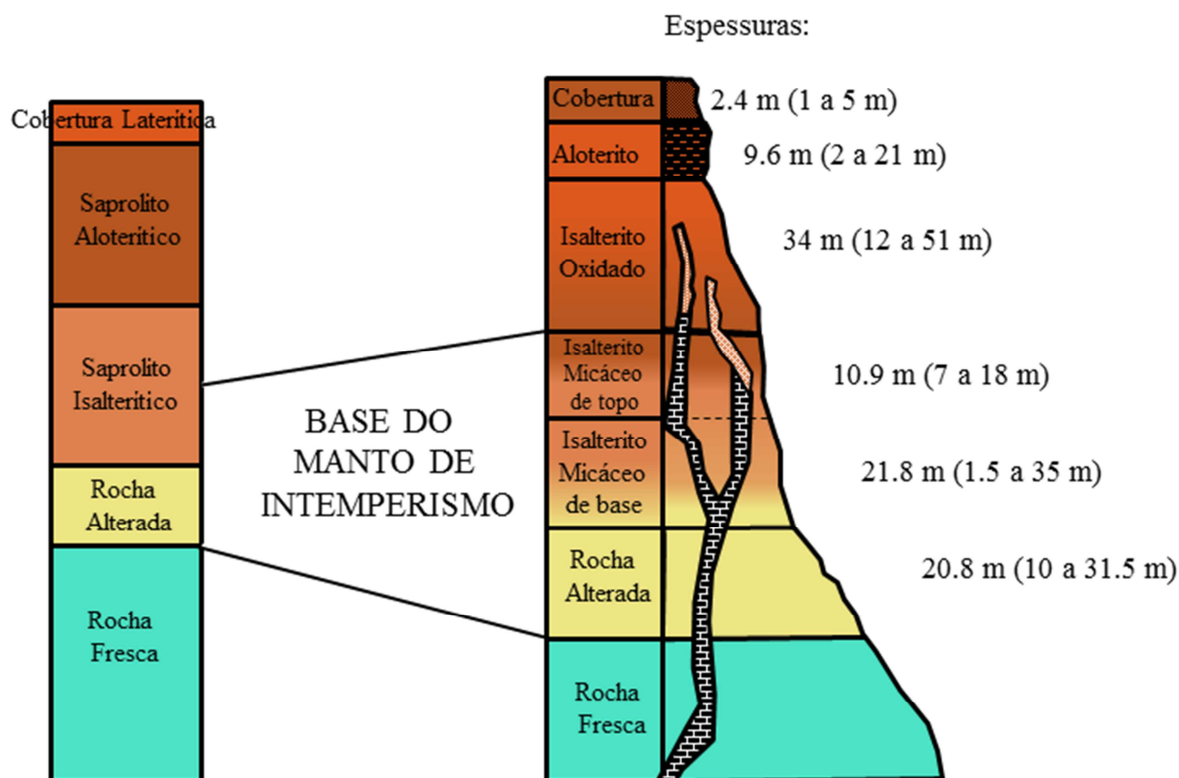


Figura 3.1: Perfil de intemperismo esquemático do Complexo de Catalão I proposto por Oliveira & Imbernon (1998), à esquerda; perfil de intemperismo esquemático de Araxá com as divisões e subdivisões propostas nesta pesquisa, e espessura média, mínima e máxima de cada intervalo, à direita. A feição quadriculada no manto de intemperismo do Barreiro representa a perda gradual das estruturas e texturas da rocha fresca com a evolução do intemperismo.

A rocha fresca é caracterizada pela ausência de sinais visíveis de alteração intempérica, enquanto a rocha alterada é marcada por uma ligeira perda de coesão e por alteração dos minerais mais suscetíveis ao intemperismo, como sulfetos e olivina, e alteração parcial dos carbonatos. A superfície de contato entre esses dois domínios pode ser brusca ou gradativa. A espessura média da rocha alterada é de 20.8 m. O minério contido nesse horizonte de intemperismo é usualmente designado, no jargão operacional das minas de fosfato da região do Alto Paranaíba, como minério sílico-carbonatado (Ribeiro, 2008). É geralmente esverdeado, com estruturas primárias bem preservadas e alguns minerais de intemperismo reconhecíveis, como filossilicatos interestratificados e vermiculita, ainda que em quantidades pouco expressivas.

O contato da rocha alterada com o isalterito micáceo de base é marcado pelo desaparecimento de carbonato reconhecível em campo ou em amostra de mão. Em alguns casos, ainda é possível detectar resíduos de carbonato ao microscópio ou em imagens eletrônicas em amostras do isalterito micáceo de base. Entretanto, considera-se que as quantidades de carbonato não são mais significativas a partir do seu não reconhecimento macroscópico, tendo em vista que não necessitam ser previamente retirados no processo de concentração da apatita (ver Capítulo IV).

O isalterito micáceo tipicamente contém micas, mais ou menos pseudomorfizadas por filossilicatos interestratificados (e.g. Azzone e Ruberti, 2010; Neumann et al., 2011). Devido à característica gradacional da passagem da flogopita à vermiculita durante o intemperismo, marcada por estágios intermediários de filossilicatos interestratificados, utilizou-se um critério físico de campo para separar os isalteritos micáceo de topo e de base, levando em conta o comportamento mecânico da mica: se os cristais de mica podem ser manualmente desintegrados o intervalo é classificado como micáceo de topo. Se, ao contrário, a mica for resistente à pulverização manual, ou seja, se ainda houver uma quantidade expressiva de flogopita como parte do filossilicato interestratificado, o intervalo é classificado como micáceo de base. Esta diferença no comportamento mecânico dos filossilicatos tem implicações importantes para o beneficiamento e, por conseguinte, para o comportamento geometalúrgico do minério (ver Capítulo IV). A espessura média do intervalo micáceo de base é de 21.8 m, e apresenta ampla variação, de 1.5 a 35 m. A espessura média do intervalo micáceo de topo é de 10.9 m, variando de 7 a 18 m.

O limite superior do micáceo de topo é marcado pelo desaparecimento dos filossilicatos em escala macroscópica. A partir deste estágio estabelece-se o isalterito oxidado, dominado por óxidos, hidróxidos, argilominerais e apatita, com granulação arenosa e consistência friável. Apresenta espessura média de 34 m.

O aloterito possui espessura média de 9.6 m, granulação arenosa e coloração amarelo-avermelhado, formado por óxidos/hidróxidos, fosfatos aluminosos secundários, argilominerais e característica ausência de apatita. Representa o produto final do processo de alteração intempélica.

A cobertura é um horizonte argiloso de coloração predominantemente vermelha, superficial, com ocorrência de matéria orgânica, e espessura média de 2.4 m. O isalterito oxidado, o aloterito e a cobertura não são objetos deste trabalho e não serão, portanto, abordados em maior detalhe.

3.2. NOMENCLATURA PRATICADA NAS OPERAÇÕES DE FOSFATO DA PROVÍNCIA DO ALTO PARANAÍBA

As minas de fosfato situadas nos complexos da Província Ígnea do Alto Paranaíba utilizam a delimitação dos horizontes de intemperismo como um controle de mineralização de forma a subsidiar a lavra e o beneficiamento do minério fosfático. Todas as minas utilizam critérios semelhantes, mas também apresentam diversos pontos divergentes entre si. A análise comparativa entre a nomenclatura proposta no presente trabalho, a nomenclatura adotada historicamente em

Araxá, a proposta de Oliveira e Imbernon (1998) e as nomenclaturas atualmente aplicadas em outras minas de fosfato da Província está sumarizada na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Nomenclatura do perfil de intemperismo proposta neste trabalho comparada com as nomenclaturas praticadas nas minas de Catalão I, Tapira e Araxá e a proposta de Oliveira e Imbernon (1998) para Catalão I.

Este trabalho	Braga et al. (2010)	Oliveira & Imbernon (1998)	Ribeiro (2008)	Nascimento (2014)
Araxá	Araxá	Catalão I	Catalão I	Tapira
Cobertura	Solo	<i>Overburden</i>	Cobertura laterítica	Aloterito
Aloterito	aloterito Isalterito Laranja	Saprolito aloterítico	Aloterito	
Isalterito oxidado	Isalterito marrom araranjado	Saprolito isalterítico	Isalterito oxidado	Isalterito
	Isalterito marrom		Isalterito micáceo oxidado	
	Isalterito marrom esverdeado		Isalterito micáceo de topo	
Isalterito Micáceo topo	Isalterito micáceo médio			
Isalterito Micáceo base	Isalterito micáceo de base			
Rocha alterada	Isalterito verde Rocha pouco intemperizada	Rocha alterada	Rocha alterada	Rocha semi intemperizada
Rocha Fresca		Rocha Sã	Rocha fresca	Rocha fresca

A nomenclatura adotada nesta pesquisa possui a mesma divisão básica da proposta de Oliveira e Imbernon (1998) para Catalão; adicionalmente, sugere-se um detalhamento do horizonte isalterítico neste trabalho.

As divisões propostas nesta tese trabalho são, ainda, correlacionáveis às divisões propostas por Ribeiro (2008) em Catalão. Excetua-se a individualização, em Catalão, de um horizonte denominado micáceo oxidado, que representa a transição entre o micáceo de topo e o oxidado. Ribeiro (2008) define mineralogicamente esse horizonte como caracterizado por pequenas quantidades de vermiculita de granulação fina. No entanto, esse critério é muito sutil, normalmente de difícil identificação em campo e, por sua característica limítrofe, muito dependente da composição do protolito. Ribeiro (2008) individualiza também um horizonte de transição entre o micáceo de topo e o micáceo de base, denominado micáceo médio e caracterizado mineralogicamente por quantidades similares de vermiculita e flogopita. Assim como considerado para o horizonte micáceo oxidado, o referido critério é muito sutil e difícil de ser diagnosticado em campo.

Na comparação com Tapira (Nascimento, 2014), a nomenclatura adotada aqui apresenta um maior grau de detalhamento no horizonte isalterítico; adicionalmente, não mina de Tapira não é individualizado um horizonte de cobertura. Nos demais horizontes, ambas as abordagens são equivalentes.

A maior diferença entre a nomenclatura adotada nesta pesquisa e as das demais minas ocorre justamente com Araxá. Neste complexo, os horizontes de intemperismo têm sido individualizados como isalterito laranja, isalterito marrom alaranjado, isalterito marrom, isalterito marrom

esverdeado, isalterito verde e rocha pouco intemperizada (Braga et al. 2010). O termo isalterito verde é utilizado para agrupar os horizontes micáceos e a parte mais friável do horizonte de rocha alterada. De acordo com Oliveira e Imbernon (1998), Ribeiro (2008) e o presente trabalho, o horizonte isalterítico não possui carbonatos em quantidades relevantes, e designar como isalterito a porção mais friável do horizonte de rocha alterada é inconsistente com essa abordagem. A segunda inconsistência na nomenclatura de Araxá é a associação dos horizontes de intemperismo com cores, uma vez que a cor do manto de intemperismo pode ser fortemente influenciada pelo tipo de protolito. Por exemplo, um foscorito pode produzir alteração de cor marrom escuro no mesmo grau de intemperismo em que um carbonatito produz alteração alaranjada. Adicionalmente, o termo isalterito laranja é aplicado, naquela proposta, a um material que equivale ao aloterito em todas as demais.

3.3. CARACTERIZAÇÃO MINERAL DE TESTEMUNHOS DE SONDAGEM

A caracterização mineral de testemunhos de sondagem teve como objetivo identificar a presença e analisar a evolução dos minerais na base do manto de intemperismo por macrogrupo de protolitos em amostras de minérios não aflorantes na mina. Os resultados de análises pontuais por EDS possuem caráter semi-quantitativo, normalizados a 100%, e serão utilizados apenas de forma relativa, na mesma abordagem de Florêncio e Toledo (1997) para o estudo da alteração intempérica no complexo de Ipanema.

As assembleias mineralógicas identificadas por difração de raios X e MEV-EDS em cada um dos macrogrupos de protolitos e por unidade da base do manto de intemperismo, nas amostras estudadas, constam na tabela 3.2. Destaca-se que os minerais do grupo da plumbogummita foram agrupados sob a identificação de gorceixita, devido ao predomínio dessa fase mineral em relação às demais fases desse grupo.

Tabela 3.2: Assembléias mineralógicas por macrogrupo de protolito e unidades da base do manto de intemperismo nas amostras estudadas de testemunhos de sondagem. XXX: presença; X: rara presença. BEB/CC: associação bebedourito/calcita carbonatito; ANF BEB/CC: associação anfibólio bebedourito/calcita carbonatito; BEB/DC: associação bebedourito/dolomita carbonatito; FCR/DC: associação foscrito/dolomita carbonatito. MT: micáceo de topo; MB: micáceo de base; RA: rocha alterada. K feldspato: feldspato potássico; Sr apatita: estrôncio apatita; TFF: tetraferri-flogopita; Filos. Interstrat.: filossilicatos interestratificados.

Mineral	BEB/CC			ANF BEB/CC			BEB/DC			FRC/DC		
	MT	MB	RA	MT	MB	RA	MT	MB	RA	MT	MB	RA
Diopsídio		XXX	XXX		XXX	XXX		XXX	XXX			
Flogopita		XXX	XXX		XXX	XXX		XXX	XXX		XXX	XXX
Titanita			X	XXX	XXX	XXX		XXX				
K feldspato					XXX	XXX						
Zircão	XXX		XXX						XXX	XXX		
Apatita	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
Dolomita		X	XXX					X	XXX		X	XXX
Calcita		X	XXX			XXX		X	XXX		X	XXX
Norsethita												XXX
Ankerita									XXX			
Magnetita	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
Perovskita									XXX			
Ilmenita	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
Pirocloro	X	X	X					X		XXX	XXX	XXX
Calzirtita							XXX	XXX	XXX			
Zirconolita		XXX								XXX		
Pirita									XXX			XXX
Anatásio	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
Barita	XXX	XXX	XXX				XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
Estroncianita									X			
Sr Apatita							XXX	XXX	XXX			
Monazita	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
Priderita		X										
Richterita	X	X	X	XXX	XXX	XXX	X	X	X			
Riebeckita				XXX			X	X	X			
TFF							X	X	X			XXX
Filos. Interstrat.	X	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
Goethita	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
Gorceixita	XXX	X					XXX	XXX	X			
Hematita							XXX	XXX	XXX			
Hollandita	X	X		X	X		X	XXX	XXX			
Quartzo	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
Serpentina		XXX							XXX			
Vermiculita	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX

3.3.1 Associação Bebedourito / Calcita Carbonatito (BEB/CC)

O horizonte de rocha alterada deste macrogrupo é caracterizado pela presença de carbonatos, principalmente calcita, além de dolomita subordinada. Os demais minerais residuais do protolito nesse horizonte são apatita, flogopita, diopsídio, richterita, ilmenita, magnetita e pirocloro. A apatita tem normalmente textura lisa e é bem formada (figura 3.2 A). Alguns grãos são finos e porosos, formados por dois tipos de apatita (figura 3.2 B): porções claras, mais ricas em estrôncio (5% SrO) e porções escuras, com conteúdos de estrôncio abaixo do limite de detecção. A perda de estrôncio durante o intemperismo foi observada por Ferrari (2000) para as apatitas de Juquiá e Tapira, e por Toledo et al. (2004) para as apatitas de Catalão I. Da mesma forma, neste trabalho sugere-se que a porção pobre em estrôncio seja uma porção lixiviada da apatita ou recristalização deste mineral em baixa temperatura. Notar que as regiões mais escuras do grão estão próximas a poros e espaços vazios. Adicionalmente, a apatita de BEB/CC possui teores elevados de P_2O_5 , SiO_2 e SrO e intermediários de Na_2O em relação a outros macrogrupos de protolitos nesse horizonte de intemperismo (figura 3.6).

Os minerais de alteração supergênica na rocha alterada são anatásio, goethita, monazita, barita, quartzo, filossilicatos interestratificados e vermiculita. Neste trabalho, são considerados como filossilicatos interestratificados os produtos de alteração da flogopita que apresentam carência de potássio em relação a uma flogopita pura, sendo transicionais entre a flogopita e a vermiculita, similares aos que ocorrem em outros complexos alcalino-carbonatíticos (Florêncio e Toledo, 1997; Neumann, 1999; Ribeiro, 2008; Azzone e Ruberti, 2010; Neumann et al., 2011). O limite inferior de K_2O utilizado neste trabalho para distinguir uma flogopita pura e um filossilicato interestratificado foi 8.5%, conforme sugestão de Thompson et al. (1998) para identificação de flogopita sem abertura do sistema K-Ar. A eliminação do potássio das flogopitas ocorre possivelmente ao longo dos planos de clivagem, e a alteração é facilitada pela progressiva abertura desses planos à medida que o intemperismo evolui (figura 3.2 E). Os filossilicatos interestratificados progressivamente perdem potássio e enriquecem em magnésio e cálcio com a evolução do intemperismo (Azzone e Ruberti, 2010). Neste trabalho, o limite superior de K_2O utilizado para identificação da vermiculita por EDS foi 3%. Esse limite, apesar de impreciso, indica o progressivo aumento na quantidade de vermiculita, que ocorre com frequência cada vez maior em direção ao micáceo de topo. Quartzo ocorre como cimento, preenchendo fraturas entre grãos (figura 3.2 A).

O horizonte isalterítico micáceo de base é quase livre de carbonatos, apresentando raramente relictos de calcita e dolomita identificáveis apenas em microscopia ótica ou MEV. Os demais

minerais residuais do protolito observados na rocha alterada foram também observados nesse horizonte: apatita, flogopita, diopsídio, richterita, ilmenita, magnetita e pirocloro. Observou-se, no entanto, uma queda brusca nos teores médios de SiO_2 e SrO da apatita (figuras 3.6 C e 3.6 D). O raro mineral priderita foi detectado nesse horizonte. No complexo de Catalão I esse mineral foi identificado e interpretado como produto de metassomatismo (e.g. Gaspar et al., 1994).

Os minerais de alteração supergênica encontrados no horizonte micáceo de base foram hollandita e, raramente, gorceixita, além da assembleia supergênica já identificada na rocha alterada. A figura 3.2 C apresenta cristais bem formados de anatásio associados à apatita fina e porosa, e barita. A goethita apresenta um aspecto esquelético (figuras 3.2 D).

O horizonte isalterítico micáceo de topo é caracteristicamente livre de carbonatos e de flogopita, assim como descrito por Oliveira e Imbernon (1998) e Ribeiro (2008) no manto intempérico de Catalão I. Adicionalmente, nesse trabalho sugere-se que o diopsídio foi também completamente lixiviado no horizonte micáceo de topo, conforme demonstram os dados de MEV/EDS e DRX. Os minerais residuais do protolito são apatita, richterita, ilmenita e magnetita. Observa-se uma queda nos conteúdos médios de SiO_2 , Na_2O , SrO e P_2O_5 da apatita em direção ao micáceo de topo (figura 3.6).

A assembleia de minerais supergênicos se torna mais complexa e abundante nesse horizonte intempérico: anatásio, goethita, barita, quartzo, filossilicatos interestratificados, vermiculita, hollandita, monazita e gorceixita. Em alguns cristais foi observado crescimento de gorceixita entre as folhas do filossilicato interestratificado (figura 3.2 E). Goethita e hollandita associadas formam uma textura intrincada de recristalização (figura 3.2 F).

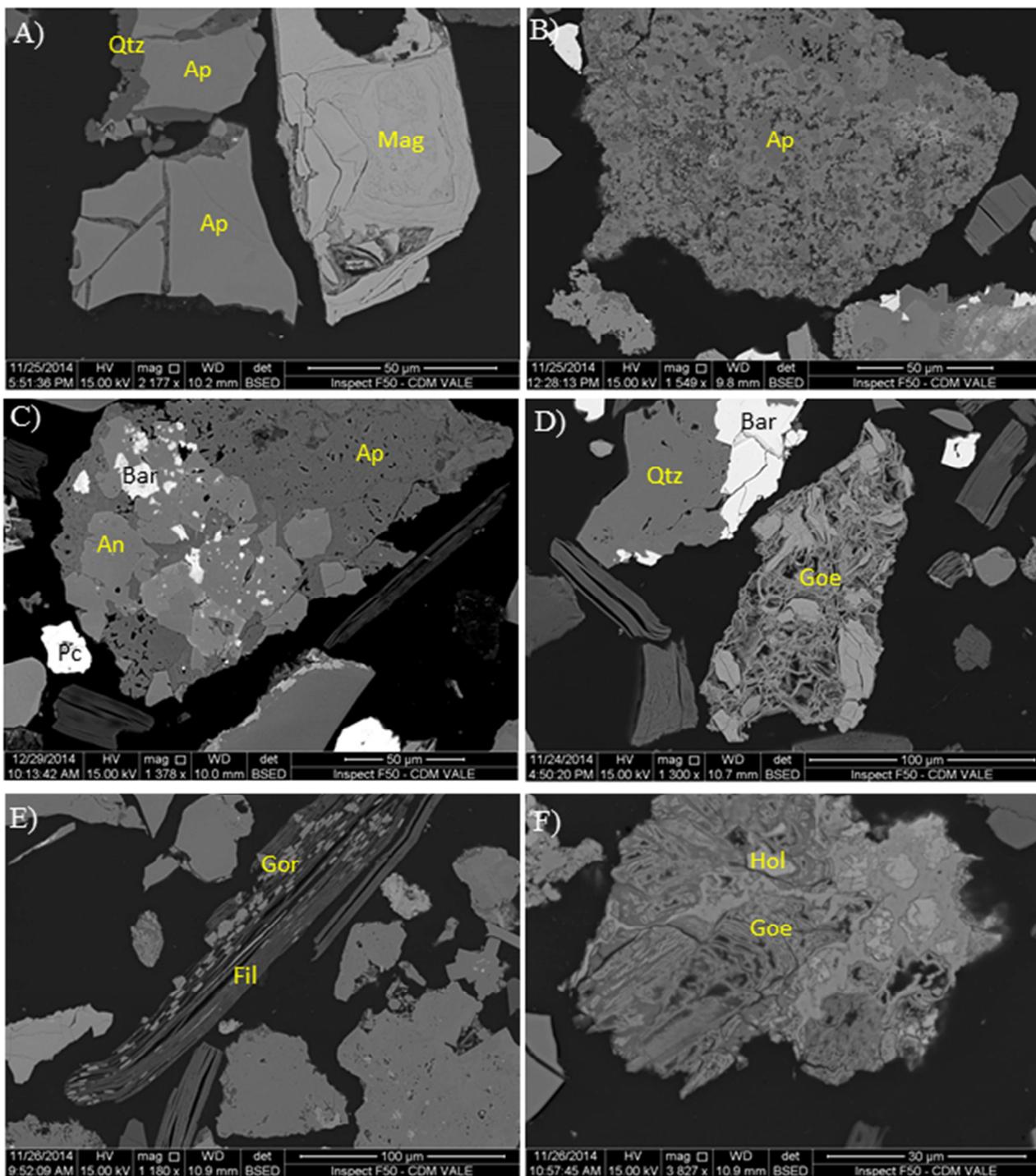


Figura 3.2: Imagens eletrônicas por elétrons retroespalhados dos minerais e suas texturas em amostras de testemunhos de sondagem do macrogrupo de protolito BEB/CC. A) Apatita bem formada, com textura lisa, e cimento de quartzo em fraturas - amostra CMA-BAR-DH149 9 a 20.85 m, rocha alterada; B) Grão de apatita formado por apatita rica em Sr (porções claras) e sem Sr (porções escuras), indicando dissolução parcial da apatita residual - amostra CMA-BAR-DH149 9 a 20.85 m, rocha alterada; C) Associação entre anatásio, barita e apatita porosa na amostra CMA-BAR-DH156 7.1 a 13.75 m, micáceo de base; D) Aspecto esqueletal da goethita - amostra CP10-042 41.55 a 51.55 m, micáceo de base; E) Filossilicato interestratificado com gorceixita formada entre seus planos de clivagem - Amostra CMA-BAR-DH149 0 a 9 m, micáceo de topo; F) Goethita e hollandita formando textura intrincada de recristalização - amostra CMA-BAR-DH149 0 a 9 m, micáceo de topo. An: anatásio; Ap: apatita; Bar: barita; Fil: filossilicato interestratificado; Goe: goethita; Gor: gorceixita; Hol: hollandita; Mag: magnetita; Pc: pirocloro; Qtz: quartzo.

3.3.2 Associação Anfibólio Bebedourito / Calcita Carbonatito (ANF BEB/CC)

A principal característica deste macrogrupo no horizonte de rocha alterada é a preservação da calcita proveniente do protolito. Os demais minerais residuais do protolito observados nesse horizonte foram apatita, ilmenita, feldspato potássico, flogopita, diopsídio, richterita e titanita. A apatita nesse macrogrupo apresenta maior conteúdo de Na_2O que a dos demais, alcançando valores em torno de 3.2% na rocha alterada (figura 3.6 B). A presença de feldspato potássico é um indicativo de que estes bebedouritos são mais evoluídos em relação à maioria dos bebedouritos da província (e.g. Brod, 1999; Barbosa et al., 2012a, Grasso, 2010). A richterita substitui o diopsídio, parcial a completamente.

Quartzo, anatásio, goethita, filossilicatos interestratificados, vermiculita, monazita e apatita secundária são os principais produtos de intemperismo encontrados na rocha alterada. Monazita muito fina e porosa foi observada cortando apatita primária (figura 3.3 A). Textura semelhante foi descrita como monazita em esferoides concêntricos, interescida com quartzo, por Neumann (1999). Feições similares foram descritas também por Tassinari (2001) e Ribeiro et al. (2001). A apatita secundária é livre de SrO , Na_2O e SiO_2 e ocorre sob a forma de cimento (figura 3.3 B).

O horizonte isalterítico micáceo de base é caracteristicamente livre de calcita. Os demais minerais residuais do protolito observados na rocha alterada mantêm-se preservados (apatita, ilmenita, feldspato potássico, flogopita, diopsídio, richterita e titanita). P_2O_5 , SiO_2 e SrO da apatita decrescem (figuras 3.6 A, C e D). O feldspato potássico pode apresentar pertitas (figura 3.3 C).

A assembleia de minerais supergênicos observada no horizonte rocha alterada permanece no micáceo de base, contudo aumenta em quantidade. Quartzo preenche interstícios e fraturas formados possivelmente a partir da dissolução de calcita (figura 3.3 D).

De maneira similar ao isalterito micáceo de base, o micáceo de topo é livre de calcita; no entanto, difere daquele pela ausência de feldspato potássico, flogopita e diopsídio, que foram completamente lixiviados no micáceo de topo. Os demais minerais residuais do protolito (apatita, ilmenita, richterita e titanita) mantêm-se preservados. De forma análoga ao observado em BEB/CC, a apatita em ANF BEB/CC perde gradualmente P_2O_5 , SrO e SiO_2 em direção ao micáceo de topo; no entanto, seu conteúdo de Na_2O é sempre elevado, próximo a 3.5%, e não se altera com a evolução do manto de intemperismo (figura 3.6). Adicionalmente, foi observada pela primeira vez rara presença de riebeckita, não identificada nos horizontes anteriores. A figura 3.3 E ilustra um grão de richterita com bordas parcialmente corroídas, indicativas de alteração parcial.

A assembleia de minerais supergênicos cresce em quantidade, mas não em espécies minerais (quartzo, anatásio, goethita, filossilicatos interestratificados vermiculita, monazita e apatita secundária). A forte associação textural entre quartzo e monazita (figura 3.3 F) sugere uma origem supergênica para a monazita, assim como observado também no horizonte micáceo de base.

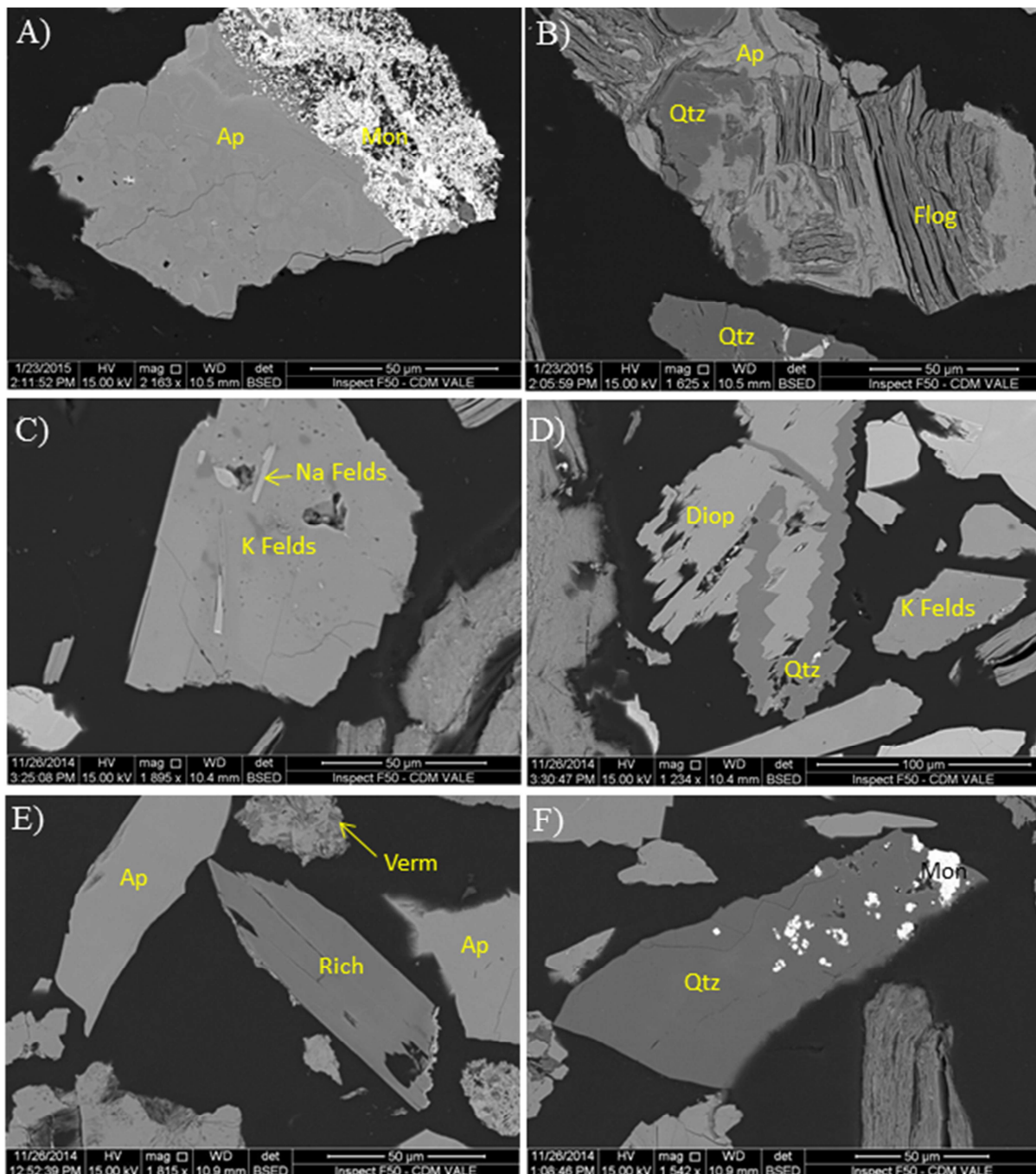


Figura 3.3: Imagens eletrônicas por elétrons retroespalhados dos minerais e suas texturas em amostras de testemunhos de sondagem do macrogrupo de protolito ANF BEB/CC. A) Monazita fina e porosa cortando grão de apatita primária - amostra SR10-034 30 a 43.35 m, rocha alterada; B) Apatita secundária formando cimento entre grãos de quartzo e flogopita - amostra SR10-034 30 a 43.35, rocha alterada; C) Detalhe de um grão de feldspato potássico, com lamelas de feldspato sódico - amostra SR09-038 13.70 a 37.70 m, micáceo de base; D) Quartzo preenchendo interstícios e fraturas formados possivelmente a partir da dissolução de calcita - amostra SR09-038 13.70 a 37.70 m, micáceo de base; E) Grão de richterita com bordas parcialmente corroídas, indicativas de alteração parcial - amostra

SR10-034 14 a 30 m, micáceo de topo; F) Forte associação textural entre quartzo e monazita - amostra SR10-034 14 a 30 m, micáceo de topo. Ap: apatita; Diop: diopsídio; Flog: flogopita; K felds: feldspato potássico; Mon: monazita; Na felds: feldspato sódico; Qtz: quartzo; Rich: richterita; Verm: vermiculita.

3.3.3 Associação Bebedourito / Dolomita Carbonatito (BEB/DC)

A principal característica de BEB/DC no horizonte de rocha alterada é a presença de uma assembleia mais ampla de carbonatos, formada principalmente por dolomita e, subordinadamente, por calcita, ankerita e estroncianita. Os demais minerais residuais do protolito nesse horizonte são apatita, flogopita, tetraferroflogopita, diopsídio, richterita, riebeckita, ilmenita, magnetita, perovskita, anatásio, calzirtita e piritita. A apatita de BEB/DC possui conteúdos de Na₂O e SrO elevados nesse horizonte, em média 3.3 e 3.5%, respectivamente (figuras 3.6 B e 3.6 D).

Richterita e riebeckita possuem caráter acessório e são produtos da alteração metassomática do diopsídio. Parte do anatásio e, possivelmente, estroncianita (figura 3.4 A), são produtos de alteração metassomática da perovskita. De acordo com Pereira et al. (2005), a alteração da perovskita por fluidos magmáticos carbohidrotermais culmina com a cristalização do anatásio, a partir do colapso da estrutura cristalina da perovskita por lixiviação total do Ca. Reequilíbrio termodinâmico em estado subsolidus, alterações metassomáticas e secundárias foram apontadas por Chakhmouradian e Mitchell (2000) como possíveis origens do anatásio. Sr-apatita também é interpretada aqui como mineral metassomático.

Os minerais de alteração supergênica nesse horizonte são: quartzo, serpentina, filossilicatos interestratificados, vermiculita, anatásio, goethita, hematita, hollandita, barita, monazita e gorceixita. Esta variedade de produtos de alteração mostra que mesmo no nível mais profundo do manto de intemperismo alterações intempéricas importantes já ocorrem. Gorceixita (figura 3.4 B) indica que alguma alteração de apatita, ainda que incipiente, ocorre nesse nível, liberando fósforo, que se combina com alumínio proveniente de alteração da flogopita e com o bário possivelmente proveniente da alteração de norsethita, apesar deste último não ter sido identificado neste macrogrupo. Fosfatos secundários aluminosos são, de acordo com Ferrari (2000), indicativos do início da desestabilização da apatita, desde que haja disponibilidade de alumínio. Alteração incipiente da apatita foi observada por MEV, indicada por baixos conteúdos de SrO, Na₂O e SiO₂ em grãos finos e porosos (figura 3.4 B).

O horizonte isalterítico micáceo de base apresenta ausência quase completa de carbonatos, com rara presença de dolomita e calcita, identificáveis somente por microscopia. Os demais minerais residuais do protolito observados na rocha alterada mantêm-se preservados: apatita,

flogopita, tetraferroflogopita, diopsídio, richterita, riebeckita, ilmenita, magnetita, anatásio e calzirtita, com exceção da perovskita, que foi completamente convertida para anatásio, e pirita, cuja alteração disponibilizou enxofre para a precipitação de barita secundária. A apatita perde P_2O_5 , Na_2O , SiO_2 e SrO (figura 3.6). Sr-apatita é observada pela primeira vez no perfil de intemperismo, e sua estreita associação textural com a tetraferroflogopita (figura 3.4 C) é sugestiva de uma origem metassomática, e não intempérica.

A figura 3.4 C mostra uma possível textura cumulus de diopsídio com apatita intercumulus, cortados por um fino veio de calcita, protegida do intemperismo pelos minerais mais resistentes.

A figura 3.4 D mostra substituição de flogopita por tetraferroflogopita nas bordas e planos de clivagem, que representa uma feição textural reliquiar do protolito, formada por reação entre a flogopita e líquidos carbonatíticos, que são pobres em Al (Brod et al., 2001).

A assembleia de minerais supergênicos já observada na rocha alterada mantém-se estável no horizonte micáceo de base (quartzo, filossilicatos interestratificados, vermiculita, anatásio, goethita, hematita, hollandita, barita, monazita e gorceixita), com exceção de serpentina, que não foi observada.

O horizonte isalterítico micáceo de topo é livre de carbonatos; adicionalmente, flogopita, tetraferroflogopita e diopsídio foram também lixiviados, sendo que os primeiros estão transformados para filossilicatos interestratificados, e o diopsídio, completamente dissolvido. Apatita, Sr-apatita, richterita, riebeckita, ilmenita, magnetita, anatásio e calzirtita são os minerais remanescentes do protolito. A apatita nesse horizonte tipicamente possui conteúdos de P_2O_5 , SrO , SiO_2 e Na_2O menores que nos demais (figura 3.6).

Os minerais secundários já observados no horizonte micáceo de base mantêm-se estáveis no micáceo de topo: quartzo, filossilicatos interestratificados, vermiculita, anatásio, goethita, hematita, hollandita, barita, monazita e gorceixita, e aumentam em quantidade. Adicionalmente, apatita secundária surge pela primeira vez no manto de intemperismo, formando cimento entre fraturas de grãos primários (figura 3.4 E). Quartzo ocorre normalmente de forma irregular, intersticial, contudo cristais euédricos também foram observados, cristalizados provavelmente dentro de cavidades na rocha. O anatásio (figura 3.4 F) é produto de alteração da perovskita. Monazita foi observada associada à apatita, em provável substituição pseudomórfica, conforme sugerido também por Neumann (1999) para grãos de monazita do complexo de Catalão.

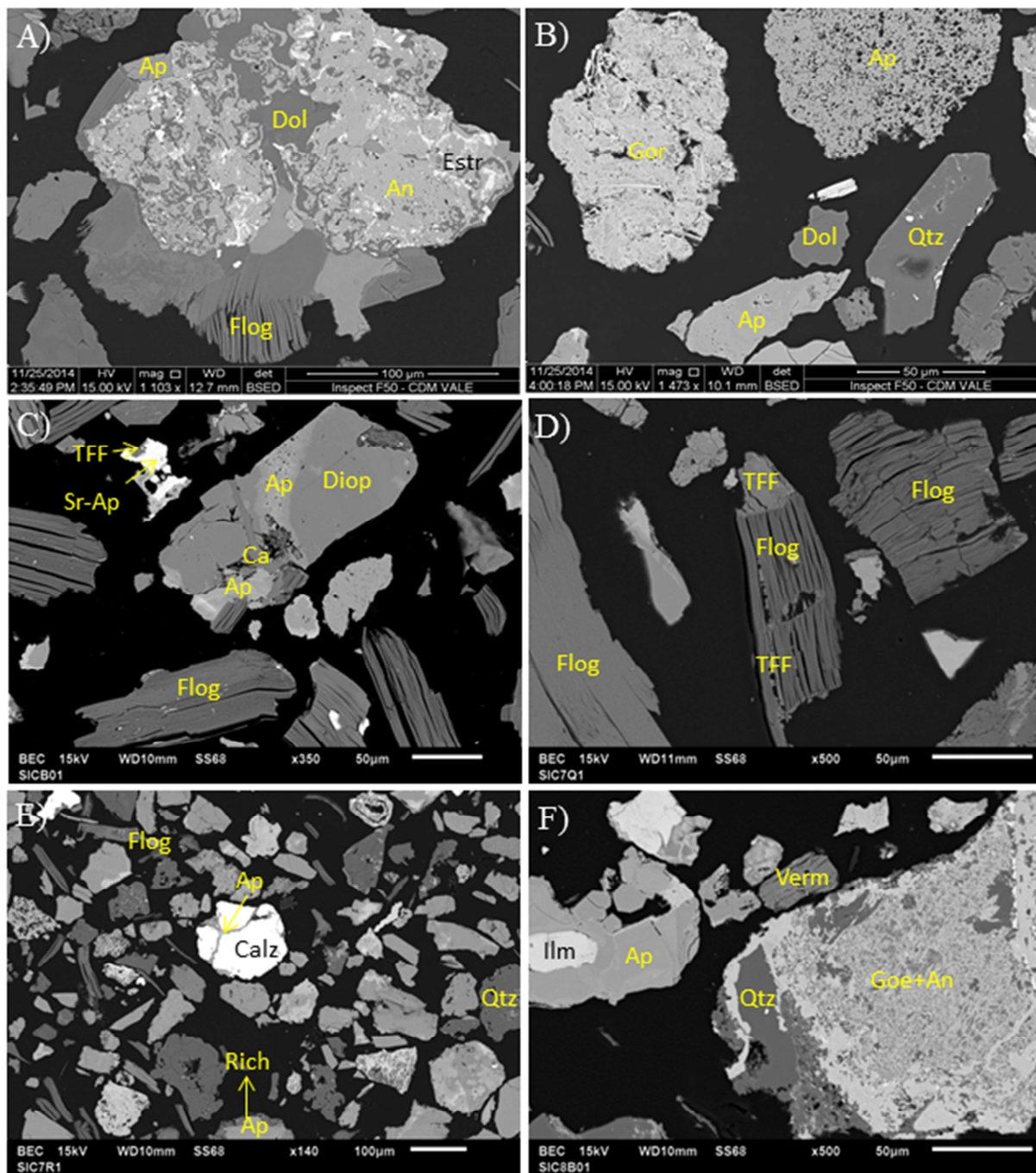


Figura 3.4: Imagens eletrônicas por elétrons retroespalhados dos minerais e suas texturas em amostras de testemunhos de sondagem do macrogrupo de protolito BEB/DC. A) Associação textural entre anatásio e estroncianita - amostra MB59 71.40 a 84.40 m, rocha alterada; B) gorceixita e apatita com textura fina e porosa - amostra MB59 62.5 a 71.40 m, rocha alterada; C) Provável textura cumulus de diopsídio com apatita intercumulus, cortados por um fino veio de calcita, protegida do intemperismo pelos minerais mais resistentes - amostra CP10-0018 31.70 a 43.40 m, micáceo de base; D) Feição textural reliquiar do protolito, gerada por substituição de flogopita por tetraferroflogopita nas bordas e planos de clivagem - amostra MS118 44,50 a 59,50 m, micáceo de base; E) Apatita secundária formando cimento entre fraturas de grãos primários - amostra MS118 29,50 a 44,50 m, micáceo de topo; F) Associação entre anatásio e goethita indicando possível formação de anatásio a partir da alteração metassomática da ilmenita - amostra MS118 29,50 a 44,50 m, micáceo de topo. An: anatásio; Ap: apatita; Ca: calcita; Calz: calzirtita; Diop: diopsídio; Dol: dolomita; Flog: flogopita; Goe: goethita; Gor: gorceixita; Ilm: ilmenita; Qtz: quartzo; Rich: richterita; Sr-Ap: estrôncio apatita; TFF: tetraferroflogopita; Verm: vermiculita.

3.3.4 Associação Foscorito / Dolomita Carbonatito (FCR/DC)

No horizonte de rocha alterada possui carbonatos, essencialmente dolomita e norsethita, com calcita subordinada. Em Araxá, FCR/DC é o único macrogrupo com ocorrência de norsethita. De forma análoga, Cordeiro et al. (2011a) descreveram norsethita em dolomita carbonatitos e nelsonitos de Catalão I. Dolomita euédrica (figuras 3.5 A e 3.5 B) é proveniente do dolomita carbonatito, e não do foscorito, no qual ocorre em caráter intersticial. Os demais minerais residuais do protolito preservados no horizonte rocha alterada são apatita, flogopita, tetraferroflogopita, ilmenita, magnetita, pirocloro, barita e pirita. É notável a diferença de assembleia mineralógica residual do protolito entre este macrogrupo e macrogrupos com associação de bebedouritos, pela ausência de diopsídio, anfibólio e anatásio neste. A apatita nesse macrogrupo possui os menores conteúdos de P_2O_5 , SrO e Na₂O que a dos demais, e ausência de SiO₂, já no horizonte de rocha alterada (figura 3.6).

Os minerais supergênicos identificados na rocha alterada foram quartzo, filossilicatos interestratificados, vermiculita e goethita. Goethita com aspecto poroso é um grão tipicamente gerado pela remobilização do Fe durante o intemperismo (figura 3.5 B) que começa a ocorrer já no horizonte de rocha alterada.

O horizonte micáceo de base é tipicamente pobre em carbonatos, com rara presença de dolomita e calcita identificáveis apenas em microscopia. Tetraferroflogopita e pirita desaparecem nesse horizonte de intemperismo. Os demais minerais residuais do protolito preservados na rocha alterada foram observados também no horizonte micáceo de base: apatita, flogopita, ilmenita, magnetita, pirocloro e barita. Alguns grãos de apatita começam a apresentar feições de incipiente alteração, como o da figura 3.5 C, com variação nos conteúdos de P_2O_5 e SrO.

A assembleia de minerais supergênicos identificada na rocha alterada (quartzo, filossilicatos interestratificados, vermiculita e goethita) mantém-se preservada no horizonte micáceo de base e aumenta em quantidade. Adicionalmente, foram identificadas barita e apatita secundárias pela primeira vez no horizonte de intemperismo desse macrogrupo de protolito. A barita é formada a partir da disponibilização de bário proveniente da dissolução da norsethita, e do enxofre proveniente da alteração da pirita.

Apatita secundária é o único fosfato secundário identificado no manto de intemperismo desenvolvido sobre FCR/DC, devido à indisponibilidade de alumínio, necessário para a formação dos fosfatos secundários aluminosos (Ferrari, 2000). Esta indisponibilidade é devida, por sua vez, aos baixos conteúdos de alumínio da tetraferroflogopita, que é a mica predominante em foscoritos e a única mica presente em dolomita carbonatitos. As figuras 3.5 C e 3.5 D mostram espaços vazios

acentuados no interior dos grãos de filossilicatos interestratificados, por onde o potássio é lixiviado. A apatita secundária foi observada formando um cimento entre grãos (figura 3.5 D).

O horizonte isalterítico micáceo de topo é livre de carbonatos e flogopita. Os principais minerais residuais remanescentes do protolito são apatita, ilmenita, magnetita, pirocloro e barita. A apatita ocorre tanto com um aspecto rugoso (centro inferior da figura 3.5 E) quanto límpido (lado direito da figura 3.5 E) sendo o primeiro um indicativo de alteração supergênica que libera fósforo, reutilizado na precipitação de apatita supergênica.

Os minerais supergênicos já observados no horizonte micáceo de base (quartzo, filossilicatos interestratificados, vermiculita, goethita, apatita e barita) aumentam em quantidade no micáceo de topo (figura 3.5 E). A figura 3.5 F ilustra um grão neoformado de óxidos/hidróxidos de Fe, produto de intemperismo típico e abundante neste horizonte.

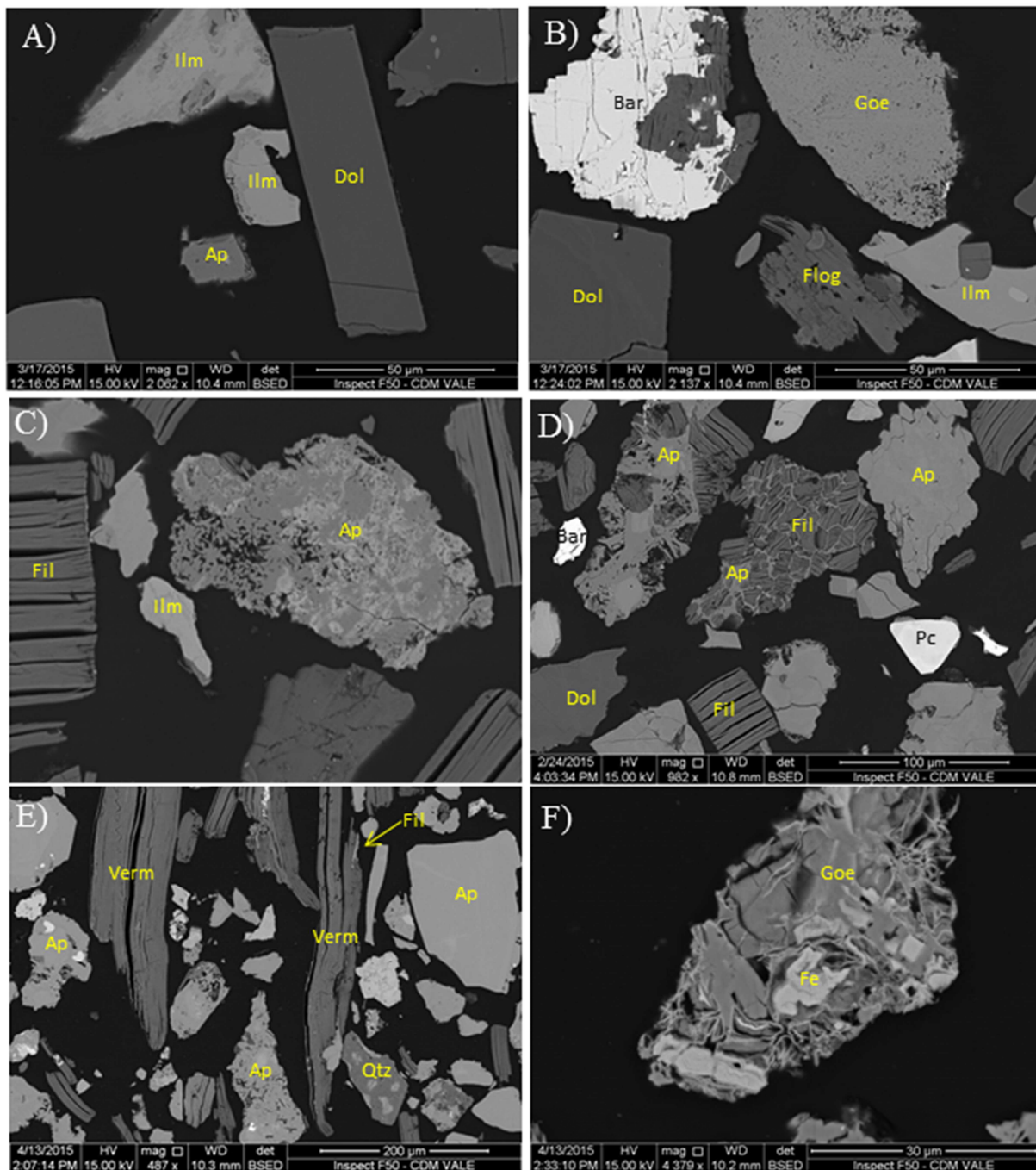


Figura 3.5: Imagens eletrônicas por elétrons retroespalhados dos minerais e suas texturas em amostras de testemunhos de sondagem do macrogrupo de protolito FCR/DC. A) Detalhe de um grão euédrico de dolomita proveniente de dolomita carbonatito - amostra SC04 25.8 a 30.8 m, rocha alterada; B) Grão euédrico de dolomita do lado inferior esquerdo da figura, e goethita com aspecto poroso, acima e à direita, produto típico da remobilização de Fe durante o intemperismo - amostra SC04 25.8 a 30.8 m, rocha alterada; C) Grãos de apatita, cujas porções mais escuras, com carência de estrôncio, evidenciam alteração incipiente da apatita. Lado esquerdo da imagem: espaços vazios acentuados no interior dos grãos de filossilicatos interestratificados - amostra SC04 9.3 a 18 m, micáceo de base; D) Apatita secundária formando um cimento entre grãos no centro da imagem - amostra SC04 9.3 a 18 m, micáceo de base; E) Apatita com um aspecto rugoso, na região central da imagem, indica alteração supergênica que libera fósforo - amostra CMA-BAR-DH0160 40 a 49.55 m, micáceo de topo; F) Grão neoformado de óxidos/hidróxidos de Fe - amostra CMA-BAR-DH0160 40 a 49.55 m, micáceo de topo. An: anatásio; Ap: apatita; Ca: calcita; Calz: calzirtita; Diop: diopsídio; Dol: dolomita; Flog: flogopita; Goe: goethita; Gor: gorceixita; Ilm: ilmenita; Qtz: quartzo; Rich: richterita; Sr-Ap: estrôncio apatita; TFF: tetraferroflogopita; Verm: vermiculita.

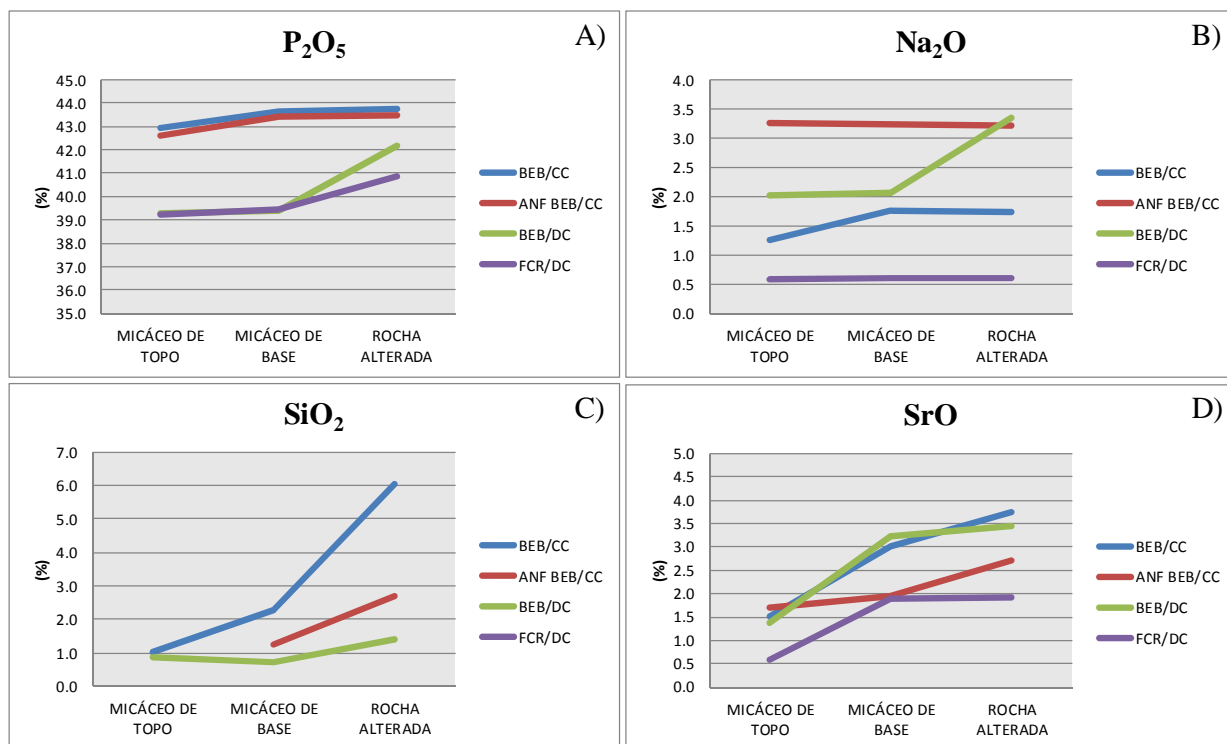


Figura 3.6: Variação nos conteúdos médios de P_2O_5 , Na_2O , SiO_2 e SrO da apatita por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo.

3.4. EVOLUÇÃO GEOQUÍMICA DA BASE DO MANTO DE INTEMPERISMO

A base do manto de intemperismo da mina do Barreiro é mineralogicamente heterogênea porque reflete as características mineralógicas dos protolitos e por evoluir de diversas formas a partir da composição mineralógica de seu protolito. A evolução mineralógica, por sua vez, ocorre por alteração dos minerais menos resistentes ao intemperismo químico, como carbonatos, olivina e sulfetos, seguidos de perovskita, diopsídio e flogopita, enriquecimento residual dos minerais mais resistentes, como apatita e magnetita, e formação de minerais intempéricos, como goethita, hollandita, anatásio, quartzo, vermiculita e fosfatos secundários. A evolução mineralógica da base do manto de intemperismo explica, portanto, as variações geoquímicas observadas desde a rocha alterada até o isalterito micáceo de topo.

As amostras de testemunhos de sondagem utilizadas na análise da evolução geoquímica da base do manto de intemperismo receberam um carimbo numérico, denominado M_I (macrogrupo de protolito_intemperismo), que representa um protolito e um horizonte de intemperismo, de forma sequencial. Por exemplo, amostras BEB/CC no horizonte micáceo de topo possuem M_I=1;

amostras BEB/CC no horizonte micáceo de base possuem $M_I=2$; amostras BEB/CC no horizonte rocha alterada possuem $M_I=3$, e assim consecutivamente, até $M_I=12$. A tabela 3.3 apresenta os resultados das análises químicas das amostras de testemunhos de sondagem, ordenadas por seus respectivos números M_I . A tabela 3.4 apresenta as estatísticas descritivas dos dados apresentados na tabela 3.3, por M_I , e a figura 3.7, os gráficos das variações dos valores médios das principais variáveis analisadas.

Tabela 3.3: Informações geológicas e químicas das amostras de testemunhos de sondagem utilizadas na análise da evolução geoquímica da base do manto de intemperismo, ordenadas por seus respectivos números M_I.

M_I	MACROGRUPO	INTEMPERISMO	AMOSTRA	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	BaO (%)	C (%)	CaO/P ₂ O ₅
1	BEB/CC	MT	CMA-BAR-DH-041 81.30 a 91.15	33.29	5.9	23.27	4.06	8.6	6.04	6.81	0.76	0.1	1.26
1	BEB/CC	MT	CMA-BAR-DH-149 0 a 9	10.86	1.28	24.65	3.43	25.27	3.61	17.86	0.85	0.55	1.41
1	BEB/CC	MT	CP10-0036 6.90 a 21.65	13.48	2.12	28.98	4.57	16.91	7.68	13.16	1.55	0.28	1.28
1	BEB/CC	MT	CP10-0080 12.50 a 25.60	18.12	1.6	27.67	6.64	18.3	4.76	13.38	0.29	0.3	1.37
1	BEB/CC	MT	CP10-0091 25.30 a 38.70	23.15	4.86	25.57	4.54	8.64	8.26	7.34	2.01	0.13	1.18
1	BEB/CC	MT	CP10-0097 31.60 a 43.90	14.23	1.94	28.54	1.82	18.24	5.42	14.8	1.89	0.27	1.23
1	BEB/CC	MT	MB18 14.26 a 24.26	21.89	3.01	24.69	11.37	11.97	3.31	9.42	1.88	0.24	1.27
1	BEB/CC	MT	MB63 68.40 a 83.40	30.78	3.16	22.75	7.39	11.95	6.85	8.41	0.38	0.17	1.42
1	BEB/CC	MT	MB72 35.30 a 50.30	24.95	2.08	26.55	10.89	11.09	7.78	7.37	0.15	0.18	1.50
1	BEB/CC	MT	SR09-054 95.70 a 107.10	44.39	2.75	16.33	4.8	11.1	6	8.49	0.28	0.24	1.31
1	BEB/CC	MT	SR09-055 95.85 a 106.25	39.24	3.12	17.21	2.71	12.67	9.11	8.89	0.81	0.18	1.43
1	BEB/CC	MT	SR09-063 44.00 a 55.40	28.3	2.11	22.97	4.79	14.09	7.29	10.84	1.71	0.21	1.30
2	BEB/CC	MB	CMA-BAR-DH-155 0 a 8.4	11.75	1.26	20.25	3.29	23.67	1.9	16.9	4.65	0.66	1.40
2	BEB/CC	MB	CMA-BAR-DH-156 7.1 a 13.75	19.07	4.3	22.13	8.84	13.43	4.83	9.8	2.87	0.21	1.37
2	BEB/CC	MB	CMA-BAR-DH-156 13.75 a 23.85	24.74	3.09	14.96	8.37	20.07	2.81	14.47	0.88	0.29	1.39
2	BEB/CC	MB	CP09-0069 29.00 a 39.00	23.88	3.6	21.46	8.01	14.15	6.3	10.47	0.42	0.25	1.35
2	BEB/CC	MB	CP10-0042 41.55 a 51.55	22.38	2.41	24.53	14.87	7.51	3.86	5.83	7.12	0.14	1.29
2	BEB/CC	MB	CP10-0042 51.55 a 67.50	8.31	0.99	27.17	5.82	15.8	2.9	11.17	11.11	0.75	1.41
2	BEB/CC	MB	CP10-0091 38.70 a 49.05	25.69	5.38	20.43	8.24	5.68	4.88	5.02	6	0.16	1.13
2	BEB/CC	MB	MB31 95.69 a 111.45	20.23	1.97	22.78	11.06	11.03	4.31	8.08	5.91	0.14	1.37
2	BEB/CC	MB	MS163 6.20 a 16.20	26.4	2.34	29.2	12.11	7.92	7.96	5.44	0.28	0.12	1.46
2	BEB/CC	MB	SR09-078 13.30 a 29.70	25.12	2.98	21.61	6.76	15.76	5.54	11.95	0.3	0.29	1.32
2	BEB/CC	MB	SR10-089 57.10 a 82.40	26.07	3.82	20.76	7.71	12.82	7.52	9.39	0.61	0.19	1.37
2	BEB/CC	MB	SR10-089 82.40 a 95.50	17.65	2.82	23.28	7.01	18.36	4.89	13.68	1.68	0.25	1.34
3	BEB/CC	RA	CMA-BAR-DH-149 9 a 20.85	19.91	2.5	22.55	7.06	16.61	3.22	9.5	2.6	1.51	1.75
3	BEB/CC	RA	CMA-BAR-DH-158 0 a 6.4	18.77	1.96	16.46	9.8	23.7	2.95	8.02	0.24	3.17	2.96
3	BEB/CC	RA	CMA-BAR-DH-158 6.4 a 12.8	17.12	2.14	15.34	14.95	20.6	3.69	4.33	0.13	3.94	4.76
3	BEB/CC	RA	CMA-BAR-DH-158-12.8 a 20.85	16.95	2.17	15.6	12.54	21.64	3.54	5.13	0.49	3.94	4.22
4	ANF BEB/CC	MT	RE07 15.76 a 25.76	17.73	1.9	15.38	3.95	26.24	5.24	18.76	0.29	0.36	1.40
4	ANF BEB/CC	MT	RF08 4.53 a 19.53	24.65	3.36	16.14	4.34	19.02	7.72	13.72	0.24	0.14	1.39
4	ANF BEB/CC	MT	SR09-035 8.50 a 21.05	28.21	3.17	15.21	6.75	18.16	6.22	12.2	0.14	0.21	1.49
4	ANF BEB/CC	MT	SR10-034 14.00 a 30.00	23.99	3.38	16.44	7.17	18.18	4.71	12.91	0.23	0.44	1.41
4	ANF BEB/CC	MT	SR10-089 24.55 a 46.30	31.26	3.93	21.69	4.27	10.27	11.66	7.25	0.53	0.14	1.42
5	ANF BEB/CC	MB	RD04 33.25 a 53.23	57.27	4.1	11.14	4.2	7.26	2.3	5.14	0.27	0.22	1.41
5	ANF BEB/CC	MB	RD07 29.33 a 39.33	25.43	2.66	16.97	5.55	17.28	4.63	12.75	0.29	0.46	1.36
5	ANF BEB/CC	MB	RD07 39.33 a 43.33	30.37	3.92	22.01	8.92	8.52	6.23	6.21	0.32	0.27	1.37
5	ANF BEB/CC	MB	RD07 49.33 a 64.33	32.45	4.37	19.85	13.1	7.1	5.59	4.85	0.22	0.18	1.46
5	ANF BEB/CC	MB	RE07 25.76 a 40.76	23.1	1.37	12.66	6.07	24.59	3.05	16.68	0.24	0.49	1.47
5	ANF BEB/CC	MB	RE08 6.68 a 21.68	18.88	3.62	17.96	5.3	21.01	4.57	16.07	0.26	0.34	1.31
5	ANF BEB/CC	MB	RF09 11.53 a 41.53	35.72	2.95	14.53	8.6	12.96	6.16	7.73	0.24	0.19	1.68
5	ANF BEB/CC	MB	SR09-026 34.00 a 46.10	53.91	2.31	8.46	9.47	10.89	1.23	6.94	0.15	0.28	1.57
5	ANF BEB/CC	MB	SR09-031 33.00 a 48.20	32.04	6.13	23.22	4.92	9.05	6.24	6.41	0.5	0.12	1.41
5	ANF BEB/CC	MB	SR09-038 13.70 a 37.70	31.56	3.35	15.53	7.83	15.7	5.91	10.83	0.29	0.34	1.45
5	ANF BEB/CC	MB	SR09-039 47.15 a 58.75	51.15	2.3	16.12	7.16	7.92	6.34	5.47	0.2	0.18	1.45
5	ANF BEB/CC	MB	SR10-030 34.00 a 53.10	32.78	2.58	12.37	6.51	19.52	2.95	13.87	0.27	0.42	1.41
5	ANF BEB/CC	MB	SR10-040 26.00 a 48.70	41.96	3.48	16.53	7.82	9.1	5.1	6.74	0.23	0.18	1.35
6	ANF BEB/CC	RA	RF08 19.53 a 29.53	33.95	4.57	13.58	10.2	13.73	4.07	8.17	0.18	0.19	1.68
6	ANF BEB/CC	RA	SR09-035 21.05 a 41.20	35.76	1.11	11.28	8.66	22.15	5.27	11.05	0.09	0.2	2.00
6	ANF BEB/CC	RA	SR10-034 30.00 a 43.35	31.12	3.13	15.61	10.69	16.19	3.91	9.32	0.17	0.16	1.74
7	BEB/DC	MT	CP09-0023 6.50 a 10.50	22.01	2.76	15.31	9.29	23.03	3.27	15.59	0.15	0.4	1.48
7	BEB/DC	MT	CP09-0077 8.70 a 26.20	21.06	3.42	22.69	7.16	20.36	4.4	16.02	0.6	0.25	1.27
7	BEB/DC	MT	CP10-0004 38.06 a 49.50	30.92	2.31	19.65	11.75	10.75	3.8	7.27	0.27	0.21	1.48
7	BEB/DC	MT	CP10-0019 10.45 a 15.65	32.66	1.68	24.58	3.69	15.44	2.17	12.06	0.31	0.24	1.28
7	BEB/DC	MT	CP10-0032 39.55 a 50.20	9.12	1.96	23.41	5.41	29.61	1.67	22.22	0.11	0.31	1.33
7	BEB/DC	MT	MS118 29.5 a 37	21.34	2.5	32.16	5.37	17.3	3.63	13.01	0.21	0.21	1.33
7	BEB/DC	MT	MS119 34.80 a 40.90	21.26	2.52	23.84	5.15	20.46	4.19	15.03	0.25	0.26	1.36
7	BEB/DC	MT	MS133 41.50 a 51.50	21.29	2.8	21.19	5.74	19.61	3.86	14.08	0.59	0.28	1.39
7	BEB/DC	MT	MS135 36.55 a 50.20	30.57	3.36	17.29	10.71	15.6	4.19	7.62	0.15	0.18	2.05
7	BEB/DC	MT	MS136 47.85 a 54.30	18.98	2.68	18.53	4.15	25.27	4.31	18.21	0.2	0.26	1.39
7	BEB/DC	MT	MS147 82.80 a 92.80	26.75	2.97	20.69	8.13	16.34	4.2	11.23	0.27	0.24	1.46
7	BEB/DC	MT	MS88 34.00 a 45.90	15.45	5.04	39.22	4.05	6.7	7	5.81	0.79	0.08	1.15
7	BEB/DC	MT	SC38 0.00 a 13.08	24.91	2.4	23.49	10.82	9.52	4.07	6.52	4.27	0.32	1.46
7	BEB/DC	MT	SR09-058 47.40 a 69.00	17.52	3.46	20.19	6.67	19.92	3.76	14.4	0.25	0.23	1.38
7	BEB/DC	MT	SR09-071 70.45 a 87.25	22.83	3.31	24.13	4.88	16.12	4.76	12.95	0.54	0.32	1.24
7	BEB/DC	MT	SR10-087 9.45 a 26.30	18.95	2.66	21.88	6.83	22.09	3.86	14.92	0.2	0.27	1.48

Tabela 3.3: Continuação.

M_I	MACROGRUPO	INTEMPERISMO	AMOSTRA	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	BaO (%)	C (%)	CaO/P ₂ O ₅
8	BEB/DC	MB	AB78 68.86 a 83.86	39.99	3.02	17.38	12.73	7.46	3.72	5.41	0.2	0.17	1.38
8	BEB/DC	MB	BC89 107.20 a 117.20	23.3	3.18	17.73	6.11	15.72	4.59	13.22	1.82	0.59	1.19
8	BEB/DC	MB	CP09-0014 15.95 a 29.10	22.52	3.22	16.76	8.2	21.64	4.29	14.98	0.15	0.34	1.44
8	BEB/DC	MB	CP10-0001 42.70 a 55.65	28.23	2.95	27.45	9.72	9.21	4.39	6.61	0.27	0.31	1.39
8	BEB/DC	MB	CP10-0002 40.20 a 49.00	32.8	2.92	23.57	9.58	5.79	5.91	4.7	1.75	0.22	1.23
8	BEB/DC	MB	CP10-0002 49.00 a 60.10	37.93	3.78	24.1	5.34	6.83	5.2	5.44	0.53	0.19	1.26
8	BEB/DC	MB	CP10-0003 47.00 a 62.00	24.91	3.8	18.85	5.4	17.07	4.22	13.18	0.97	0.4	1.30
8	BEB/DC	MB	CP10-0004 27.95 a 38.06	23.93	2.48	19.7	8.04	20.74	4.49	14.98	0.26	0.37	1.38
8	BEB/DC	MB	CP10-0005 22.00 a 38.10	30.58	2.95	24.74	9.2	10.32	4.12	7.58	0.27	0.23	1.36
8	BEB/DC	MB	CP10-0016 37.65 a 44.25	21.46	2.28	31.6	8.26	12.28	3.1	8.6	1.13	0.64	1.43
8	BEB/DC	MB	CP10-0017 30.10 a 44.30	22.3	2.1	16.12	6.86	23.2	2.95	15.89	0.23	0.32	1.46
8	BEB/DC	MB	CP10- 0018 16.05 a 31.70	35.24	3.16	17.27	12.46	11.16	4.1	7.39	0.28	0.32	1.51
8	BEB/DC	MB	CP10-0022 38.60 a 49.00	30.16	4.23	22.47	15.15	8.67	3.71	5.23	0.43	0.58	1.66
8	BEB/DC	MB	CP10-0032 50.20 a 65.55	9.9	2.5	42.37	8.07	16.75	1.32	11.73	0.11	0.44	1.43
8	BEB/DC	MB	MB28 52.02 a 68.67	31.31	3.26	17.96	11.19	13.57	3.39	6.72	0.33	0.55	2.02
8	BEB/DC	MB	MB55 70.40 a 80.40	32.15	3.24	20.75	12.09	11.07	4.73	4.88	0.2	0.2	2.27
8	BEB/DC	MB	MS118 44.50 a 59.50	27.86	2.79	25.58	11.55	10.88	5.96	6.96	0.21	0.19	1.56
8	BEB/DC	MB	MS140 55.10 a 70.10	37.86	3.4	20.33	13.67	6.16	3.37	4.34	0.24	0.32	1.42
8	BEB/DC	MB	MS144 49.60 a 59.60	18.98	1.71	19.5	8.37	22.79	2.19	15.91	0.14	0.42	1.43
8	BEB/DC	MB	MS148 53.50 a 63.50	29.9	2.6	20.33	13.26	12.11	3.38	7.34	0.46	0.43	1.65
8	BEB/DC	MB	MS81 34.60 a 48.20	27.88	3.05	25	10.11	13.17	4.79	8.05	0.46	0.17	1.64
8	BEB/DC	MB	SC27 14.23 a 23.23	25.08	2.74	20.57	11.3	14.8	3.44	9.01	1.26	0.51	1.64
8	BEB/DC	MB	SC34 14.90 a 32.90	19.21	1.56	22.4	9.15	18.93	1.96	13.29	2.47	0.34	1.42
8	BEB/DC	MB	SC41 0.00 a 9.89	20.72	3.6	18.92	7.96	18.16	3.47	12.85	2.53	0.34	1.41
8	BEB/DC	MB	SC44 0.00 a 15.60	26.28	2.51	18.05	12.21	12.08	3.78	7.89	3.03	0.31	1.53
8	BEB/DC	MB	SR09-021 61.00 a 71.00	18.58	1.44	24.38	5.56	21.13	1.49	15.12	1.45	0.64	1.40
8	BEB/DC	MB	SR09-059 81.70 a 91.50	26.72	3.04	24.66	5.21	14.32	4.16	11.88	1	0.41	1.21
8	BEB/DC	MB	SR09-071 87.25 a 99.80	28	3.78	21.66	10.75	11.8	4.48	8.79	0.96	0.28	1.34
9	BEB/DC	RA	CMA-BAR-DH-159 14 a 23.2	24.18	3.03	16.3	16.22	14.46	3.58	5.58	0.3	1.8	2.59
9	BEB/DC	RA	CMA-BAR-DH-159 5.2 a 14	21.52	2.08	22.82	15.18	14	3.62	5.96	0.36	1.73	2.35
9	BEB/DC	RA	CP09-0023 16.90 a 27.30	27.62	2.42	26.39	12.85	11.32	3.11	5.28	0.32	1.15	2.14
9	BEB/DC	RA	CP10-0002 60.10 a 75.20	22.52	2.16	14.35	12.04	16.48	4.02	6.77	1.4	2.65	2.43
9	BEB/DC	RA	CP10-0007 44.50 a 57.40	17.53	1.63	39.37	8.99	8.95	2.51	4.94	2.84	1.3	1.81
9	BEB/DC	RA	CP10-0007 57.4 a 65.95	17.5	1.87	19.31	12.69	16.35	2.77	7.84	1.68	3.19	2.09
9	BEB/DC	RA	CP10-0014 30.80 a 50.75	24.76	2.38	20.18	11.11	16.26	2.96	7.92	0.56	1.68	2.05
9	BEB/DC	RA	CP10-0020 19.40 a 25.75	31.7	1.95	18.7	11.2	12.58	2.79	4.73	0.2	2.16	2.66
9	BEB/DC	RA	CP10-0027 24.90 a 30.20	25.83	2.13	20.5	10.74	14.67	3.14	9.66	0.28	0.97	1.52
9	BEB/DC	RA	MB36 78.20 a 92.02	21.47	2.51	18.95	12.23	14.93	2.82	6.26	1.16	2.45	2.38
9	BEB/DC	RA	MB59 62.50 a 71.40	15.31	1.65	15.81	6.61	28.29	2.54	18.45	0.21	1.23	1.53
9	BEB/DC	RA	MB59 71.40 a 84.40	11.35	1.43	9.41	10.4	26.51	1.76	6.73	0.7	6.63	3.94
9	BEB/DC	RA	MB60 51.15 a 71.15	20.79	2.6	15.77	10.41	21.62	2.01	10.29	0.25	1.92	2.10
9	BEB/DC	RA	MB60 71.15 a 86.15	18.78	1.83	30.1	11.65	12.69	2.83	4.97	0.25	2.68	2.55
9	BEB/DC	RA	SC34 32.90 a 46.90	13.97	1.4	14.83	8.66	22.94	1.36	14.32	5.89	1.54	1.60
9	BEB/DC	RA	SC35 13.80 a 28.80	15.25	1.15	12.66	8	24.06	0.9	16.75	5.16	0.83	1.44
9	BEB/DC	RA	SC39 3.89 a 11.89	28.11	2.46	17.17	11.95	14.92	4.08	7.5	1.24	1.13	1.99
9	BEB/DC	RA	SR09-020 50.00 a 55.00	29.68	2.42	17.01	11.91	14.61	3.8	9.15	0.24	1.23	1.60
9	BEB/DC	RA	SR09-021 71.00 a 81.00	19.1	1.34	12.65	8.33	24.11	1.62	12.94	1.8	2.37	1.86
10	FCR/DC	MT	CMA-BAR-DH-160 11.05 a 20.00	18.99	3.96	18.51	10.62	18.02	3.23	12.66	0.26	0.39	1.42
10	FCR/DC	MT	CMA-BAR-DH-160 20.00 a 29.00	12.26	3.24	18.73	7.35	24.38	3.59	18.2	0.3	0.41	1.34
10	FCR/DC	MT	CMA-BAR-DH-160 29.00 a 40.00	11.4	3.07	19.93	6.57	24.61	4.13	18.25	0.29	0.42	1.35
10	FCR/DC	MT	CMA-BAR-DH-160 40.00 a 49.55	13.91	3.27	20.63	7.27	21.12	5.18	15.4	0.34	0.33	1.37
10	FCR/DC	MT	MS21 1.05 a 15.00	8.31	0.89	32.28	5.73	14.07	3.4	10.86	7.24	0.21	1.30
10	FCR/DC	MT	SR09-016 31.00 a 41.00	7.32	2.71	24.62	3.35	27.06	3.82	21.93	0.79	0.41	1.23
11	FCR/DC	MB	SC02 4.22 a 13.22	9.2	0.92	38.43	6.16	16.46	1.83	12.35	4.43	0.19	1.33
11	FCR/DC	MB	SC04 9.30 a 18.20	16.73	1.82	23.17	11.38	14.32	4.12	10.93	3.59	0.38	1.31
11	FCR/DC	MB	SR09-016 41.01 a 51.00	12.56	3.35	26.18	6.07	20.81	4.28	16.9	0.63	0.37	1.23
12	FCR/DC	RA	CMA-BAR-DH-151 15 a 21	25.68	4.61	12.76	14.86	14.15	4.66	4.68	1.04	1.75	3.02
12	FCR/DC	RA	CMA-BAR-DH-151 21 a 30	20.64	3.95	13.59	12.28	17.71	4.41	6.66	1.31	2.28	2.66
12	FCR/DC	RA	SC01 10.38 a 25.38	13.87	1.56	29.88	11.87	9.41	2.3	5.92	6.11	2.57	1.59
12	FCR/DC	RA	SC01 27.38 a 35.38	10.64	1.28	32.66	9.25	14.82	0.86	9.57	3.34	2.37	1.55
12	FCR/DC	RA	SC01 39.38 a 47.38	13.13	1.27	34.91	11.22	11.3	2.15	6.1	2.12	3.13	1.85
12	FCR/DC	RA	SC01 48.38 a 54.38	20.56	1.74	26.38	13.8	10.87	1.92	6.69	1.13	2.13	1.62
12	FCR/DC	RA	SC04 25.80 a 30.80	7.24	0.64	15.9	13.12	25.2	1.39	5.85	1.21	7.14	4.31
12	FCR/DC	RA	SC04 30.80 a 35.90	6.46	0.59	12.73	14.1	24.88	1.41	6.52	0.89	7.72	3.82

O SiO₂ decresce da rocha alterada ao horizonte micáceo de topo devido à alteração dos silicatos, principalmente flogopita, filossilicatos interestratificados e diopsídio, como pode ser observado em ANF BEB/CC e FCR/DC (figura 3.7 A). No entanto, BEB/CC nitidamente apresenta um comportamento contrário, devido à presença de quartzo secundário, observado em todos os

horizontes intempéricos, mas com maior quantidade no horizonte micáceo de topo. BEB/DC não apresenta uma tendência aparente, possivelmente porque a formação de quartzo secundário dificulta observar o reflexo da alteração dos silicatos primários com a evolução do manto de intemperismo. ANF BEB/CC possui teores de SiO_2 sempre mais elevados que os demais macrogrupos, corroborando com seu caráter magmático mais evoluído. FCR/DC, por outro lado, é o macrogrupo com teores de SiO_2 sempre menores que os macrogrupos com associação de bebedouritos.

O conteúdo de Al_2O_3 também cresce com a evolução do manto de intemperismo (figura 3.7 B), refletindo principalmente o enriquecimento em vermiculita e, subordinadamente, de fosfatos aluminosos de origem intempérica.

O Fe_2O_3 enriquece de forma gradual a partir da rocha alterada em direção ao micáceo de topo (figura 3.7 C) e é reflexo do aumento de óxidos/hidróxidos de Fe supergênicos, principalmente goethita, que provêm da alteração de flogopita, carbonatos e sulfetos, e também do enriquecimento residual da magnetita. O comportamento anômalo observado no horizonte micáceo de base em FCR/DC é devido à quantidade muito elevada de magnetita em uma amostra, com consequente aumento de seu conteúdo de Fe_2O_3 (38.43%, tabela 3.3), que elevou, por sua vez, a média desse óxido no grupo.

A diminuição do conteúdo de MgO ocorre de forma gradativa da rocha alterada até o horizonte micáceo de topo, em todos os macrogrupos (figura 3.7 D), em decorrência da alteração de dolomita, da alteração gradativa da flogopita para filossilicatos interestratificados e vermiculita, e da alteração do diopsídio. A diminuição do MgO é mais acentuada em FCR/DC devido à maior quantidade de dolomita presente nesse macrogrupo na rocha alterada, comparativamente aos demais.

O CaO apresenta um comportamento peculiar (figura 3.7 E): observa-se uma queda da rocha alterada ao micáceo de base em decorrência da alteração dos carbonatos; por outro lado, volta a subir em direção ao micáceo de topo, refletindo o enriquecimento supergênico da apatita. Apenas FCR/DC apresenta um crescimento gradativo de CaO com a evolução do intemperismo, possivelmente devido à dolomita ser o principal carbonato neste macrogrupo, não refletindo a perda do Ca da rocha alterada ao micáceo de base, que está compensada pelo aumento do Ca devido ao enriquecimento relativo de apatita.

O padrão da evolução do TiO_2 é ascendente da rocha alterada ao micáceo de topo (figura 3.7 F) e reflete o enriquecimento supergênico do anatásio e da ilmenita no manto de intemperismo. Adicionalmente, o titânio apresenta uma afinidade geoquímica com bebedouritos (Brod, 1999; Barbosa et al., 2012a), o que também condiciona a distribuição do TiO_2 : o maior valor médio foi encontrado em ANF BEB/CC, 7.11% no micáceo de topo; por outro lado, FCR/DC possui os

menores valores médios (2.39% na rocha alterada a 3.89% no micáceo de topo), apenas sob a forma de ilmenita.

O enriquecimento do P_2O_5 (figura 3.7 G) reflete o enriquecimento supergênico da apatita e a lixiviação dos elementos formadores dos minerais contaminantes. O maior enriquecimento ocorre em FCR/DC no horizonte micáceo de topo, cujo conteúdo de P_2O_5 passa de 6.29% na rocha alterada para 16.22% no micáceo de topo; esse enriquecimento está diretamente relacionado ao conteúdo de carbonatos no protolito, o maior dentre todos os macrogrupos. BEB/DC, por outro lado, apresenta conteúdo de P_2O_5 na rocha alterada maior (8.20%) que o de FCR/DC; no entanto, o fator de enriquecimento até o micáceo de topo é menor, alcançando 12.93%. Esse fato demonstra que FCR/DC são melhores protominérios, e que a qualidade de protominério está associada à quantidade de apatita e carbonatos na rocha, e não apenas à de apatita. Um exemplo de protominério rico em carbonatos gerador de minério de alto teor de P_2O_5 é o carbonatito dolomítico de Juquiá (SP), cuja jazida de fosfato residual apresenta teores médios de 16% de P_2O_5 (Alcover Neto e Toledo, 1993).

A queda do C da rocha alterada para o isalterito micáceo de base (figura 3.7 H) para valores inferiores a 0.5% foi observada em todos os macrogrupos, como consequência da dissolução dos carbonatos em larga escala que ocorre na passagem entre estes horizontes. Pode-se afirmar, então, que a dissolução dos carbonatos é quase completa nos horizontes micáceos, sendo que teores próximos a 0.5% não são detectáveis por testes expeditos de campo. A variação de C entre os horizontes micáceo de base e o micáceo de topo é pouco relevante, indicando a quantidade remanescente pouco expressiva de carbonatos no horizonte micáceo de base. Por exemplo, o conteúdo de C em BEB/DC passa de 1.78% na rocha alterada para 0.37% no micáceo de base e 0.27% no micáceo de topo. Essa é a principal característica que distingue a rocha alterada do horizonte isalterítico, sendo que a dissolução de carbonatos leva ao enriquecimento supergênico da apatita nos produtos intempéricos a partir do isalterito micáceo de base. Apenas ANF BEB/CC não apresenta esse padrão característico de dissolução de carbonatos, tendo valores muito baixos de C desde o horizonte rocha alterada, porque a quantidade de carbonatos no protolito é pouco expressiva, e os diques de calcita carbonatitos ocorrem de forma subordinada na região de ocorrência desse macrogrupo de protolito. A identificação de ANF/BEB no horizonte de rocha alterada requer, portanto, uma atenção especial aos demais aspectos relacionados a esse horizonte além da presença de carbonatos: consistência do material, preservação das estruturas primárias e proximidade com a rocha fresca.

A relação CaO/P_2O_5 (tabela 3.3) tende a ser mais elevada nas amostras de rocha alterada e diminuir em direção aos horizontes micáceos, devido à dissolução dos carbonatos. Esse

comportamento, amplamente observado em Catalão I (Ribeiro, 2008) e utilizado por aquele autor na distinção de minérios de rocha alterada e micáceos, nem sempre é observado nos macrogrupos de protolitos associados a bebedouritos de Araxá, devido ao elevado conteúdo de outros minerais portadores de CaO, principalmente o diopsídio, no horizonte micáceo de base. Por outro lado, as variações de $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ observadas no macrogrupo FCR/DC são mais uniformes, similares às observadas em Catalão, porque FCR/DC não possui quantidades relevantes de outros minerais portadores de CaO além de apatita e carbonatos.

Tabela 3.4: Estatísticas descritivas dos principais óxidos analisados por ICP-AES e C, por infravermelho, em amostras de testemunhos de sondagem por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo. M_I: macrogrupo de protolito_intemperismo. N: número de amostras.

BEB/CC																					
MICÁCEO DE TOPO (M_I=1)								MICÁCEO DE BASE (M_I=2)						ROCHA ALTERADA (M_I=3)							
Variável (%)	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
SiO ₂	12	25.22	24.05	10.86	44.39	16.18	32.04	12	20.94	23.13	8.31	26.40	18.36	25.41	4	18.19	17.95	16.95	19.91	17.04	19.34
Al ₂ O ₃	12	2.83	2.44	1.28	5.90	2.01	3.14	12	2.91	2.90	0.99	5.38	2.16	3.71	4	2.19	2.16	1.96	2.50	2.05	2.34
Fe ₂ O ₃	11	24.80	24.69	17.21	28.98	22.97	27.67	10	22.44	21.87	20.25	27.17	20.76	23.28	4	17.49	16.03	15.34	22.55	15.47	19.51
MgO	12	5.58	4.68	1.82	11.37	3.75	7.02	11	7.93	8.01	3.29	12.11	6.76	8.84	4	11.09	11.17	7.06	14.95	8.43	13.75
CaO	12	14.07	12.32	8.60	25.27	11.10	17.58	12	13.85	13.79	5.68	23.67	9.48	17.08	4	20.64	21.12	16.61	23.70	18.61	22.67
TiO ₂	12	6.34	6.45	3.31	9.11	5.09	7.73	12	4.81	4.86	1.90	7.96	3.38	5.92	4	3.35	3.38	2.95	3.69	3.09	3.62
P ₂ O ₅	12	10.56	9.16	6.81	17.86	7.89	13.27	12	10.18	10.14	5.02	16.90	6.96	12.82	4	6.75	6.58	4.33	9.50	4.73	8.76
BaO	12	1.05	0.83	0.15	2.01	0.34	1.80	12	3.49	2.28	0.28	11.11	0.52	5.96	4	0.87	0.37	0.13	2.60	0.19	1.55
C	11	0.21	0.21	0.10	0.30	0.17	0.27	12	0.29	0.23	0.12	0.75	0.15	0.29	4	3.14	3.56	1.51	3.94	2.34	3.94
ANF BEB/CC																					
MICÁCEO DE TOPO (M_I=4)								MICÁCEO DE BASE (M_I=5)						ROCHA ALTERADA (M_I=6)							
Variável (%)	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
SiO ₂	5	25.17	24.65	17.73	31.26	23.99	28.21	13	35.89	32.45	18.88	57.27	30.37	41.96	3	33.61	33.95	31.12	35.76	31.12	35.76
Al ₂ O ₃	3	3.30	3.36	3.17	3.38	3.17	3.38	12	3.08	3.15	1.37	4.37	2.45	3.77	3	2.94	3.13	1.11	4.57	1.11	4.57
Fe ₂ O ₃	5	16.97	16.14	15.21	21.69	15.38	16.44	13	15.95	16.12	8.46	23.22	12.66	17.96	3	13.49	13.58	11.28	15.61	11.28	15.61
MgO	5	5.30	4.34	3.95	7.17	4.27	6.75	13	7.34	7.16	4.20	13.10	5.55	8.60	3	9.85	10.20	8.66	10.69	8.66	10.69
CaO	3	18.45	18.18	18.16	19.02	18.16	19.02	13	13.15	10.89	7.10	24.59	8.52	17.28	3	17.36	16.19	13.73	22.15	13.73	22.15
TiO ₂	5	7.11	6.22	4.71	11.66	5.24	7.72	13	4.64	5.10	1.23	6.34	3.05	6.16	3	4.42	4.07	3.91	5.27	3.91	5.27
P ₂ O ₅	3	12.94	12.91	12.20	13.72	12.20	13.72	13	9.21	6.94	4.85	16.68	6.21	12.75	3	9.51	9.32	8.17	11.05	8.17	11.05
BaO	5	0.29	0.24	0.14	0.53	0.23	0.29	12	0.25	0.25	0.15	0.32	0.23	0.28	3	0.15	0.17	0.09	0.18	0.09	0.18
C	5	0.26	0.21	0.14	0.44	0.14	0.36	13	0.28	0.27	0.12	0.49	0.18	0.34	3	0.18	0.19	0.16	0.20	0.16	0.20
BEB/DC																					
MICÁCEO DE TOPO (M_I=7)								MICÁCEO DE BASE (M_I=8)						ROCHA ALTERADA (M_I=9)							
Variável (%)	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
SiO ₂	16	22.23	21.32	9.12	32.66	18.97	25.83	28	26.92	27.29	9.90	39.99	22.41	30.95	19	21.42	21.47	11.35	31.70	17.50	25.83
Al ₂ O ₃	16	2.86	2.72	1.68	5.04	2.45	3.34	28	2.90	2.99	1.44	4.23	2.51	3.25	19	2.02	2.08	1.15	3.03	1.63	2.42
Fe ₂ O ₃	16	23.02	22.29	15.31	39.22	19.92	23.99	27	21.40	20.57	16.12	31.60	18.05	24.38	17	17.22	17.01	9.41	26.39	14.83	19.31
MgO	16	6.86	6.21	3.69	11.75	5.02	8.71	28	9.55	9.39	5.21	15.15	8.00	11.82	19	11.11	11.20	6.61	16.22	8.99	12.23
CaO	16	18.01	18.46	6.70	29.61	15.52	21.28	28	13.85	12.73	5.79	23.20	10.60	17.62	19	17.36	14.93	8.95	28.29	14.00	22.94
TiO ₂	13	4.02	4.07	3.27	4.76	3.80	4.20	26	4.00	4.11	1.96	5.96	3.39	4.49	19	2.75	2.82	0.90	4.08	2.01	3.58
P ₂ O ₅	16	12.93	13.55	5.81	22.22	9.43	15.31	28	9.57	8.33	4.34	15.91	6.67	13.20	18	8.20	7.14	4.73	16.75	5.58	9.66
BaO	16	0.57	0.26	0.11	4.27	0.20	0.57	28	0.83	0.45	0.11	3.03	0.24	1.20	17	0.81	0.36	0.20	2.84	0.25	1.24
C	15	0.27	0.26	0.18	0.40	0.23	0.31	28	0.37	0.34	0.17	0.64	0.26	0.44	18	1.78	1.71	0.83	3.19	1.23	2.37
FCR/DC																					
MICÁCEO DE TOPO (M_I=10)								MICÁCEO DE BASE (M_I=11)						ROCHA ALTERADA (M_I=12)							
Variável (%)	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
SiO ₂	6	12.03	11.83	7.32	18.99	8.31	13.91	3	12.83	12.56	9.20	16.73	9.20	16.73	8	14.78	13.50	6.46	25.68	8.94	20.60
Al ₂ O ₃	5	3.25	3.24	2.71	3.96	3.07	3.27	3	2.03	1.82	0.92	3.35	0.92	3.35	8	1.96	1.42	0.59	4.61	0.96	2.85
Fe ₂ O ₃	6	22.45	20.28	18.51	32.28	18.73	24.62	3	29.26	26.18	23.17	38.43	23.17	38.43	8	22.35	21.14	12.73	34.91	13.18	31.27
MgO	5	6.05	6.57	3.35	7.35	5.73	7.27	3	7.87	6.16	6.07	11.38	6.07	11.38	8	12.56	12.70	9.25	14.86	11.55	13.95
CaO	6	21.54	22.75	14.07	27.06	18.02	24.61	3	17.20	16.46	14.32	20.81	14.32	20.81	8	16.04	14.49	9.41	25.20	11.09	21.30
TiO ₂	6	3.89	3.71	3.23	5.18	3.40	4.13	3	3.41	4.12	1.83	4.28	1.83	4.28	8	2.39	2.04	0.86	4.66	1.40	3.36
P ₂ O ₅	6	16.22	16.80	10.86	21.93	12.66	18.25	3	13.39	12.35	10.93	16.90	10.93	16.90	6	6.29	6.31	5.85	6.69	5.92	6.66
BaO	6	1.54	0.32	0.26	7.24	0.29	0.79	3	2.88	3.59	0.63	4.43	0.63	4.43	7	1.58	1.21	0.89	3.34	1.04	2.12
C	6	0.36	0.40	0.21	0.42	0.33	0.41	3	0.31	0.37	0.19	0.38	0.19	0.38	8	3.64	2.47	1.75	7.72	2.21	5.14

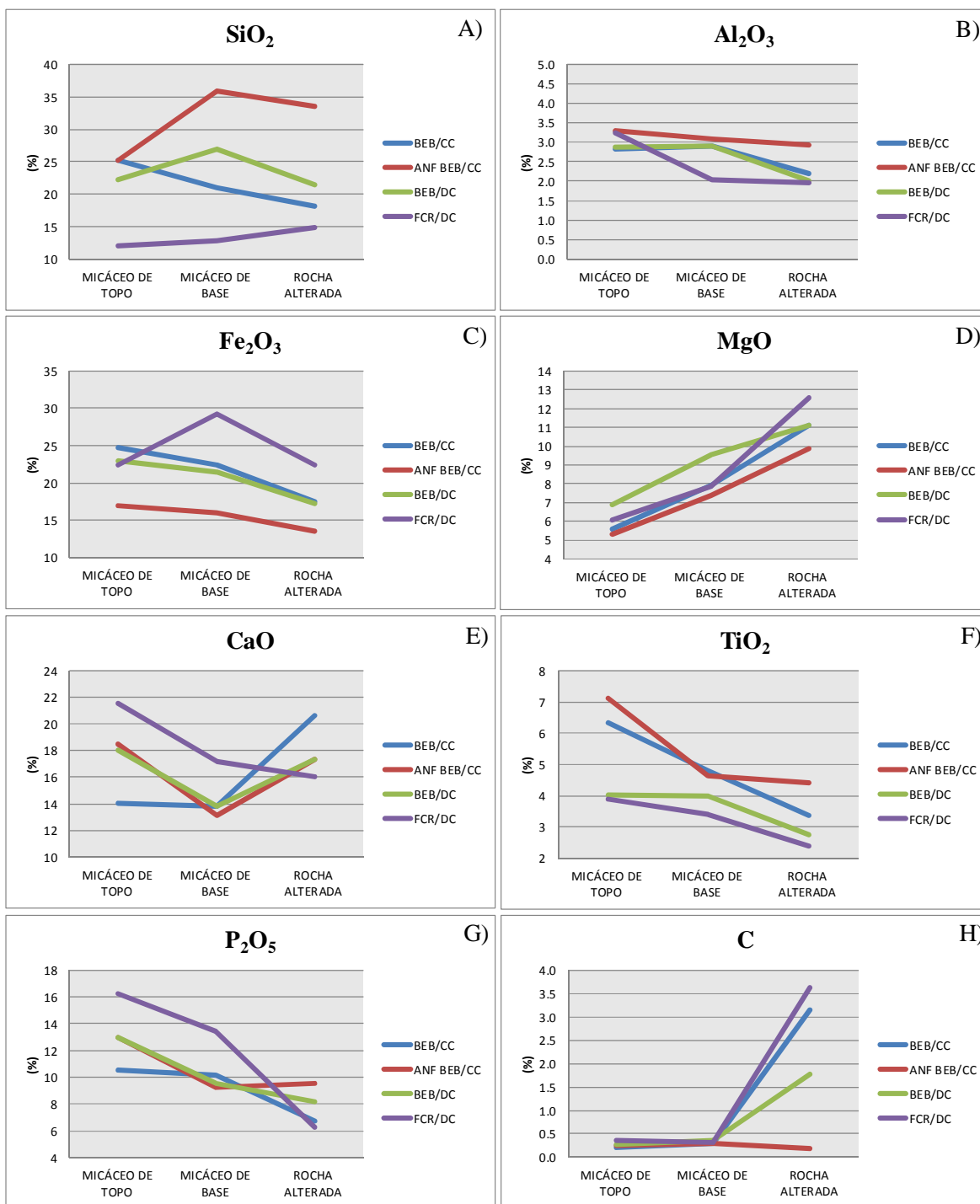


Figura 3.7: Variações dos teores médios dos principais óxidos e carbono analisados em amostras de testemunhos de sondagem, por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo.

3.5. CARACTERIZAÇÃO MINERAL DE AMOSTRAS VOLUMÉTRICAS

Com objetivo de conhecer em detalhe as variações mineralógicas e químicas dos minérios da base do manto de intemperismo das frentes de lavra da mina do Barreiro, foi realizada uma caracterização mineralógica em cinco amostras volumétricas representativas de minérios aflorantes nos horizontes micáceo de topo, micáceo de base e rocha alterada. Os estudos consistiram em análises mineralógicas por DRX, MEV-EDS e QEMSCAN para determinação da composição modal, análise de texturas, identificação das associações mineralógicas, grau de liberação e análises químicas por ICP-AES.

A coleta das amostras volumétricas foi realizada em canaletas horizontais abertas nas faces de taludes. Cada amostra foi formada por 17 a 35 incrementos, totalizando 2 a 2.5 toneladas (figura 3.8), excetuando-se a amostra AV-3 que foi uma amostra pontual de 2 t devido a dificuldades operacionais de amostragem de frente de lavra. As amostras AV-1, AV-2 e AV-3 foram coletadas em afloramentos de isalterito micáceo, enquanto as amostras AV-4 e AV-5, de rocha alterada. A tabela 3.5 apresenta os respectivos horizontes de intemperismo, protolitos e teores químicos das amostras volumétricas e a figura 3.9, aspectos geológicos de campo.

Tabela 3.5: Horizontes de intemperismo, protolitos e teores químicos das amostras AV-1, AV-2, AV-3, AV-4 e AV-5. BEB/DC: associação bebedourito/dolomita carbonatito; ANF BEB/CC: associação anfibólio bebedourito/calcita carbonatito; BEB/CC: associação bebedourito/calcita carbonatito; FCR/DC: associação foscrito/dolomita carbonatito.

AMOSTRA	GEOLOGIA		TEORES QUÍMICOS (%)								CaO/P ₂ O ₅
	INTEMPERISMO	PROTOLITO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	
AV1	MICÁCEO TOPO	BEB/DC	17.89	4.14	28.42	4.66	15.97	6.16	11.79	0.59	1.35
AV2	MICÁCEO BASE	BEB/DC	29.03	3.14	23.24	11.44	12.99	3.68	8.14	0.33	1.60
AV3	MICÁCEO BASE	ANF BEB/CC	36.79	4.03	17.82	8.45	9.68	4.18	6.18	0.18	1.57
AV4	ROCHA ALTERADA	BEB/CC	22.02	1.96	20.78	9.67	14.87	5.63	8.53	1.45	1.74
AV5	ROCHA ALTERADA	FCR/CC	10.80	1.18	23.91	8.72	17.59	2.24	9.88	6.27	1.78

As amostras foram britadas em granulometria inferior a 1 mm. Em seguida, foram homogeneizadas e quarteadas para obtenção de alíquotas de 1000 g que foram, por sua vez, fracionadas em 9 intervalos granulométricos: -1000/+840 µm, -840/+500 µm, -500/+300 µm, -300/+212 µm, -212/+150 µm, -150/+75 µm, -75/+44 µm, -44/+20 µm e -20 µm. A tabela 3.6 apresenta a composição mineralógica geral, a tabela 3.7, a química global e por faixa granulométrica, e a tabela 3.8, a mineralogia global e por faixa granulométrica de cada uma das cinco amostras volumétricas.

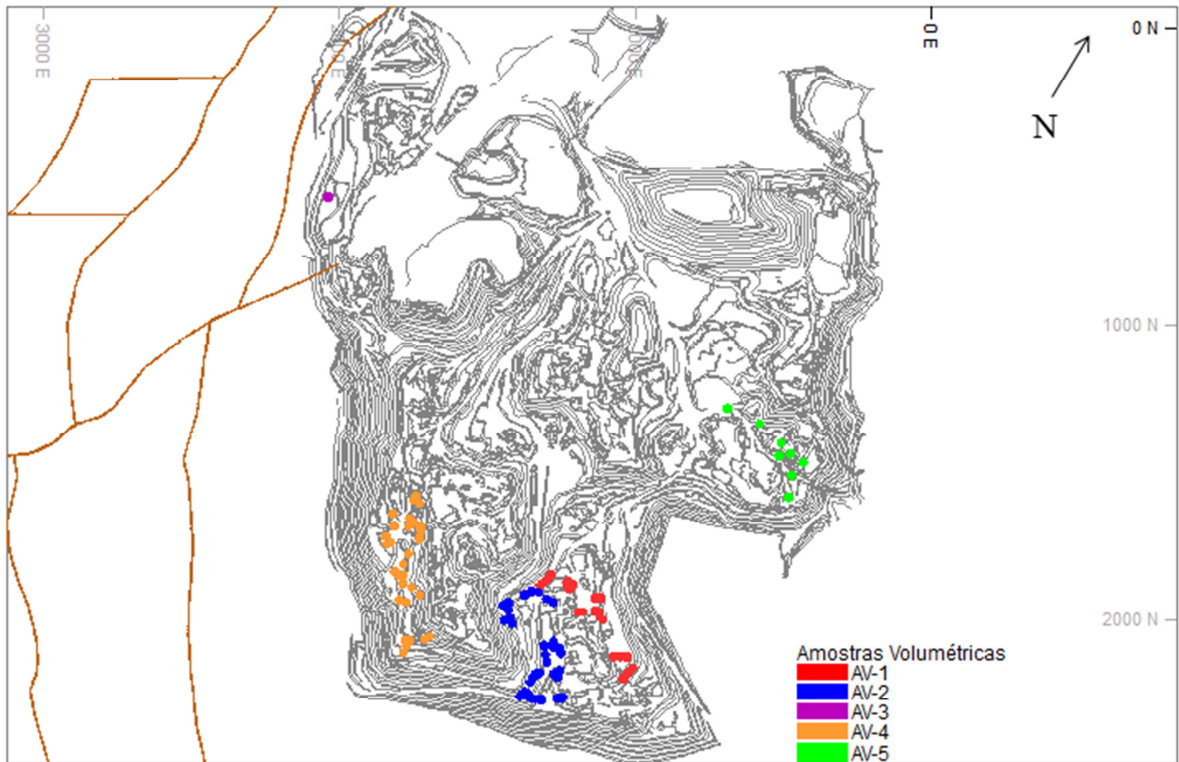


Figura 3.8: Mapa da mina do Barreiro com a localização dos pontos de coleta das 5 amostras volumétricas. Cada círculo cheio representa um incremento formador da amostra volumétrica. A linha marrom representa o limite do domo de Araxá; as linhas cinza são as curvas de nível da mina do Barreiro. Coordenadas métricas locais.

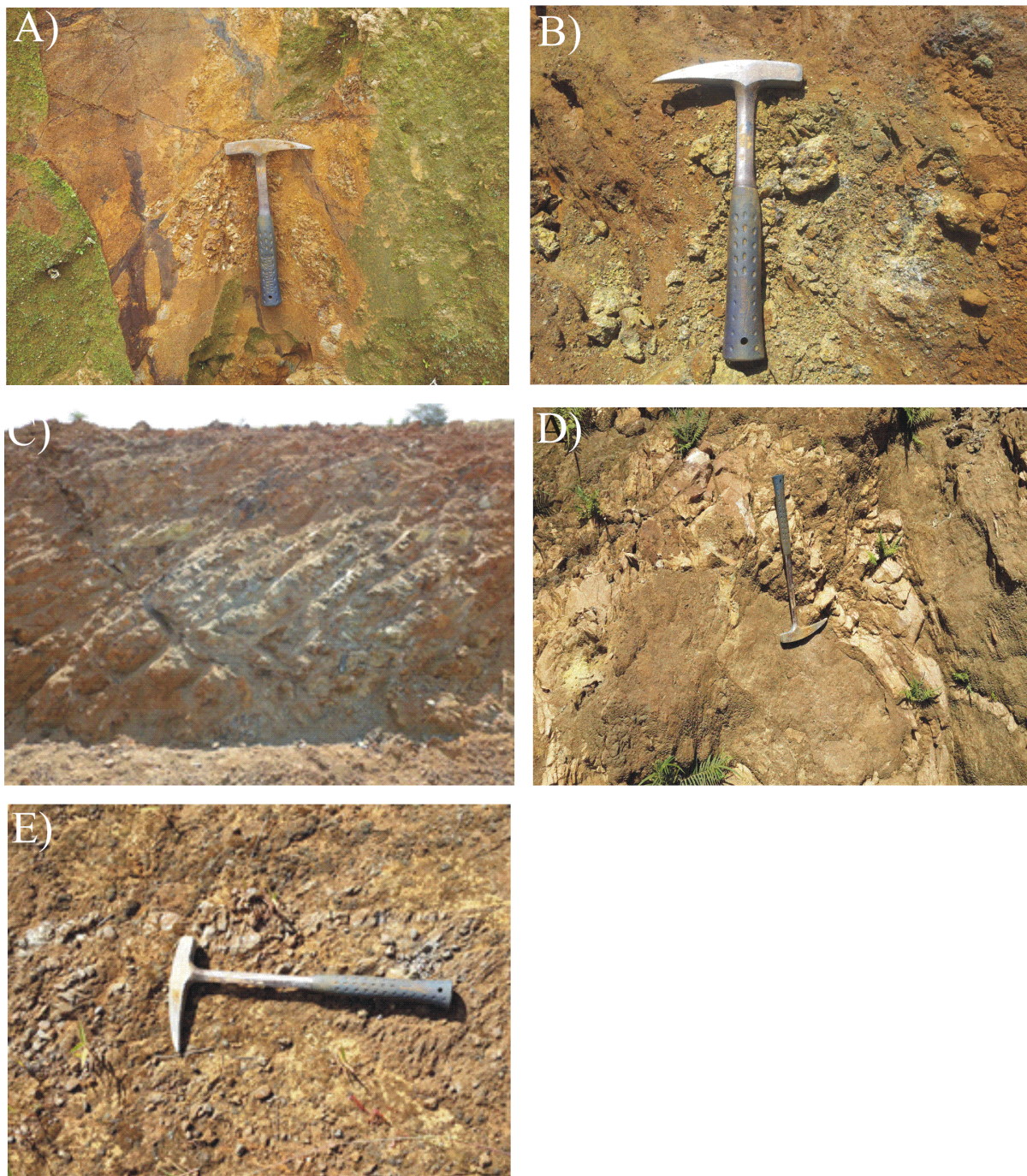


Figura 3.9: Aspectos geológicos de campo das cinco amostras volumétricas. A) Amostra AV-1: BEB/DC no horizonte micáceo de topo cortado por veios de óxidos de manganês, derivados da alteração de dolomita carbonatitos. B) Amostra AV-2: detalhe de BEB/DC no horizonte micáceo de base. A coloração verde é devida à abundância de diopsídio. C) Amostra AV-3: ANF BEB/CC no horizonte micáceo de base com variação no silicato predominante: anfíbólio (porção cinza) e flogopita/vermiculita (porção marrom alaranjada). D) Amostra AV-4: BEB/CC no horizonte rocha alterada. Observa-se claramente a relação entre o bebedourito encaixante e os diques de calcita carbonatito associados. E) Amostra AV-5: FCR/DC com magnetita grossa, horizonte rocha alterada, aflorante no piso da mina do Barreiro.

3.5.1 Amostra AV-1

Esta amostra foi coletada no horizonte isalterito de topo de BEB/DC. Apresenta consistência friável. Possui abundantes veios de flogopita pegmatóide alterada para filossilicatos interestratificados, e veios de carbonatito alterado e transformado para um material fino rico em óxidos de manganês (figura 3.9 A), eventualmente com monazita. Os principais minerais primários residuais do protolito identificados foram apatita, ilmenita, magnetita, tetraferroflogopita, titanita e richterita.

A assembleia de minerais intempéricos identificados consiste de filossilicatos interestratificados, vermiculita, quartzo, anatásio, goethita, hematita, monazita e crandallita.

A figura 3.10 A mostra um grão formado pelos minerais residuais magnetita, apatita, titanita e ilmenita, com vermiculita intersticial. A figura 3.10 B mostra um grão formado por apatita residual com textura lisa, associada com goethita, hollandita e crandallita desenvolvidos nas porções mais porosas do grão.

A apatita concentra-se principalmente nas frações granulométricas mais grossas, entre 1000 μm e 212 μm ; para granulações mais finas decresce continuamente até alcançar seu menor conteúdo em - 20 μm . Por outro lado, os principais contaminantes da amostra, como óxidos/hidróxidos de ferro, vermiculita, richterita e gorceixita, concentram-se abaixo de 20 μm ; anatásio também ocorre em maior quantidade entre -75 μm + 44 μm .

Quimicamente, AV-1 é a amostra volumétrica com a menor relação $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ (1.35). Mesmo assim, este valor está acima do esperado numa apatita estequiométrica, o que pode ser devido a uma deficiência de fósforo (por exemplo, substituído por carbonato) na apatita, ou presença de outros minerais cálcicos como richterita e calzirtita, observados em pequenas quantidades na amostra. A presença de crandallita e monazita, como fosfatos sem cálcio, reforça esta última hipótese. Adicionalmente, é a amostra com o maior conteúdo de P_2O_5 (11.79%), que sugere um maior grau de alteração dos minerais contaminantes e concentração residual dos fosfatos. O P_2O_5 é maior nas frações entre -840 μm +212 μm , coincidentes com o maior conteúdo de apatita, mostrando que este é o principal mineral portador de fósforo na amostra.

É ainda a amostra com menor conteúdo de MgO (4.66%), devido à alteração da flogopita em estágio mais avançado, que acarreta a lixiviação de MgO e também de SiO_2 da flogopita, transformando-a gradativamente para vermiculita. Possui também o maior conteúdo de Fe_2O_3 (28.42%), que está mais concentrado nas frações mais finas, atingindo 36.61% na fração -20 μm , coincidente com os maiores conteúdos de óxidos/hidróxidos de ferro, vermiculita e richterita. É, ainda, a amostra com o maior conteúdo de TiO_2 (6.16%) devido à alteração de perovskita primária

para anatásio, e concentração residual do último no manto de intemperismo. O TiO_2 alcança seu maior conteúdo entre 75 e 44 μm , intervalo coincidente com o maior conteúdo de anatásio. O teor de SiO_2 está condicionado tanto à maior presença de quartzo nas frações mais grossas (+840 μm + 300 μm) quanto de vermiculita e richterita nas mais finas (-20 μm).

Um súbito aumento de partículas monominerálicas de apatita a partir da fração -212/+150 μm em direção às frações finas foi observado na amostra AV-1 (figura 3.12), passando de cerca de 40% na fração -500/+300 μm para 65% em -44/+20 μm . Se forem consideradas partículas com conteúdos de apatita iguais ou superiores a 80%, a fração mais grossa (-840/+500 μm) apresenta 65% de liberação, que cresce continuamente em direção às frações mais finas, alcançando 80% em -44/+20 μm . A associação com a apatita mais frequente ocorre com óxidos/hidróxidos de Fe, seguida pela associação com flogopita/vermiculita.

Os parâmetros químicos e mineralógicos observados indicam que a amostra AV-1 é a mais alterada de todas as amostras volumétricas. Comparada a outros minérios da base do manto de intemperismo, a amostra AV-1 é um minério de ótima qualidade, tanto por seu teor elevado de P_2O_5 , quanto por sua natureza friável, que se deve à alteração supergênica com baixo grau de silicificação, refletida na pequena quantidade de quartzo (3.2%). Apresenta, ainda, grande potencial para concentração de apatita no beneficiamento mineral, devido aos principais contaminantes estarem concentrados em faixas granulométricas finas, distantes das faixas de maior concentração de apatita.

Tabela 3.6: Composição mineralógica geral, obtida por QEMSCAN, das amostras AV-1, AV-2, AV-3, AV-4 e AV-5. Detalhamento adicional feito por MEV-EDS e/ou DRX. Minerais Zr: calzirtita, zirconolita e zircão. Outros: composição híbrida no espectro de EDS.

Mineral (%)	Amostra AV-1	Amostra AV-2	Amostra AV-3	Amostra AV-4	Amostra AV-5
Piroxênio/anfibólio	4.3	9.7	18.4	8.6	1.8
Vermiculita/flogopita	18.0	31.8	32.6	25.8	17.4
Feldspato potássico	0.0	0.0	1.4	0.0	0.0
Titanita	1.6	0.1	0.8	0.1	0.0
Apatita	27.8	21.3	17.9	22.6	26.1
Calcita	0.0	0.9	0.1	4.0	3.9
Dolomita	0.0	1.3	0.0	3.8	9.1
Perovskita	0.7	0.6	0.0	0.6	0.0
Ilmenita	1.8	2.6	0.2	4.1	2.5
Pirocloro	0.1	0.1	0.1	0.3	1.4
Quartzo	3.2	5.6	9.4	2.8	0.2
Plumbogummita	3.1	0.8	0.1	0.5	0.1
Monazita	1.2	0.8	0.1	0.9	0.4
Óx/hidroxi Fe	31.0	19.5	11.2	17.3	24.4
Anatásio	3.5	2.3	3.6	3.9	0.8
Minerais Zr	1.0	0.4	0.1	0.2	0.1
Hollandita	0.7	0.5	0.6	0.5	0.6
Barita	0.0	0.1	0.0	2.1	9.1
Outros	2.0	1.5	3.4	1.9	2.1

3.5.2 Amostra AV-2

Esta amostra foi coletada no horizonte isalterito de base de BEB/DC. Possui consistência semicompacta (figura 3.9 B). Os principais minerais residuais do protolito identificados foram apatita, flogopita, ilmenita, magnetita, diopsídio e richterita; os minerais intempéricos compreendem anatásio, goethita, hematita, quartzo e filossilicatos interestratificados.

A figura 3.10 C ilustra a presença de filossilicatos interestratificados e flogopita, indicando que no horizonte micáceo de base a flogopita ocorre tanto sem indícios de alteração quanto em processo de alteração intempérica. A figura 3.10 D mostra um grão característico desse horizonte, por possuir uma estreita relação textural entre minerais residuais e neoformados, nesse caso entre a apatita e flogopita e anatásio e goethita.

O principal contaminante é a flogopita/vermiculita (31.8%) que pode ocorrer como grãos livres, ou associados à apatita. A apatita está distribuída uniformemente nas diversas frações, exceto por uma queda significativa na fração abaixo de 20 µm. Os óxidos/hidróxidos de ferro apresentaram um comportamento distinto do da amostra AV-1, porque seus maiores conteúdos estão associados

às frações mais grossas, principalmente na forma de magnetita. Quartzo também ocorre em maior quantidade nas frações mais grossas e seu conteúdo diminui gradativamente até -20 μm . Por outro lado, flogopita e vermiculita são em geral muito finas, alcançando conteúdo máximo na fração abaixo de 20 μm . Diopsídio e richterita também se concentram nas frações mais finas.

Quimicamente, possui conteúdos de MgO e SiO_2 mais elevados do que na amostra AV-1, refletindo seu menor grau de alteração intempérica; tais teores apresentam um aumento significativo a partir da fração -300 μm +212 μm em direção às frações mais finas, em resposta ao aumento da quantidade de flogopita, vermiculita, diopsídio e richterita. A amostra AV-2 possui também relação $\text{CaO/P}_2\text{O}_5$ mais elevada (1.60) devido à presença de outros minerais portadores de cálcio além da apatita, principalmente o diopsídio e, em quantidades subordinadas, carbonatos. Por outro lado, seu conteúdo de Al_2O_3 é mais baixo que o da amostra AV-1, refletindo a alteração menos intensa da flogopita para vermiculita; Fe_2O_3 também é menor (23.24%), devido à menor quantidade de óxidos/hidróxidos de Fe secundários. O menor conteúdo de TiO_2 em AV-2 é consistente com o enriquecimento progressivo desse elemento com a intensidade do intemperismo; o ligeiro aumento de TiO_2 nas frações entre 75 μm e 20 μm reflete a maior quantidade de ilmenita e anatásio nessas frações.

P_2O_5 também é menor (8.14%) em AV-2 do que em AV-1, sugerindo menor grau de lixiviação dos elementos contaminantes e, conseqüentemente, menor concentração supergênica da apatita. Por outro lado, o teor mais baixo em AV-2 pode estar relacionado ao menor conteúdo de apatita no protolito. O teor mais elevado de P_2O_5 ocorre na fração + 840 μm , devido ao maior conteúdo de apatita nessa fração; nesse caso se assemelha à AV-1 que possui os maiores teores de P_2O_5 também nas frações mais grossas. Nas demais frações, o P_2O_5 decresce levemente e mantém-se estável, próximo a 8%, apresentando queda brusca apenas na fração -20 μm , na qual atinge 5.7%.

Mais liberada que AV-1, sua fração mais grossa (-840/+500 μm) possui 50% de partículas formadas exclusivamente por apatita (figura 3.12). O maior grau de liberação ocorre em -75/+44 μm , 78%. Considerando-se partículas com conteúdos de apatita iguais ou superiores a 80%, a referida fração alcança grau de liberação superior a 90%. Similar à observada na amostra AV-1, a associação com a apatita mais frequente ocorre com óxidos/hidróxidos de Fe e é seguida pela associação com flogopita/vermiculita.

AV-2 é, portanto, um minério de qualidade inferior comparativamente a AV-1, devido à maior quantidade de minerais contaminantes e menor quantidade de apatita. Adicionalmente, a maior concentração de óxidos/hidróxidos de Fe (principalmente magnetita) coincide com as faixas de maior conteúdo de apatita, favorecendo o potencial arraste de apatita durante a separação magnética.

3.5.3 Amostra AV-3

Esta amostra foi coletada no horizonte isalterito de base de ANF BEB/CC. Possui consistência friável e coloração marrom clara a cinza esverdeada (figura 3.9 C). O bebedourito é cortado por finos veios de calcita, e localmente por diques de calcita carbonatito alterados; apresenta estruturas primárias preservadas e consistência friável. Os principais minerais residuais do protolito identificados foram apatita, flogopita, richterita e magnetita. Os minerais intempéricos identificados foram filossilicatos interestratificados, vermiculita, anatásio, goethita e quartzo.

A figura 3.10 E mostra um grão de apatita com fraturas e interstícios preenchidos por goethita. A figura 3.10 F mostra uma feição semelhante à figura anterior, mas nesta a associação da apatita é com quartzo.

Observa-se que a mineralogia dessa amostra assemelha-se à da AV-2, ambas do horizonte micáceo de base; diferem, principalmente, na quantidade dos minerais contaminantes, com exceção de flogopita/vermiculita. As maiores diferenças estão no conteúdo de piroxênio/anfibólio, que é de 18.4% em AV-3 e 9.7% em AV-2; salienta-se que, apesar de o QEMSCAN não diferenciar em rotina piroxênio e anfibólio, constatou-se por MEV/EDS e DRX o predomínio de diopsídio na amostra AV-2, e de richterita em AV-3. Ambas apresentam um enriquecimento desses minerais em direção às frações mais finas, sendo que o maior conteúdo em AV-3 ocorre na fração – 20 µm.

A quantidade de flogopita/vermiculita na amostra global, 32.6%, assemelha-se à da AV-2 (31.8%); o enriquecimento gradual desse mineral em direção às frações mais finas está presente em ambas as amostras.

A apatita ocorre em maior quantidade nas frações mais grossas, de -1000 a 300 µm. Quartzo (9.4%) também alcança seus maiores conteúdos nas frações mais grossas, acompanhando a apatita. O conteúdo de óxidos/hidróxidos de Fe, por outro lado, é menor na amostra AV-3 do que em AV-2 (11.2% e 19.5%, respectivamente). Apresenta, ainda, quantidades similares de anatásio (3.6%) em relação à amostra AV-2 (2.3%) ambas atingindo o maior conteúdo desse mineral na fração -75+44 µm. Cristais grossos de richterita ocorrem associados a filossilicatos interestratificados e à apatita fina (figura 3.10 E).

Quimicamente, a amostra AV-3 apresenta MgO (8.45%) inferior ao da amostra AV-2 (11.44%); apesar de conter uma proporção modal maior de silicatos ferromagnesianos totais. Este comportamento se explica pelo maior conteúdo de richterita na amostra AV-3, enquanto na amostra AV-2 predomina diopsídio. Isso é também consistente com o maior conteúdo de SiO₂ em AV-3 (36.79%) do que em AV-2 (29.03%). O maior conteúdo de Al₂O₃ (5.68%) ocorre na fração +840 µm.

O teor de P_2O_5 (6.18%) é o mais baixo dentre as cinco amostras volumétricas, devido ao menor conteúdo de apatita (17.9%); o teor mais alto de P_2O_5 foi observado na fração -840+500 μm , o que é consistente com o predomínio de apatita nas frações grossas, observado também nas demais amostras volumétricas.

Amostra AV-3 possui grau de liberação similar à AV-2: a fração -840/+500 μm possui 50% de partículas monominerálicas e 80% de partículas com mais de 80% de apatita (figura 3.12). O maior grau de liberação ocorre em -150/+75 μm , na qual alcança 75% de partículas monominerálicas e mais de 90% de partículas com mais de 80% de apatita. As associações com a apatita mais frequentes ocorrem com diopsídio/anfibólio, flogopita/vermiculita, quartzo e óxidos/hidróxidos de Fe.

AV-3 é, portanto, a amostra volumétrica que representa o minério de pior qualidade dentre as amostras de minério micáceo, tanto devido à menor quantidade de apatita, quanto pela forte associação entre a apatita e os diversos silicatos presentes na amostra.

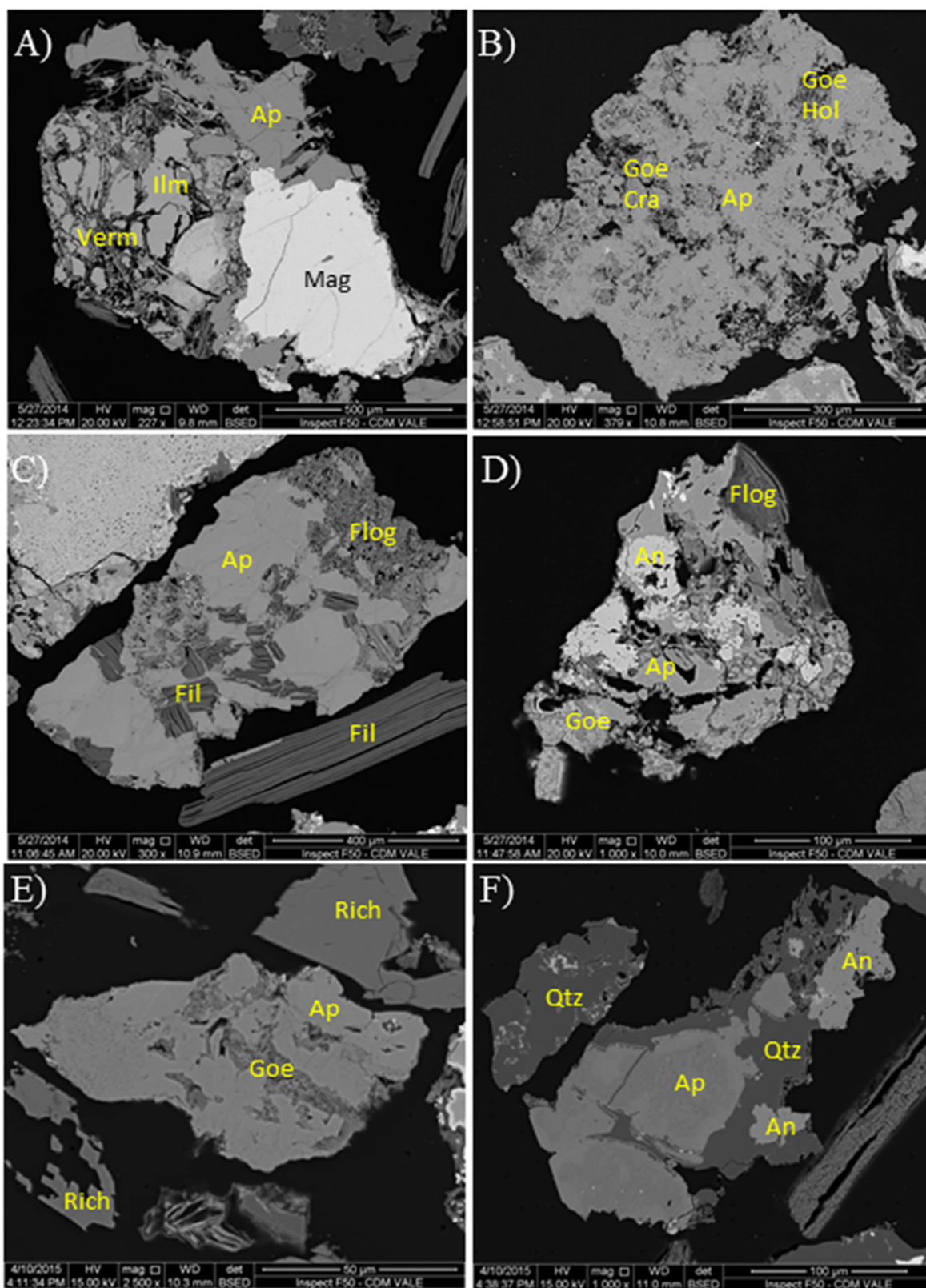


Figura 3.10: Imagens eletrônicas por elétrons retroespalhados das amostras volumétricas. A) Grão formado por magnetita, apatita, titanita, ilmenita e vermiculita intersticial, amostra AV-1. B) Grão formado por apatita residual com textura lisa, associada a goethita, hollandita e crandallita desenvolvidos nas porções mais porosas do grão, amostra AV-1; C) Filossilicatos interestratificados e flogopita, amostra AV-2. D) Grão característico do horizonte micáceo de base, com estreita relação textural entre apatita, flogopita, anatásio e goethita, amostra AV-2. E) Grão de apatita com fraturas e interstícios preenchidos por goethita, amostra AV-3. F) Grão de apatita com fraturas preenchidas por quartzo, amostra AV-3. Legenda: An: anatásio; Ap: apatita; Cra: crandallita; fil: filossilicato interestratificado; Flog:flogopita; Flog:

flogopita; Goe: goethita; Hol: hollandita; Ilm: ilmenita; Mag: magnetita; Qtz: quartzo; Rich: richterita, Tit: titanita; Verm: vermiculita.

3.5.4 Amostra AV-4

Esta amostra foi coletada no horizonte rocha alterada de BEB/CC. Os diques de carbonatito possuem espessura centimétrica a métrica (figura 3.9 D), às vezes formam uma estrutura em *stockwork* e localmente estão silicificados. Possui consistência semcompacta. Os principais minerais residuais do protolito identificados foram apatita, calcita, dolomita, flogopita, richterita, ilmenita e magnetita. Os minerais intempéricos identificados foram quartzo, vermiculita, barita, anatásio e goethita.

A figura 3.11 A mostra um cristal de calcita com pequenas exsoluções de estroncianita, indicando recristalização subsolidus. A figura 3.11 B mostra um grão formado predominantemente por apatita associada a carbonatos com aspecto de inclusões ou preenchendo poros, e veios de calcita.

Vermiculita, flogopita e richterita apresentam forte enriquecimento nas frações finas, enquanto a apatita concentra-se nas frações grossas a intermediárias. Os óxidos/hidróxidos de ferro apresentam distribuição bimodal, concentrados nas frações entre 1000 μm e 840 μm (magnetita) e abaixo de 20 μm (goethita). Os carbonatos possuem um comportamento peculiar: enquanto a calcita concentra-se nas frações grossas a intermediárias (-1000 μm +106 μm), possivelmente derivada de diques de calcita carbonatitos grossos, a dolomita apresenta comportamento contrário, concentrando-se nas frações intermediárias a finas (-210 μm + 44 μm), possivelmente de natureza intersticial. Ilmenita, anatásio e barita diminuem gradativamente em direção às frações finas.

Quimicamente, possui o segundo maior teor de MgO (9.67%). A relação CaO/P₂O₅ é elevada (1.74), principalmente pelo elevado conteúdo de carbonatos (7.8%), esperado numa amostra que possui associação com carbonatitos no horizonte rocha alterada. Tanto P₂O₅ como CaO decrescem significativamente em direção aos finos, indicando que os principais controles da distribuição de CaO são a apatita e calcita presentes nas frações grossas a intermediárias. O conteúdo de Al₂O₃ é baixo (1.96%), refletindo a baixa quantidade de vermiculita.

O conteúdo de P₂O₅ (8.53%) é baixo comparativamente aos minérios ricos dos horizontes intempéricos superiores, mas é considerável para uma amostra na rocha alterada, dada a incipiente dissolução dos carbonatos nesse nível, que acarreta um baixo fator de enriquecimento supergênico da apatita. Os maiores teores de P₂O₅ concentram-se nas frações +212 μm , alcançando um máximo na fração -840 μm +500 μm , que tem a maior concentração modal de apatita.

O conteúdo de Fe_2O_3 apresenta distribuição bimodal, com as maiores concentrações abaixo de $20\ \mu\text{m}$, devido principalmente ao alto conteúdo de goethita nessa fração granulométrica, e teores elevados associados também às frações $+300\ \mu\text{m}$, devido à presença de magnetita. O conteúdo de TiO_2 mais elevado nas frações grossas deve-se à maior quantidade de ilmenita parcialmente convertida em anatásio nessas frações.

A fração $-840/+500\ \mu\text{m}$ possui o menor grau de liberação dentre todas as amostras volumétricas: 21%. No entanto, a fração seguinte ($-500/+300$) já possui 50% de partículas monominerálicas e mais de 70% de partículas com mais de 80% de apatita (figura 3.12). O maior grau de liberação ocorre em $-75/+44\ \mu\text{m}$, com 80% de partículas monominerálicas e 89% de partículas com mais de 80% de apatita. As associações com a apatita mais frequentes ocorrem com óxidos/hidróxidos de Fe, flogopita/vermiculita e diopsídio/anfibólio.

3.5.5 Amostra AV-5

Esta amostra foi coletada no horizonte rocha alterada de FCR/DC (figura 3.9 E). Possui consistência semicompacta. Os principais minerais primários identificados foram apatita, barita, calcita, dolomita, ilmenita e magnetita; os únicos minerais intempéricos identificados foram goethita e filossilicatos interestratificados.

A figura 3.11 C ilustra um grão de goethita porosa associada com apatita e barita residuais, e grãos livres de calcita e flogopita. A figura 3.11 D mostra um grão formado apenas por minerais residuais e bem formados.

Barita ocorre em quantidade substancial (9.1%, tabela 3.6), livre ou associada com apatita; Dolomita predomina sobre calcita na amostra, e se concentra em frações mais finas, entre 212 μm e 44 μm , enquanto que a calcita está distribuída uniformemente entre 1000 μm e 75 μm . Barita acompanha a calcita, concentrando-se também entre 1000 μm e 500 μm . Os óxidos/hidróxidos de ferro, principalmente magnetita, concentram-se nas frações intermediárias, entre 500 μm e 212 μm . Apatita concentra-se predominantemente nas frações grossas, entre 1000 μm e 500 μm .

Quimicamente, a amostra AV-5 possui teor elevado de MgO (8.72%) e a maior relação CaO/P₂O₅ dentre as cinco amostras volumétricas coletadas, o que reflete o seu maior conteúdo de carbonatos (9.1% de dolomita e 3.9% de calcita). Seu conteúdo de P₂O₅ também é elevado (9.88%) em comparação com outros minérios em rocha alterada, e está concentrado nas frações grossas, de 840 μm a 500 μm .

Sua fração mais grossa possui 40% de partículas monominerálicas (figura 3.12). O grau de liberação dessa amostra cresce de forma gradativa e alcança seu valor máximo em -44/+20 μm , fração que possui 81% de partículas monominerálicas e 91% de partículas com mais de 80% de apatita. A associação com a apatita mais frequente ocorre com óxidos/hidróxidos de Fe, seguindo-se de associação com vermiculita/flogopita e barita.

Essa amostra é um excelente protominério, pois além de possuir teor elevado de P₂O₅ num horizonte cuja concentração supergênica da apatita é incipiente, apresenta quantidade elevada de carbonatos que, uma vez lixiviados, resultam em elevação significativa do teor do minério em horizontes intempérico mais evoluídos. O conteúdo de BaO é significativamente superior (6.27%) ao das demais amostras e reflete a presença de barita, concentrada entre 840 μm a 500 μm . A amostra apresenta, ainda, o menor conteúdo de SiO₂ (10.80%) dentre as amostras volumétricas, o que se explica pelos conteúdos caracteristicamente baixos de SiO₂ em foscoritos e carbonatitos, já no horizonte de rocha fresca; os maiores teores de SiO₂ estão nas frações mais finas, de 44 μm a -20 μm . Seu conteúdo de Al₂O₃ também é o menor de todos, refletindo a baixa quantidade de

vermiculita. O teor de TiO_2 é baixo (2.24%) e está controlado pela ilmenita, que é o único mineral portador de TiO_2 relevante nessa amostra. É esperado que o TiO_2 dessa amostra seja menor que o das demais, uma vez que todas as outras amostras possuem natureza bebedourítica, concentrando TiO_2 em relação às séries carbonatítica e foscorítica (e.g. Brod, 1999). Fe_2O_3 está concentrado nas frações grossas a intermediárias, entre 840 μm e 150 μm .

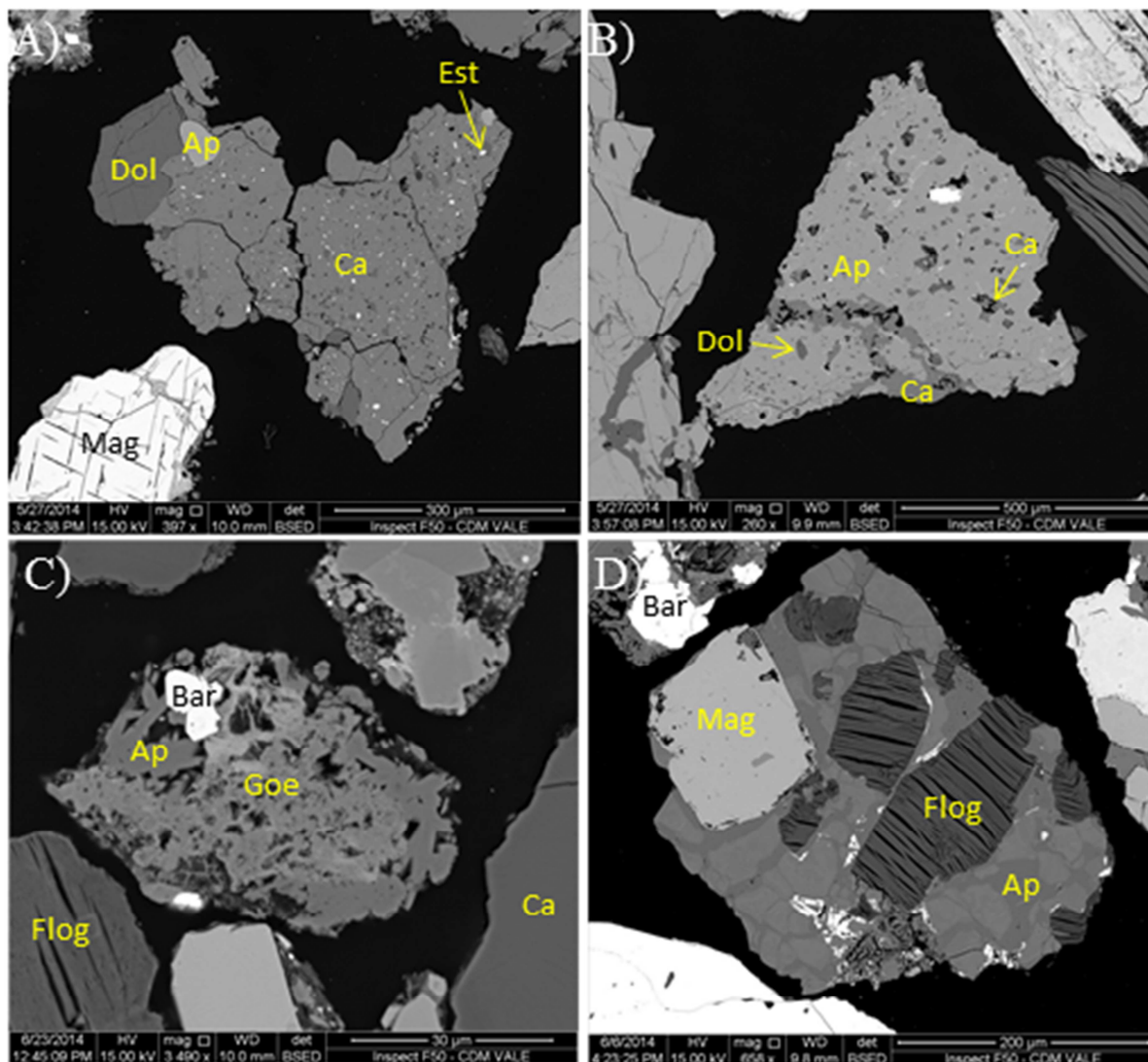


Figura 3.11: Imagens eletrônicas por elétrons retroespalhados das amostras volumétricas. A) Cristal de calcita com pequenas exsoluções de estroncianita, indicando recristalização subsolidus, amostra AV-4. B) Grão formado predominantemente por apatita associada a carbonatos, amostra AV4. C) Grão de goethita porosa associada com apatita e barita residuais, e grãos livres de calcita e flogopita, amostra AV-5. D) Grão formado por minerais residuais e bem formados, amostra AV-5. Legenda: Ap: apatita; Bar: barita; Ca: calcita; Dol: dolomita; Est: estroncianita; Flog: flogopita; Goe: goethita; Mag: magnetita.

Tabela 3.8 – Composição mineralógica geral e por fração granulométrica das amostras volumétricas AV-1, AV-2, AV-3, AV-4 e AV-5. Outros: composição híbrida no espectro de EDS.

Amostra AV-1										
Mineral (%)	Total	-1000/+840	-840/+500	-500/+300	-300/+212	-212/+150	-150/+75	-75/+44	-44/+20	-20/+0 (µm)
Piroxênio/anfibólio	4.3	3.7	3.8	4.4	4.6	4.2	4.6	4.5	4.9	6.8
Vermiculita/flogopita	18.0	16.6	13.1	16.1	11.2	11.8	12.0	14.3	16.6	24.1
Feldspato potássico	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.3	0.3
Titanita	1.6	2.5	2.4	3.6	2.7	2.9	2.1	1.5	0.8	0.4
Apatita	27.8	33.4	33.5	32.3	35.7	31.1	29.6	26.7	20.4	12.7
Calcita	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
Dolomita	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
Perovskita	0.7	1.2	1.0	1.1	1.4	1.4	1.1	0.8	0.4	0.5
Ilmenita	1.8	2.1	3.0	1.9	3.0	2.9	3.7	3.2	2.4	1.2
Pirocloro	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.3	0.3
Quartzo	3.2	3.5	4.6	3.4	2.3	2.5	2.3	3.0	3.2	1.9
Plumbogummita	3.1	1.1	1.2	1.6	1.4	1.2	1.8	2.7	4.5	7.6
Monazita	1.2	0.5	1.0	0.8	0.5	0.6	1.3	2.0	2.6	2.5
Óx/hidroxFé	31.0	27.6	28.5	27.2	29.2	33.4	32.1	31.3	33.9	34.7
Anatásio	3.5	4.1	4.9	4.0	5.1	4.3	5.5	5.6	4.0	2.1
Minerais Zr	1.0	1.3	1.0	1.5	1.2	2.5	1.9	1.4	0.9	0.6
Hollandita	0.7	0.2	0.4	0.7	0.6	0.4	0.9	1.5	2.7	1.4
Barita	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Outros	1.9	2.0	1.4	1.2	1.1	0.7	0.8	1.2	2.0	3.0
Amostra AV-2										
Piroxênio/anfibólio	9.7	4.1	6.7	7.7	8.9	10.7	11.6	13.2	12.5	10.3
Vermiculita/flogopita	31.8	21.1	24.5	30.6	34.7	33.4	34.2	31.8	33.9	36.5
Feldspato potássico	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.5
Titanita	0.1	0.2	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Apatita	21.3	27.4	23.0	22.4	23.3	23.2	22.1	22.4	20.1	12.2
Calcita	0.9	1.4	1.4	1.1	0.9	0.7	0.6	0.7	0.9	0.9
Dolomita	1.3	1.2	1.2	1.0	0.8	0.7	0.9	1.1	1.3	3.1
Perovskita	0.6	0.4	0.3	0.5	0.5	0.8	1.0	1.1	0.9	0.3
Ilmenita	2.6	2.1	2.7	2.3	2.3	2.4	2.9	3.1	3.0	2.3
Pirocloro	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3
Quartzo	5.6	9.3	7.6	6.6	5.3	4.6	4.5	4.9	4.8	4.8
Plumbogummita	0.8	0.2	0.5	0.6	0.5	0.4	0.6	0.9	1.4	2.2
Monazita	0.8	0.6	0.4	0.4	0.6	0.4	0.6	0.6	1.0	2.5
Óx/hidroxFé	19.5	28.8	28.6	22.9	18.5	18.7	16.3	14.6	13.7	16.4
Anatásio	2.3	1.3	1.6	1.9	2.2	2.5	3.1	3.8	3.7	0.8
Minerais Zr	0.4	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	1.2
Hollandita	0.5	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.4	0.6	1.5
Barita	0.1	0.2	0.1	0.4	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0
Outros	1.3	1.3	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.6	1.5	4.3

Tabela 3.8: Continuação.

Amostra AV-3										
Mineral (%)	Total	-1000/+840	-840/+500	-500/+300	-300/+212	-212/+150	-150/+75	-75/+44	-44/+20	-20/+0 (µm)
Piroxênio/anfibólio	18.4	17.9	14.7	13.4	14.2	14.8	17.7	18.7	20.5	23.4
Vermiculita/flogopita	32.6	16.3	23.8	29.5	34.0	34.4	36.1	33.5	31.9	35.7
Feldspato potássico	1.4	3.4	1.7	2.2	1.5	1.4	1.3	1.4	1.3	0.7
Titanita	0.8	0.8	0.7	0.7	1.0	0.9	0.7	0.7	0.5	0.9
Apatita	17.9	28.0	27.8	27.7	23.1	21.2	17.4	16.1	13.6	9.8
Calcita	0.1	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Dolomita	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0
Perovskita	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ilmenita	0.2	0.4	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Pirocloro	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0
Quartzo	9.4	13.5	12.5	10.9	10.0	10.2	10.2	10.0	8.8	6.5
Plumbogummita	0.1	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
Monazita	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
Óx/hidro Fe	11.2	13.7	10.2	7.5	7.0	7.4	7.4	10.0	12.8	16.8
Anatásio	3.6	2.0	3.5	3.8	4.5	4.8	5.0	5.2	4.6	1.5
Minerais Zr	0.1	0.0	0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Hollandita	0.6	0.3	0.6	0.4	0.5	0.5	0.7	1.2	1.1	0.4
Barita	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Outros	3.3	3.1	3.3	2.9	3.4	3.6	2.7	2.3	4.1	3.6
Amostra AV-4										
Piroxênio/anfibólio	8.6	5.6	7.4	6.2	7.5	7.5	9.7	11.6	12.4	9.6
Vermiculita/flogopita	25.8	16.9	17.6	21.0	24.5	26.4	29.3	30.2	36.3	30.6
Feldspato potássico	0.4	0.5	0.6	0.6	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3
Titanita	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Apatita	22.6	26.3	30.9	28.3	27.0	25.0	21.4	18.6	13.7	12.8
Calcita	4.0	5.8	4.8	4.3	4.5	4.3	4.1	3.8	3.1	2.2
Dolomita	3.8	1.2	2.6	3.0	4.9	5.8	5.9	5.4	3.8	3.0
Perovskita	0.6	0.9	1.4	0.9	0.4	0.5	0.3	0.3	0.2	0.1
Ilmenita	4.1	5.5	4.2	5.2	4.4	4.9	4.7	4.7	3.0	2.0
Pirocloro	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.5	0.4	0.4
Quartzo	2.8	4.2	4.3	3.4	2.9	2.7	2.4	2.1	1.9	1.3
Plumbogummita	0.5	0.5	0.5	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.8
Monazita	0.9	0.7	0.3	0.5	0.5	0.6	0.7	0.9	1.0	2.4
Óx/hidro Fe	17.3	20.9	16.4	18.1	15.3	14.6	13.5	13.6	16.1	23.9
Anatásio	3.9	5.9	4.8	4.4	3.9	3.7	3.9	4.2	3.5	1.9
Minerais Zr	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.5
Hollandita	0.5	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.9	1.2
Barita	2.1	3.7	2.5	2.5	2.0	1.6	1.6	1.7	1.5	2.2
Outros	1.5	0.9	0.9	0.9	0.7	0.9	0.7	0.8	0.8	4.9

Tabela 3.8: Continuação.

Mineral (%)	Amostra AV-5									
	Total	-1000/840	-840/500	-500/300	-300/212	-212/150	-150/+75	-75/44	-44/+20	-20/+0 (µm)
Piroxênio/anfibólio	1.8	0.5	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.5	2.6	5.9
Vermiculita/flogopita	17.4	4.5	6.7	10.1	13.0	13.6	18.3	28.0	34.9	23.9
Feldspato potássico	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
Titanita	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Apatita	26.1	45.7	40.9	33.9	26.9	23.5	20.6	19.3	18.4	13.5
Calcita	3.9	5.6	4.2	4.0	4.9	5.3	4.8	3.2	2.6	2.2
Dolomita	9.1	4.1	3.6	7.0	10.0	12.7	14.6	12.2	9.5	8.0
Perovskita	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ilmenita	2.5	1.9	2.6	2.1	2.3	3.7	4.3	3.4	1.8	0.4
Pirocloro	1.4	1.2	0.9	1.2	1.4	1.7	2.3	1.9	1.0	0.8
Quartzo	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.6	0.1
Plumbogummita	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2
Monazita	0.4	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.8
Óx/hidroxFe	24.4	22.9	26.5	28.4	28.5	26.5	22.2	18.0	16.8	28.5
Anatásio	0.8	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9	1.1	1.1	0.8	0.6
Minerais Zr	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0
Hollandita	0.6	0.5	0.6	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	0.6	1.3
Barita	9.1	11.2	11.6	9.8	9.3	9.3	8.7	8.2	6.3	8.2
Outros	1.8	0.7	0.6	0.8	0.8	0.7	1.0	1.9	3.4	5.3

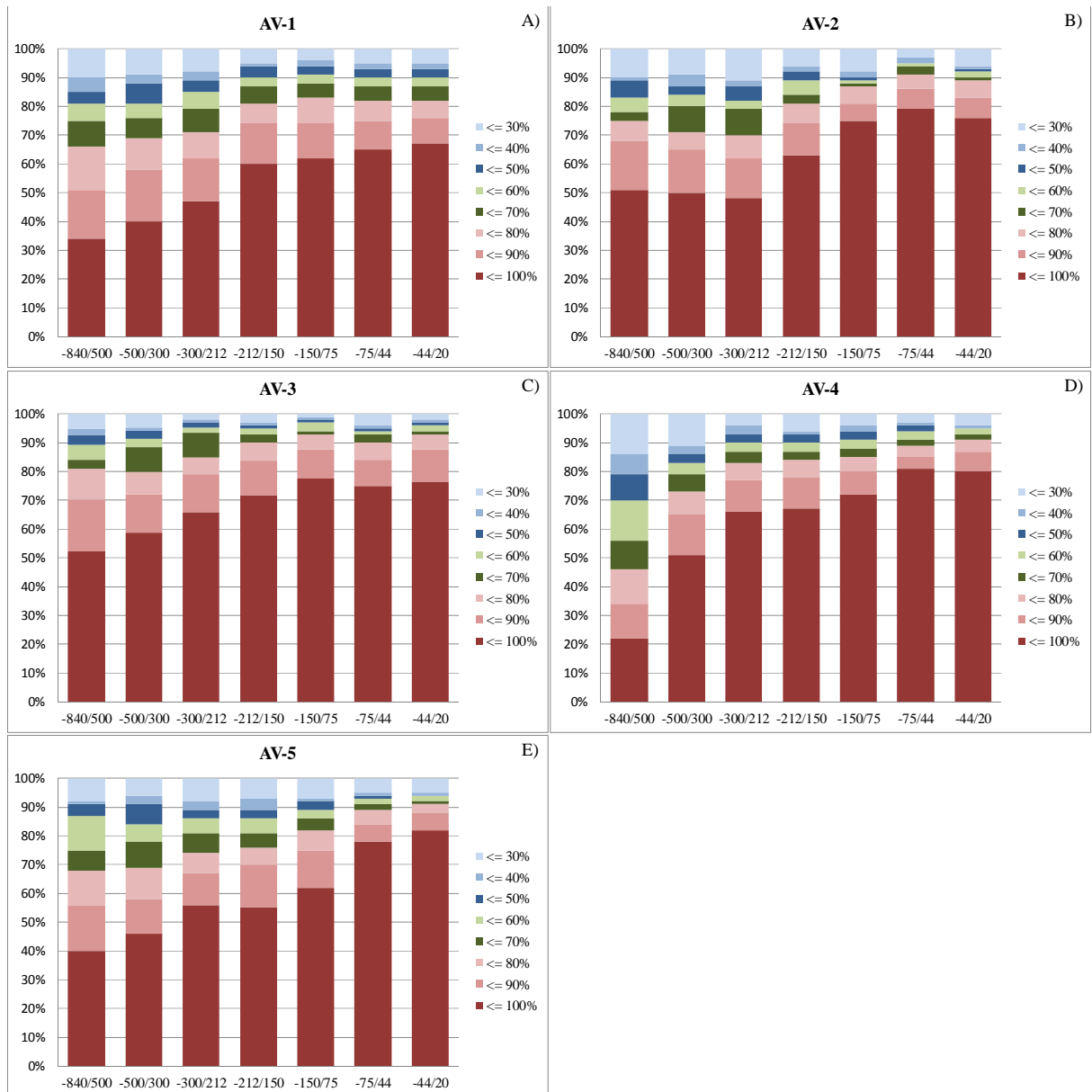


Figura 3.12: Gráficos de liberação da apatita por faixa granulométrica das amostras AV-1, AV-2, AV-3, AV-4 e AV-5. A legenda indica as percentagens de partículas monominerálicas de apatita em cada amostra.

3.6. GÊNESE DA MINERALIZAÇÃO DE APATITA DE ARAXÁ, E DEMAIS MINERAIS DE MINÉRIO

Processos magmáticos, metassomáticos e intempéricos são controles de mineralização de fundamental importância na gênese dos depósitos minerais da Província Ígnea do Alto Paranaíba. Cada processo contribui de forma específica para a concentração dos diversos minerais de minério encontrados na Província. Diversos trabalhos discutem os controles das mineralizações em rocha fresca, isto é, mineralizações primárias, incluindo-se aqui as concentrações magmáticas e metassomáticas (Ribeiro, 2008; Grasso, 2010; Cordeiro et al., 2011b; Barbosa et al., 2012a; Ribeiro et al., 2014). Outros trabalhos enfatizaram os controles do intemperismo sobre a concentração residual em depósitos minerais da Província (e.g. Melo, 1997; Fava, 2001; Imbernon, 1993; Imbernon et al., 1994; Oliveira e Imbernon, 1998; Ferrari, 2000; Toledo et al., 2004; Torres, 1996). Uma discussão mais ampla, buscando estabelecer as relações entre os controles metalogenéticos primários e intempéricos foi apresentada apenas para Catalão I, por Ribeiro (2008) e, de maneira mais geral, por Ribeiro et al. (2014).

O presente item discute os controles primários e intempéricos da mineralização de Araxá a partir dos estudos dos protolitos e da evolução do manto de intemperismo, relacionando-os com os aspectos apresentados na literatura para os demais complexos da Província, de forma a se propôr um modelo genético para as mineralizações em Araxá.

Um magma com composição de flogopita picrito foi interpretado por Brod et al. (2000) como representativo do magma parental dos complexos alcalino-carbonatíticos da Província. A grande afinidade geoquímica e similaridades composicionais entre os flogopita picritos dos complexos de Serra Negra (Grasso, 2010) e Salitre (Barbosa et al., 2012a) com os demais flogopita picritos e kamafigitos da província levaram os autores à conclusão de que essas rochas representam o líquido mais primitivo desses complexos. Em Araxá, diques alterados de flogopita picritos são encontrados nas frentes de lavra do Barreiro e, apesar de não terem sido estudados na presente pesquisa, indicam uma origem similar à dos demais complexos da Província.

A evolução magmática do flogopita picrito observada em Catalão, Serra Negra e Salitre ocorreu por uma combinação de cristalização fracionada, imiscibilidade de líquidos e metassomatismo. As rochas resultantes dessa evolução magmática pertencem a diferentes séries petrogenéticas associadas a complexos alcalino-carbonatíticos de filiação ultrapotássica. Nesta pesquisa, as relações de contato e características petrográficas e mineralógicas indicam que as rochas das diferentes séries petrogenéticas originaram-se de um mesmo magma parental, similar ao observado nos demais complexos da APIP.

Dados de campo, estudos petrográficos e mineralógicos mostram que a maior parte da mineralização de fosfato na mina do Barreiro está contida em bebedouritos ricos em apatita, similares aos bebedouritos evoluídos de Catalão I (Ribeiro, 2008), Tapira (Brod, 1999) e Salitre (Barbosa et al., 2012a). De acordo com os autores acima, esses bebedouritos foram formados a partir da evolução do flogopita picrito que, após uma fase inicial de cristalização fracionada, tornou-se saturado em CO₂ e separou-se em um dois líquidos imiscíveis, um silicático e um carbonatítico. A cristalização fracionada do líquido conjugado silicático produziu cumulados duníticos e bebedouríticos, inicialmente ricos em perovskita e, posteriormente, em apatita.

Os dunitos, apatita peridotitos e olivina apatititos de Araxá representam os membros primitivos da série bebedourítica, formados por acumulação de olivina, apatita e, eventualmente, de perovskita. Após a extração desses minerais, o líquido silicático evolui por cristalização fracionada, levando à extração de perovskita clinopiroxenitos e perovskita bebedouritos, que são protominérios de titânio. Em algumas amostras de rocha fresca dessas rochas, foi observada alteração metassomática de perovskita para anatásio. Esse fenômeno foi amplamente observado em Catalão I; contudo, não foi suficiente para aumento do teor de TiO₂ em larga escala na rocha fresca (Ribeiro et al., 2014).

A cristalização de olivina e de perovskita consomem, respectivamente, MgO e TiO₂ do líquido silicático, levando a uma composição mais evoluída para o líquido residual, a partir do qual são extraídos os bebedouritos ricos em apatita. Estes foram classificados petrograficamente como apatita clinopiroxenitos, perovskita apatititos, diopsídio apatititos e apatititos, e representam diferenciados evoluídos da série bebedourítica. Juntos, formam o principal protominério de fosfato do Barreiro.

Após a extração dos bebedouritos ricos em apatita, a evolução continuada do magma gera os anfibólio bebedouritos, que representam os membros mais evoluídos da série bebedourítica no complexo. Estas rochas contêm feldspato potássico primário, observado apenas nas rochas mais evoluídas da Província, como nos traquitos de Serra Negra (Grasso, 2010), e nos bebedouritos evoluídos e sienitos de Tapira (Brod, 1999). Os anfibólio bebedouritos são, portanto, intermediários entre os bebedouritos evoluídos de Tapira e Salitre (Brod, 1999; Barbosa et al., 2012a) e os traquitos de Serra Negra (Grasso, 2010) e sienitos de Tapira (Brod, 1999).

Os calcita carbonatitos descritos neste trabalho são interpretados como resíduos da cristalização fracionada da série bebedourítica e constituem parte do protominério de apatita, similares aos descritos por Ribeiro et al. (2014) para Catalão.

O metassomatismo potássico em Araxá provocou a flogopitização de parte das rochas da série bebedourítica, mas a textura e a mineralogia dos protolitos estão parcialmente preservadas.

Evidências petrográficas do metassomatismo em Araxá incluem bordas de reação no contato entre carbonatitos e bebedouritos, com crescimento de tetraferroflogopita, alteração de flogopita aluminosa para tetraferroflogopita, alteração de olivina e diopsídio para flogopita, alteração de perovskita para anatásio. Adicionalmente, nos anfibólio bebedouritos foi observada ampla alteração metassomática do diopsídio para anfibólio, principalmente richterita.

Membros da série foscorítica também foram identificados nesta pesquisa: foscoritos ricos em olivina, foscoritos pobres em olivina e nelsonitos com pirocloro. A evolução da série foscorítica foi profundamente discutida por Ribeiro (2008) e Ribeiro et al. (2014). Naqueles trabalhos, a origem do líquido foscorítico é atribuída a um segundo evento de imiscibilidade, quando parte do conjugado carbonatítico produzido a partir do primeiro evento separa-se em um líquido foscorítico e um líquido carbonatítico mais evoluído, rico em magnésio. A extração de olivina, apatita e magnetita do líquido foscorítico leva à geração dos foscoritos ricos em olivina, que constituem o principal responsável pela mineralização primária de fosfato em Catalão I (Grasso et al., 2006, Palmieri et al., 2006, Ribeiro, 2008) e parte importante da mineralização de fosfato em Araxá. O líquido evolui, por cristalização fracionada, a partir do qual são extraídos os foscoritos pobres em olivina. Os dolomita carbonatitos são considerados o resíduo final da evolução dessa série e, junto com as demais rochas, constituem protominérios de fosfato em Araxá.

Nelsonitos podem ser membros evoluídos da série foscorítica, formados após a extração dos foscoritos sem olivina. No entanto, os nelsonitos observados em Araxá possuem grandes quantidades de pirocloro, que sugerem uma origem relacionada a eventos magmáticos de concentração do Nb. De acordo com Ribeiro et al. (2014), elementos de alto potencial iônico, como Ti, Zr, Hf, Nb e Ta, são bastante sensíveis aos processos de imiscibilidade de líquidos. Em sistemas de imiscibilidade silicato-carbonatito, estes elementos mostram preferência pelo magma silicático, conforme sugere, por exemplo, a cristalização de perovskita preferencialmente nos bebedouritos.

Exceto pelo Ti, os demais elementos de alto potencial iônico não formam minerais próprios em quantidades apreciáveis em magmas ultramáficos, mas ocorrem em minerais acessórios e/ou são incorporados em pequenas quantidades como solução sólida em perovskita e outros minerais de Ti. Assim, o processo de cristalização fracionada não conduz ao enriquecimento desses elementos nos cumulados, ainda que eles tenham sido particionados preferencialmente para o magma silicático durante a imiscibilidade de líquidos silicato-carbonato. O conjugado carbonatítico, por outro lado, é pobre em Ti e não cristaliza minerais precoces que possam sequestrar os demais elementos de alto potencial iônico. Logo, estes permanecem no líquido e são progressivamente enriquecidos com a diferenciação do carbonatito. O Nb é um elemento importante neste contexto, visto que as maiores

reservas e produções mundiais estão em complexos carbonatíticos da Província Ígnea do Alto Paranaíba, e Araxá é o maior produtor mundial.

Um evento de imiscibilidade entre líquidos carbonatítico e fosfático leva à concentração do Nb no conjugado foscóritico, a partir do qual são gerados os nelsonitos com pirocloro, que constituem a mineralização primária de Nb de Catalão. Similarmente a Catalão, o depósito de Nb de Araxá ocorre em nelsonitos ricos em pirocloro, e sua gênese está sendo atribuída pelos mesmos processos de geração do depósito de Nb de Catalão.

O resíduo da cristalização do nelsonito com pirocloro identificado em Araxá é um líquido carbonatítico rico em Nb, Ba e ETR, a partir do qual foram gerados os dolomita carbonatitos com pirocloro, norsethita e monazita, que são protominérios de nióbio, barita e terras raras.

O papel do intemperismo foi enriquecer residualmente os minerais de minério no manto de intemperismo desenvolvido sobre os protominérios. O intemperismo dos protominérios de titânio transforma a perovskita em anatásio e produz o enriquecimento supergênico do último no manto de intemperismo. Como consequência, são produzidos teores elevados de TiO_2 . Contudo, os protominérios de titânio ocorrem de forma restrita na mina do Barreiro e, por isso, não produzem uma mineralização em larga escala.

O papel do intemperismo na mineralização de fosfato foi enriquecer residualmente o manto de intemperismo desenvolvido sobre as rochas das séries bebedourítica e foscóritica com apatita, com a lixiviação dos principais elementos contaminantes. Destaca-se que tanto os calcita carbonatitos quanto os dolomita carbonatitos podem ampliar o teor de P_2O_5 no manto de intemperismo, desde que possuam apatita.

O papel do intemperismo na mineralização de nióbio e terras raras é promover o enriquecimento residual do manto de intemperismo em pirocloro e monazita, respectivamente. A forte associação destas fases com grandes quantidades de carbonato no protominério implica em alta eficiência do processo de enriquecimento residual.

O papel do intemperismo na mineralização de barita é efetuar uma ampla dissolução da norsethita, de forma a disponibilizar Ba^{2+} para o meio aquoso; adicionalmente, a oxidação dos sulfetos contidos nos dolomita carbonatitos disponibiliza SO_4^{2-} . Em ambientes mais oxidantes, ocorre a formação de barita supergênica.

A figura 3.13 apresenta o esquema de evolução das séries magmáticas em Araxá, com base no modelo proposto por Ribeiro et al. (2014).

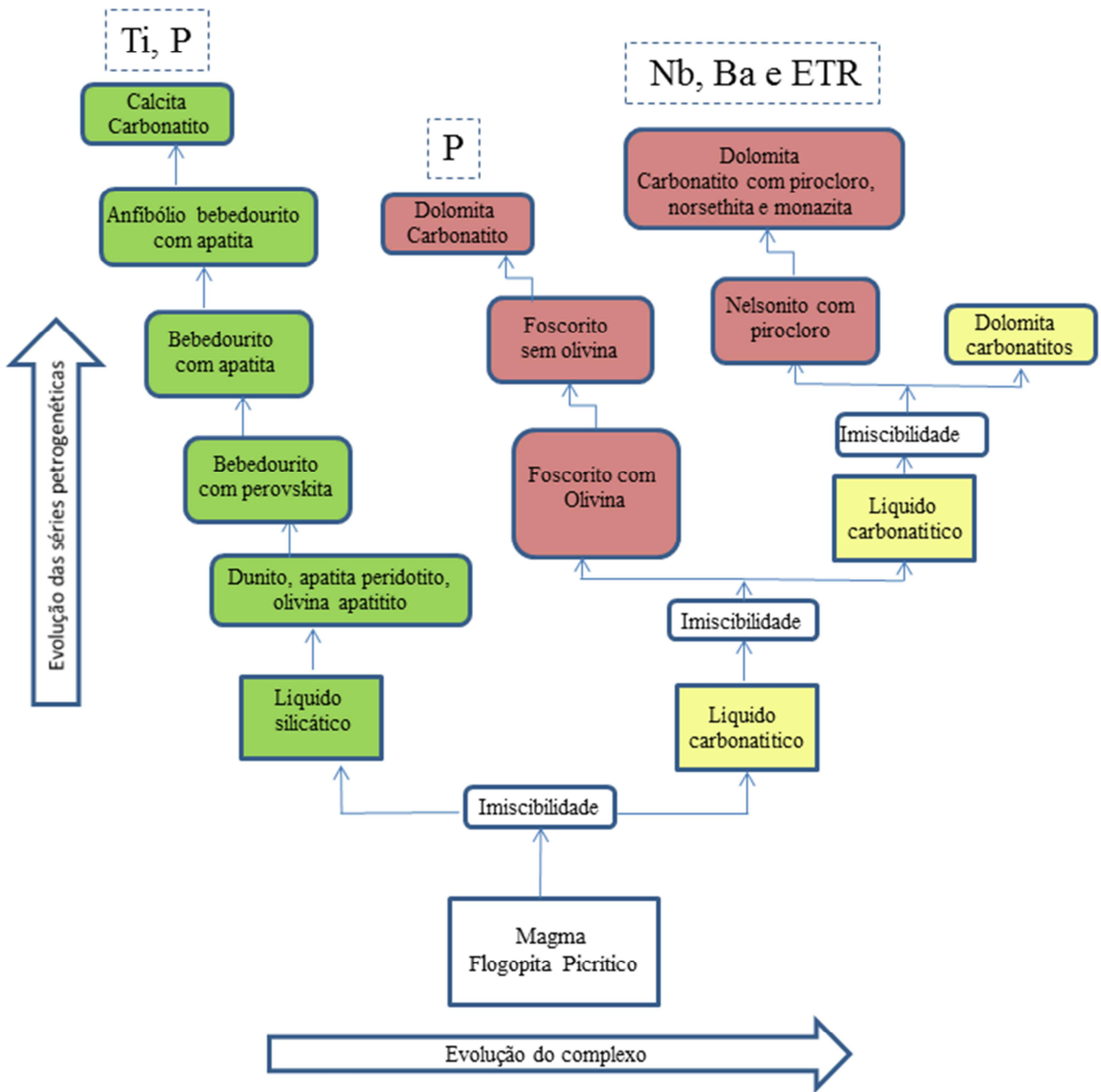


Figura 3.13: Esquema de evolução de Ribeiro et al. (2014), adaptado para as séries magmáticas no Complexo de Araxá, e suas mineralizações. Em verde: série bebedourítica; em rosa: série foscorítica; em amarelo: série carbonatítica.

CAPÍTULO IV - GEOMETALURGIA

4.1. INTRODUÇÃO

Conhecer as características dos protominérios e de seus respectivos produtos gerados na evolução do intemperismo permite obter controles de campo, mineralógicos e químicos para identificação de tipos de minério com assinaturas mineralógicas e químicas específicas. Este Capítulo irá abordar a geometurgia dos minérios da base do manto de intemperismo, buscando identificar minérios com comportamentos similares frente ao processo de concentração mineral e associar os distintos comportamentos às suas características geológicas.

As características geológicas e mineralógicas dos diferentes minérios estão frequentemente relacionadas a dificuldades no beneficiamento mineral. Barros (1997) expôs diversas situações em que as características mineralógicas influenciam substancialmente o processo de concentração da apatita. Por exemplo, a presença de filossilicatos interestratificados no minério acarreta necessidade de maior consumo de soda cáustica para correção do pH. Ao entrarem em equilíbrio com meio aquoso, os filossilicatos interestratificados liberam significativa carga iônica formada por magnésio, ferro e alumínio, alterando as condições físico-químicas do processo de flotação. As possíveis consequências dessas alterações são a redução da recuperação metalúrgica de P_2O_5 e perda de controle do processo. Os filossilicatos interestratificados tendem, ainda, a se concentrar nas frações finas, sendo necessárias adequações no circuito de lamas de acordo com o conteúdo desses minerais. Devido ao enriquecimento de filossilicatos interestratificados nas frações finas, a flotação de grossos e finos separadamente tem alcançado melhores desempenhos.

A dolomita pode prejudicar a qualidade do concentrado fosfático, por não ser deprimida no processo de concentração convencional dos minérios fosfáticos. A dolomita flota facilmente, elevando o conteúdo de MgO do concentrado.

O estudo geometúrgico desenvolvido nesta pesquisa foi realizado com as amostras de testemunhos de sondagem já utilizadas nos estudos sobre o manto de intemperismo (Capítulo III). As amostras foram submetidas a procedimentos de preparação aos ensaios de flotação; diversos parâmetros importantes do ponto de vista geometúrgico foram obtidos durante a etapa de preparação, tais como quantidade de lamas e de magnetita. A preparação das amostras gerou as alíquotas de alimentação da flotação que foram caracterizadas mineralogicamente por QEMSCAN para determinação e quantificação das assembleias mineralógicas. Em seguida, as alíquotas de alimentação da flotação foram submetidas a ensaios de flotação em bancada para determinação da recuperação metalúrgica de P_2O_5 e rendimento mássico. Os resultados obtidos nas etapas de preparação e flotação foram analisados por técnicas estatísticas descritivas e multivariadas e utilizados para a elaboração de modelos geometúrgicos.

4.2. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE TESTEMUNHOS DE SONDAGEM

4.2.1 *Preparação das Amostras e Ensaios de Flotação*

As amostras de testemunhos de sondagem serão referidas neste Capítulo como minério ROM (*Run of Mine*), de forma a distingui-las dos produtos gerados nas etapas de caracterização tecnológica.

As amostras de minério ROM foram inicialmente britadas para atingir granulometria inferior a 1 mm. Em seguida, foram quarteadas para obtenção de alíquotas de 2000 g por amostra para ensaios de flotação.

As alíquotas de 2000 g foram moídas em moinho de barras até atingir granulometria 80% inferior a 106 μm ($P_{80} = 106 \mu\text{m}$). O produto moído alimentou a deslamagem em ciclone de 40 mm de diâmetro, com corte granulométrico entre 15 e 20 μm para separação de dois produtos: o *overflow* da deslamagem, com granulometria inferior à de corte, e o *underflow* da deslamagem, com granulometria superior.

O *overflow* de cada amostra foi descartado e o *underflow*, submetido à separação magnética em campo de 1000 Gauss. O produto magnético foi descartado e o não magnético foi separado para ensaios de flotação em escala de bancada.

Os resultados de flotação tendem a ser melhores quando se executa flotação de grossos e de finos separadamente. Dessa forma, consegue-se incrementar a recuperação da fração grossa e, por conseguinte, de todo o circuito de flotação (Barros, 1997). Buscando-se obter os melhores desempenhos na etapa de flotação, a fração não magnética foi submetida à classificação granulométrica em ciclone para separação das frações grossa e fina aplicando-se corte em 44 μm . A fração grossa foi denominada alimentação da flotação de grossos (ALFG), e a fração fina, alimentação da flotação de finos (ALFF). Nessa classificação, foram admitidas 15 a 20% de massa retida na fração de 44 μm na fração fina e 10% de massa passante em 44 μm na fração grossa. Os dois produtos foram filtrados, secados e quarteados. Alíquotas de 50 g foram direcionadas para determinação da composição mineralógica por QEMSCAN, e alíquotas de 1000 g, para os ensaios de flotação em escala de bancada. A figura 4.1 apresenta o fluxograma da preparação das amostras.

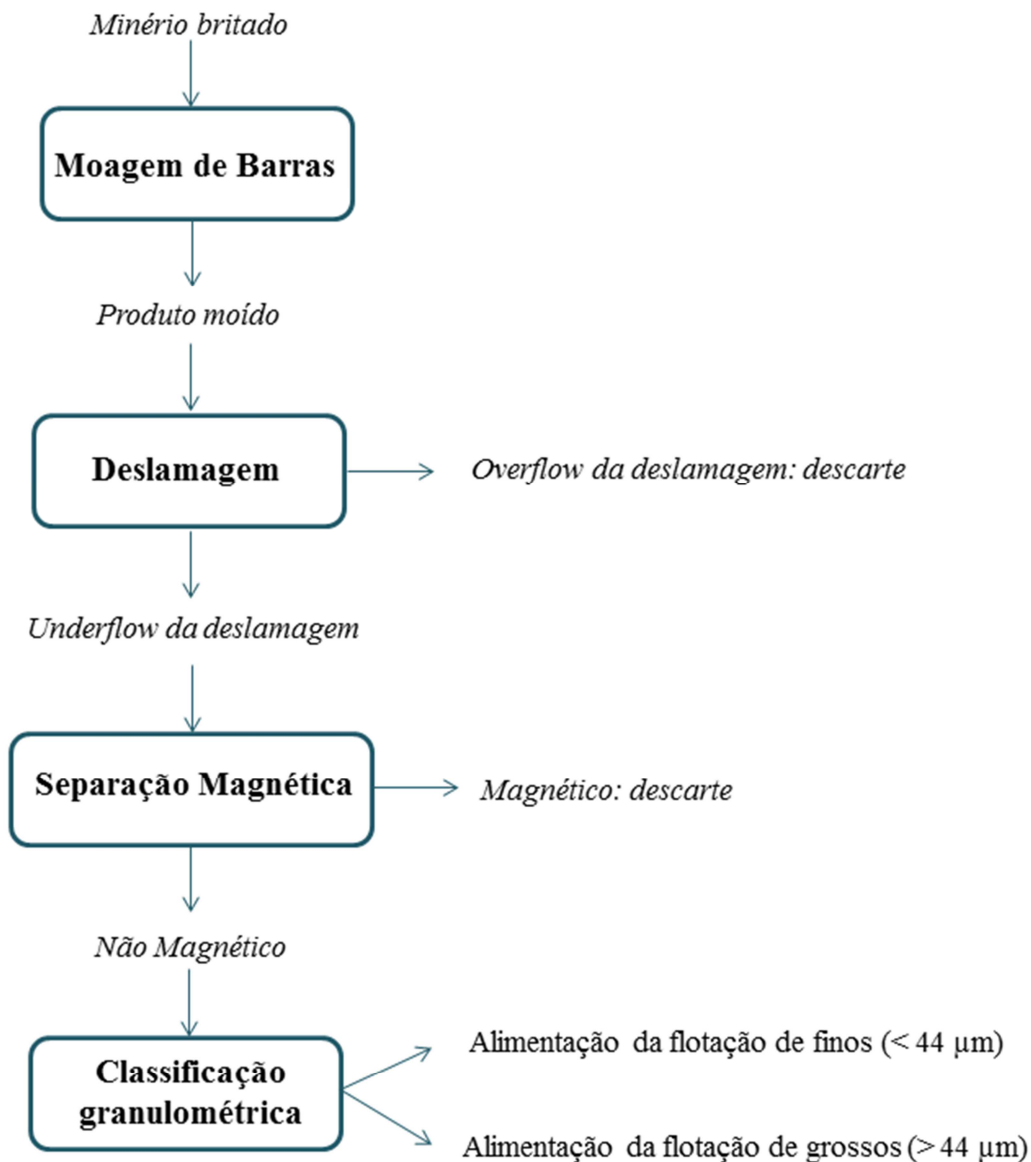


Figura 4.1 – Fluxograma da preparação das amostras de testemunhos de sondagem para ensaios de flotação.

Os ensaios de flotação foram realizados em escala de bancada com célula mecânica. A flotação de apatita não possui seletividade entre apatita, barita e carbonatos, de forma que barita e carbonatos contaminam o concentrado fosfático e diminuem, por consequência, a recuperação metalúrgica de P_2O_5 do teste de flotação. Dessa forma, há necessidade de efetuar flotação reversa de barita, em amostras com conteúdos de BaO no ROM superiores a 1%, e flotação reversa de carbonatos, para amostras com conteúdos de C superiores a 0.8% no ROM, ambas antes da flotação de apatita (Ferreira et al., 2013). As flotações de barita e carbonatos são denominadas reversas porque seus produtos de interesse são os rejeitos, que alimentam as etapas subsequentes de flotação.

Os ensaios de flotação de carbonatos foram realizados com injeção de CO_2 nas células de flotação, com objetivo de promover condições mais favoráveis de adoração dos reagentes pelos

carbonatos, além de causar uma desejável diminuição na dimensão das bolhas e aumento de sua quantidade (Wang e Miller, 2011).

As alíquotas de alimentação da flotação foram submetidas a uma de quatro rotas de flotação, de acordo com o conteúdo de barita e carbonatos: a) flotação direta da apatita; b) flotação reversa de barita seguida de flotação de apatita; c) flotação reversa de carbonatos seguida de flotação de apatita; d) flotações reversas de barita e carbonatos, e flotação de apatita. O fluxograma das etapas de flotação está apresentado na figura 4.2. Observa-se que a flotação de barita é efetuada em apenas uma etapa, a etapa *rougher*; a flotação de carbonatos é efetuada em duas etapas, etapas *rougher* e *cleaner*, e a flotação de apatita, em três etapas, *rougher*, *cleaner* e *re-cleaner*.

Cada alíquota de alimentação da flotação foi submetida a três testes de flotação com diferentes dosagens do coletor de apatita Lupromin 721, buscando-se teores de P_2O_5 no concentrado de apatita próximos a 34%. O depressor fubá de milho gelatinizado foi utilizado numa proporção de 500g/t nos ensaios de flotação das frações grossas e 1000g/t nos ensaios de flotação da fração fina; o coletor de barita Lupromin 715 foi utilizado numa dosagem de 150g/t; o espumante de barita Flotanol 1123/93 foi utilizado numa dosagem de 15g/t; o coletor de carbonatos Liacid 1218 foi utilizado, por sua vez, numa dosagem de 130g/t (Ferreira et al., 2013).

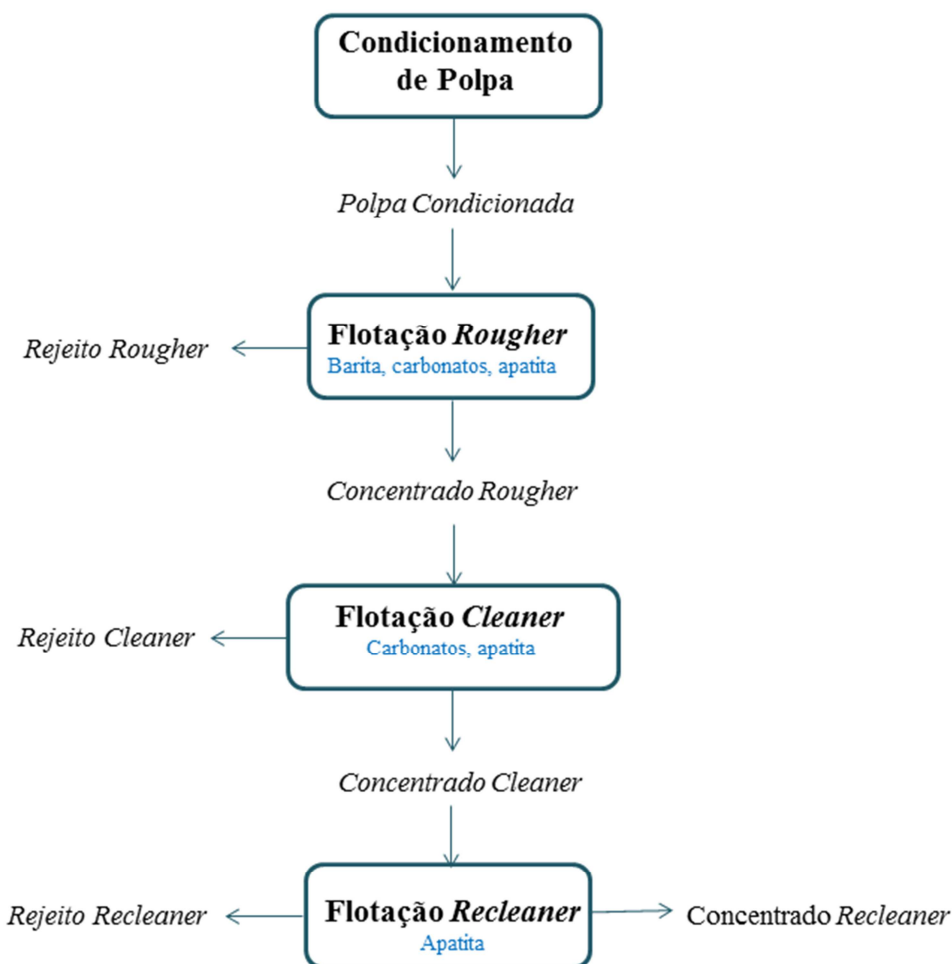


Figura 4.2 – Fluxograma das etapas de flotação em bancada.

4.2.2 Variáveis de Preparação

A preparação das amostras para os testes de flotação fornece parâmetros tecnológicos que podem estar associados às propriedades mineralógicas das amostras. Estas, por sua vez, estão associadas às características de protolitos e horizontes de intemperismo. A busca das correlações entre os resultados obtidos nas etapas de preparação e as características geológicas das amostras analisadas foi feita a partir de uma análise exploratória dos dados utilizando-se técnicas de estatística descritiva.

Inicialmente, os dados foram agrupados nas doze categorias do atributo M_I (macrogrupo de protolito/intemperismo) abordadas no Capítulo III. Um aspecto importante considerado na análise estatística dos dados foi a busca por observações atípicas, que são notavelmente diferentes das demais e afetam os valores médios dos dados. Se não representarem a população à qual pertencem,

as observações atípicas distorcem os resultados estatísticos e devem ser desconsideradas. Contudo, se indicarem uma característica peculiar da população, podem ser benéficas e devem ser mantidas.

As observações atípicas foram analisadas por cada grupo M_I e excluídas da base de dados. Excepcionalmente, optou-se por mantê-las, quando constatada sua representatividade em relação à população à qual pertence. Por exemplo, o conteúdo variável de barita em amostras de uma mesma população reflete a forma de ocorrência da barita em campo, na forma de veios. Uma amostra que não possuir o veio terá conteúdo nulo de barita, enquanto outra amostra da mesma população e que possuir o veio irá apresentar um valor de barita excepcionalmente elevado.

As estatísticas descritivas dos principais resultados obtidos na etapa de preparação estão apresentadas na tabela 4.1. Os gráficos da figura 4.3 foram gerados a partir dos valores médios das amostras por macrogrupo de protolito e por horizonte de intemperismo (M_I).

O gráfico da figura 4.3 A mostra a proporção de material com granulometria já adequada para a etapa subsequente de flotação (80% passante em 106 μm) antes da etapa de moagem. Observa-se uma tendência de maior quantidade de material passante em 106 μm no horizonte micáceo de topo em relação aos demais horizontes. Ou seja, o minério torna-se mais fino à medida que o intemperismo evolui, sendo que em BEB/CC e ANF BEB/CC essa tendência é mais sutil que nos demais macrogrupos.

O gráfico da figura 4.3 B mostra uma tendência de o tempo de moagem necessário para adequação granulométrica diminuir com a evolução do intemperismo, demonstrando que o minério torna-se mais friável com essa evolução. Excepcionalmente, BEB/CC apresenta comportamento contrário, coincidente com o aumento do teor de SiO_2 do minério ROM (tabela 3.4) causado pelo aumento da silicificação desse minério em direção ao horizonte micáceo de topo, com conseqüente endurecimento do material e necessidade de maior tempo de moagem.

Tabela 4.1: Estatísticas descritivas dos resultados obtidos na etapa de preparação de amostras de testemunhos de sondagem para os testes de flotação, por grupo de protolitos e intemperismo (M_I). Pas_106 T=0: material passante em 106 µm antes da moagem; TM: tempo de moagem; Pas_106 µm: material passante em 106 µm após moagem; Massa *Over*: massa do *overflow* da deslamagem; Massa *Under*: massa do *underflow* da deslamagem; P₂O₅ *over*: P₂O₅ *overflow*; P₂O₅ *under*: P₂O₅ *underflow*; Massa Mag: massa da fração magnética; Massa N Mag: massa da fração não magnética; P₂O₅ Mag: P₂O₅ na fração magnética; P₂O₅ N Mag: P₂O₅ na fração não magnética; Massa Grosso: massa da fração não magnética classificada acima de 44 µm; Massa Fino: massa da fração não magnética classificada abaixo de 44 µm; P₂O₅ grosso: P₂O₅ da fração não magnética classificada acima de 44 µm; P₂O₅ fino: P₂O₅ da fração não magnética classificada abaixo de 44 µm. N: número de amostras.

BEB/CC																		
Variável	MICÁCEO DE TOPO (M_I=1)						MICÁCEO DE BASE (M_I=2)						ROCHA ALTERADA (M_I=3)					
	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
Pas_106 T=0 (%)	11	51.21	42.07	60.59	46.17	56.12	10	50.68	36.96	62.65	46.10	55.12	3	51.65	48.67	53.79	48.67	53.79
TM (min)	11	18.18	11.00	25.00	15.50	20.00	7	16.57	15.00	18.00	15.00	17.50	3	12.00	11.00	14.00	11.00	14.00
Pas_106µm (%)	11	79.56	77.88	81.90	78.61	81.01	10	79.50	77.64	82.25	78.71	80.25	3	80.15	78.65	82.15	78.65	82.15
Massa <i>Over</i> (%)	11	44.00	32.00	53.00	40.00	48.42	11	42.15	33.18	51.69	36.72	46.88	4	35.41	34.62	36.25	34.75	36.08
Massa <i>Under</i> (%)	11	56.00	47.00	68.00	51.58	60.00	11	57.85	48.31	66.82	53.13	63.28	4	64.59	63.75	65.38	63.92	65.26
P ₂ O ₅ <i>Over</i> (%)	12	5.95	2.82	10.44	3.77	8.08	12	5.89	2.58	10.65	3.77	7.79	4	4.16	2.00	6.25	2.50	5.83
P ₂ O ₅ <i>Under</i> (%)	12	12.44	7.72	20.87	9.58	14.95	12	12.20	6.03	19.74	8.83	15.44	4	8.01	5.24	11.57	5.61	10.42
Massa Mag (%)	12	11.34	3.49	19.00	7.41	15.56	11	7.20	1.03	15.33	3.28	9.13	4	12.96	11.64	15.27	11.87	14.06
Massa N Mag (%)	12	88.66	81.00	96.51	84.44	92.59	11	92.80	84.67	98.97	90.87	96.72	4	87.04	84.73	88.36	85.94	88.14
P ₂ O ₅ Mag (%)	11	1.14	0.28	3.24	0.34	1.57	10	0.92	0.16	1.51	0.52	1.31	4	0.50	0.00	0.77	0.27	0.74
P ₂ O ₅ N Mag (%)	12	13.03	7.72	23.67	8.94	17.37	12	13.07	6.34	20.85	8.11	17.40	4	9.21	6.32	12.41	6.77	11.65
Massa Grosso (%)	11	84.87	81.00	89.52	83.41	86.07	12	86.05	79.64	93.71	82.77	88.73	4	87.43	85.95	88.58	86.33	88.53
Massa Fino (%)	12	14.59	10.09	24.41	10.61	18.50	12	13.95	6.29	20.36	11.28	17.24	4	12.57	11.42	14.05	11.47	13.67
P ₂ O ₅ Grosso (%)	11	15.13	10.48	19.00	13.93	16.59	12	14.45	6.46	23.70	10.88	17.68	4	10.14	6.95	14.14	7.29	13.00
P ₂ O ₅ Fino (%)	12	8.78	4.64	13.61	6.28	11.72	12	8.20	3.74	14.62	5.32	10.85	4	5.71	3.34	8.71	3.78	7.65

ANF BEB/CC																		
Variável	MICÁCEO DE TOPO (M_I=4)						MICÁCEO DE BASE (M_I=5)						ROCHA ALTERADA (M_I=6)					
	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
Pas_106 T=0 (%)	4	50.93	49.29	52.48	49.47	52.40	12	51.35	39.42	59.93	48.42	55.20	3	49.76	45.44	58.01	45.44	58.01
TM (min)	4	12.88	11.50	14.00	12.25	13.50	12	14.17	7.00	20.50	11.75	16.50	3	14.50	12.00	17.00	12.00	17.00
Pas_106µm (%)	4	79.32	79.24	79.39	79.27	79.37	13	80.05	78.24	82.06	79.12	80.62	3	80.30	79.12	80.90	79.12	80.90
Massa <i>Over</i> (%)	5	44.26	37.96	50.00	40.00	47.69	13	39.34	17.50	55.00	33.44	46.50	3	39.22	32.35	47.38	32.35	47.38
Massa <i>Under</i> (%)	5	55.74	50.00	62.04	52.31	60.00	13	60.66	45.00	82.50	53.50	66.56	3	60.79	52.63	67.65	52.63	67.65
P ₂ O ₅ <i>Over</i> (%)	4	6.44	4.31	7.97	5.21	7.68	12	5.42	3.25	10.74	3.75	6.15	3	6.01	4.98	7.35	4.98	7.35
P ₂ O ₅ <i>Under</i> (%)	3	15.10	14.91	15.20	14.91	15.20	13	10.87	5.80	18.74	7.48	15.66	3	10.59	9.51	11.62	9.51	11.62
Massa Mag (%)	3	1.77	1.49	2.04	1.49	2.04	12	1.65	0.07	4.90	0.52	2.26	3	2.21	0.19	4.51	0.19	4.51
Massa N Mag (%)	3	98.23	97.96	98.51	97.96	98.51	12	98.35	95.10	99.93	97.74	99.48	3	97.79	95.49	99.81	95.49	99.81
P ₂ O ₅ Mag (%)	5	1.24	0.39	1.96	0.80	1.60	13	1.80	0.65	4.03	1.26	2.66	3	1.15	0.44	1.91	0.44	1.91
P ₂ O ₅ N Mag (%)	5	14.26	8.12	19.95	12.79	16.54	13	10.26	4.20	20.23	6.27	14.20	3	10.48	8.97	11.31	8.97	11.31
Massa Grosso (%)	4	85.34	84.03	86.60	84.22	86.47	11	86.93	83.16	91.67	83.50	90.11	3	87.23	86.83	87.75	86.83	87.75
Massa Fino (%)	3	16.98	15.98	18.16	15.98	18.16	13	11.52	5.56	19.66	7.50	17.19	3	12.77	12.25	13.17	12.25	13.17
P ₂ O ₅ Grosso (%)	4	14.66	13.40	15.97	13.54	15.78	11	13.07	8.33	16.84	9.89	16.50	3	11.80	10.02	13.25	10.02	13.25
P ₂ O ₅ Fino (%)	4	8.69	6.57	10.62	7.29	10.08	13	7.28	4.21	12.79	4.91	8.71	3	7.55	6.72	8.75	6.72	8.75

Tabela 4.1: Continuação.

BEB/DC																		
MICÁCEO DE TOPO (M_I=7)						MICÁCEO DE BASE (M_I=8)						ROCHA ALTERADA (M_I=9)						
Variável	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
Pas_106 T=0 (%)	16	46.37	31.36	60.28	39.71	53.67	28	44.01	26.00	62.27	37.68	51.62	19	38.06	28.88	54.14	31.21	45.69
TM (min)	16	14.41	8.00	22.00	10.50	18.25	28	16.73	9.00	24.00	13.50	21.00	19	17.03	12.00	22.00	15.00	19.00
Pas_106µm (%)	15	79.77	77.00	82.44	78.40	81.47	27	79.79	75.70	84.68	78.70	81.19	19	79.29	73.78	82.37	77.31	81.60
Massa <i>Over</i> (%)	16	36.07	27.50	47.10	31.58	41.78	26	34.76	23.58	46.07	30.88	37.08	19	31.70	15.75	47.86	25.70	40.30
Massa <i>Under</i> (%)	16	63.45	52.90	72.50	58.23	67.37	26	65.24	53.93	76.42	62.92	69.12	19	68.30	52.14	84.25	59.70	74.30
P ₂ O ₅ <i>Over</i> (%)	16	8.64	4.78	14.77	6.65	10.45	28	6.48	3.07	12.04	4.71	8.02	18	5.91	2.93	11.06	4.31	6.78
P ₂ O ₅ <i>Under</i> (%)	16	14.34	6.48	24.13	10.40	16.53	28	10.65	4.70	18.45	7.28	14.96	17	8.35	4.68	15.89	6.27	10.08
Massa Mag (%)	15	11.26	2.92	22.68	6.93	15.86	27	10.23	3.30	24.24	6.08	13.86	19	10.81	1.16	26.59	6.07	14.59
Massa N Mag (%)	15	88.74	77.32	97.08	84.14	93.07	27	89.77	75.76	96.70	86.14	93.92	19	89.19	73.41	98.84	85.41	93.93
P ₂ O ₅ Mag (%)	16	1.75	0.54	3.76	0.72	2.42	28	1.05	0.31	2.34	0.67	1.42	18	0.70	0.20	1.90	0.44	0.85
P ₂ O ₅ N Mag (%)	16	15.69	7.68	29.46	10.89	18.37	28	11.52	4.64	22.36	7.31	15.16	18	9.74	5.53	19.34	7.32	11.10
Massa Grosso (%)	16	84.53	74.73	88.94	82.74	87.59	28	82.09	71.88	88.26	78.70	85.49	19	81.27	71.67	88.79	75.50	85.62
Massa Fino (%)	16	15.47	11.06	25.27	12.42	17.26	28	17.91	11.74	28.12	14.51	21.30	18	10.82	6.32	21.22	8.00	11.95
P ₂ O ₅ Grosso (%)	16	16.85	8.23	32.85	11.57	19.87	28	12.88	4.88	25.54	8.01	17.88	18	18.47	11.21	28.33	14.38	24.66
P ₂ O ₅ Fino (%)	16	11.28	5.59	21.92	8.31	13.20	28	8.80	4.12	15.53	6.02	11.75	19	8.76	4.21	24.40	5.73	11.54
FCR/DC																		
MICÁCEO DE TOPO (M_I=10)						MICÁCEO DE BASE (M_I=11)						ROCHA ALTERADA (M_I=12)						
Variável	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
Pas_106 T=0 (%)	6	50.69	45.20	60.14	46.00	51.97	3	53.02	50.00	57.69	50.00	57.69	5	31.49	27.27	40.44	27.35	32.86
TM (min)	5	15.10	13.50	17.00	14.00	16.00	3	13.00	9.00	16.00	9.00	16.00	5	16.90	15.00	19.00	16.00	17.50
Pas_106µm (%)	6	80.00	78.55	81.60	79.54	80.60	3	80.95	80.00	82.20	80.00	82.20	5	81.57	80.88	82.20	81.30	81.85
Massa <i>Over</i> (%)	6	38.83	35.58	42.89	35.69	41.09	3	38.83	30.71	45.35	30.71	45.35	8	23.17	17.50	31.56	18.41	27.48
Massa <i>Under</i> (%)	6	61.17	57.11	64.42	58.91	64.31	3	61.17	54.65	69.29	54.65	69.29	8	76.83	68.44	82.50	72.52	81.60
P ₂ O ₅ <i>Over</i> (%)	6	11.70	8.56	16.26	8.58	13.91	3	9.47	7.06	10.79	7.06	10.79	7	5.93	4.11	7.42	4.67	7.00
P ₂ O ₅ <i>Under</i> (%)	6	18.56	13.30	25.13	15.19	19.97	3	15.63	12.96	20.30	12.96	20.30	7	6.27	5.20	7.12	5.92	6.84
Massa Mag (%)	5	10.54	2.60	15.41	7.49	15.26	3	21.31	13.46	35.42	13.46	35.42	8	18.28	2.68	35.49	7.38	29.63
Massa N Mag (%)	5	89.46	84.59	97.40	84.74	92.51	3	78.69	64.58	86.54	64.58	86.54	8	81.72	64.51	97.32	70.38	92.63
P ₂ O ₅ Mag (%)	6	3.05	2.75	3.32	2.80	3.24	3	4.28	1.69	8.25	1.69	8.25	8	2.21	0.96	2.95	1.46	2.88
P ₂ O ₅ N Mag (%)	6	21.30	15.39	28.55	16.90	24.08	3	18.25	13.31	22.75	13.31	22.75	6	7.34	6.58	8.09	6.83	7.97
Massa Grosso (%)	6	77.68	71.33	83.56	74.66	81.09	3	83.43	82.00	84.31	82.00	84.31	8	84.14	78.51	88.71	80.74	87.76
Massa Fino (%)	6	22.97	16.97	30.43	18.34	25.14	3	16.57	15.69	18.00	15.69	18.00	7	7.23	5.72	8.14	6.64	7.78
P ₂ O ₅ Grosso (%)	6	22.32	16.44	28.67	18.91	25.34	3	19.36	14.16	25.05	14.16	25.05	8	15.86	11.29	21.49	12.24	19.27
P ₂ O ₅ Fino (%)	5	13.49	10.25	15.92	12.93	15.27	3	12.92	8.84	16.17	8.84	16.17	7	6.75	3.99	8.45	4.48	8.35

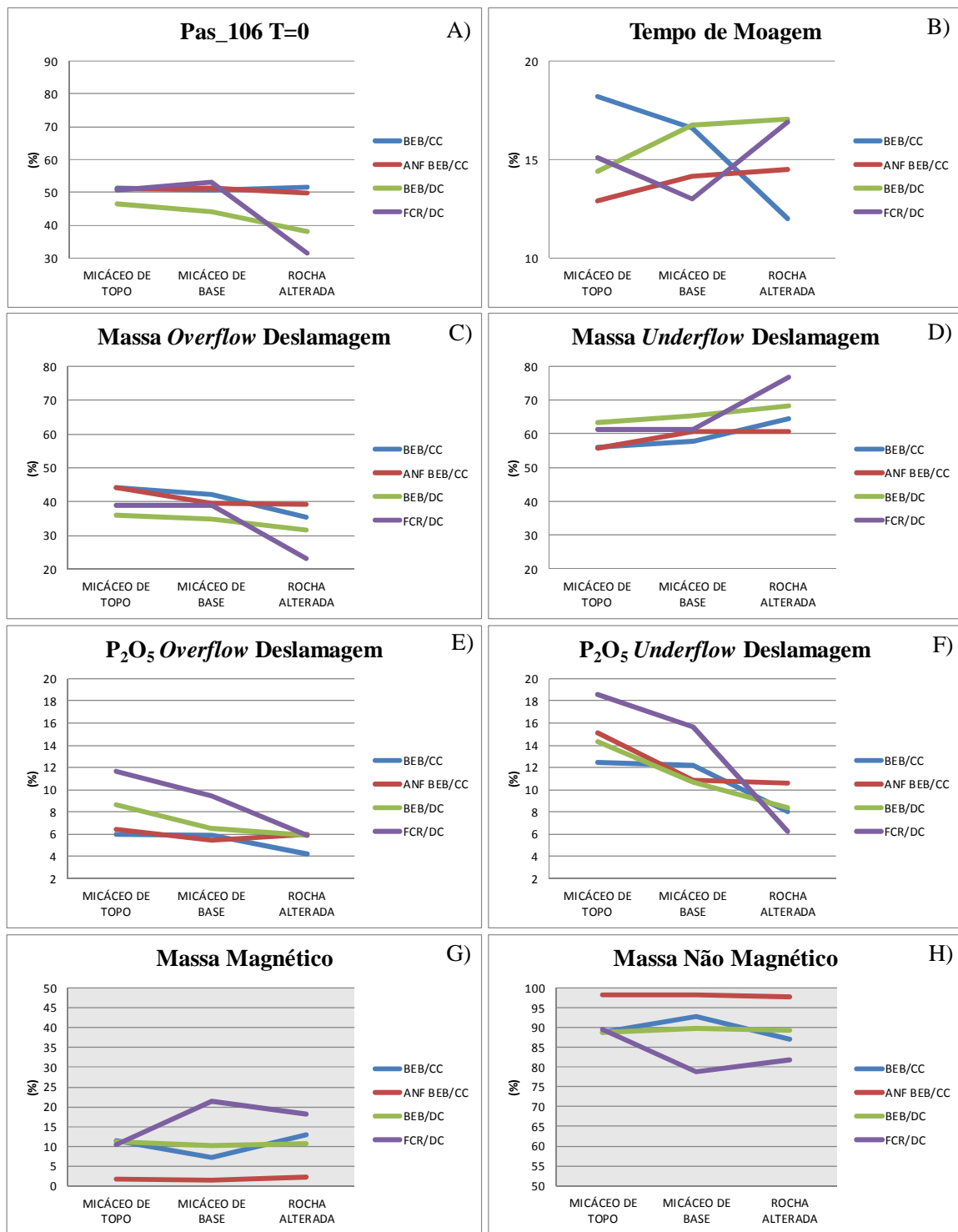


Figura 4.3: Valores médios das variáveis obtidas na etapa de preparação de amostras de testemunhos de sondagem para os ensaios de flotação, por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo (M_I). Pas_106 T=0: material passante em 106 μm antes da moagem; Massa Grosso: massa da fração não magnética classificada acima de 44 μm ; Massa Fino: massa da fração não magnética classificada abaixo de 44 μm ; P₂O₅ grosso: P₂O₅ da fração não magnética classificada acima de 44 μm ; P₂O₅ fino: P₂O₅ da fração não magnética classificada abaixo de 44 μm .

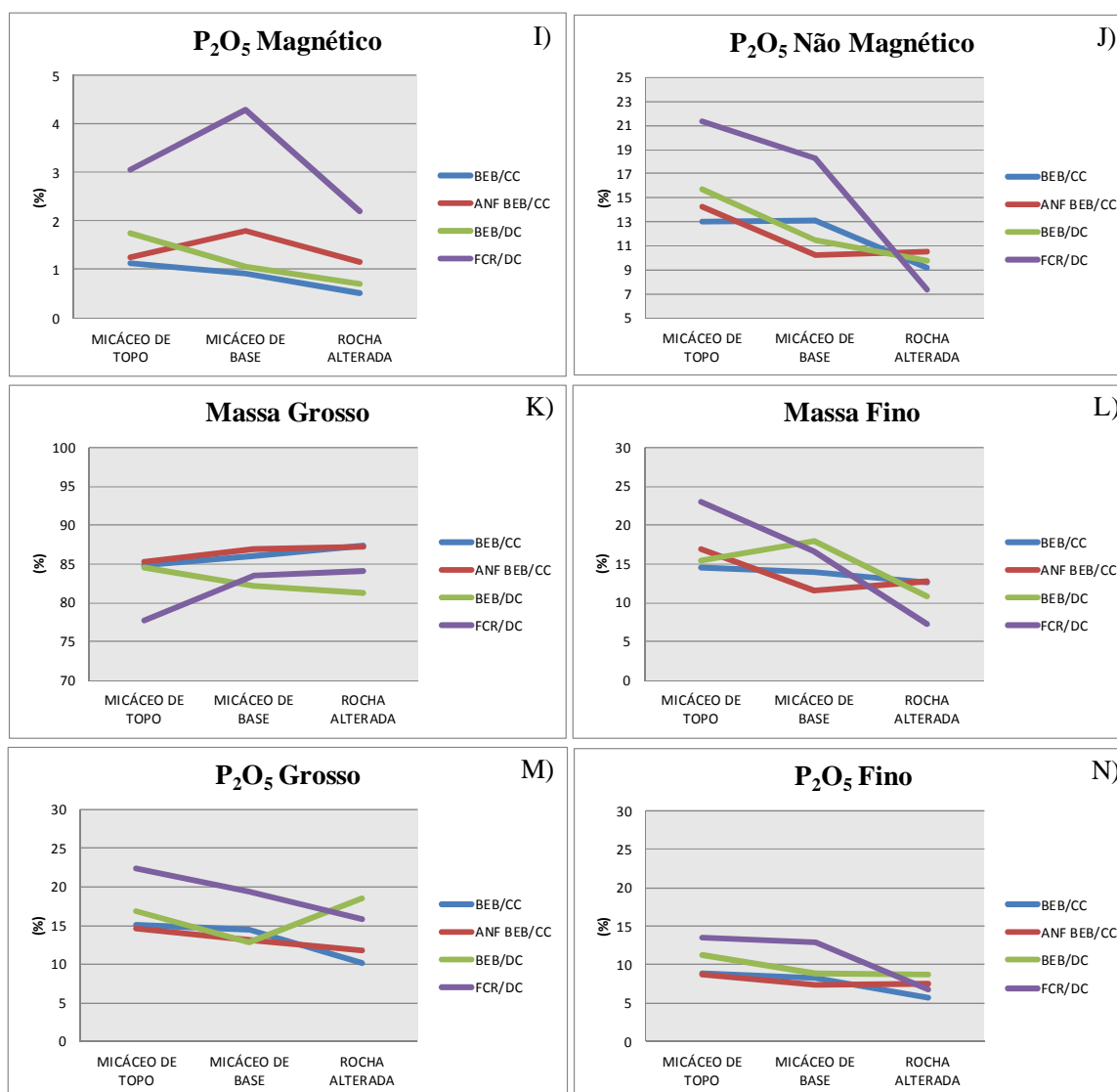


Figura 4.3: Continuação.

O gráfico 4.3 C mostra uma tendência de a massa do *overflow* aumentar da rocha alterada em direção ao micáceo de topo em todos os macrogrupos de protolitos, excetuando-se FCR/DC com valores equivalentes no micáceo de base e no micáceo de topo. A tendência geral demonstra que, quanto mais alterada está a amostra, maior sua quantidade de lamelas que é devida, por sua vez, ao aumento na quantidade de goethita e vermiculita com a evolução do intemperismo. O gráfico da figura 4.3 D apresenta as variações de massa do *underflow*, com padrão complementar ao apresentado no gráfico anterior.

O gráfico 4.3 E mostra uma tendência geral de o P₂O₅ do *overflow* ser maior à medida que se avança no intemperismo, sendo que os valores absolutos de P₂O₅ nesse produto da preparação decrescem na seguinte ordem: FCR/DC, BEB/DC, ANF BEB/CC e BEB/CC. O aumento do P₂O₅ no *overflow* está controlado principalmente pelos teores de P₂O₅ do minério ROM: os grupos M_I

com valores elevados de P_2O_5 estão associados aos teores mais elevados de P_2O_5 no *overflow*. Também pode ser considerado um aporte de fosfatos secundários do grupo da plumbogummita descartados na lama, devido à sua granulometria predominantemente inferior à granulometria de corte do *overflow* da deslamagem.

O gráfico 4.3 F mostra um aumento do P_2O_5 no *underflow* com o avanço no intemperismo, refletindo o enriquecimento supergênico da apatita; FCR/DC apresenta os maiores valores absolutos, alcançando 18.6% no micáceo de topo. Observa-se que o *underflow* está controlado tanto pelo horizonte de intemperismo, sendo maior quanto mais evoluído for o horizonte, quanto pelo teor de ROM, sendo maior quanto mais rico for o minério ROM.

A maior massa de produto magnético (figura 4.3 G) foi obtida em FCR/DC. Valores intermediários foram observados em BEB/DC e BEB/CC, e os valores mais baixos, em ANF BEB/CC. A massa de produto não magnético, por sua vez, apresenta um padrão complementar ao padrão da massa do magnético, ou seja, maiores valores em ANF BEB/CC e menores em FCR/DC.

O gráfico 4.3 I mostra que os teores de P_2O_5 dos produtos magnéticos são bastante baixos em BEB/DC, ANF BEB/CC e BEB/CC, refletindo a baixa quantidade de apatita nesses produtos; por outro lado, FCR/DC alcança mais de 4% de P_2O_5 . Esse é o grupo que possui a maior quantidade de magnetita no ROM, e os valores mais elevados de P_2O_5 no produto magnético sugerem possível arraste de grãos de apatita durante a separação, ou que uma parcela de grãos mistos de magnetita com apatita tenha preferência pela fração magnética. Nota-se que a perda de P_2O_5 nos produtos magnéticos é irrelevante nos macrogrupos com associação de bebedouritos, mas pode ser considerável em FCR/DC.

O Gráfico 4.3 J mostra uma tendência de aumento do P_2O_5 nos produtos não magnéticos da rocha alterada ao micáceo de topo; adicionalmente, os valores de P_2O_5 são mais elevados em FCR/DC e decrescem em direção a ANF BEB/CC.

A massa de grossos tende a decrescer da rocha alterada em direção ao micáceo de topo (figura 4.3 K) e a massa de finos, conseqüentemente, crescer (figura 4.3 L). Esse padrão ocorre principalmente pelo conteúdo crescente de goethita e filossilicatos interestratificados finos com a evolução do intemperismo. BEB/DC apresenta, excepcionalmente, um aumento da massa de grossos com a evolução do intemperismo, mas a causa desse comportamento não foi estabelecida.

O conteúdo de P_2O_5 na fração de grossos (figura 4.3 M) e de finos (figura 4.3 N) cresce em direção ao micáceo de topo, é maior em FCR/DC e menor em ANF BEB/CC, sendo portanto, controlado pelos teores de P_2O_5 do ROM.

4.2.3 Alimentação da Flotação de Grossos (ALFG)

A alimentação da flotação de grossos é o produto não magnético classificado com granulometria superior a 44 μm . A figura 4.4 A apresenta o histograma de frequência de massas de ALFG global, ou seja, sem separação por grupos M_I, e a tabela 4.2, as estatísticas descritivas dos valores de massa de ALFG global.

Em média, 83.75% da massa da fração não magnética é classificada para a fração de grossos, que alimenta o circuito de flotação de grossos. A distribuição apresenta uma ligeira assimetria negativa, que reflete valores de mediana sutilmente maiores que os de média (84.67% e 83.75%, respectivamente). Os quartis mostram que 50% das amostras possuem a partição da massa de grossos entre 81.39% e 86.83%; a ALFG é, portanto, a fração granulométrica com maior influência nos resultados globais dos testes de flotação.

A figura 4.4 B apresenta o histograma de frequência de teores de P_2O_5 da ALFG global e a tabela 4.2, as estatísticas descritivas do teor de P_2O_5 de ALFG global. A distribuição dos teores mostra pequena assimetria positiva, indicando valor de média maior que o de mediana (13.42% e 12.44%, respectivamente). Os quartis mostram que 50% das amostras possuem teor de P_2O_5 na fração grossa entre 8.47% e 17.60%.

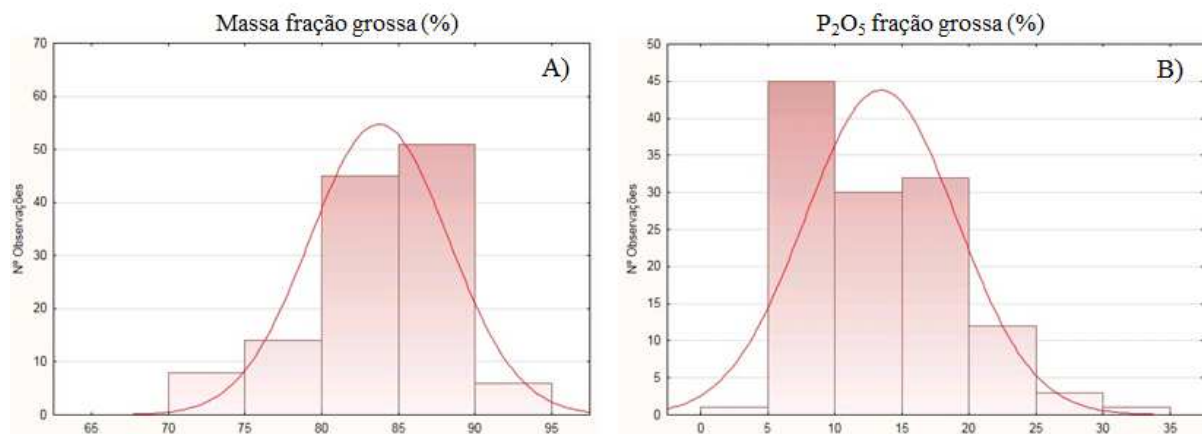


Figura 4.4: Estatísticas descritivas da alimentação de grossos global (sem separação por grupo M_I). A) Histograma de frequências das massas de ALFG global; B) Histograma de frequência dos teores de P_2O_5 de ALFG global.

Tabela 4.2: Estatísticas descritivas da massa e do teor de P_2O_5 de ALFG global.

Variáveis (%)	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	Desvio Padrão
Massa Grosso	124	83.75	84.67	71.33	93.71	81.39	86.82	4.52
P_2O_5 Grosso	124	13.42	12.44	4.88	30.43	8.47	17.60	5.65

A tabela 4.3 apresenta os valores médios dos principais óxidos analisados, e teor de C, para as alíquotas de alimentação da flotação de grossos (ALFG) por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo. A tabela 4.4 e a figura 4.5 apresentam as diferenças entre teores médios dos produtos ALFG e do minério ROM, calculados por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo. A tabela 4.5 e a figura 4.6 apresentam os conteúdos dos principais minerais na ALFG por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo.

Tabela 4.3: Estatísticas descritivas dos principais óxidos analisados, e teor de C, para as alíquotas de alimentação da flotação de grossos (ALFG) por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo. N: número de amostras.

BEB/CC																		
MICÁCEO DE TOPO (M_I=1)						MICÁCEO DE BASE (M_I=2)						ROCHA ALTERADA (M_I=3)						
Variável	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
SiO ₂	12	27.56	10.83	50.68	16.48	35.18	12	20.33	7.47	27.68	17.01	25.87	4	18.20	16.10	19.82	16.88	19.52
Al ₂ O ₃	12	2.15	1.10	3.89	1.30	3.04	12	2.71	0.80	4.77	2.12	3.29	4	2.53	1.88	2.88	2.20	2.87
Fe ₂ O ₃	12	11.02	6.24	15.38	9.43	13.74	12	10.79	4.98	15.79	8.63	13.58	4	7.10	4.71	10.70	5.51	8.70
MgO	12	5.36	1.88	11.87	2.97	7.21	11	8.21	4.89	12.17	7.23	9.39	4	9.99	5.48	13.91	6.50	13.48
CaO	12	20.18	13.39	33.94	15.26	25.45	12	20.03	7.75	33.19	14.97	24.35	4	27.47	24.80	31.39	25.70	29.24
TiO ₂	12	7.74	3.44	12.50	6.12	9.99	12	6.21	1.56	10.59	4.43	8.02	4	3.63	2.88	4.03	3.32	3.94
P ₂ O ₅	12	14.59	10.09	24.41	10.61	18.50	12	14.45	6.46	23.70	10.88	17.68	4	10.14	6.95	14.14	7.29	13.00
BaO	12	1.52	0.18	4.26	0.59	2.10	12	4.52	0.18	14.71	0.42	7.82	4	1.22	0.16	3.91	0.20	2.25
C	10	0.36	0.00	0.77	0.20	0.56	9	0.24	0.16	0.39	0.18	0.28	4	3.66	1.87	4.78	2.78	4.55
ANF BEB/CC																		
MICÁCEO DE TOPO (M_I=4)						MICÁCEO DE BASE (M_I=5)						ROCHA ALTERADA (M_I=6)						
Variável	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
SiO ₂	5	24.34	16.99	34.72	20.98	24.61	13	37.06	16.86	64.64	29.98	47.29	3	31.68	29.48	33.21	29.48	33.21
Al ₂ O ₃	3	2.43	2.27	2.57	2.27	2.57	13	3.02	1.01	5.84	2.14	3.68	3	2.48	0.84	4.18	0.84	4.18
Fe ₂ O ₃	5	8.99	7.21	11.85	7.68	9.86	13	9.23	5.35	16.76	6.54	9.35	3	9.10	7.94	10.36	7.94	10.36
MgO	5	4.67	3.00	5.98	4.24	5.58	12	5.81	2.40	8.86	4.75	7.03	3	8.59	7.42	9.64	7.42	9.64
CaO	3	24.85	24.30	25.95	24.30	25.95	13	16.79	7.81	29.02	11.79	24.31	3	21.28	17.00	24.52	17.00	24.52
TiO ₂	4	7.19	5.73	9.45	5.96	8.43	13	5.61	1.37	8.16	4.07	6.92	3	5.01	4.13	5.71	4.13	5.71
P ₂ O ₅	3	16.98	15.98	18.16	15.98	18.16	13	11.52	5.56	19.66	7.50	17.19	3	11.80	10.02	13.25	10.02	13.25
BaO	3	0.23	0.22	0.24	0.22	0.24	12	0.22	0.14	0.32	0.19	0.25	3	0.11	0.06	0.17	0.06	0.17
C	5	0.26	0.00	0.53	0.13	0.35	13	0.24	0.00	0.55	0.15	0.38	3	0.21	0.19	0.22	0.19	0.22
BEB/DC																		
MICÁCEO DE TOPO (M_I=7)						MICÁCEO DE BASE (M_I=8)						ROCHA ALTERADA (M_I=9)						
Variável	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
SiO ₂	16	22.33	7.94	39.58	17.64	27.25	28	28.54	12.86	47.28	21.64	34.28	19	23.46	12.02	36.93	18.28	28.58
Al ₂ O ₃	15	2.32	1.07	3.02	1.85	2.73	27	2.73	1.57	3.87	2.17	3.21	19	2.40	1.00	3.90	1.55	2.99
Fe ₂ O ₃	16	11.86	3.12	27.28	9.48	13.67	28	12.21	5.76	17.99	9.90	13.71	19	9.70	5.35	17.74	7.51	11.65
MgO	16	6.36	2.23	11.52	4.58	7.84	28	9.07	3.56	17.93	7.11	11.61	19	11.40	4.57	18.88	9.74	13.41
CaO	15	22.98	11.92	33.95	19.99	28.72	28	18.91	7.21	36.14	13.72	24.46	19	21.56	14.69	37.42	17.09	26.93
TiO ₂	16	4.21	1.32	10.79	3.56	4.46	25	4.11	1.45	6.50	3.43	4.78	19	2.82	0.99	5.53	1.76	3.62
P ₂ O ₅	15	15.79	8.23	23.73	9.02	19.66	28	12.88	4.88	25.54	8.01	17.88	18	10.82	6.32	21.22	8.00	11.95
BaO	16	0.61	0.09	5.32	0.16	0.42	25	0.64	0.11	2.70	0.20	0.95	16	0.72	0.16	1.87	0.26	1.16
C	14	0.31	0.17	0.45	0.27	0.35	28	0.39	0.17	0.70	0.26	0.49	18	1.83	0.65	3.28	1.17	2.22
FCR/DC																		
MICÁCEO DE TOPO (M_I=10)						MICÁCEO DE BASE (M_I=11)						ROCHA ALTERADA (M_I=12)						
Variável	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
SiO ₂	4	9.06	8.48	9.98	8.62	9.50	3	12.55	9.65	15.30	9.65	15.30	8	17.17	6.07	26.29	10.65	22.95
Al ₂ O ₃	6	2.26	1.15	3.86	1.44	2.46	3	1.90	1.40	2.42	1.40	2.42	8	2.49	0.65	5.08	1.35	3.53
Fe ₂ O ₃	6	9.67	8.01	11.18	9.22	10.07	3	11.88	10.43	14.13	10.43	14.13	8	9.89	5.90	13.69	7.25	12.74
MgO	4	5.34	4.68	6.13	4.96	5.73	3	7.95	4.60	10.61	4.60	10.61	8	14.86	12.36	17.23	13.97	15.65
CaO	6	31.41	22.91	40.32	25.84	34.88	3	25.51	18.71	33.31	18.71	33.31	8	19.04	12.49	29.88	13.69	23.92
TiO ₂	6	4.54	3.41	6.31	3.76	4.91	3	4.20	1.60	5.62	1.60	5.62	8	2.62	0.92	5.47	1.52	3.63
P ₂ O ₅	6	22.97	16.97	30.43	18.34	25.14	3	19.36	14.16	25.05	14.16	25.05	7	7.23	5.72	8.14	6.64	7.78
BaO	6	1.93	0.22	10.18	0.22	0.52	3	3.31	0.42	5.34	0.42	5.34	8	2.85	1.04	7.34	1.31	4.51
C	6	0.49	0.35	0.58	0.44	0.56	3	0.42	0.25	0.53	0.25	0.53	8	4.16	1.67	8.68	2.26	6.18

Alguns óxidos, como Fe_2O_3 e P_2O_5 , apresentam comportamentos previsíveis na etapa de preparação, pois a retirada da magnetita e lamas, ricas em óxidos/hidróxidos de Fe, abaixa o conteúdo de Fe_2O_3 nas alíquotas de alimentação da flotação. Por conseguinte, a etapa de preparação efetua uma concentração prévia de apatita, elevando o P_2O_5 . Em consequência, sempre ocorre empobrecimento de Fe_2O_3 e o enriquecimento em P_2O_5 na ALFG (tabela 4.4). Contudo, outros óxidos, como SiO_2 , apresentam comportamentos variáveis entre os grupos M_I, em decorrência dos distintos minerais portadores desse óxido, assim como de suas características granulométricas.

O SiO_2 apresenta comportamentos variáveis. BEB/CC enriquece nesse óxido no horizonte micáceo de topo devido ao elevado conteúdo de quartzo (figuras 4.5 A e 4.6 G). ANF BEB/CC apresenta empobrecimento na rocha alterada e no micáceo de topo, e um enriquecimento no horizonte micáceo de base também devido a uma quantidade elevada de quartzo. BEB/DC apresenta um gradual empobrecimento em SiO_2 devido à retirada de filossilicatos interestratificados e vermiculita. FCR/DC no horizonte rocha alterada enriquece em SiO_2 , apresentando uma diferença positiva de 2.40 entre ALFG e ROM em decorrência da flogopita não ser retirada em grande escala na deslamagem e devido à dificuldade de ser cominuída na etapa de moagem, concentrando-se parcialmente na ALFG. No micáceo de base e no micáceo de topo, a diferença de SiO_2 entre ALFG e ROM torna-se gradativamente mais negativa, ou seja, empobrecimento desse óxido na ALFG (tabela 4.4) devido principalmente à concentração de filossilicatos interestratificados e vermiculita na alimentação da flotação de finos e no *overflow* da deslamagem.

O Al_2O_3 apresenta uma tendência geral, observada em todos os macrogrupos de protolitos, de empobrecer na ALFG devido principalmente à retirada de vermiculita e filossilicatos interestratificados. Essa tendência está refletida nas diferenças quase sempre negativas entre os teores de ALFG e ROM. Nota-se também a tendência de empobrecimentos progressivos de Al_2O_3 da rocha alterada em direção ao micáceo de topo, devido à retirada de vermiculita, presente em maior quantidade no ROM do último. Os valores predominantemente positivos observados na rocha alterada refletem presença de flogopita na ALFG.

FCR/DC possui as maiores diferenças negativas de Fe_2O_3 nos três horizontes de intemperismo, que significa o maior empobrecimento desse óxido na ALFG devido, por sua vez, à maior quantidade de magnetita nesse macrogrupo. Por outro lado, ANF BEB/CC apresenta a menor variação na rocha alterada (figura 4.5 C), devido em grande parte à escassez de magnetita. Esse fato sugere que pelo menos parte da richterita, que é o principal mineral portador de ferro desse M_I, mantém-se na ALFG do M_I=6 (figura 4.6 A). Esse aspecto é particularmente negativo, pois fornece potencial de contaminação do concentrado fosfático com esses minerais, caso a depressão dos silicatos não for efetiva, elevando o teor de Fe_2O_3 no concentrado.

O MgO apresenta um fator de enriquecimento variável. Os macrogrupos de protolitos 9 e 12 apresentam diferenças positivas, refletindo o enriquecimento da ALFG em dolomita, que concentra-se em faixas granulométricas superiores à granulometria de corte da deslamagem, distribuindo-se entre a alimentação da flotação de grossos e de finos. Nos demais grupos M_I, a diferença é negativa, ou seja, o MgO nas alíquotas da ALFG é menor que o conteúdo observado nas amostras ROM, em decorrência da retirada de flogopita e filossilicatos interestratificados finos, concentrados principalmente nas faixas granulométricas inferiores a 44 µm (tabela 3.8). Exceções ocorrem com BEB/CC no micáceo de base, com diferença positiva, indicando granulometria da flogopita acima das granulometrias de corte da deslamagem e de grossos e finos, e com FCR/DC no micáceo de base, cuja variação de MgO entre ROM e ALFG é pouco significativa (figura 4.5 D).

CaO enriquece do ROM à ALFG em todos os macrogrupos de protolitos e em todos os horizontes de intemperismo, como consequência da concentração de apatita na etapa de preparação. Ainda que ocorra concentração de apatita e dolomita na ALFG de FCR/DC na rocha alterada, esse foi o M_I com o menor enriquecimento em CaO na ALFG em relação aos demais (figura 4.5 E). Esse fato sugere que a gradual retirada de filossilicatos interestratificados e vermiculita é muito mais eficiente no enriquecimento relativo de CaO na ALFG do que a concentração de apatita e dolomita em amostras com baixo conteúdo de lama.

O TiO₂ (tabela 4.4) apresenta enriquecimento na ALFG em relação ao ROM em todos os grupos M_I. Esse padrão sugere que os minerais portadores de titânio, principalmente anatásio e ilmenita, não são retirados na etapa de preparação e concentram-se preferencialmente na ALFG. As diferenças próximas de zero obtidas em alguns grupos M_I indicam que, nesses casos, o processo de preparação não contribui para variação na proporção dos minerais portadores de titânio entre ROM e ALFG.

O P₂O₅ apresenta comportamento similar ao do CaO porque ambos ocorrem principalmente sob a forma de apatita, que enriquece na etapa de preparação. A diferença de P₂O₅ entre ALFG e ROM em M_I=12 (FCR/DC na rocha alterada) é a menor dentre todas as diferenças calculadas para P₂O₅. Isso sugere que os carbonatos, principalmente dolomita, se concentra com a apatita na alíquota ALFG, impedindo um enriquecimento maior de apatita nesse produto. A diferença varia de 0.94 na rocha alterada para 5.97 no micáceo de base, refletindo que os carbonatos diluem o conteúdo de P₂O₅ nas alíquotas ALFG de amostras de rocha alterada e, conseqüentemente, na ausência de carbonatos, o enriquecimento da apatita na ALFG é alto. Magnetita e lamas também estão envolvidas na causa do enriquecimento. ANF BEB/CC apresenta, de forma geral, diferenças pequenas nos três horizontes de intemperismo, sugerindo uma baixa eficiência de concentração de apatita na etapa de preparação. Esta, por sua vez, pode estar relacionada a pouca quantidade de

minerais com características necessárias para serem retirados nas etapas de separação magnética e deslamagem. Por outro lado, podem também indicar baixa eficiência na deslamagem, pois diopsídio e richterita concentram-se nas frações mais finas e deveriam ser parcialmente retirados nesta etapa. A baixa eficiência na deslamagem e no corte de grossos e finos, por sua vez, pode ser exatamente devida à maior quantidade desses minerais em ANF BEB/CC do que a quantidade geralmente encontrada nas demais amostras. Como o teste de caracterização tecnológica é um teste padrão, não foram feitos ajustes para buscar melhorias em seus resultados em caso de peculiaridades como essa. BEB/CC na rocha alterada (M_I=3) apresentou um comportamento contrário ao de FCR/DC no mesmo horizonte de intemperismo, ou seja, alcançou a maior diferença de P_2O_5 entre ALFG e ROM neste horizonte (figura 4.5 F). Esse fato sugere que parte dos carbonatos de BEB/CC foi descartada na deslamagem ou classificada para a alimentação da flotação de finos, contribuindo com o enriquecimento de apatita na ALFG.

Tabela 4.4: Teores médios do minério ROM (*run of mine*) e dos produtos ALFG (alimentação da flotação de grossos) calculados por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo, e respectivas diferenças (DIF) entre ALFG e ROM.

	Variável	MICÁCEO DE TOPO (M_I=1)			MICÁCEO DE BASE (M_I=2)			ROCHA ALTERADA (M_I=3)		
		ROM	ALFG	DIF	ROM	ALFG	DIF	ROM	ALFG	DIF
BEB/CC	SiO ₂	25.22	27.56	2.34	20.94	20.33	-0.61	18.19	18.20	0.01
	Al ₂ O ₃	2.83	2.15	-0.68	2.91	2.71	-0.21	2.19	2.53	0.34
	Fe ₂ O ₃	24.80	11.02	-13.79	22.44	10.79	-11.65	17.49	7.10	-10.39
	MgO	5.58	5.36	-0.22	7.93	8.21	0.28	11.09	9.99	-1.10
	CaO	14.07	20.18	6.12	13.85	20.03	6.18	20.64	27.47	6.83
	TiO ₂	6.34	7.74	1.40	4.81	6.21	1.40	3.35	3.63	0.28
	P ₂ O ₅	10.56	14.59	4.03	10.18	14.45	4.27	6.75	10.14	3.40
	BaO	1.05	1.52	0.47	3.49	4.52	1.03	0.87	1.22	0.36
	C	0.21	0.36	0.15	0.29	0.24	-0.04	3.14	3.66	0.52
	Variável	MICÁCEO DE TOPO (M_I=4)			MICÁCEO DE BASE (M_I=5)			ROCHA ALTERADA (M_I=6)		
		ROM	ALFG	DIF	ROM	ALFG	DIF	ROM	ALFG	DIF
ANF BEB/CC	SiO ₂	25.17	24.34	-0.83	35.89	37.06	1.16	33.61	31.68	-1.93
	Al ₂ O ₃	3.30	2.43	-0.87	3.08	3.02	-0.07	2.94	2.48	-0.46
	Fe ₂ O ₃	16.97	8.99	-7.98	15.95	9.23	-6.72	13.49	9.10	-4.39
	MgO	5.30	4.67	-0.62	7.34	5.81	-1.53	9.85	8.59	-1.26
	CaO	18.45	24.85	6.40	13.15	16.79	3.64	17.36	21.28	3.93
	TiO ₂	7.11	7.19	0.08	4.64	5.61	0.97	4.42	5.01	0.59
	P ₂ O ₅	12.94	16.98	4.04	9.21	11.52	2.32	9.51	11.80	2.29
	BaO	0.29	0.23	-0.06	0.25	0.22	-0.03	0.15	0.11	-0.03
	C	0.26	0.26	0.00	0.28	0.24	-0.04	0.18	0.21	0.02
	Variável	MICÁCEO DE TOPO (M_I=7)			MICÁCEO DE BASE (M_I=8)			ROCHA ALTERADA (M_I=9)		
		ROM	ALFG	DIF	ROM	ALFG	DIF	ROM	ALFG	DIF
BEB/DC	SiO ₂	22.23	22.33	0.10	26.92	28.54	1.61	21.42	23.46	2.04
	Al ₂ O ₃	2.86	2.32	-0.55	2.90	2.73	-0.18	2.02	2.40	0.38
	Fe ₂ O ₃	23.02	11.86	-11.15	21.40	12.21	-9.19	17.22	9.70	-7.52
	MgO	6.86	6.36	-0.51	9.55	9.07	-0.48	11.11	11.40	0.28
	CaO	18.01	22.98	4.97	13.85	18.91	5.06	17.36	21.56	4.20
	TiO ₂	4.02	4.21	0.19	4.00	4.11	0.11	2.75	2.82	0.07
	P ₂ O ₅	12.93	15.79	2.85	9.57	12.88	3.31	8.20	10.82	2.62
	BaO	0.57	0.61	0.04	0.83	0.64	-0.19	0.81	0.72	-0.09
	C	0.27	0.31	0.04	0.37	0.39	0.02	1.78	1.83	0.05
	Variável	MICÁCEO DE TOPO (M_I=10)			MICÁCEO DE BASE (M_I=11)			ROCHA ALTERADA (M_I=12)		
		ROM	ALFG	DIF	ROM	ALFG	DIF	ROM	ALFG	DIF
FCR/DC	SiO ₂	12.03	9.06	-2.97	12.83	12.55	-0.28	14.78	17.17	2.40
	Al ₂ O ₃	3.25	2.26	-0.99	2.03	1.90	-0.13	1.96	2.49	0.54
	Fe ₂ O ₃	22.45	9.67	-12.78	29.26	11.88	-17.38	22.35	9.89	-12.46
	MgO	6.05	5.34	-0.71	7.87	7.95	0.08	12.56	14.86	2.29
	CaO	21.54	31.41	9.87	17.20	25.51	8.32	16.04	19.04	3.00
	TiO ₂	3.89	4.54	0.65	3.41	4.20	0.79	2.39	2.62	0.23
	P ₂ O ₅	16.22	22.97	6.75	13.39	19.36	5.97	6.29	7.23	0.94
	BaO	1.54	1.93	0.40	2.88	3.31	0.42	1.58	2.85	1.27
	C	0.36	0.49	0.12	0.31	0.42	0.10	3.64	4.16	0.53

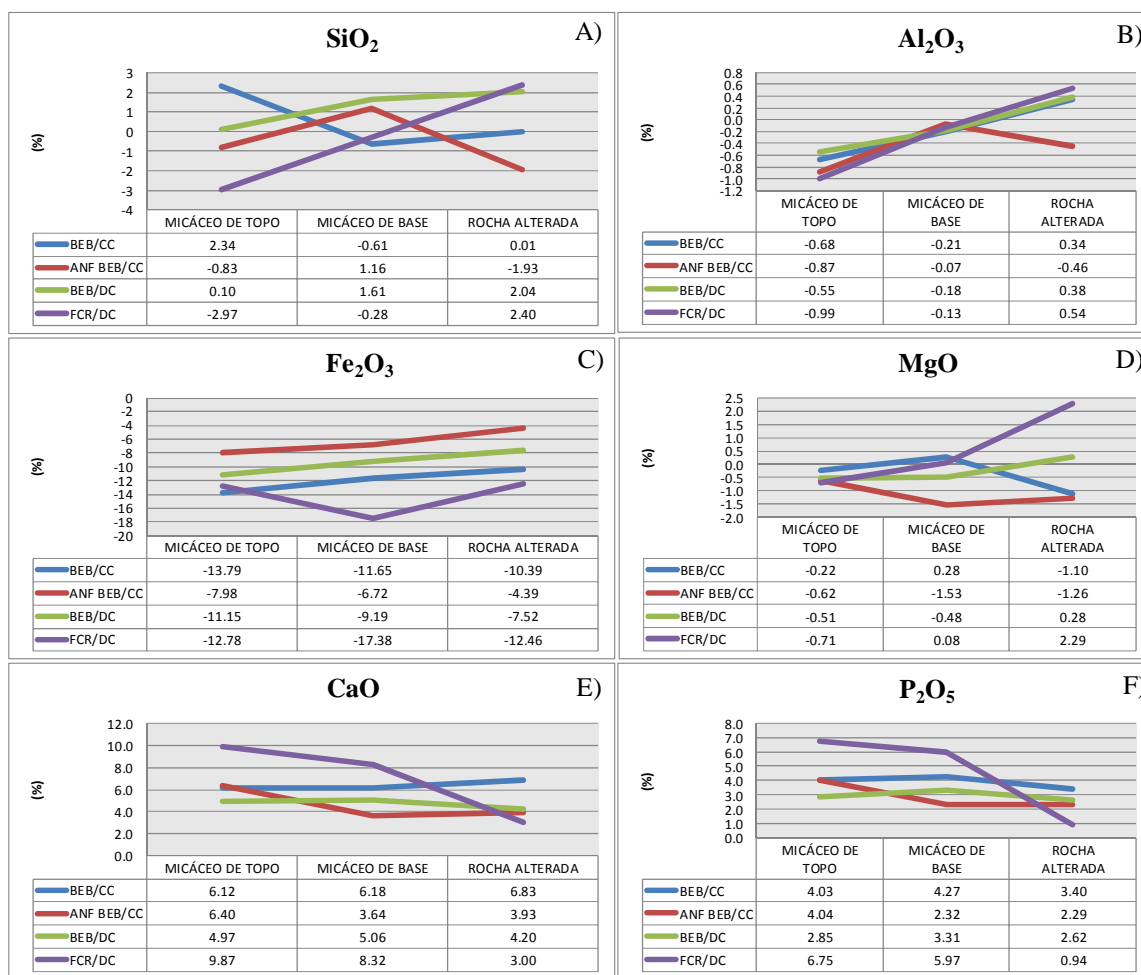


Figura 4.5: Diferenças (DIF) entre os conteúdos médios dos principais óxidos na ALFG e ROM por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo. Valores negativos indicam empobrecimento do óxido na ALFG em relação ao minério ROM, e valores positivos, enriquecimento.

Tabela 4.5: Estatísticas descritivas dos resultados de mineralogia obtidos por QEMSCAN das amostras de alimentação da flotação de grossos (ALFG) provenientes de testemunhos de sondagem, por grupo de protolitos e intemperismo (M_I). Óx Fe: óxidos/hidróxidos de ferro; Flog/verm: flogopita/vermiculita; Pir/anf: piroxênio/anfibólio. N: número de amostras.

BEB/CC																		
MICÁCEO DE TOPO (M_I=1)						MICÁCEO DE BASE (M_I=2)						ROCHA ALTERADA (M_I=3)						
Variável	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
Pir/anf	11	1.31	0.20	3.00	0.50	2.60	11	1.34	0.00	4.15	0.60	1.50	4	1.60	0.50	2.20	1.05	2.15
Flog/verm	12	18.71	5.50	36.80	9.85	25.00	12	24.54	5.60	36.50	16.75	32.50	4	23.55	13.00	32.30	16.25	30.85
Apatita	12	36.25	19.10	62.20	27.70	46.35	12	37.18	14.30	64.70	27.05	44.15	4	27.28	18.80	36.90	19.50	35.05
Calcita	10	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	10	0.05	0.00	0.20	0.00	0.10	4	19.85	7.50	25.40	15.15	24.55
Dolomita	12	0.38	0.00	0.80	0.20	0.55	11	0.22	0.00	0.70	0.02	0.30	4	7.98	3.60	13.50	3.95	12.00
Ilmenita	12	3.88	1.40	9.20	2.25	4.95	12	3.76	0.20	8.60	1.35	6.30	4	0.78	0.20	2.30	0.25	1.30
Quartzo	12	16.08	4.90	39.80	6.40	24.27	12	7.89	0.30	22.30	2.26	12.10	4	5.13	0.80	11.90	1.10	9.15
Óx Fe	12	9.88	2.80	18.70	6.10	13.14	11	9.14	7.20	11.34	7.40	10.60	4	4.35	1.20	9.70	1.65	7.05
Anatásio	11	5.49	2.00	9.10	4.10	6.40	12	4.56	0.50	8.91	1.65	6.80	4	3.28	2.80	3.70	2.85	3.70
Barita	12	0.99	0.00	2.80	0.25	1.80	12	6.43	0.00	21.80	0.62	9.20	4	1.48	0.00	5.60	0.00	2.95
ANF BEB/CC																		
MICÁCEO DE TOPO (M_I=4)						MICÁCEO DE BASE (M_I=5)						ROCHA ALTERADA (M_I=6)						
Variável	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
Pir/anf	5	5.35	0.27	9.00	4.10	8.80	12	6.98	1.76	20.70	3.57	8.89	3	24.87	18.10	35.40	18.10	35.40
Flog/verm	5	18.20	9.80	22.00	16.00	21.81	11	19.71	7.30	33.00	13.94	24.60	3	23.93	13.60	32.00	13.60	32.00
Apatita	4	47.50	40.90	57.30	42.40	52.60	12	29.44	14.69	53.40	17.91	42.53	3	31.53	27.00	33.90	27.00	33.90
Calcita	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Dolomita	5	0.06	0.00	0.20	0.00	0.10	10	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	3	0.10	0.00	0.20	0.00	0.20
Ilmenita	5	1.66	1.20	2.22	1.20	2.10	12	1.16	0.09	2.60	0.40	1.78	3	1.03	0.30	2.10	0.30	2.10
Quartzo	5	9.07	3.80	19.65	6.10	9.40	12	18.64	4.40	47.10	6.25	33.98	3	2.50	2.30	2.70	2.30	2.70
Óx Fe	5	8.36	3.00	11.02	8.50	10.50	12	8.48	2.60	16.20	5.58	10.75	3	5.40	1.20	7.90	1.20	7.90
Anatásio	5	6.46	4.00	13.11	4.40	5.90	12	5.01	1.20	7.30	3.80	6.46	3	2.77	2.20	3.20	2.20	3.20
Barita	4	0.03	0.00	0.10	0.00	0.05	12	0.08	0.00	0.21	0.00	0.14	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BEB/DC																		
MICÁCEO DE TOPO (M_I=7)						MICÁCEO DE BASE (M_I=8)						ROCHA ALTERADA (M_I=9)						
Variável	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
Pir/anf	16	6.19	0.20	16.90	1.80	11.35	28	6.53	0.20	22.00	1.70	9.55	19	6.38	0.60	16.40	3.30	9.50
Flog/verm	17	20.47	7.50	38.90	14.40	25.10	29	27.08	11.50	49.00	20.20	35.40	19	29.55	8.20	44.60	17.80	37.30
Apatita	16	41.75	20.40	66.80	31.55	50.75	29	34.36	13.50	63.80	22.90	46.80	18	28.97	17.00	57.40	20.50	34.60
Calcita	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	26	0.17	0.00	1.00	0.00	0.20	18	3.92	0.10	9.20	1.50	5.50
Dolomita	14	0.03	0.00	0.10	0.00	0.10	29	0.67	0.00	2.00	0.10	1.10	19	7.59	1.00	24.60	3.70	9.70
Ilmenita	17	1.51	0.40	4.10	0.80	1.70	29	1.31	0.20	3.40	0.80	2.00	19	0.78	0.20	1.60	0.40	1.10
Quartzo	17	7.01	1.00	32.60	2.90	8.90	28	9.52	0.90	24.60	4.45	13.90	18	4.44	0.10	12.50	1.70	6.10
Óx Fe	17	9.82	1.70	30.00	4.90	11.80	29	10.13	4.30	20.50	6.90	13.10	18	5.93	2.40	9.00	3.70	7.70
Anatásio	17	3.72	0.80	10.00	3.30	3.70	29	3.41	0.40	8.50	2.80	4.10	19	2.44	0.50	4.60	1.70	2.90
Barita	17	0.62	0.00	6.70	0.00	0.40	29	1.00	0.00	5.10	0.00	1.60	19	2.25	0.00	11.20	0.20	2.50
FCR/DC																		
MICÁCEO DE TOPO (M_I=10)						MICÁCEO DE BASE (M_I=11)						ROCHA ALTERADA (M_I=12)						
Variável	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
Pir/anf	6	0.60	0.10	0.90	0.40	0.80	3	0.73	0.40	1.20	0.40	1.20	7	0.43	0.00	2.50	0.10	0.10
Flog/verm	5	15.96	13.80	19.10	15.10	16.10	3	23.10	14.30	30.00	14.30	30.00	8	35.06	10.90	53.80	20.60	49.75
Apatita	5	69.10	63.20	76.30	65.40	70.50	3	50.87	38.60	64.00	38.60	64.00	7	18.27	15.30	20.60	16.60	20.50
Calcita	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3	0.03	0.00	0.10	0.00	0.10	8	4.98	0.30	14.50	1.45	8.80
Dolomita	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3	0.93	0.00	2.10	0.00	2.10	8	19.79	2.60	53.90	5.20	33.45
Ilmenita	6	4.13	1.70	7.80	2.50	5.40	3	5.40	2.40	10.00	2.40	10.00	8	2.89	0.90	4.10	1.70	3.85
Quartzo	6	0.72	0.20	1.40	0.20	1.40	3	0.80	0.40	1.50	0.40	1.50	8	0.50	0.10	1.20	0.25	0.70
Óx Fe	6	6.88	5.30	8.50	5.60	7.60	3	8.40	6.60	9.80	6.60	9.80	8	4.08	0.80	8.30	1.85	7.15
Anatásio	6	2.80	0.90	3.60	2.30	3.60	3	1.67	0.40	3.50	0.40	3.50	8	1.19	0.10	4.00	0.25	2.00
Barita	6	2.28	0.00	13.70	0.00	0.00	3	4.03	0.00	6.90	0.00	6.90	8	1.19	0.30	2.30	0.75	1.55

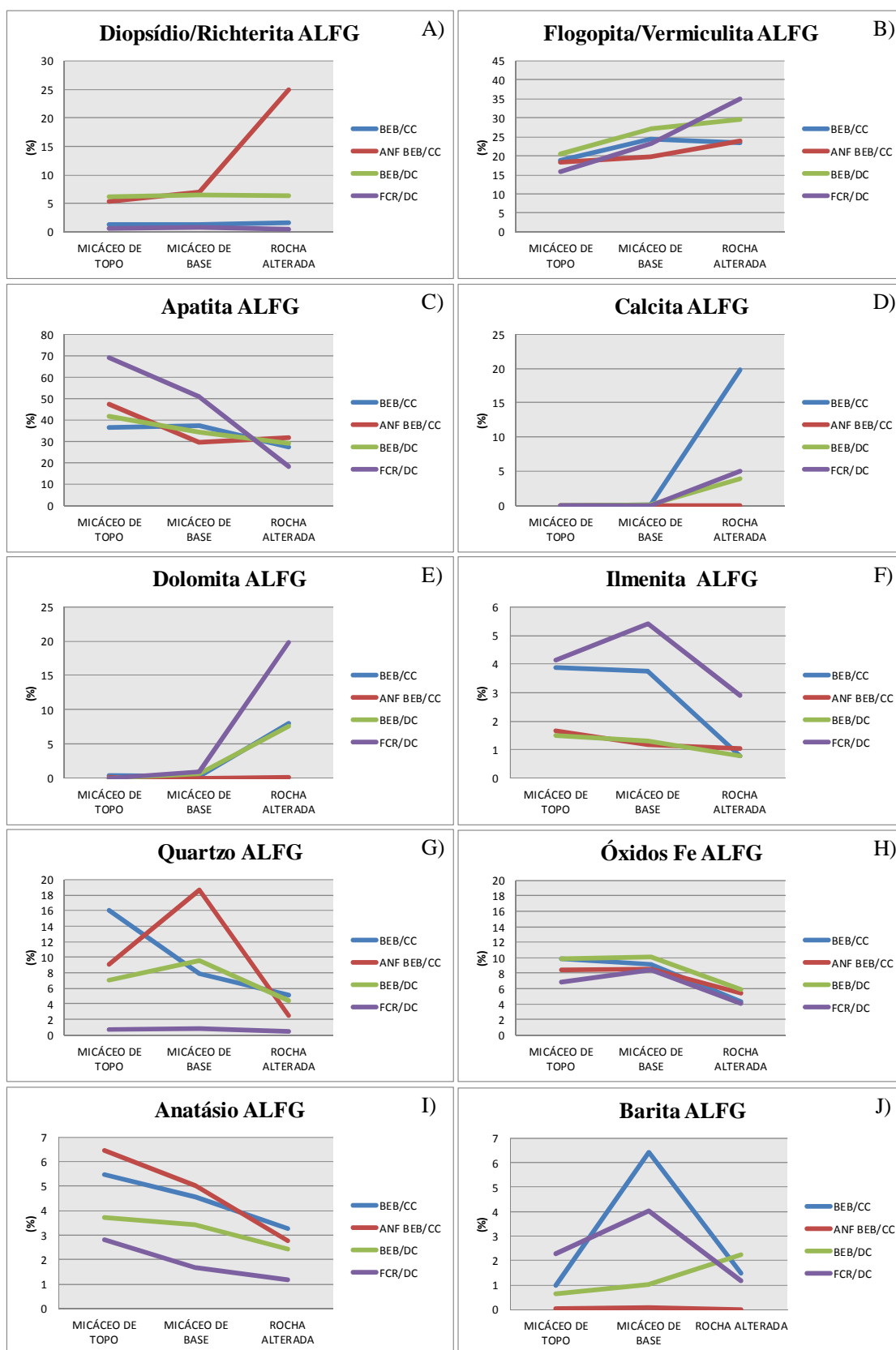


Figura 4.6: Valores médios dos resultados de composição mineralógica obtidos por QEMSCAN para as amostras de alimentação da flotação de grossos (ALFG) provenientes de testemunhos de sondagem, por macrogrupo de protólito e por horizonte de intemperismo.

4.2.4 Alimentação da Flotação de Finos (ALFF)

A alimentação da flotação de finos é o produto não magnético classificado com granulometria inferior a 44 μm . A figura 4.7 A apresenta o histograma de frequência de massas da ALFF global, ou seja, sem separação por grupos M_I, e a tabela 4.6, as estatísticas descritivas da massa de ALFF global.

Em média, 16.19% da massa da fração não magnética é classificada para a fração de finos, que irá alimentar o circuito de flotação de finos. 50% das amostras possui a partição da massa de finos entre 13.17% e 18.54%, sendo, portanto, a fração granulométrica que menos contribui com os resultados globais dos testes de flotação. A distribuição de massas apresenta uma distribuição muito próxima da distribuição normal (linha vermelha), com uma ligeira assimetria positiva, que reflete valores de média sutilmente maiores que os de mediana (16.19% e 15.29%, respectivamente), devido aos valores mais elevados distribuídos após o quartil superior.

A figura 4.7 B apresenta o histograma de frequência de teores de P_2O_5 da ALFF global. A distribuição dos teores apresenta um padrão similar ao padrão observado na distribuição dos teores de P_2O_5 da ALFG, com pequena assimetria positiva, indicando valor de média ligeiramente maiores que o de mediana (8.83% e 7.94%, respectivamente). Seu conteúdo de P_2O_5 inferior ao de ALFG (13.42%) reflete quantidades menores de apatita e maiores de minerais contaminantes, como será detalhado adiante. A tabela 4.6 apresenta as estatísticas descritivas do teor de P_2O_5 de ALFF global.

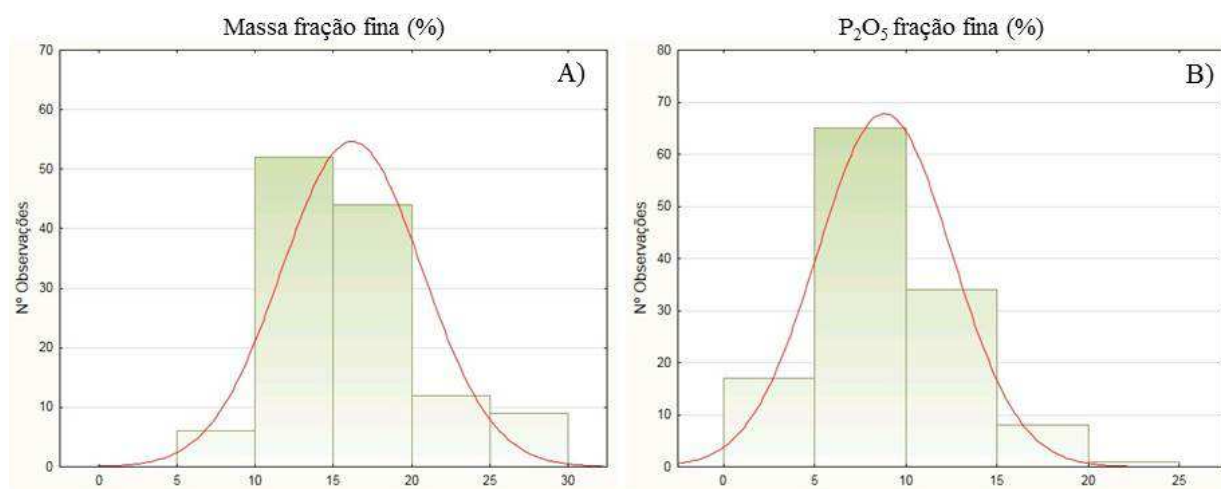


Figura 4.7: A) Histograma de frequências das massas de ALFF global. B) Histograma de frequência dos teores de P_2O_5 de ALFF global.

Tabela 4.6: Estatísticas descritivas da alimentação de finos (ALFF) global.

Variáveis (%)	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	Desvio Padrão
Massa Fino	123	16.19	15.29	6.29	28.67	13.17	18.54	4.49
P ₂ O ₅ Fino	125	8.83	7.94	3.34	24.40	5.98	11.75	3.68

A tabela 4.7 apresenta os valores médios dos principais óxidos analisados, e teor de C, para as alíquotas de alimentação da flotação de finos (ALFF) por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo. A figura 4.8 e a tabela 4.8 apresentam a comparação entre teores médios do minério ROM (*run of mine*) e dos produtos ALFF calculados por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo, e respectivas diferenças de teores entre ALFF e ROM.

Tabela 4.7: Estatísticas descritivas dos principais óxidos analisados, e teor de C, para as alíquotas de alimentação da flotação de finos (ALFF) por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo. N: número de amostras.

BEB/CC																		
MICÁCEO DE TOPO (M_I=1)						MICÁCEO DE BASE (M_I=2)						ROCHA ALTERADA (M_I=3)						
Variável	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
SiO ₂	12	29.70	15.80	49.38	21.75	35.86	12	25.84	14.13	37.13	23.22	29.84	4	21.92	19.53	24.01	20.50	23.35
Al ₂ O ₃	12	3.91	2.01	8.48	2.67	4.25	12	3.80	1.62	6.80	2.61	4.52	4	3.04	2.77	3.54	2.84	3.24
Fe ₂ O ₃	12	19.10	12.16	30.15	14.04	23.48	11	18.91	12.47	23.04	17.11	21.80	4	9.66	6.76	15.01	7.29	12.02
MgO	12	8.49	2.54	16.07	6.38	11.00	12	11.53	4.84	18.56	9.59	13.33	4	14.21	10.16	18.26	11.65	16.77
CaO	12	11.80	5.94	19.06	8.81	15.19	12	11.31	4.61	20.60	7.06	14.92	4	19.89	15.80	22.28	17.65	22.13
TiO ₂	12	4.85	3.28	7.86	3.74	5.55	12	3.76	1.69	6.23	2.43	4.57	4	2.97	2.84	3.26	2.85	3.09
P ₂ O ₅	12	8.78	4.64	13.61	6.28	11.72	12	8.20	3.74	14.62	5.32	10.85	4	5.71	3.34	8.71	3.78	7.65
BaO	12	1.20	0.17	2.35	0.52	1.98	12	2.91	0.23	10.22	0.58	4.98	4	0.80	0.11	2.45	0.18	1.43
C	7	0.21	0.00	0.33	0.16	0.32	8	0.22	0.13	0.30	0.16	0.29	4	3.33	1.59	4.64	2.26	4.40

ANF BEB/CC																		
MICÁCEO DE TOPO (M_I=4)						MICÁCEO DE BASE (M_I=5)						ROCHA ALTERADA (M_I=6)						
Variável	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
SiO ₂	4	32.83	29.68	35.52	31.06	34.61	13	39.06	24.92	55.15	34.53	43.49	3	36.37	35.59	37.57	35.59	37.57
Al ₂ O ₃	3	4.12	3.95	4.22	3.95	4.22	10	3.85	2.98	4.38	3.48	4.22	3	3.35	1.40	4.75	1.40	4.75
Fe ₂ O ₃	4	15.98	14.56	18.03	14.95	17.02	13	15.43	8.38	24.68	10.35	20.64	3	12.62	11.29	13.51	11.29	13.51
MgO	5	6.87	5.12	9.37	5.24	8.64	12	8.39	5.01	11.50	7.24	9.53	3	11.06	9.76	13.05	9.76	13.05
CaO	4	12.17	8.50	15.27	10.27	14.07	13	10.55	5.72	19.14	6.93	12.21	3	14.07	11.74	17.74	11.74	17.74
TiO ₂	4	4.79	4.39	5.27	4.54	5.05	13	4.06	1.12	5.79	2.87	4.95	3	4.11	3.89	4.43	3.89	4.43
P ₂ O ₅	4	8.69	6.57	10.62	7.29	10.08	13	7.28	4.21	12.79	4.91	8.71	3	7.55	6.72	8.75	6.72	8.75
BaO	5	0.38	0.23	0.75	0.23	0.46	12	0.25	0.16	0.32	0.23	0.28	3	0.14	0.08	0.18	0.08	0.18
C	5	0.19	0.00	0.35	0.14	0.28	13	0.20	0.00	0.43	0.12	0.32	3	0.18	0.15	0.20	0.15	0.20

BEB/DC																		
MICÁCEO DE TOPO (M_I=7)						MICÁCEO DE BASE (M_I=8)						ROCHA ALTERADA (M_I=9)						
Variável	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
SiO ₂	16	27.83	18.41	42.91	23.39	31.95	28	31.57	22.81	42.31	26.76	36.49	19	26.33	13.75	38.08	21.59	31.10
Al ₂ O ₃	16	4.01	2.82	6.43	3.36	4.33	28	3.88	2.03	5.45	3.28	4.49	19	3.01	1.63	4.56	2.15	3.47
Fe ₂ O ₃	14	15.28	9.92	19.59	13.66	17.02	27	14.59	8.19	19.90	12.82	16.83	19	11.03	5.88	16.90	8.79	12.95
MgO	16	9.51	4.92	14.27	7.15	11.08	28	12.29	7.24	18.65	9.93	14.38	19	13.96	10.24	19.57	11.32	15.57
CaO	15	14.53	5.98	22.34	12.16	17.68	28	12.51	5.00	23.26	8.98	15.68	19	16.73	10.11	27.41	13.16	19.42
TiO ₂	13	3.68	2.79	4.78	3.31	3.94	28	3.42	1.10	4.70	3.07	4.16	18	2.18	0.96	3.42	1.74	2.68
P ₂ O ₅	15	10.57	5.59	15.89	7.74	12.87	28	8.80	4.12	15.53	6.02	11.75	18	7.45	4.21	13.32	5.73	8.88
BaO	16	0.58	0.13	3.50	0.20	0.61	26	0.67	0.14	2.36	0.22	0.93	17	0.68	0.15	2.38	0.28	0.86
C	15	0.24	0.08	0.35	0.20	0.30	28	0.40	0.17	0.91	0.25	0.52	18	2.01	0.18	3.49	1.43	2.84

FCR/DC																		
MICÁCEO DE TOPO (M_I=10)						MICÁCEO DE BASE (M_I=11)						ROCHA ALTERADA (M_I=12)						
Variável	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
SiO ₂	6	18.04	10.73	24.28	16.42	21.16	3	20.35	16.80	25.04	16.80	25.04	8	19.64	8.13	27.69	14.16	26.25
Al ₂ O ₃	5	4.87	4.02	5.32	4.79	5.23	3	3.25	1.47	5.40	1.47	5.40	8	2.26	0.68	4.47	1.33	3.22
Fe ₂ O ₃	6	12.85	10.23	15.94	12.19	13.46	3	14.79	12.44	16.97	12.44	16.97	8	10.25	5.31	13.74	7.76	12.65
MgO	6	10.82	4.54	14.50	10.97	12.26	3	12.68	10.01	16.93	10.01	16.93	6	15.75	15.19	16.35	15.42	16.14
CaO	6	19.97	14.69	26.81	17.09	21.78	3	16.28	11.43	20.65	11.43	20.65	8	18.23	12.59	27.88	13.41	24.12
TiO ₂	5	3.95	3.75	4.23	3.85	4.06	3	2.20	0.83	4.38	0.83	4.38	8	1.56	0.46	3.90	0.54	2.57
P ₂ O ₅	6	14.91	10.25	22.05	12.93	15.92	3	12.92	8.84	16.17	8.84	16.17	7	6.75	3.99	8.45	4.48	8.35
BaO	6	1.70	0.24	7.82	0.30	1.16	3	2.87	0.91	4.94	0.91	4.94	7	1.34	0.70	2.90	0.77	2.18
C	6	0.34	0.29	0.46	0.29	0.36	3	0.27	0.21	0.34	0.21	0.34	8	3.81	1.94	8.16	2.24	5.30

SiO₂ enriquece na ALFF em relação ao ROM em todos os macrogrupos de protolitos e horizontes de intemperismo; as diferenças entre os teores de SiO₂ de ALFF e ROM são, portanto, sempre positivas (figura 4.8 A). Esse padrão ocorre principalmente devido à flogopita, filossilicatos interestratificados e vermiculita se concentrarem preferencialmente nas frações granulométricas mais finas (tabela 3.8), próximas da faixa granulométrica de ALFF. De uma forma geral, os macrogrupos de protolitos não apresentam variações substanciais no enriquecimento de SiO₂ na ALFF em relação ao ROM nos diferentes horizontes de intemperismo, com exceção de ANF

BEB/CC no micáceo de topo, e FCR/DC, no micáceo de base. Ao primeiro caso não foi identificada uma causa. O segundo caso ocorre porque, apesar de o conteúdo de flogopita/vermiculita da ALFF apresentar um ligeiro decréscimo nesse horizonte em comparação com a rocha alterada, dobra-se a quantidade de quartzo (figuras 4.9 B e G). O conteúdo de quartzo permanece o mesmo no micáceo de topo, e a queda no enriquecimento de SiO_2 na ALFF em relação ao ROM nesse horizonte é devida à retirada da vermiculita na deslamagem.

O Al_2O_3 apresenta padrão de enriquecimento da ALFF em relação ao ROM semelhante ao padrão observado do SiO_2 , ou seja, teores sempre maiores na ALFF, como mostram as diferenças positivas em todos os macrogrupos de protolitos e horizontes de intemperismo apresentadas no gráfico da figura 4.8 B. Esse padrão é controlado principalmente pela maior presença de flogopita, filossilicatos interestratificados e vermiculita nas faixas granulométricas similares à faixa de ALFF.

O Fe_2O_3 , ao contrário de SiO_2 e Al_2O_3 , apresenta sempre diferenças negativas dos teores entre ALFF e ROM (figura 4.8 C), que é o mesmo comportamento observado para esse óxido em ALFG, devido principalmente à retirada de goethita na etapa de deslamagem. O empobrecimento maior de Fe_2O_3 observado em FCR/DC no horizonte micáceo de base foi também observado na ALFG desse grupo M_I e é interpretado como devido a uma maior quantidade de magnetita.

O MgO (figura 4.8 D), da mesma forma que SiO_2 e Al_2O_3 , também enriquece na ALFF em relação ao ROM em todos os grupos M_I devido ao enriquecimento em flogopita, filossilicatos interestratificados e vermiculita que ocorre na ALFF.

CaO (figura 4.8 E) apresenta empobrecimento na ALFF em relação ao ROM em todos os grupos M_I, refletindo a concentração de apatita nos grossos e de contaminantes, nos finos. A única diferença positiva de CaO foi encontrada em FCR/DC na rocha alterada (M_I=12), ou seja, um enriquecimento de CaO na ALFF em relação ao ROM, que pode ser devido à concentração de dolomita nesse produto (figura 4.9 E), ou à ligeira concentração de apatita.

O TiO_2 (tabela 4.8) apresenta empobrecimento na ALFF em relação ao ROM em todos os grupos M_I, com exceção de M_I=10, no qual a diferença é próxima de zero. Esse padrão reflete a concentração principalmente de anatásio e ilmenita na ALFG.

P_2O_5 apresenta padrão de comportamento similar ao padrão do CaO , ou seja, ocorre um empobrecimento de P_2O_5 na ALFF em relação ao ROM em todos os macrogrupos de protolitos e horizontes de intemperismo, com exceção de FCR/DC na rocha alterada, em que a diferença é positiva. O comportamento geral demonstra que a apatita é particionada preferencialmente para a ALFG. O valor positivo da diferença entre ALFF e ROM no M_I=12 é pouco significativo, refletindo a variação de P_2O_5 de 6.75% e 6.29%, respectivamente.

Tabela 4.8: Teores médios dos produtos da alimentação da flotação de finos (ALFF) e do minério ROM e respectivas diferenças calculadas por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo. DIF=diferença.

	Variável	MICÁCEO DE TOPO (M_I=1)			MICÁCEO DE BASE (M_I=2)			ROCHA ALTERADA (M_I=3)		
		ROM	ALFF	DIF	ROM	ALFF	DIF	ROM	ALFF	DIF
BEB/CC	SiO ₂	25.22	29.70	4.48	20.94	25.84	4.90	18.19	21.92	3.73
	Al ₂ O ₃	2.83	3.91	1.08	2.91	3.80	0.89	2.19	3.04	0.84
	Fe ₂ O ₃	24.80	19.10	-5.71	22.44	18.91	-3.53	17.49	9.66	-7.83
	MgO	5.58	8.49	2.91	7.93	11.53	3.60	11.09	14.21	3.12
	CaO	14.07	11.80	-2.27	13.85	11.31	-2.54	20.64	19.89	-0.75
	TiO ₂	6.34	4.85	-1.50	4.81	3.76	-1.05	3.35	2.97	-0.38
	P ₂ O ₅	10.56	8.78	-1.78	10.18	8.20	-1.98	6.75	5.71	-1.03
	BaO	1.05	1.20	0.15	3.49	2.91	-0.58	0.87	0.80	-0.06
	C	0.21	0.21	0.00	0.29	0.22	-0.06	3.14	3.33	0.19
	Variável	MICÁCEO DE TOPO (M_I=4)			MICÁCEO DE BASE (M_I=5)			ROCHA ALTERADA (M_I=6)		
		ROM	ALFF	DIF	ROM	ALFF	DIF	ROM	ALFF	DIF
ANF BEB/CC	SiO ₂	25.17	32.83	7.66	35.89	39.06	3.16	33.61	36.37	2.76
	Al ₂ O ₃	3.30	4.12	0.81	3.08	3.85	0.76	2.94	3.35	0.42
	Fe ₂ O ₃	16.97	15.98	-0.99	15.95	15.43	-0.52	13.49	12.62	-0.87
	MgO	5.30	6.87	1.58	7.34	8.39	1.05	9.85	11.06	1.21
	CaO	18.45	12.17	-6.28	13.15	10.55	-2.60	17.36	14.07	-3.29
	TiO ₂	7.11	4.79	-2.32	4.64	4.06	-0.58	4.42	4.11	-0.31
	P ₂ O ₅	12.94	8.69	-4.26	9.21	7.28	-1.92	9.51	7.55	-1.96
	BaO	0.29	0.38	0.10	0.25	0.25	0.01	0.15	0.14	-0.01
	C	0.26	0.19	-0.06	0.28	0.20	-0.08	0.18	0.18	-0.01
	Variável	MICÁCEO DE TOPO (M_I=7)			MICÁCEO DE BASE (M_I=8)			ROCHA ALTERADA (M_I=9)		
		ROM	ALFF	DIF	ROM	ALFF	DIF	ROM	ALFF	DIF
BEB/DC	SiO ₂	22.23	27.83	5.61	26.92	31.57	4.65	21.42	26.33	4.91
	Al ₂ O ₃	2.86	4.01	1.15	2.90	3.88	0.97	2.02	3.01	0.99
	Fe ₂ O ₃	23.02	15.28	-7.74	21.40	14.59	-6.81	17.22	11.03	-6.20
	MgO	6.86	9.51	2.65	9.55	12.29	2.73	11.11	13.96	2.85
	CaO	18.01	14.53	-3.48	13.85	12.51	-1.34	17.36	16.73	-0.63
	TiO ₂	4.02	3.68	-0.35	4.00	3.42	-0.58	2.75	2.18	-0.56
	P ₂ O ₅	12.93	10.57	-2.37	9.57	8.80	-0.77	8.20	7.45	-0.75
	BaO	0.57	0.58	0.00	0.83	0.67	-0.15	0.81	0.68	-0.13
	C	0.27	0.24	-0.02	0.37	0.40	0.04	1.78	2.01	0.23
	Variável	MICÁCEO DE TOPO (M_I=10)			MICÁCEO DE BASE (M_I=11)			ROCHA ALTERADA (M_I=12)		
		ROM	ALFF	DIF	ROM	ALFF	DIF	ROM	ALFF	F.E.
FCR/DC	SiO ₂	12.03	18.04	6.01	12.83	20.35	7.52	14.78	19.64	4.86
	Al ₂ O ₃	3.25	4.87	1.62	2.03	3.25	1.22	1.96	2.26	0.31
	Fe ₂ O ₃	22.45	12.85	-9.61	29.26	14.79	-14.47	22.35	10.25	-12.11
	MgO	6.05	10.82	4.76	7.87	12.68	4.81	12.56	15.75	3.18
	CaO	21.54	19.97	-1.57	17.20	16.28	-0.92	16.04	18.23	2.19
	TiO ₂	3.89	3.95	0.06	3.41	2.20	-1.21	2.39	1.56	-0.83
	P ₂ O ₅	16.22	14.91	-1.30	13.39	12.92	-0.48	6.29	6.75	0.46
	BaO	1.54	1.70	0.16	2.88	2.87	-0.02	1.58	1.34	-0.24
	C	0.36	0.34	-0.02	0.31	0.27	-0.04	3.64	3.81	0.18

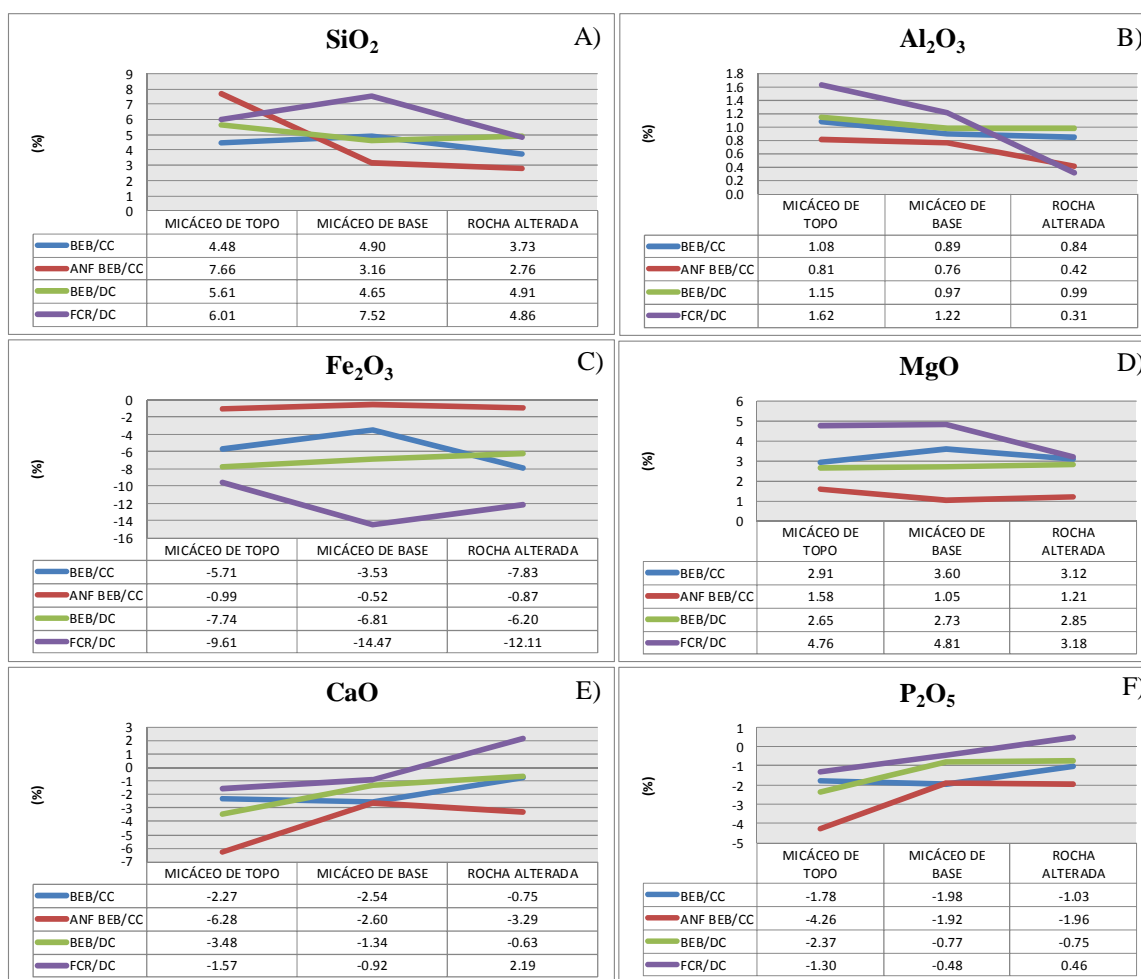


Figura 4.8: Diferenças entre os conteúdos médios dos principais óxidos em ALFF e ROM por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo. Valores negativos indicam empobrecimento do óxido na ALFF em relação ao minério ROM, e valores positivos, enriquecimento.

Tabela 4.9: Estatísticas descritivas dos resultados de mineralogia obtidos por QEMSCAN das amostras de alimentação da flotação de finos (ALFF) provenientes de testemunhos de sondagem, por grupo de protolitos e intemperismo (M_I). Pir/anf: piroxênio/anfibólio; Flog/verm: flogopita/vermiculita; Óx Fe: óxidos/hidróxidos de ferro. N: número de amostras.

BEB/CC																		
Variável	MICÁCEO DE TOPO (M_I=1)					MICÁCEO DE BASE (M_I=2)					ROCHA ALTERADA (M_I=3)							
	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
Pir/anf	11	2.05	0.30	4.90	0.50	3.10	11	2.13	0.10	6.44	0.80	3.00	4	2.30	1.10	3.00	1.75	2.85
Flog/verm	12	28.55	5.40	51.60	19.10	36.10	12	33.96	13.40	57.10	24.07	41.75	4	36.33	29.80	45.30	32.40	40.25
Apatita	12	23.77	9.05	40.60	16.80	31.85	12	23.07	8.50	41.40	13.78	30.65	4	16.70	9.70	23.30	11.35	22.05
Calcita	10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10	0.05	0.00	0.30	0.00	0.10	4	16.25	6.20	20.90	11.85	20.65
Dolomita	12	0.52	0.00	1.00	0.20	0.85	11	0.47	0.05	1.00	0.10	1.00	4	9.90	3.30	16.20	3.95	15.85
Ilmenita	12	1.78	0.70	2.60	1.50	2.20	12	1.56	0.30	2.90	0.91	2.05	4	0.33	0.10	0.80	0.15	0.50
Quartzo	10	6.87	4.30	12.60	6.00	7.10	11	5.31	0.50	14.50	2.13	9.00	4	3.30	0.50	7.40	0.75	5.85
Óx Fe	12	18.12	3.80	33.89	10.65	24.60	12	15.82	4.20	26.71	10.60	21.85	4	4.48	0.70	11.80	1.25	7.70
Anatásio	11	3.67	2.30	6.00	2.41	4.50	12	2.91	0.50	4.80	1.70	3.95	4	3.03	2.80	3.30	2.80	3.25
Barita	12	0.62	0.10	1.60	0.10	0.90	11	2.93	0.10	7.70	0.40	5.30	4	0.78	0.00	2.80	0.00	1.55
ANF BEB/CC																		
Variável	MICÁCEO DE TOPO (M_I=4)					MICÁCEO DE BASE (M_I=5)					ROCHA ALTERADA (M_I=6)							
	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
Pir/anf	5	7.77	0.45	12.90	6.40	11.20	11	8.58	1.12	20.30	4.20	11.60	3	22.67	16.70	31.90	16.70	31.90
Flog/verm	5	22.84	13.50	33.20	19.41	25.90	11	28.34	17.59	41.53	23.90	32.80	3	31.33	21.60	36.60	21.60	36.60
Apatita	5	25.66	12.00	39.10	21.90	32.70	12	15.11	0.00	30.60	10.62	18.23	3	21.27	17.40	27.00	17.40	27.00
Calcita	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Dolomita	5	0.06	0.00	0.20	0.00	0.10	9	0.01	0.00	0.04	0.00	0.01	3	0.10	0.00	0.20	0.00	0.20
Ilmenita	5	1.23	0.80	1.54	1.10	1.40	11	1.00	0.09	2.60	0.30	1.61	3	0.90	0.20	1.50	0.20	1.50
Quartzo	5	8.51	3.60	13.10	5.60	12.37	12	14.58	0.00	32.50	7.70	23.02	3	2.83	2.30	3.40	2.30	3.40
Óx Fe	4	17.25	10.30	21.30	13.20	21.30	12	14.93	0.00	28.66	8.20	20.60	3	10.80	3.80	16.50	3.80	16.50
Anatásio	5	3.81	2.20	6.64	2.90	3.90	10	3.37	2.50	4.58	2.80	3.60	3	2.17	2.10	2.30	2.10	2.30
Barita	4	0.08	0.00	0.20	0.00	0.15	12	0.17	0.00	0.48	0.00	0.26	3	0.03	0.00	0.10	0.00	0.10
BEB/DC																		
Variável	MICÁCEO DE TOPO (M_I=7)					MICÁCEO DE BASE (M_I=8)					ROCHA ALTERADA (M_I=9)							
	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
Pir/anf	16	6.11	0.30	15.30	2.15	10.05	29	5.89	0.50	15.80	2.20	9.00	18	5.33	1.00	12.80	2.90	7.80
Flog/verm	17	31.40	19.40	50.00	23.50	36.00	28	37.58	19.60	55.00	30.15	42.80	18	36.26	20.30	57.00	28.40	44.20
Apatita	16	27.89	9.60	43.30	21.55	33.25	29	23.92	9.00	44.20	16.10	33.00	17	22.60	11.90	37.90	16.30	27.00
Calcita	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	27	0.32	0.00	2.10	0.00	0.40	17	4.68	0.10	10.80	2.50	7.40
Dolomita	15	0.13	0.00	0.30	0.10	0.20	29	0.91	0.10	2.90	0.20	1.60	19	7.98	0.00	25.60	4.50	10.10
Ilmenita	17	1.06	0.40	2.00	0.70	1.30	29	0.94	0.20	2.00	0.60	1.20	18	0.67	0.20	1.20	0.50	0.90
Quartzo	17	7.38	1.40	29.80	3.60	8.80	28	8.45	1.80	17.60	5.45	11.25	17	4.51	0.20	10.80	2.30	6.30
Óx Fe	17	13.14	3.50	38.90	7.60	15.90	28	11.33	4.70	20.10	7.80	13.75	17	6.44	2.00	9.90	4.20	8.60
Anatásio	17	2.86	1.30	5.60	2.40	3.20	28	2.78	0.70	4.20	2.30	3.25	18	1.94	0.50	3.50	1.30	2.50
Barita	17	0.59	0.00	4.10	0.00	0.60	29	0.67	0.00	3.70	0.00	0.70	19	1.67	0.00	9.50	0.00	2.30
FCR/DC																		
Variável	MICÁCEO DE TOPO (M_I=10)					MICÁCEO DE BASE (M_I=11)					ROCHA ALTERADA (M_I=12)							
	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
Pir/anf	6	1.57	0.30	2.10	1.00	2.10	3	1.40	0.70	2.30	0.70	2.30	7	0.76	0.00	4.10	0.10	0.50
Flog/verm	5	36.76	31.20	39.90	35.70	38.90	3	38.73	31.00	53.40	31.00	53.40	8	39.84	15.90	57.10	27.95	52.75
Apatita	5	41.18	36.90	44.40	37.40	43.90	3	35.67	26.80	45.20	26.80	45.20	7	19.67	12.60	24.60	12.80	23.70
Calcita	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8	5.58	0.20	13.50	1.15	11.00
Dolomita	5	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	3	0.80	0.20	1.30	0.20	1.30	8	17.30	2.60	51.30	5.05	26.85
Ilmenita	6	1.73	1.50	2.10	1.60	1.80	3	1.40	0.70	1.80	0.70	1.80	8	0.88	0.30	1.80	0.50	1.15
Quartzo	6	1.13	0.10	2.40	0.30	2.40	3	1.13	0.50	2.30	0.50	2.30	8	0.49	0.10	0.80	0.30	0.70
Óx Fe	6	9.12	5.20	14.40	7.00	10.20	3	10.67	6.00	17.30	6.00	17.30	8	3.24	0.50	7.10	1.70	4.75
Anatásio	5	2.66	2.50	2.80	2.60	2.70	3	1.33	0.30	3.30	0.30	3.30	8	0.98	0.10	3.40	0.10	1.80
Barita	6	1.65	0.00	9.80	0.00	0.10	3	2.97	0.10	4.60	0.10	4.60	8	0.85	0.20	1.50	0.45	1.40

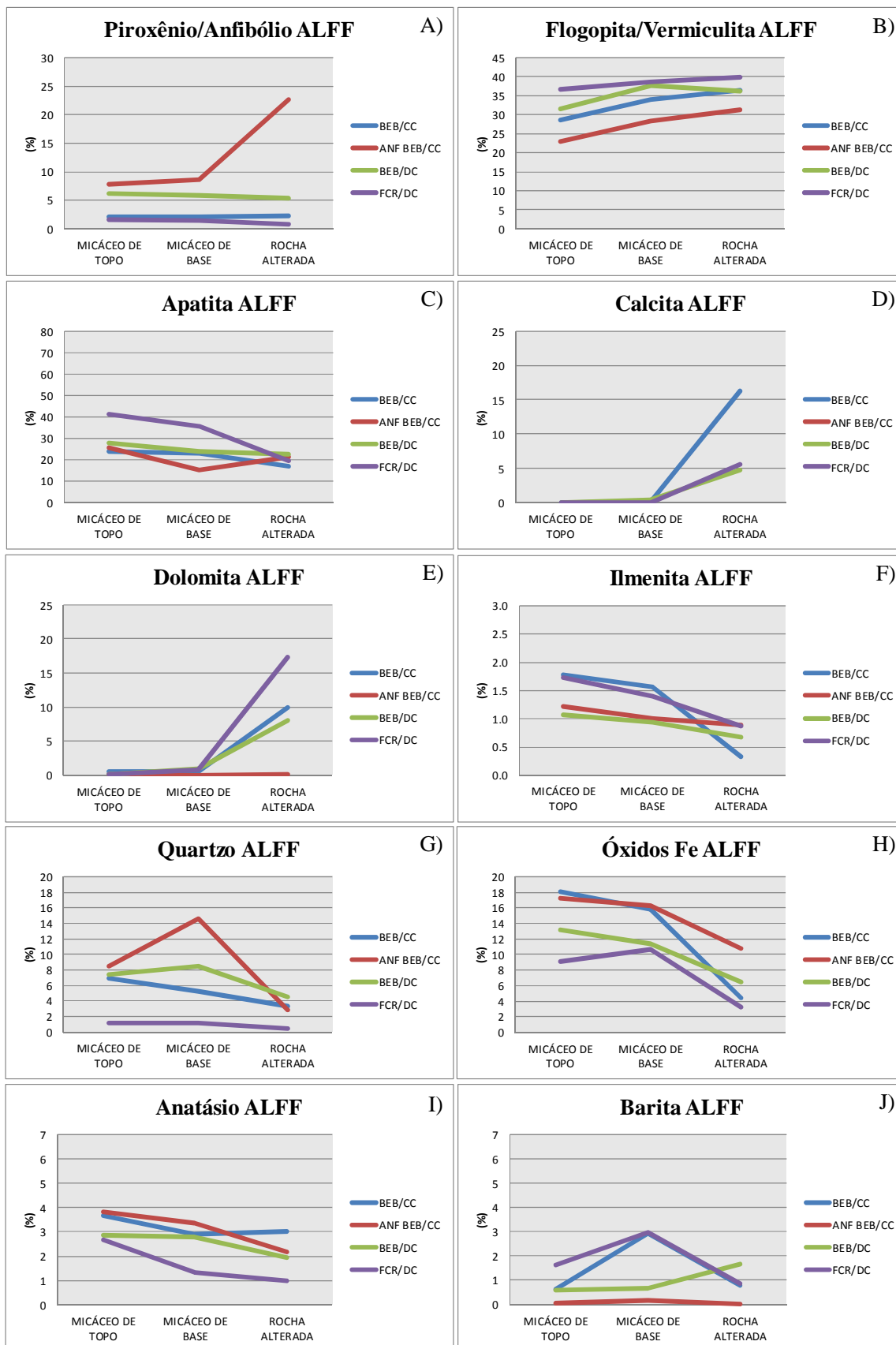


Figura 4.9: Valores médios dos resultados de composição mineralógica obtidos por QEMSCAN pra as amostras de alimentação da flotação de finos (ALFF) provenientes de testemunhos de sondagem, por macrogrupo de protolito e por horizonte de intemperismo.

4.2.5 Concentrado de Grossos (CG)

O concentrado de grossos (CG) é o produto da flotação de grossos. A tabela 4.10 apresenta as estatísticas descritivas de CG, separadamente por grupos M_I.

Os grupos M_I cujas alíquotas de alimentação da flotação possuem teores de C superiores a 0.8% e, portanto, necessitam de flotação de carbonatos, são os grupos 3, 9 e 12. (tabelas 4.3 e 4.7). Optou-se por efetuar ensaios de flotação apenas com as amostras do grupo M_I=9 (BEB/DC na rocha alterada), por ser este o grupo mais abrangente na mina do Barreiro com minério na rocha alterada atualmente exposto e que, conseqüentemente, será priorizado na lavra desse tipo de minério. A maior parte do minério M_I=3 (BEB/CC na rocha alterada) encontra-se sotoposto ao minério micáceo M_I=2 (BEB/CC no micáceo de base) atualmente aflorante na mina, e sua lavra ocorrerá apenas após a retirada deste minério. O minério M_I=12, por sua vez, possui menor abrangência em área que a de M_I=9.

Os principais contaminantes dos concentrados de grossos são SiO_2 , Fe_2O_3 , MgO e TiO_2 , que mostram padrões de variação associados aos protolitos e horizontes de intemperismo. No entanto, o Fe_2O_3 é o único contaminante controlado na especificação técnica do GCA, cujo limite máximo é 4%.

O principal padrão observado nos teores de SiO_2 são valores mais elevados nos concentrados de grossos provenientes de ANF BEB/CC, seguidos de BEB/DC, BEB/CC e FCR/DC (figura 4.10 A). Os concentrados de grossos provenientes de ANF BEB/CC possuem teores médios de SiO_2 sempre acima de 4.28% (tabela 4.10), alcançando uma média de 5.61% no CG produzido a partir de rocha alterada, devido à maior quantidade de piroxênio/anfibólio da respectiva ALFG desse M_I (figura 4.6 A). Interessante observar que o elevado conteúdo de quartzo presente na ALFG de ANF BEB/CC no micáceo de base não causou enriquecimento em SiO_2 no concentrado, sugerindo que o quartzo não foi flotado. Por outro lado, o quartzo não flotado pode carregar consigo a apatita associada, textura abundante nas amostras ROM desse macrogrupo de protolito (figura 3.10 F). Os concentrados de grossos de BEB/DC mostram um enriquecimento em SiO_2 em direção aos concentrados provenientes de minério micáceo, devido ao enriquecimento de quartzo na ALFG em direção aos horizontes micáceos, padrão contrário ao observado em ANF BEB/CC. No entanto, esse enriquecimento em SiO_2 pode ter sido uma manobra de processo, através do aumento na dosagem do coletor de apatita, para aumento da recuperação mássica desse minério. BEB/CC e FCR/DC, por sua vez, apresentam valores médios de SiO_2 inferiores a 3%. Os baixos valores de SiO_2 presentes nos concentrados de grossos

provenientes de $M_I=1$ novamente sugerem que o quartzo não foi flotado, uma vez que o conteúdo desse mineral ultrapassa 16% em sua respectiva ALFG (figura 4.6 G).

Os valores médios de Al_2O_3 são sempre baixos, não ultrapassando 0.5% (tabela 4.10), sugerindo presença pouco significativa de flogopita, filossilicatos interestratificados e vermiculita nos concentrados grossos. Esta característica reforça que os maiores portadores de SiO_2 nos concentrados grossos podem ser diopsídio, richterita, tetraferroflogopita, filossilicatos interestratificados provenientes da alteração supergênica de tetraferroflogopita e quartzo.

Os valores médios de Fe_2O_3 tendem a ser maiores nos concentrados grossos produzidos a partir de minérios micáceos (figura 4.10 B). Esse padrão é bem marcado em BEB/DC, no qual o Fe_2O_3 cresce de 2.18% no CG da rocha alterada para 3.94% no CG do micáceo de topo (tabela 4.10), acompanhando o enriquecimento em óxidos/hidróxidos de ferro com a evolução do intemperismo, observado na ALFG (figura 4.6 H). Em FCR/DC, o Fe_2O_3 do CG varia de 4.02% no micáceo de base para 5.19% no micáceo de topo, comportamento que também acompanha o aumento de óxidos hidróxidos de Fe em suas respectivas alíquotas ALFG. Tais teores estão levemente acima do limite da especificação técnica do GCA, mas podem ser corrigidos com uma separação magnética de alta intensidade. ANF BEB/CC apresenta um discreto enriquecimento nesse óxido nos concentrados grossos produzidos a partir de ALFG de rocha alterada em direção à de micáceo de topo. Apenas BEB/CC mostra um padrão contrário, com teores de Fe_2O_3 ligeiramente maiores no CG de micáceo de base em relação ao CG de micáceo de topo. Contudo, essa diferença é pouco significativa (3.98% e 3.78%, respectivamente).

O conteúdo de MgO é menor que 2% em todos os concentrados grossos analisados e decresce na seguinte ordem: BEB/DC, FCR/DC, BEB/CC e ANF BEB/CC, assim como da rocha alterada ao micáceo de topo (figura 4.10 C), proporcionalmente aos conteúdos de MgO observados nas alíquotas de ALFG. Os principais portadores de MgO nos concentrados grossos são dolomita, diopsídio, richterita, tetraferroflogopita e filossilicatos interestratificados provenientes da alteração supergênica de tetraferroflogopita.

O CaO apresenta um comportamento peculiar nos concentrados grossos provenientes de todos os macrogrupos de protolitos e horizontes de intemperismo: observa-se uma queda desse óxido da rocha alterada em direção ao micáceo de base, possivelmente marcada por uma queda no conteúdo de carbonatos, seguido de aumento desse óxido do micáceo de base em direção ao micáceo de topo (figura 4.10 D). Em ANF BEB/CC, o único mineral relevante portador de Ca além da apatita, no horizonte micáceo de topo, é a richterita; ainda, o conteúdo de apatita é o mesmo nos três horizontes, conforme indicado pelo teor de P_2O_5 (tabela 4.10). Logo, conclui-se que o aumento do teor de CaO no CG do micáceo de topo é devido ao aumento de richterita

nesse produto. Em BEB/DC, a variação do conteúdo de CaO no concentrado de grossos também está associada ao conteúdo de P_2O_5 (tabela 4.10) e, conseqüentemente, ao de apatita. Em BEB/CC e FCR/DC, as variações de CaO entre micáceo de base e de topo são pouco relevantes.

Os conteúdos de TiO_2 nos concentrados de grossos tendem a ser maiores naqueles provenientes de ANF BEB/CC e BEB/CC (figura 4.10 E). Adicionalmente, verifica-se um aumento desse óxido nos concentrados grossos de micáceo de topo (tabela 4.10), sugerindo que parte do anatásio permanece no concentrado de grossos.

O conteúdo de BaO é baixo nos concentrados de grossos, sempre inferior a 0.8%, sendo que os concentrados de ANF BEB/CC são os que apresentam os menores valores devido à sua baixa quantidade já na ALFG. No entanto, esse óxido não possui um padrão de variação definido nos concentrados de grossos relacionado aos horizontes de intemperismo (figura 4.10 F).

Tabela 4.10: Estatísticas descritivas dos principais óxidos analisados nos concentrados de grossos (CG) por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo. Notar que as amostras dos grupos M_I = 3 e 12 não foram submetidos à etapa de flotação. N: número de amostras.

BEB/CC																		
MICÁCEO DE TOPO (M_I=1)							MICÁCEO DE BASE (M_I=2)											
Variável	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior						
SiO ₂	11	2.76	0.85	5.37	1.32	3.59	9	2.85	1.41	4.64	2.01	3.19						
Al ₂ O ₃	11	0.37	0.11	1.07	0.17	0.63	9	0.34	0.16	0.69	0.18	0.50						
Fe ₂ O ₃	11	3.78	2.13	5.31	2.41	4.81	8	3.98	2.65	5.07	3.39	4.49						
MgO	11	0.63	0.16	1.72	0.23	1.15	9	0.87	0.34	1.68	0.48	1.05						
CaO	11	45.06	43.00	47.37	44.51	45.89	9	45.21	42.76	47.51	44.99	45.92						
TiO ₂	11	3.61	0.70	5.84	2.51	4.53	9	3.21	1.11	4.63	2.94	3.78						
P ₂ O ₅	11	34.10	34.10	34.10	34.10	34.10	9	34.10	34.10	34.10	34.10	34.10						
BaO	11	0.77	0.17	1.94	0.34	1.28	9	0.61	0.18	1.05	0.36	0.88						
ANF/BEB/CC																		
MICÁCEO DE TOPO (M_I=4)							MICÁCEO DE BASE (M_I=5)						ROCHA ALTERADA (M_I=6)					
Variável	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
SiO ₂	5	4.28	3.58	4.98	3.62	4.88	10	4.37	2.69	6.50	3.80	4.86	3	5.61	5.11	6.23	5.11	6.23
Al ₂ O ₃	5	0.21	0.15	0.27	0.20	0.23	11	0.31	0.17	0.55	0.18	0.50	3	0.19	0.16	0.24	0.16	0.24
Fe ₂ O ₃	5	2.26	1.04	3.25	1.77	3.20	11	2.57	1.21	3.66	2.13	2.97	3	2.03	1.40	2.82	1.40	2.82
MgO	5	0.58	0.15	0.93	0.40	0.90	11	0.63	0.24	1.08	0.47	0.75	3	1.09	0.89	1.46	0.89	1.46
CaO	5	46.72	46.29	47.00	46.68	46.89	11	45.93	44.13	47.20	45.14	46.96	3	47.09	46.61	47.47	46.61	47.47
TiO ₂	5	4.04	2.46	5.79	3.03	5.44	11	2.49	1.08	4.19	1.59	3.22	3	2.64	2.21	3.00	2.21	3.00
P ₂ O ₅	5	34.10	34.10	34.10	34.10	34.10	11	34.10	34.10	34.10	34.10	34.10	3	34.10	34.10	34.10	34.10	34.10
BaO	5	0.18	0.07	0.28	0.09	0.23	10	0.24	0.11	0.53	0.17	0.31	3	0.10	0.07	0.12	0.07	0.12
BEB/DC																		
MICÁCEO DE TOPO (M_I=7)							MICÁCEO DE BASE (M_I=8)						ROCHA ALTERADA (M_I=9)					
Variável	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
SiO ₂	14	4.08	1.32	8.48	3.02	5.24	27	3.90	1.73	6.91	2.93	4.67	13	2.45	1.26	3.69	1.91	2.87
Al ₂ O ₃	14	0.23	0.08	0.37	0.16	0.29	25	0.24	0.08	0.64	0.11	0.29	13	0.12	0.08	0.28	0.08	0.16
Fe ₂ O ₃	14	3.94	2.62	5.87	3.36	4.37	27	3.41	1.67	5.55	2.43	4.16	13	2.18	0.87	4.13	1.61	2.91
MgO	15	0.85	0.34	1.76	0.48	1.20	27	1.22	0.43	2.51	0.88	1.74	13	1.91	0.72	3.95	1.54	2.13
CaO	15	45.82	43.41	49.65	44.86	46.67	27	44.32	44.06	49.26	44.87	46.61	13	48.45	44.37	53.15	47.37	49.47
TiO ₂	15	1.90	0.49	3.07	1.51	2.37	27	1.63	0.31	2.72	0.88	2.44	13	0.76	0.22	2.37	0.43	0.78
P ₂ O ₅	15	34.02	32.00	34.20	34.10	34.20	27	32.71	30.19	34.20	34.10	34.20	13	34.18	34.00	34.20	34.20	34.20
BaO	15	0.75	0.07	7.08	0.16	0.40	24	0.52	0.08	1.85	0.21	0.57	13	0.39	0.12	1.42	0.22	0.45
FCR/DC																		
MICÁCEO DE TOPO (M_I=10)							MICÁCEO DE BASE (M_I=11)											
Variável	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior						
SiO ₂	6	1.82	1.26	2.24	1.39	2.17	3	1.30	0.92	1.59	0.92	1.59						
Al ₂ O ₃	6	0.45	0.16	1.00	0.32	0.42	3	0.31	0.16	0.60	0.16	0.60						
Fe ₂ O ₃	6	5.19	4.85	5.93	4.95	5.41	3	4.02	3.58	4.25	3.58	4.25						
MgO	6	0.84	0.60	1.13	0.63	0.96	3	1.12	0.64	2.03	0.64	2.03						
CaO	6	45.59	43.25	46.67	45.41	46.31	3	45.08	43.16	46.16	43.16	46.16						
TiO ₂	6	2.66	1.25	3.63	1.92	3.55	3	1.70	0.97	2.22	0.97	2.22						
P ₂ O ₅	6	34.12	34.10	34.20	34.10	34.10	3	34.77	34.10	36.00	34.10	36.00						
BaO	6	0.43	0.19	1.35	0.20	0.43	3	0.64	0.33	0.82	0.33	0.82						

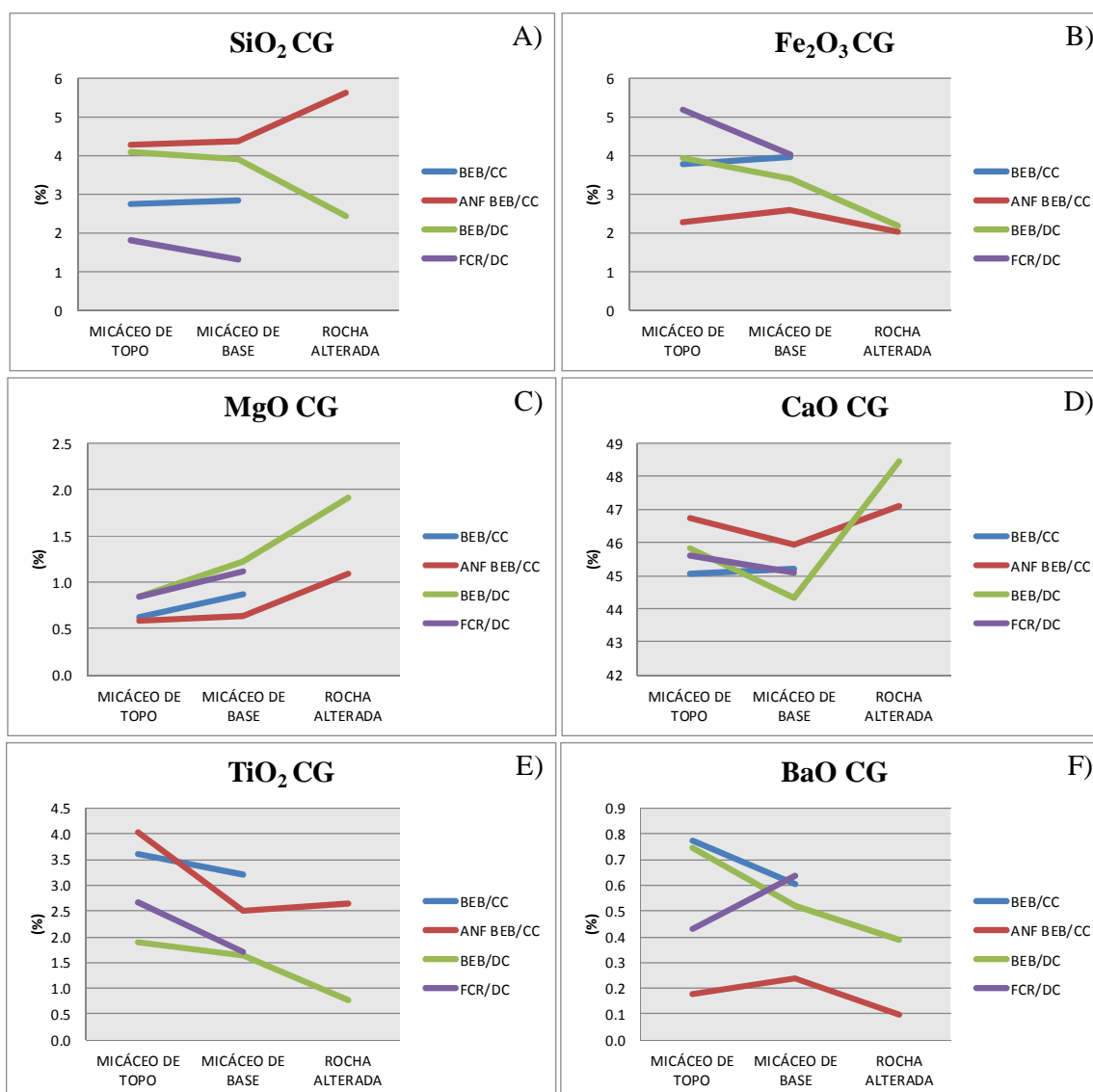


Figura 4.10: Variações dos teores médios dos principais óxidos analisados em amostras de concentrados de grossos (CG), por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo.

4.2.6 Concentrado de Finos (CF)

O concentrado de finos (CF) é o produto da flotação de finos. A tabela 4.11 apresenta as estatísticas descritivas de CF, separadamente por grupos M_I.

Os principais contaminantes dos concentrados de finos são SiO₂, Fe₂O₃ e MgO que mostram padrões de variação associados aos protolitos e horizontes de intemperismo, de forma similar à observada nos concentrados de grossos. Novamente, o Fe₂O₃ é o único contaminante controlado na especificação técnica do FCA, cujo limite superior é 7%.

O comportamento de SiO₂ em CF é semelhante ao observado nas amostras de CG: conteúdos mais elevados em CF proveniente de ANF BEB/CC, seguido de BEB/DC, BEB/CC e

FCR/DC (figura 4.11 A). O maior conteúdo de SiO_2 observado no concentrado fino de ANF BEB/CC (5.29%) foi derivado de rocha alterada, devido ao maior conteúdo de diopsídio e/ou richterita presente na ALFF desse M_I (figura 4.9 A), similar ao observado em seu respectivo concentrado de grossos. Os concentrados de finos provenientes dos demais macrogrupos de protolitos apresentam conteúdos de SiO_2 sempre abaixo de 3.5% (tabela 4.11).

O comportamento do Fe_2O_3 em CF também é, de uma forma geral, similar ao observado em CG: os maiores conteúdos foram alcançados nos concentrados produzidos a partir de FCR/DC, seguidos de BEB/CC, ANF BEB/CC e BEB/DC (figura 4.11 B). Apesar de o conteúdo de óxidos/hidróxidos de ferro ser o menor em ALFF de FCR/DC comparativamente aos demais M_I (figura 4.9 H), a maior concentração desse óxido no concentrado de finos proveniente desse macrogrupo sugere uma maior associação entre a apatita e os óxidos/hidróxidos de ferro. Fe_2O_3 também tende a enriquecer nos concentrados de finos produzidos a partir de minério dos horizontes de intemperismo mais evoluídos, comportamento compatível com o enriquecimento em óxidos/hidróxidos de ferro observados em ALFF. Ressalta-se que os teores de Fe_2O_3 em CF estão contidos na especificação técnica do FCA.

Os valores de MgO são sempre baixos nos concentrados finos, não ultrapassando 2.60% (tabela 4.11); tendem a ser maiores em FCR/DC e BEB/DC e menores em ANF BEB/CC e BEB/CC (figura 4.11 C), devido primeiramente ao maior conteúdo de flogopita/vermiculita na ALFF dos primeiros, seguido de dolomita.

O CaO apresenta o mesmo comportamento peculiar já observado nos concentrados de grossos: queda do conteúdo da rocha alterada em direção ao micáceo de base, possivelmente devido à presença de quantidade subordinada de carbonatos no concentrado de finos da rocha alterada, e aumento em direção aos concentrados de micáceo de topo, devido principalmente à presença de richterita além da apatita (figura 4.11 D).

O conteúdo de TiO_2 nos concentrados de finos tende a ser maior naqueles provenientes de ANF BEB/CC e BEB/CC (figura 4.11 E). Adicionalmente, verifica-se um aumento desse óxido nos concentrados de finos de micáceo de topo, sugerindo que anatásio e ilmenita estão presentes nos concentrado de finos de forma similar, porém menos expressiva, à observada nos concentrados de grossos.

O BaO é mais elevado nos concentrados de finos do que nos de grossos, alcançando 1.56% (tabela 4.11), quase o dobro do maior valor observado em CG. Os concentrados de finos de ANF BEB/CC apresentam os menores valores devido à baixa quantidade desse mineral já na ALFF. O padrão de variação de BaO relacionado aos horizontes de intemperismo acompanha o padrão dos conteúdos de barita observados em ALFF (figuras 4.11 F e 4.9 J).

Tabela 4.11: Estatísticas descritivas dos principais óxidos analisados nos concentrados de finos (CF) por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo. Notar que as amostras dos grupos M_I = 3 e 12 não foram submetidos à etapa de flotação. N: número de amostras.

BEB/CC													
Variável	MICÁCEO DE TOPO (M_I=1)						MICÁCEO DE BASE (M_I=2)						
	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	
SiO ₂	8	2.21	1.38	2.75	1.88	2.67	8	2.62	0.57	5.27	1.26	3.88	
Al ₂ O ₃	9	0.87	0.17	2.11	0.38	1.42	7	0.51	0.16	1.52	0.16	0.65	
Fe ₂ O ₃	10	5.09	2.54	7.72	3.28	7.35	7	4.43	2.85	6.93	3.16	5.79	
MgO	10	0.62	0.20	1.47	0.29	0.96	8	0.92	0.15	1.84	0.52	1.36	
CaO	10	43.63	37.28	48.64	41.52	45.51	7	43.50	35.61	46.26	42.80	46.22	
TiO ₂	10	2.09	0.72	5.21	1.34	2.26	8	1.65	0.53	3.69	0.68	2.35	
P ₂ O ₅	10	34.16	31.72	37.34	32.92	35.76	7	33.71	31.50	35.37	33.80	33.89	
BaO	10	1.38	0.24	3.07	0.46	2.46	8	1.56	0.30	3.22	0.33	2.36	

ANF BEB/CC																		
Variável	MICÁCEO DE TOPO (M_I=4)						MICÁCEO DE BASE (M_I=5)						ROCHA ALTERADA (M_I=6)					
	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
SiO ₂	5	3.47	2.57	4.55	3.13	3.57	11	4.70	2.30	7.31	2.91	6.94	3	5.29	4.16	6.14	4.16	6.14
Al ₂ O ₃	4	0.39	0.29	0.46	0.34	0.44	11	0.55	0.16	1.38	0.26	0.80	3	0.22	0.16	0.33	0.16	0.33
Fe ₂ O ₃	5	3.79	2.40	6.02	3.34	3.79	11	4.51	1.89	9.19	2.97	5.57	3	2.47	1.96	3.14	1.96	3.14
MgO	5	0.58	0.23	0.95	0.34	0.69	11	0.99	0.48	2.27	0.58	1.14	3	1.07	0.76	1.28	0.76	1.28
CaO	5	46.06	44.00	48.42	45.22	46.99	11	43.29	35.66	48.27	40.18	46.01	3	47.37	47.35	47.39	47.35	47.39
TiO ₂	5	2.48	1.21	3.91	2.00	3.07	11	1.73	0.96	3.11	1.03	2.34	3	2.37	1.90	2.72	1.90	2.72
P ₂ O ₅	4	33.62	33.29	33.80	33.43	33.80	11	32.35	26.98	36.59	29.38	34.21	3	33.94	33.80	34.23	33.80	34.23
BaO	4	0.17	0.08	0.28	0.11	0.24	11	0.34	0.19	0.59	0.22	0.51	3	0.14	0.09	0.16	0.09	0.16

BEB/DC																		
Variável	MICÁCEO DE TOPO (M_I=7)						MICÁCEO DE BASE (M_I=8)						ROCHA ALTERADA (M_I=9)					
	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
SiO ₂	14	3.29	1.58	4.41	2.69	4.15	23	3.49	1.20	5.29	2.69	4.46	8	2.25	1.09	4.03	1.36	2.95
Al ₂ O ₃	14	0.36	0.08	0.85	0.17	0.45	22	0.28	0.08	0.80	0.16	0.36	8	0.13	0.08	0.29	0.08	0.16
Fe ₂ O ₃	15	4.11	0.18	8.86	3.13	5.21	24	3.88	0.70	7.65	3.20	4.60	8	2.33	1.26	4.86	1.52	2.83
MgO	15	0.84	0.37	1.53	0.44	1.09	24	1.38	0.44	2.37	0.90	1.97	8	2.60	0.87	6.99	1.33	3.25
CaO	14	46.27	40.32	51.05	44.41	47.95	24	45.01	39.10	51.53	43.99	45.95	8	47.11	39.63	50.43	44.02	50.20
TiO ₂	14	1.18	0.49	1.69	0.99	1.45	23	1.24	0.15	2.78	0.80	1.57	8	0.42	0.18	0.82	0.23	0.65
P ₂ O ₅	14	34.78	31.15	38.90	33.80	35.97	23	33.39	30.00	37.91	32.70	33.80	8	31.11	22.52	33.80	28.68	33.80
BaO	14	0.40	0.01	1.27	0.19	0.45	24	1.28	0.06	7.71	0.32	1.62	8	1.06	0.19	3.70	0.22	1.73

FCR/DC													
Variável	MICÁCEO DE TOPO (M_I=10)						MICÁCEO DE BASE (M_I=11)						
	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	
SiO ₂	6	1.99	1.44	2.59	1.59	2.56	3	1.77	1.19	2.62	1.19	2.62	
Al ₂ O ₃	6	0.77	0.16	2.24	0.43	0.77	3	0.92	0.16	2.28	0.16	2.28	
Fe ₂ O ₃	6	5.47	4.54	6.13	4.57	6.11	3	4.43	2.22	6.39	2.22	6.39	
MgO	6	0.93	0.62	1.64	0.69	0.95	3	1.41	0.64	2.72	0.64	2.72	
CaO	6	45.13	42.31	48.00	43.42	46.80	3	44.49	43.38	46.50	43.38	46.50	
TiO ₂	6	1.30	0.88	2.14	1.06	1.48	3	0.69	0.22	1.13	0.22	1.13	
P ₂ O ₅	6	34.14	33.14	35.83	33.51	34.75	3	35.03	33.80	37.50	33.80	37.50	
BaO	6	0.63	0.21	1.68	0.24	0.98	3	0.76	0.64	0.93	0.64	0.93	

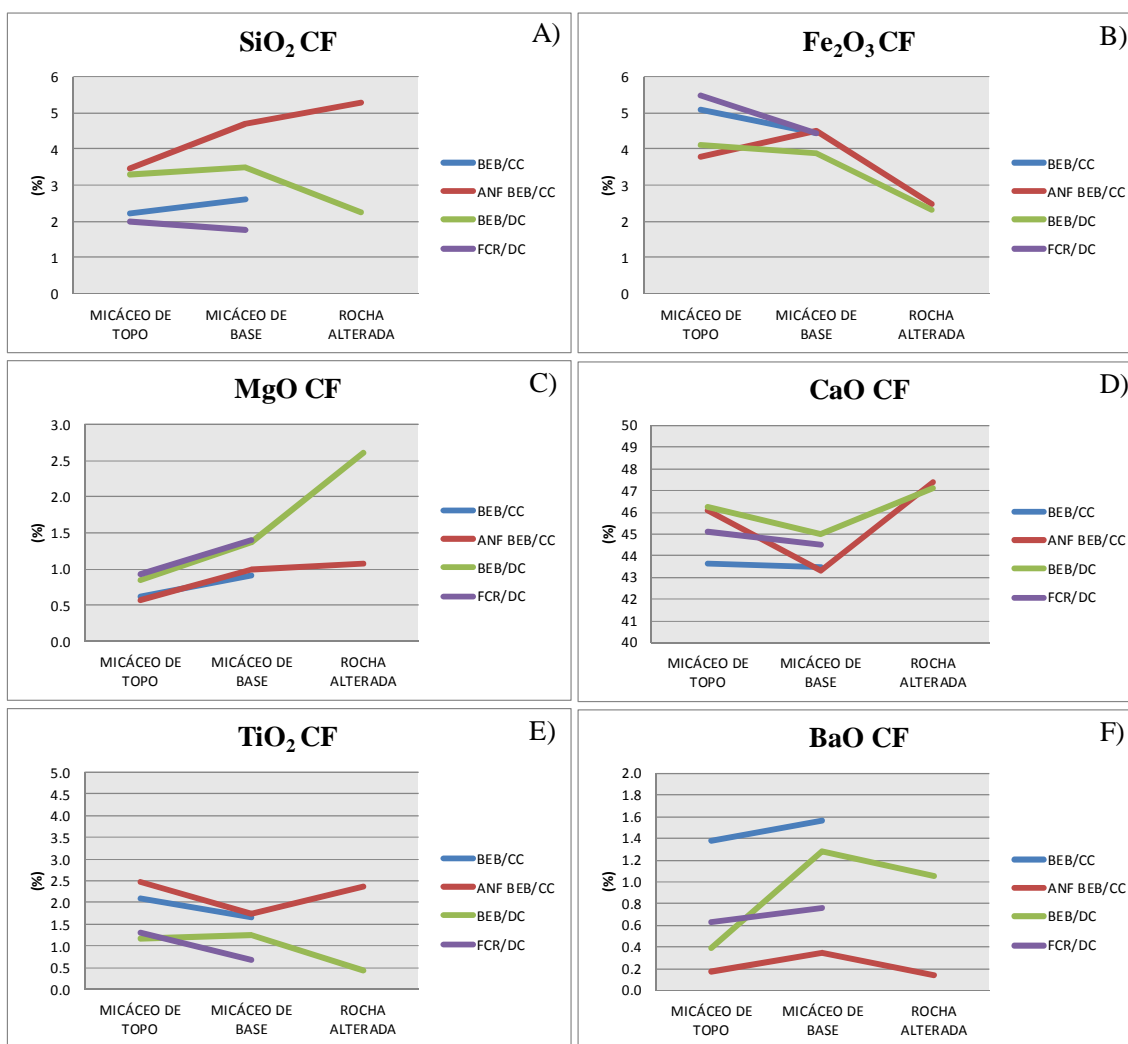


Figura 4.11: Variações dos teores médios dos principais óxidos analisados em amostras de concentrados de finos (CF), por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo.

4.2.7 *Rendimento Mássico e Recuperação Metalúrgica de P₂O₅*

Dois parâmetros tecnológicos de fundamental importância capazes de apontar comportamentos associados às características mineralógicas e químicas dos minérios são o rendimento mássico e a recuperação metalúrgica.

O rendimento mássico é a razão entre a massa do concentrado e a massa da alimentação de uma determinada operação unitária (por exemplo, etapa de preparação ou flotação) ou do teste tecnológico global, sendo determinado da seguinte forma:

$$\text{Rendimento Mássico} = \frac{C}{A} = \frac{a - r}{c - r}$$

Onde C é a massa de concentrado, A é a massa de alimentação, c é o teor de concentrado, a é teor de alimentação e r é o teor de rejeito.

A recuperação metalúrgica de um determinado elemento de interesse é a razão entre o conteúdo do elemento em um determinado concentrado em relação ao conteúdo deste elemento na alimentação. Do mesmo modo que o rendimento mássico, pode ser calculado de forma global ou por operação unitária, da seguinte forma:

$$\text{Recuperação Metalúrgica} = \frac{Cc}{Aa} = \frac{c * (a - r)}{a * (c - r)}$$

Onde C é a massa de concentrado, A é a massa de alimentação, c é o teor de concentrado, a é teor de alimentação e r é o teor de rejeito.

Os resultados de rendimento mássico e recuperações metalúrgicas de P₂O₅ obtidos nesta pesquisa estão apresentados na tabela 4.12, e os gráficos de variação das recuperações, na figura 4.12.

A figura 4.12 A mostra que o rendimento mássico obtido na etapa de preparação é maior nas amostras de rocha alterada e decresce em direção ao micáceo de topo. Esse comportamento é devido aos menores conteúdos de lama (*overflow* da deslamagem) observados na rocha alterada (figura 4.3 C). O valor muito baixo de rendimento mássico observado no M_I=11 é devido principalmente à maior massa de produto magnético (figura 4.3 G). O valor quase nulo de produto magnético obtido em ANF BEB/CC (figura 4.3 G) é a causa principal dos altos rendimentos mássicos associados a esse macrogrupo de protolito.

A recuperação metalúrgica de P₂O₅ total na preparação está associada ao rendimento mássico obtido nessa etapa, visto que há uma tendência de se recuperar maior conteúdo de P₂O₅ nas amostras com maior massa recuperada (figura 4.12 B).

Rendimento mássico total é o produto entre os rendimentos mássicos da preparação e da flotação. A figura 4.12 C mostra uma tendência de rendimentos mássicos totais de grossos menores em direção à rocha alterada. Esse comportamento é devido aos menores conteúdos de apatita presentes na rocha alterada, refletidos nos teores de P₂O₅ da ALFG desse horizonte de intemperismo (tabela 4.3).

O rendimento mássico total dos finos (figura 4.12 D) apresenta um padrão similar ao dos grossos, com exceção de BEB/DC, cujo rendimento cresce na rocha alterada. Os elevados teores de

MgO presentes no concentrado de finos desse M_I (figura 4.11 C) sugerem dolomita nesse concentrado, que eleva o rendimento mássico total dos finos. Conteúdos mais elevados de MgO também ocorrem nos concentrados de grossos desse M_I (figura 4.10). No entanto, nesse caso o rendimento mássico não acompanha o teor de MgO.

A recuperação metalúrgica de P_2O_5 na flotação de grossos (figura 4.12 E) diminui, de forma geral, em direção à rocha alterada. Considerando-se que a apatita da rocha alterada tende a possuir menor quantidade de impregnação por óxidos/hidróxidos de ferro e maior cristalinidade quando comparada à apatita de horizontes de intemperismo mais evoluídos (Leal Filho, 1995; Barros, 2005), o comportamento obtido nesta pesquisa é o contrário do comportamento esperado.

A heterogeneidade química superficial da apatita, devida principalmente a recobrimentos superficiais por óxidos/hidróxidos de ferro, é um fator determinante de seu nível de flotabilidade (Leal Filho, 1995). A presença de apatita recoberta por películas de óxidos/hidróxidos de ferro, que afetam intensamente a sua flotabilidade, é muito comum nos minérios situados nos horizontes superiores do manto de intemperismo, e tende a diminuir em direção à rocha fresca. Nesse contexto, cita-se um amplo trabalho de caracterização do minério oxidado da mina do Barreiro desenvolvido na década de 1980, cujo resultado mais significativo foi a predição do desempenho da flotação de uma determinada amostra a partir do levantamento do grau de recobrimento das partículas de apatita por óxidos/hidróxidos de ferro (Takata, 2000). Minérios contendo grãos com alta percentagem de recobrimento apresentavam recuperações de P_2O_5 significativamente inferiores em comparação com os minérios cujas apatitas exibiam superfícies isentas de recobrimento. A queda de recuperação metalúrgica de P_2O_5 na flotação de grossos em direção à rocha alterada, observada na presente pesquisa, sugere que o processo de flotação dos minérios da base do manto de intemperismo de Araxá requer ajustes para atingir melhores resultados. No entanto, não pode ser desconsiderado que, apesar de menos frequentes, as impregnações por óxidos/hidróxidos de ferro na apatita da base do manto de intemperismo não são ausentes (Ferreira et al., 2013).

O comportamento da recuperação metalúrgica de P_2O_5 total dos grossos (figura 4.12 F) está condicionado principalmente pelos resultados de recuperação metalúrgica de P_2O_5 da flotação de grossos, conforme sugere a similaridade entre ambos os padrões.

A recuperação metalúrgica de P_2O_5 na flotação de finos (figura 4.12 G) tende a ser menor em direção à rocha alterada, assim como observado na flotação de grossos. Entende-se que os resultados obtidos podem ser melhorados com ajustes no processo de flotação de carbonatos. O pico de baixa recuperação metalúrgica observado em ANF BEB/CC no micáceo de base pode decorrer do elevado conteúdo de quartzo em sua respectiva ALFF (figura 4.9 G). De forma a se controlar o teor de SiO_2 no concentrado de finos, perde-se P_2O_5 no rejeito, conforme sugere estreita associação

entre apatita e quartzo na amostra volumétrica de ANF BEB/CC no horizonte micáceo de base (AV-3, figura 3.10 F).

A recuperação metalúrgica de P_2O_5 total dos finos (figura 4.12 H) é em geral muito baixa, alcançando uma média de 9.47% em FCR/DC no micáceo de topo, e 4.15% em BEB/CC (tabela 4.12). De uma maneira geral, essa variável apresenta um padrão similar ao observado na recuperação metalúrgica de P_2O_5 na flotação de finos. Apesar dos valores mais elevados de recuperação de P_2O_5 na flotação de finos alcançados em ANF BEB/CC na rocha alterada, a recuperação de P_2O_5 total dos finos nesse M_I é baixa em decorrência da restrita massa recuperada de finos (figura 4.12 D), 1.39% (tabela 4.12). Por outro lado, as baixas recuperações de P_2O_5 na flotação de finos de BEB/DC na rocha alterada (figura 4.12 G) são compensadas pela recuperação de P_2O_5 na etapa de preparação (figura 4.12 B).

O gráfico da figura 4.12 I mostra o padrão dos resultados obtidos de recuperação de P_2O_5 totais das flotações de grossos e de finos, herança dos padrões obtidos nas flotações de grossos e finos separadamente.

O comportamento observado de recuperação metalúrgica de P_2O_5 total de grossos e finos (figura 4.12 J) reflete as recuperações metalúrgicas obtidas nas etapas de preparação e flotação.

Em busca das causas que levaram às baixas recuperações metalúrgicas obtidas nas amostras de rocha alterada, Ferreira et al. (2014) observaram que o conteúdo de barita, silicatos e carbonatos impacta negativamente na recuperação de apatita, e que as dosagens de coletores e depressores devem ser minuciosamente ajustadas de forma a ser evitado arraste excessivo de apatita para os concentrados de barita e carbonato, e recuperações excessivas de barita e carbonato no concentrado de apatita. A amostra volumétrica AV-4 foi utilizada em estudos de coletores e depressores alternativos. Os resultados, no entanto, não foram satisfatórios. Os autores recomendam a continuidade dos estudos de processo com as amostras de rocha alterada, assim como execução de ensaios para otimização das dosagens dos coletores de barita e carbonato.

Tabela 4.12: Estatísticas descritivas dos resultados de recuperações dos testes de flotação, por macrogrupo de protólito e horizonte de intemperismo. Rend Mas Prep T: rendimento mássico da preparação total; Rec P₂O₅ Prep T: recuperação metalúrgica de P₂O₅ da preparação total; Enr P₂O₅ Prep T: enriquecimento de P₂O₅ na preparação total; Rec P₂O₅ FLG: recuperação de P₂O₅ da flotação de grossos; Rec P₂O₅ TG: recuperação de P₂O₅ total de grossos; Rec Mas TG: recuperação mássica total de grossos; Rec P₂O₅ FLF: recuperação de P₂O₅ da flotação de finos; Rec P₂O₅ TF: recuperação de P₂O₅ total de finos; Rec Mas TF: recuperação mássica total de finos; Rec P₂O₅ FLGF: recuperação de P₂O₅ da flotação de grossos e finos; Rec P₂O₅ TGF: recuperação de P₂O₅ total de grossos e finos; Rec Mas GF: rendimento mássico total de grossos e finos. N: número de amostras.

Variável	BEB/CC																	
	MICÁCEO DE TOPO						MICÁCEO DE BASE						ROCHA ALTERADA					
	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
Rend Mas Prep T	12	50.89	40.96	63.07	45.60	54.52	11	52.90	44.28	61.66	48.69	57.63	4	56.21	55.40	56.76	55.72	56.70
Rec P ₂ O ₅ Prep T	12	73.53	65.29	80.63	69.00	78.74	11	76.52	66.75	89.58	70.96	81.32	4	77.84	74.40	81.98	75.27	80.42
Enr P ₂ O ₅ Prep T	12	1.21	0.92	1.39	1.11	1.34	12	1.27	1.09	1.43	1.22	1.35	4	1.38	1.31	1.46	1.34	1.43
Rec P ₂ O ₅ FLG	11	84.28	69.46	96.34	75.84	94.43	9	82.55	55.24	94.14	83.86	92.18	0					
Rec P ₂ O ₅ TG	11	55.62	47.28	76.56	51.31	57.33	9	56.11	25.34	75.52	52.77	66.82	0					
Rec Mas TG	11	17.21	9.67	39.10	11.00	20.80	9	17.70	4.46	34.88	8.64	24.14	0					
Rec P ₂ O ₅ FLF	10	61.62	22.78	87.10	51.60	76.66	8	48.87	14.70	75.00	21.86	73.70	0					
Rec P ₂ O ₅ TF	10	4.15	1.40	7.36	3.11	5.47	8	3.12	0.67	6.01	1.15	4.57	0					
Rec Mas TF	10	1.10	0.34	2.18	0.80	1.39	8	1.07	0.17	2.86	0.27	1.54	0					
Rec P ₂ O ₅ FLGF	10	82.02	68.07	95.43	74.37	92.88	8	83.78	53.19	92.73	83.26	91.80	0					
Rec P ₂ O ₅ TGF	10	57.68	50.73	68.70	55.47	58.14	8	63.08	35.97	81.53	57.36	72.13	0					
Rec Mas GF	10	16.12	10.48	22.98	11.66	19.93	8	20.17	4.78	36.68	11.29	30.95	0					

Variável	ANF BEB/CC																	
	MICÁCEO DE TOPO						MICÁCEO DE BASE						ROCHA ALTERADA					
	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
Rend Mas Prep T	5	54.63	49.73	60.94	51.53	57.68	13	59.41	44.41	78.00	53.32	65.20	3	59.47	51.61	67.52	51.61	67.52
Rec P ₂ O ₅ Prep T	5	71.63	64.19	79.81	69.20	75.57	13	73.02	62.78	89.00	65.31	78.76	3	73.03	64.74	77.60	64.74	77.60
Enr P ₂ O ₅ Prep T	4	1.06	1.01	1.12	1.03	1.09	12	1.12	0.87	1.32	1.07	1.20	3	1.11	1.02	1.20	1.02	1.20
Rec P ₂ O ₅ FLG	5	79.79	66.09	85.86	78.66	85.75	8	77.61	67.62	90.64	69.14	86.79	2	80.05	76.52	83.57	76.52	83.57
Rec P ₂ O ₅ TG	5	48.91	40.86	58.58	45.15	51.69	11	47.88	26.77	69.01	37.20	58.13	2	50.21	43.95	56.46	43.95	56.46
Rec Mas TG	5	16.98	9.22	24.70	12.65	19.73	11	12.41	1.00	26.53	5.37	21.75	2	13.53	9.82	17.24	9.82	17.24
Rec P ₂ O ₅ FLF	5	76.56	57.42	89.54	72.86	85.67	11	55.45	2.91	87.07	29.38	82.46	2	77.90	75.62	80.18	75.62	80.18
Rec P ₂ O ₅ TF	5	6.39	5.06	9.73	5.51	5.83	11	4.63	0.10	11.86	2.82	6.49	2	5.05	4.19	5.90	4.19	5.90
Rec Mas TF	5	2.20	1.35	2.86	1.71	2.85	11	1.37	0.02	5.08	0.55	1.53	2	1.39	0.92	1.85	0.92	1.85
Rec P ₂ O ₅ FLGF	5	79.21	67.53	86.14	74.74	85.84	11	70.67	49.80	90.04	61.26	83.09	2	79.84	76.44	83.24	76.44	83.24
Rec P ₂ O ₅ TGF	5	55.30	50.59	63.64	50.98	57.51	11	52.51	32.59	77.80	37.99	69.99	2	55.26	48.14	62.37	48.14	62.37
Rec Mas GF	5	19.18	10.57	27.55	15.51	21.43	11	13.79	1.55	31.61	5.49	23.40	2	14.92	10.74	19.09	10.74	19.09

Variável	BEB/DC																	
	MICÁCEO DE TOPO						MICÁCEO DE BASE						ROCHA ALTERADA					
	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
Rend Mas Prep T	14	53.88	46.98	62.96	51.99	56.40	28	55.94	40.04	64.62	51.76	60.31	19	60.79	47.73	72.65	54.12	66.30
Rec P ₂ O ₅ Prep T	15	72.90	62.77	80.02	69.99	75.64	25	74.20	67.12	84.80	71.80	76.15	19	75.18	62.67	87.23	68.18	80.64
Enr P ₂ O ₅ Prep T	16	1.21	1.05	1.42	1.13	1.30	26	1.16	0.99	1.43	1.10	1.24	17	1.20	1.04	1.43	1.15	1.25
Rec P ₂ O ₅ FLG	15	79.97	44.75	99.74	70.59	91.76	26	72.11	42.27	98.49	63.20	81.70	13	66.41	32.80	92.51	61.42	74.03
Rec P ₂ O ₅ TG	15	52.71	30.97	72.36	43.83	62.52	26	46.57	20.86	71.69	38.70	56.19	13	41.92	24.90	62.49	34.81	47.16
Rec Mas TG	15	18.89	5.64	40.68	11.61	21.74	26	14.45	3.49	32.69	8.00	21.72	13	12.45	2.37	28.57	7.18	17.41
Rec P ₂ O ₅ FLF	15	69.02	50.39	86.89	55.83	77.06	24	62.11	5.12	91.14	45.71	82.71	6	50.83	16.51	70.67	47.60	59.85
Rec P ₂ O ₅ TF	15	5.86	3.26	12.75	4.42	6.82	24	6.17	0.58	14.05	4.13	8.58	6	5.94	3.45	8.30	4.77	7.16
Rec Mas TF	15	2.09	0.68	5.34	1.24	2.54	24	2.22	0.14	9.78	0.91	3.16	6	2.88	2.13	3.17	2.96	3.03
Rec P ₂ O ₅ FLGF	15	79.27	46.55	96.19	69.57	90.44	27	71.91	40.80	97.43	61.48	82.56	13	64.29	32.80	89.45	57.84	74.03
Rec P ₂ O ₅ TGF	15	58.57	35.46	77.77	47.32	67.10	27	50.33	4.42	81.15	39.87	65.76	13	44.66	24.90	70.78	34.81	54.33
Rec Mas GF	15	20.98	6.88	43.84	12.75	27.08	27	15.89	1.95	37.17	7.67	24.37	13	13.77	2.37	31.53	7.18	20.42

Variável	FCR/DC																	
	MICÁCEO DE TOPO						MICÁCEO DE BASE						ROCHA ALTERADA					
	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior	N	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Quartil Superior
Rend Mas Prep T	5	54.93	49.92	59.50	54.49	55.62	3	47.56	44.75	50.62	44.75	50.62	8	62.41	52.42	72.60	54.88	69.16
Rec P ₂ O ₅ Prep T	6	69.75	64.02	73.92	67.71	72.59	3	68.25	65.78	70.93	65.78	70.93	8	72.35	65.50	80.80	67.64	77.05
Enr P ₂ O ₅ Prep T	5	1.28	1.22	1.32	1.25	1.31	3	1.36	1.22	1.51	1.22	1.51	8	1.18	0.99	1.38	1.06	1.28
Rec P ₂ O ₅ FLG	6	85.55	77.85	93.94	78.62	93.68	3	79.34	67.84	86.86	67.84	86.86	0					
Rec P ₂ O ₅ TG	6	50.14	42.98	59.45	47.02	53.18	3	48.23	39.79	54.04	39.79	54.04	0					
Rec Mas TG	6	23.04	13.02	31.52	19.30	27.36	3	17.69	12.20	23.65	12.20	23.65	0					
Rec P ₂ O ₅ FLF	6	84.38	70.35	88.57	85.43	87.82	3	59.14	51.13	75.07	51.13	75.07	0					
Rec P ₂ O ₅ TF	6	9.47	6.22	12.10	8.37	10.64	3	4.65	3.50	5.36	3.50	5.36	0					
Rec Mas TF	6	4.28	3.01	5.42	3.68	5.37	3	1.62	1.06	2.19	1.06	2.19	0					
Rec P ₂ O ₅ FLGF	6	85.58	78.30	93.07	79.83	92.74	3	77.65	66.51	85.86	66.51	85.86	0					
Rec P ₂ O ₅ TGF	6	59.62	52.84	67.82	53.54	62.82	3	52.89	43.29	59.41	43.29	59.41	0					
Rec Mas GF	6	27.32	16.04	35.90	22.98	32.78	3	19.31	13.26	25.85	13.26	25.85	0					

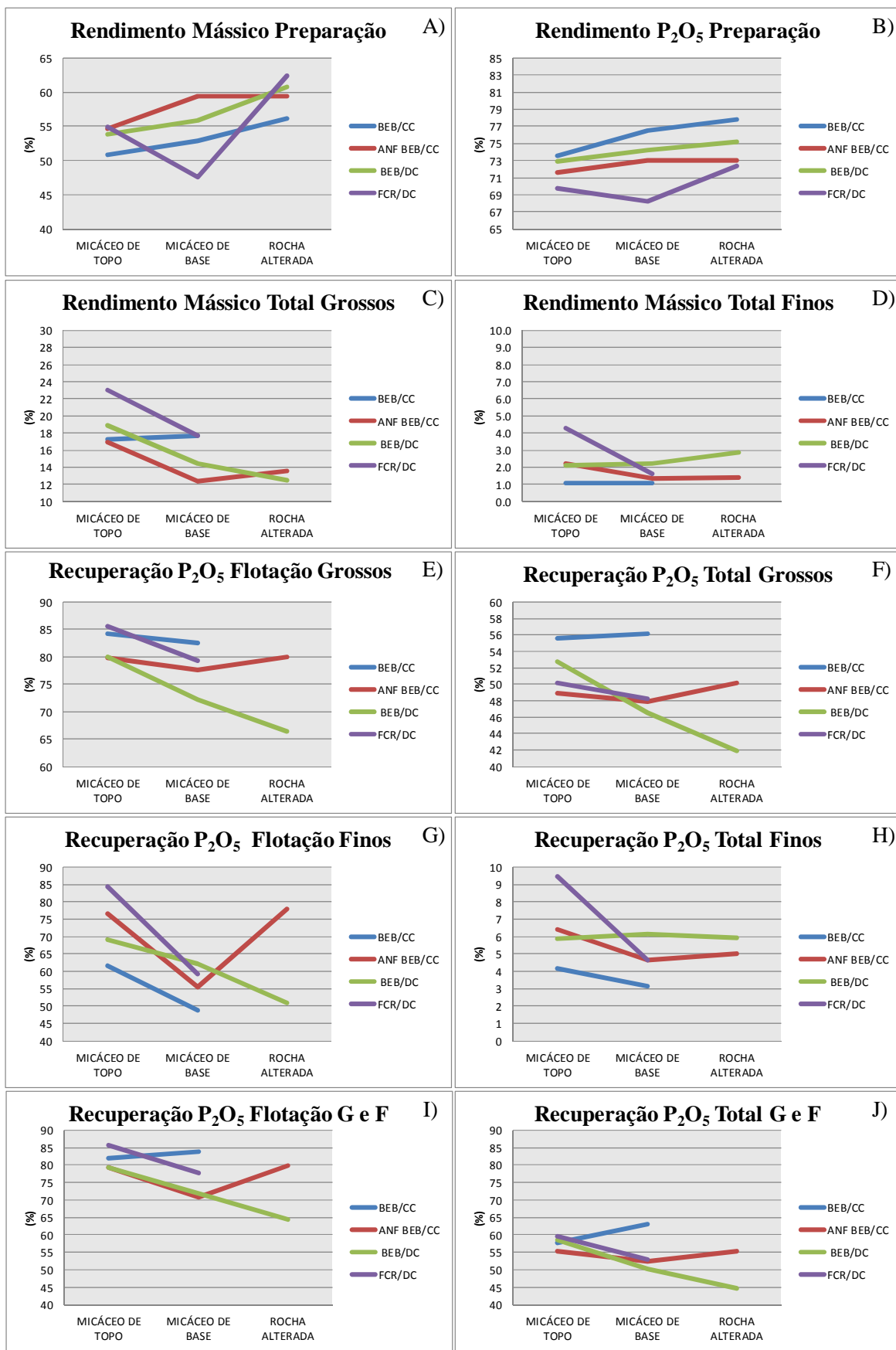


Figura 4.12: Variações de rendimentos mássicos e recuperações metalúrgicas obtidas nos ensaios tecnológicos, por macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo. G: grossos; F: finos.

4.3. ANÁLISES ESTATÍSTICAS MULTIVARIADAS

Os resultados apresentados no item 4.2 mostraram o comportamento das variáveis obtidas a partir dos testes de caracterização tecnológica. Contudo, relações simultâneas entre diversas variáveis só podem ser feitas com o uso de técnicas estatísticas multivariadas.

Análise multivariada corresponde a todos os métodos estatísticos que analisam simultaneamente múltiplas medidas sobre uma amostra, num universo em que todas as variáveis são inter-relacionadas, de maneira que seus diferentes efeitos não podem ser significativamente interpretados de forma separada (Hair et al. 2005). Em muitos casos, técnicas multivariadas são um meio de executar em uma única análise aquilo que exigiria múltiplas análises usando técnicas univariadas. Outras técnicas multivariadas, no entanto, foram projetadas exclusivamente para tratar questões multivariadas, como análise por principais componentes, que identifica a estrutura subjacente em um conjunto de variáveis.

Nesta pesquisa, a base de dados geometalúrgica foi tratada por análise por principais componentes e regressão linear.

4.3.1 *Análise por Principais Componentes (APC)*

4.3.1.1 *Introdução*

A análise por principais componentes visa definir a estrutura subjacente em uma matriz de dados. Esta técnica aborda o problema de analisar a estrutura das inter-relações entre um grande número de variáveis, definindo um conjunto de dimensões latentes comuns. Ao reduzir o número de variáveis, a análise espacial obtém dimensões latentes que, quando interpretadas e compreendidas, descrevem os dados em um número muito menor de conceitos do que as variáveis individuais originais, além de fornecer ferramentas adequadas para identificar as variáveis mais importantes no espaço das principais componentes (Hair et al., 2005).

A idéia central da análise baseia-se na redução do conjunto de dados a ser analisado, quando os dados são constituídos por um grande número de variáveis inter-relacionadas, com coeficientes de correlação não-nulos. Procura-se redistribuir a variação nas variáveis de forma a se obter um conjunto ortogonal de eixos não correlacionados.

Matematicamente, esta técnica consiste em reescrever as variáveis originais em novas variáveis por uma transformação de coordenadas. As principais componentes são as novas variáveis geradas através de uma transformação matemática especial realizada sobre as variáveis originais. Cada uma destas componentes, por sua vez, é escrita como uma combinação linear das variáveis originais. Nestas combinações, cada variável terá uma importância diferente. O conjunto original de variáveis transforma-se, então, em um novo conjunto, de dimensões equivalentes ou menores e que mantém, ao máximo, a variabilidade do conjunto original.

As principais componentes possuem características específicas que as tornam mais efetivas que as variáveis originais para a análise do conjunto das amostras. Primeiramente, são ortogonais entre si e, deste modo, cada componente traz uma informação estatística diferente. A segunda característica é decorrente do processo matemático de geração de cada componente, que maximiza a informação estatística para cada uma das coordenadas que estão sendo criadas. Enquanto as variáveis originais possuem a mesma importância estatística entre elas, as principais componentes possuem importância estatística decrescente. Ou seja, as primeiras principais componentes são mais importantes, de forma que as demais são usualmente desprezadas. As principais componentes podem, portanto, ser analisadas separadamente devido à ortogonalidade, servindo para interpretar o peso das variáveis originais na combinação das principais componentes mais importantes. Podem, ainda, servir para visualizar o conjunto da amostra apenas pelo gráfico das duas primeiras componentes, que detêm maior parte da informação estatística (Moita Neto, 2004).

Para a determinação das principais componentes, é necessário calcular a matriz de variância-covariância ou a matriz de correlação, encontrar os autovalores e os autovetores e, por fim, escrever as combinações lineares, que são as novas variáveis.

4.3.1.2 Primeira Análise

Vinte e uma variáveis originais da base de dados geometalúrgica, com características multicolineares, foram transformadas em onze principais componentes, também denominadas de fatores. No novo sistema de coordenadas gerado, os autovetores determinam a direção dos eixos das principais componentes. Variáveis com direções e sentidos equivalentes apresentam correlações positivas entre si; variáveis com direções próximas e sentidos contrários apresentam correlações negativas; variáveis cujas direções dos vetores formam ângulos próximos de 90° possuem baixa correlação (figura 4.13).

SiO₂ ROM, SiO₂ ALFG, SiO₂ ALFF e Pir/anf ALFF possuem correlações positivas entre si. O vetor de Massa Mag, por outro lado, possui sentido oposto ao das demais variáveis sendo, portanto,

negativamente correlacionado. Esse comportamento indica que rochas com maior conteúdo de piroxênio/anfibólio possuem menor conteúdo de magnetita, e vice-versa.

P_2O_5 ROM, Al_2O_3 ROM, TiO_2 ROM, Fe_2O_3 ROM, BaO ROM, P_2O_5 Mag, Fe_2O_3 ALFG e Óx Fe ALFG possuem correlações positivas entre si e crescem com a evolução do intemperismo.

Os vetores de MgO ROM, MgO ALFG, MgO ALFF, Flog/Verm ALFG, Flog/Verm ALFF, calcita ALFF e dolomita ALFF também possuem direções e sentidos próximos e, portanto, correlações positivas entre si; de forma contrária, possuem sentidos opostos e, portanto, correlações negativas com os vetores de P_2O_5 ROM, Al_2O_3 ROM, TiO_2 ROM, Fe_2O_3 ROM, BaO ROM, P_2O_5 Mag, Fe_2O_3 ALFG e Óx Fe ALFG. As variáveis MgO ROM, MgO ALFG, MgO ALFF, Flog/Verm ALFG, Flog/Verm ALFF, calcita ALFF e dolomita ALFF decrescem com a evolução do intemperismo.

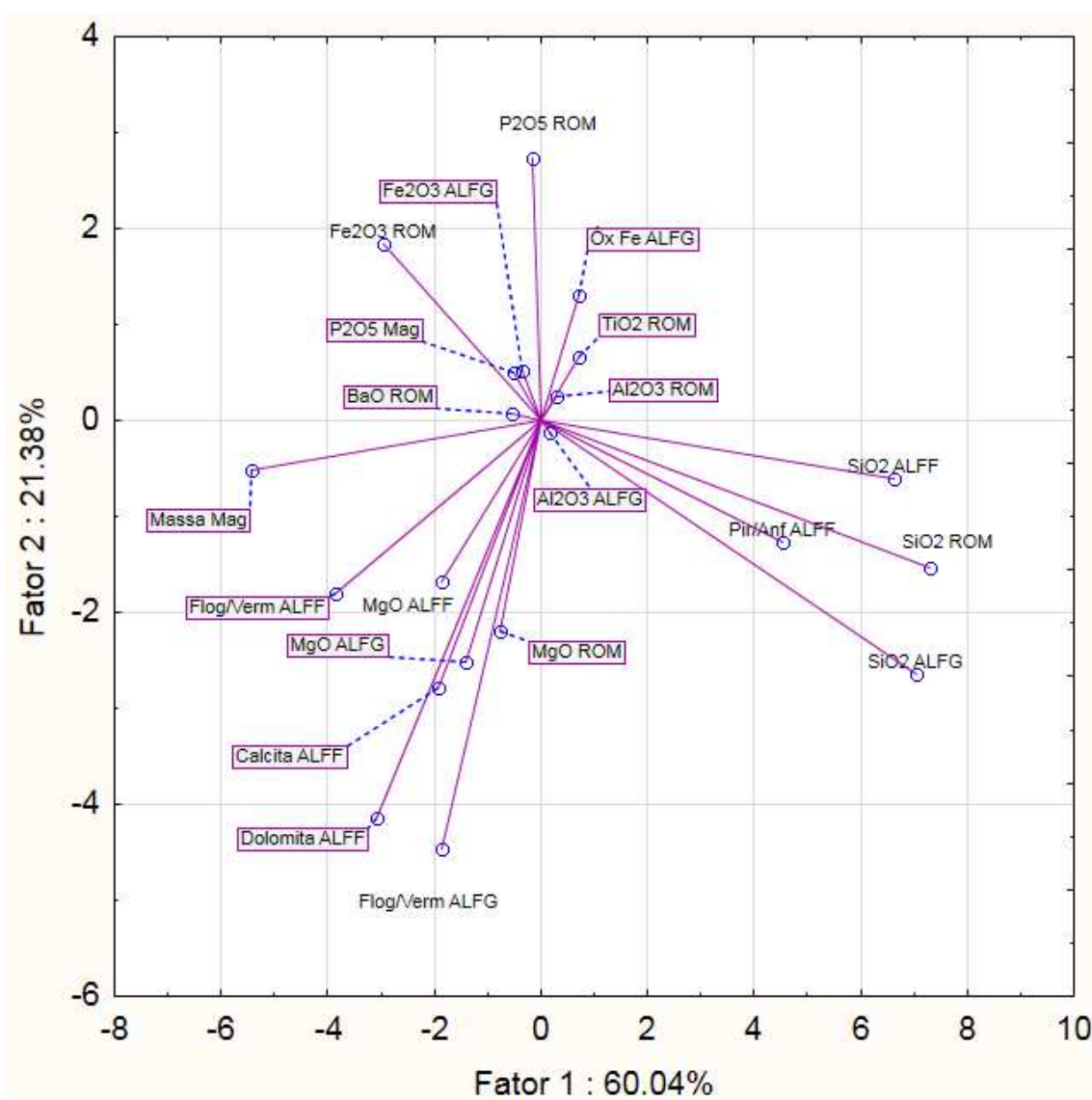


Figura 4.13: Projeção das variáveis analisadas no plano de coordenadas fator 1 versus fator 2.

Os autovalores determinam a quantidade de variabilidade absorvida por cada principal componente após a rotação do sistema de coordenadas. O primeiro autovalor está associado à primeira principal componente, e assim consecutivamente. A figura 4.14 apresenta os autovalores da matriz de covariância em forma de gráfico. A porcentagem de variação explicada pela componente está no eixo das ordenadas, e os autovalores estão representados em ordem decrescente no eixo das abscissas. As duas primeiras componentes explicam 81.42% da variância total, enquanto as nove demais componentes absorvem o restante da variância. Juntas, as onze principais componentes resumem o total de variabilidade existente nas vinte e uma variáveis. A estabilização do gráfico após a quarta componente indica que o acréscimo de explicação da variabilidade pelas demais é pouco significativo. A tabela 4.13 apresenta os autovalores obtidos, suas respectivas porcentagens e valores e porcentagens acumulados.

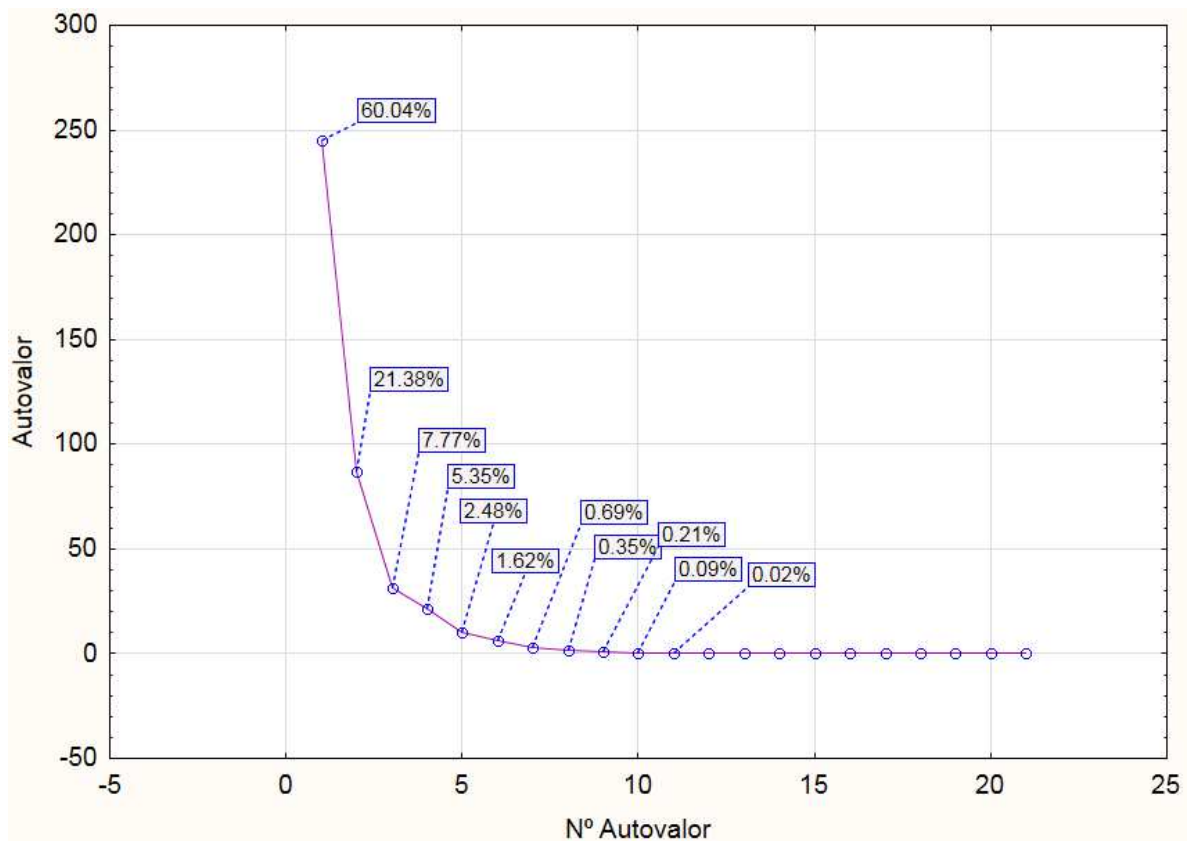


Figura 4.14: Autovalores da matriz de covariância.

Tabela 4.13: Autovalores obtidos na primeira análise por principais componentes.

PC	Autovalor	Total (%)	Autovalor Acumulado	Autovalor Acumulado (%)
1	244.9060	60.03613	244.9060	60.0361
2	87.2278	21.38297	332.1337	81.4191
3	31.6970	7.77018	363.8307	89.1893
4	21.8122	5.34703	385.6429	94.5363
5	10.1160	2.47983	395.7588	97.0161
6	6.6102	1.62041	402.3690	98.6365
7	2.7962	0.68545	405.1652	99.3220
8	1.4393	0.35282	406.6044	99.6748
9	0.8615	0.21120	407.4660	99.8860
10	0.3869	0.09484	407.8529	99.9809
11	0.0781	0.01914	407.9310	100.0000

A correlação entre as variáveis e as duas primeiras principais componentes e a contribuição das variáveis na construção das principais componentes estão apresentadas na tabela 4.14. PC1 possui correlação positiva e forte com SiO₂ ALFF, SiO₂ ROM, SiO₂ ALFG, Pir/Anf ALFF, TiO₂ ROM e Al₂O₃ ROM, variáveis com conteúdos altos em ANF BEB/CC e baixos em FCR/DC. As principais variáveis com correlações negativas com PC1 são Massa Mag, Flog/Verm ALFF, MgO ALFF e Fe₂O₃ ROM, variáveis com conteúdos pronunciados em FCR/DC e que decrescem em direção a ANF BEB/CC. Portanto, PC1 pode ser utilizado com um marcador de protolitos. As variáveis que mais contribuíram para a construção de PC1 foram SiO₂ e Fe₂O₃.

O fator 2 possui correlação positiva principalmente com P₂O₅ ROM, Óx Fe ALFG e TiO₂ ROM, variáveis cujos conteúdos aumentam com a evolução do intemperismo. Em contrapartida, possui correlação negativa principalmente com MgO ROM, MgO ALFG, Flog/Verm ALFG e Dolomita ALFF, variáveis cujos conteúdos diminuem com a evolução do intemperismo. PC2 pode ser utilizado, portanto, como um marcador de horizonte de intemperismo. As variáveis que mais contribuíram para a construção de PC2 foram MgO e P₂O₅.

Tabela 4.14: Correlações entre PC1 e PC2 e variáveis, e contribuição das variáveis. Em negrito destacam-se os valores de correlação mais próximos de 1 ou -1 e as contribuições mais elevadas associadas aos teores de óxidos de ROM.

Variável (%)	PC1		PC2	
	Correlação	Contribuição (%)	Correlação	Contribuição (%)
SiO ₂ ROM	0.969859	0.217128	-0.203889	0.026942
Al ₂ O ₃ ROM	0.591097	0.000360	0.497700	0.000716
Fe ₂ O ₃ ROM	-0.661862	0.035610	0.414263	0.039169
MgO ROM	-0.318850	0.002355	-0.921312	0.055196
TiO ₂ ROM	0.610518	0.002108	0.564135	0.005053
P ₂ O ₅ ROM	-0.048582	0.000082	0.938462	0.085978
BaO ROM	-0.508681	0.001229	0.074296	0.000074
Massa Mag	-0.882406	0.120166	-0.083568	0.003026
P ₂ O ₅ Mag	-0.455150	0.001000	0.459640	0.002864
SiO ₂ ALFG	0.888107	0.202310	-0.334104	0.080389
Al ₂ O ₃ ALFG	0.521386	0.000093	-0.437832	0.000184
Fe ₂ O ₃ ALFG	-0.231944	0.000535	0.333241	0.003102
MgO ALFG	-0.472579	0.007990	-0.849909	0.072563
SiO ₂ ALFF	0.982570	0.179068	-0.089923	0.004211
MgO ALFF	-0.706123	0.014328	-0.629399	0.031960
Flog/Verm ALFG	-0.346724	0.014081	-0.833094	0.228245
Óx Fe ALFG	0.343610	0.002094	0.627321	0.019596
Flog/Verm ALFF	-0.760340	0.061025	-0.355332	0.037420
Dolomita ALFF	-0.556004	0.038528	-0.749093	0.196352
Calcita ALFF	-0.401223	0.015355	-0.574732	0.088463
Pir/anf ALFF	0.756376	0.084554	-0.211128	0.018497

Conclui-se que as vinte e uma variáveis utilizadas nesta análise foram resumidas em onze principais componentes, sendo que as duas primeiras foram capazes de identificar padrões de natureza protolítica e intempérica. Isso sugere que um número menor de variáveis originais também deve ser capaz de identificar padrões similares.

4.3.1.3 Segunda Análise

Com o objetivo de confirmar se um número menor de variáveis originais é capaz de identificar os padrões obtidos na primeira análise, uma segunda análise por principais componentes foi realizada, considerando-se apenas os teores de óxidos de ROM que apresentaram as correlações mais pronunciadas com PC1 e PC2 (tabela 4.14): SiO₂, Al₂O₃, MgO, Fe₂O₃, TiO₂ e P₂O₅. A escolha por óxidos de ROM em detrimento de variáveis tecnológicas e mineralógicas foi feita com o objetivo de aplicar os resultados no modelo de teores químicos do Barreiro, que possui os

referidos óxidos, mas não possui as variáveis tecnológicas e mineralógicas obtidas na presente pesquisa.

Quatro principais componentes geradas a partir da transformação de SiO₂, MgO, Al₂O₃ e P₂O₅ delimitaram de forma clara os protolitos e os horizontes de intemperismo no novo sistema de eixos (figura 4.15). Os grupos de protolitos serão designados como grupos APC_P, enquanto os grupos de intemperismo, por grupos APC_I. A tabela 4.15 apresenta as características que determinam cada grupo APC.

Tabela 4.15: Características dos grupos APC.

GEOLOGIA	GRUPO APC	PROTOLITO	HORIZONTE DE INTEMPERISMO	GRUPO M_I
PROTOLITO	APC_P=1	BEB/DC; BEB/CC	-	1, 2, 3, 7, 8, 9
	APC_P=2	ANF BEB/CC	-	4,5,6
	APC_P=3	FCR/DC	-	10,11,12
INTEMPERISMO	APC_I=1	-	MT	1,4,7,10
	APC_I=2	-	MB	2,5,6,8,11
	APC_I=3	-	RA	3,9,12

Na figura 4.15, os polígonos rosas agrupam os grupos APC_P, enquanto os polígonos azuis, os grupos APC_I. Os valores de PC1 são os menores em ANF BEB/CC, crescem em direção à BEB/CC e BEB/DC e atingem seus valores máximos em FCR/DC. Os valores de PC2, por sua vez, são menores na rocha alterada, crescem no micáceo de base e atingem seus maiores conteúdos no micáceo de topo. As coordenadas dos grupos M_I no plano fator 1 *versus* fator 2 foram obtidas a partir dos valores médios de seus respectivos óxidos.

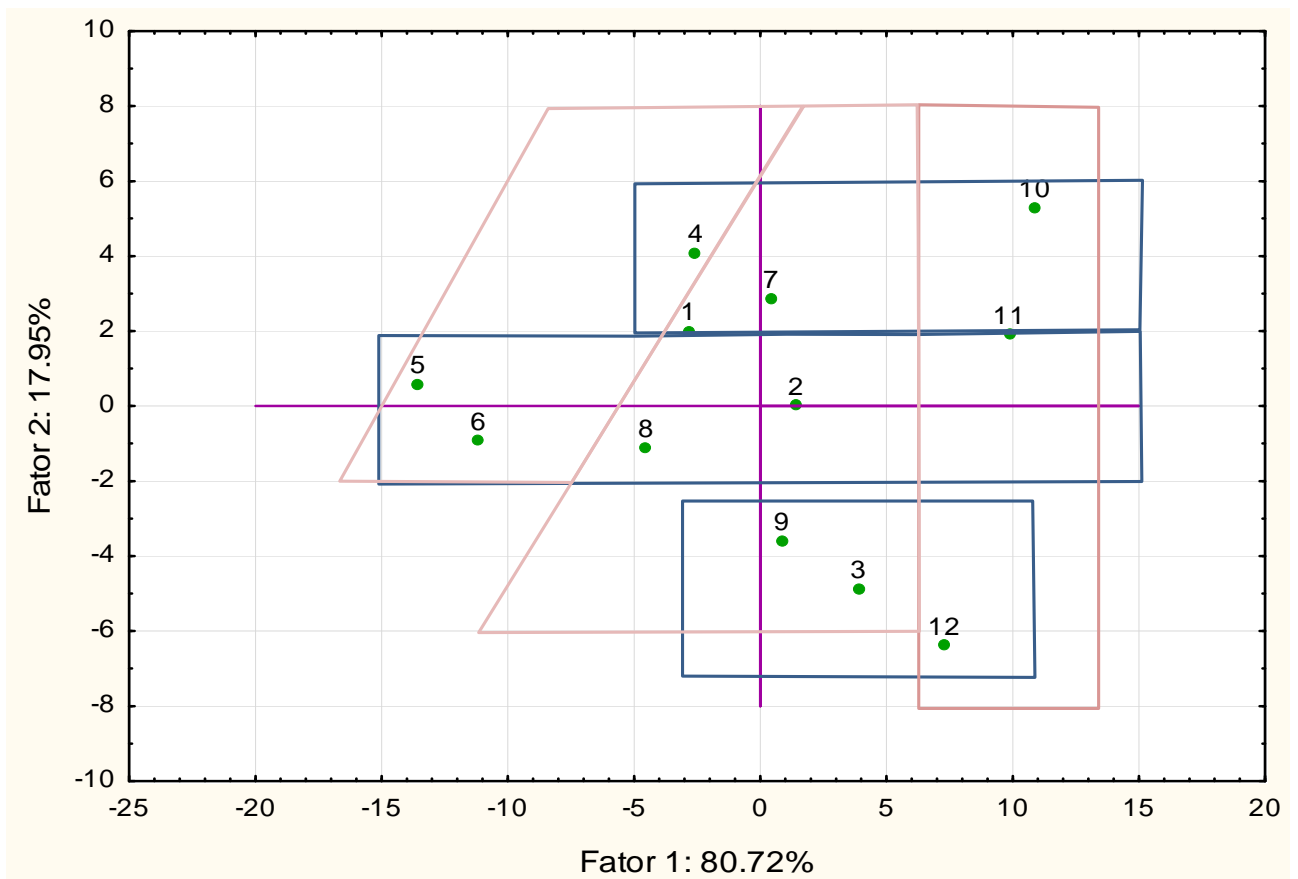


Figura 4.15: Projeção dos grupos M_I no plano fator 1 versus fator 2. I. Os polígonos rosa delimitam os protólitos. M_I=1, 2, 3, 7, 8 e 9: BEB/CC e BEB/DC; M_I=4, 5 e 6: ANF BEB/CC; M_I=10, 11 e 12: FCR/DC. Os polígonos azuis delimitam os horizontes de intemperismo: M_I=1, 4, 7 e 10: horizonte micáceo de topo; M_I=2, 5, 6, 8 e 11: micáceo de base (M_I=6 foi incorporado ao micáceo de base devido ao seu baixo conteúdo de carbonatos); M_I=3, 9 e 12: rocha alterada.

As variáveis utilizadas na segunda análise foram plotadas no novo sistema de coordenadas gerado (figura 4.16). P_2O_5 e MgO estão representados por vetores que formam um ângulo próximo de 180° , que indica correlação negativa entre essas variáveis, assim como os vetores de Al_2O_3 e MgO. Os vetores de P_2O_5 e SiO_2 comportam-se de maneira similar, porém menos pronunciada. Os ângulos próximos de 90° , formados pelas combinações entre os vetores das demais variáveis, indicam correlações mais fracas.

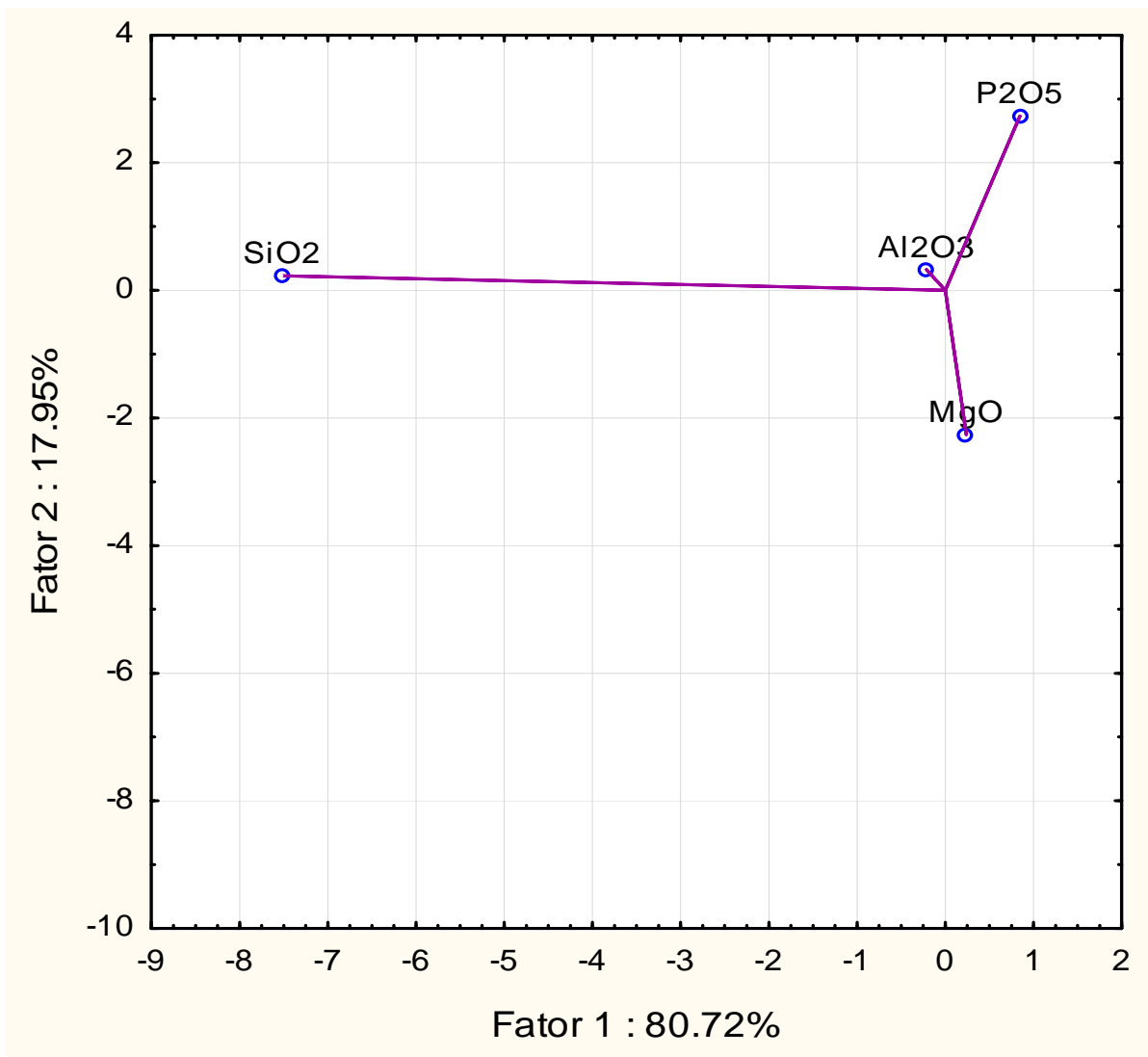


Figura 4.16: Projeção das variáveis utilizadas na segunda análise no plano de coordenadas fator 1 versus fator 2.

As duas primeiras componentes explicam 98.67% da variabilidade total (tabela 4.16) e, por este motivo, foram definidas como as novas variáveis válidas, dado que o acréscimo de explicação da variabilidade pelos demais componentes é pouco significativo.

Tabela 4.16: Autovalores obtidos na segunda análise por principais componentes.

PC	Autovalor	Total (%)	Autovalor Acumulado	Autovalor Acumulado (%)
1	57.28957	80.72086	57.28957	80.7209
2	12.74146	17.95268	70.03103	98.6735
3	0.84661	1.19288	70.87765	99.8664
4	0.09480	0.13358	70.97245	100.0000

A tabela 4.17 apresenta as correlações entre as duas principais componentes e as variáveis utilizadas na segunda análise, assim como a contribuição das variáveis no cálculo de cada componente. Observa-se que ambos os parâmetros analisados possuem comportamentos similares. No entanto, as contribuições são sempre positivas e totalizam 100 %.

Comparando-se os resultados obtidos entre a primeira e a segunda análise por principais componentes, o padrão de correlação encontrado para a PC1 é similar: em ambas a PC1 é fortemente correlacionada com SiO₂, porém com sinais contrários, ou seja, os vetores foram obtidos com intensidades semelhantes e sentidos opostos. O padrão de correlação entre variáveis e PC2 em ambas as análises foi também similar e com vetores no mesmo sentido, ou seja, em ambas as análises a PC2 está positivamente correlacionada com P₂O₅ e negativamente correlacionada com MgO.

Tabela 4.17: Correlações entre principais componentes e variáveis, e contribuição das variáveis. Em negrito destacam-se os valores de correlação mais próximos de 1 ou -1 e as contribuições mais elevadas.

Variável	PC1		PC2	
	Correlação	Contribuição (%)	Correlação	Contribuição (%)
MgO	0.100290	0.000996	-0.949067	0.400982
SiO ₂	-0.999482	0.985764	0.030122	0.004026
P ₂ O ₅	0.289611	0.012467	0.936886	0.586631
Al ₂ O ₃	-0.419005	0.000773	0.649949	0.008361

4.3.1.4 Variação Espacial das Principais componentes

Com objetivo de visualizar a variação espacial das principais componentes em planta, os valores de PC1 e PC2 foram adicionados à base de dados de testemunhos de sondagem utilizada nesta pesquisa. Dessa forma, cada amostra, cujas coordenadas espaciais são conhecidas, passou a possuir também seus respectivos valores de PC1 e PC2.

As únicas principais componentes efetivamente conhecidas são os valores associados às amostras. Os valores nas regiões da mina não amostradas nesta pesquisa foram estimados pelo método do inverso da potência da distância. Numa abordagem similar para Catalão I, Ribeiro (2008) aponta a necessidade de aplicação de modelos numéricos para o cálculo dos valores de interesse nas regiões não amostradas do depósito de forma a visualizar dados multivariados em mapas.

Dado que as principais componentes são assinaturas geoquímicas relacionadas a características dos protolitos e dos horizontes intempéricos, os mapas das componentes são uma expressão espacial dessas assinaturas.

O mapa da primeira principal componente (PC1) está apresentado na figura 4.17. Observa-se que PC1 delimita três grandes regiões na mina, que são os grupos APC_P: região com predomínio de cores azuis e verdes (menores valores de PC1), correspondente ao grupo APC_P=2 (ANF BEB/CC); região predominantemente amarela (valores intermediários de PC1), correspondente ao grupo APC_P=1 (BEB/CC e BEB/DC); região com predomínio de laranja e vermelho (maiores valores de PC1), correspondente ao grupo APC_P=3 (FCR/DC).

Uma vez que a PC1 possui forte correlação negativa com SiO_2 , e esta é a variável que mais contribuiu na geração desse fator, a figura 4.17 reflete predominantemente as variações nos teores desse óxido, sendo que os teores mais elevados situam-se nas regiões do mapa com predomínio de cores frias, e os teores mais baixos, nas regiões com predomínio de cores quentes.

Interessante notar que a porção esverdeada do mapa entre as coordenadas do eixo y 1700 e 2200 corresponde a uma região da mina com forte silicificação secundária, ou seja, os elevados teores de SiO_2 nessa região não são uma característica inerente do protolito, e sim de alteração intempérica.

No mapa de PC1 está evidente uma tendência de queda no conteúdo de SiO_2 em direção ao centro do domo, que é a região com predomínio das rochas foscoríticas.

Dado que PC1 explica cerca de 80% da variabilidade dos dados e expressa as variações de protolitos, conclui-se que a grande parcela de variabilidade dos dados estudados nesta pesquisa é devida às variações dos protolitos. Essa afirmação reforça o conceito de que as características da rocha primária exercem uma forte influência nos minérios da base do manto de intemperismo.

O mapa da segunda principal componente (PC2) está apresentado na figura 4.18. Assim como PC1, a PC2 também foi capaz de delimitar três grandes regiões na mina, que aproximam-se dos grupos APC_I: região com predomínio de cores vermelha e laranja (maiores valores de PC2), correspondente ao grupo APC_I=1 (micáceo de topo); região com predomínio da cor amarela (valores intermediários de PC2), correspondente ao grupo APC_I=2 (micáceo de base); região com predomínio de cores azuis (menores valores de PC2), correspondente ao grupo APC_I=3 (rocha alterada).

As assinaturas geoquímicas apresentadas por PC2 refletem a sua forte correlação negativa com MgO e positiva com P_2O_5 . Uma vez que o enriquecimento supergênicos da apatita é maior à medida que o intemperismo evolui (afirmação válida até o topo do isalterito, após o qual ocorre a desestabilização da apatita), a correlação negativa entre P_2O_5 e o MgO reflete a evolução do intemperismo.

Dado que PC2 absorve quase que inteiramente a variabilidade dos dados não explicada por PC1 (18% de variabilidade restante, equivalente a 99% de variabilidade acumulada) e reflete

variações de caráter intempérico, conclui-se que a variabilidade dos dados não explicada pelos protolitos é devida às características controladas pelo intemperismo. Os protolitos e o intemperismo, portanto, explicam 99% da variabilidade do depósito de apatita da base do manto de intemperismo da mina do Barreiro.

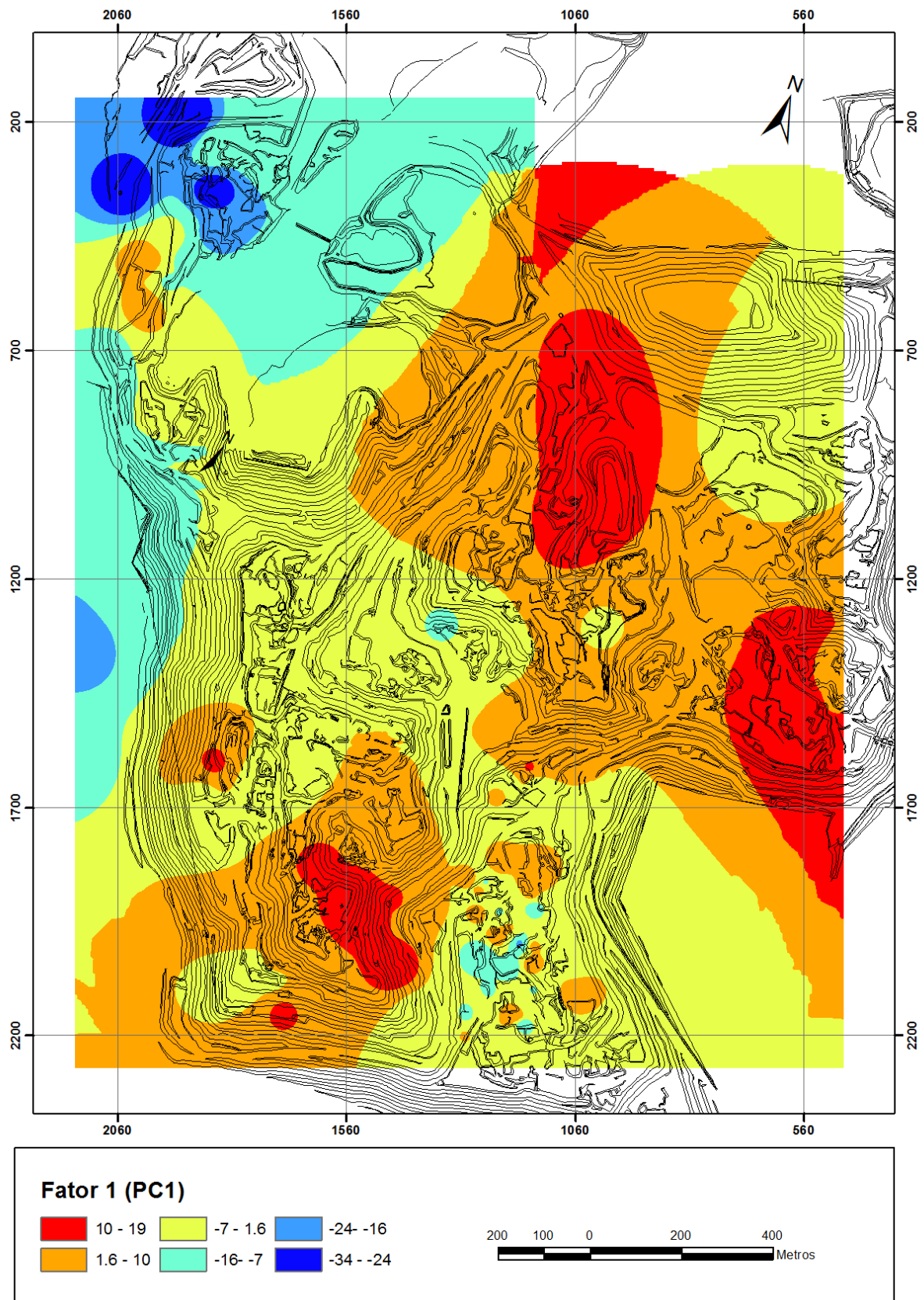


Figura 4.17: Mapa das assinaturas geoquímicas da primeira principal componente (PC1).

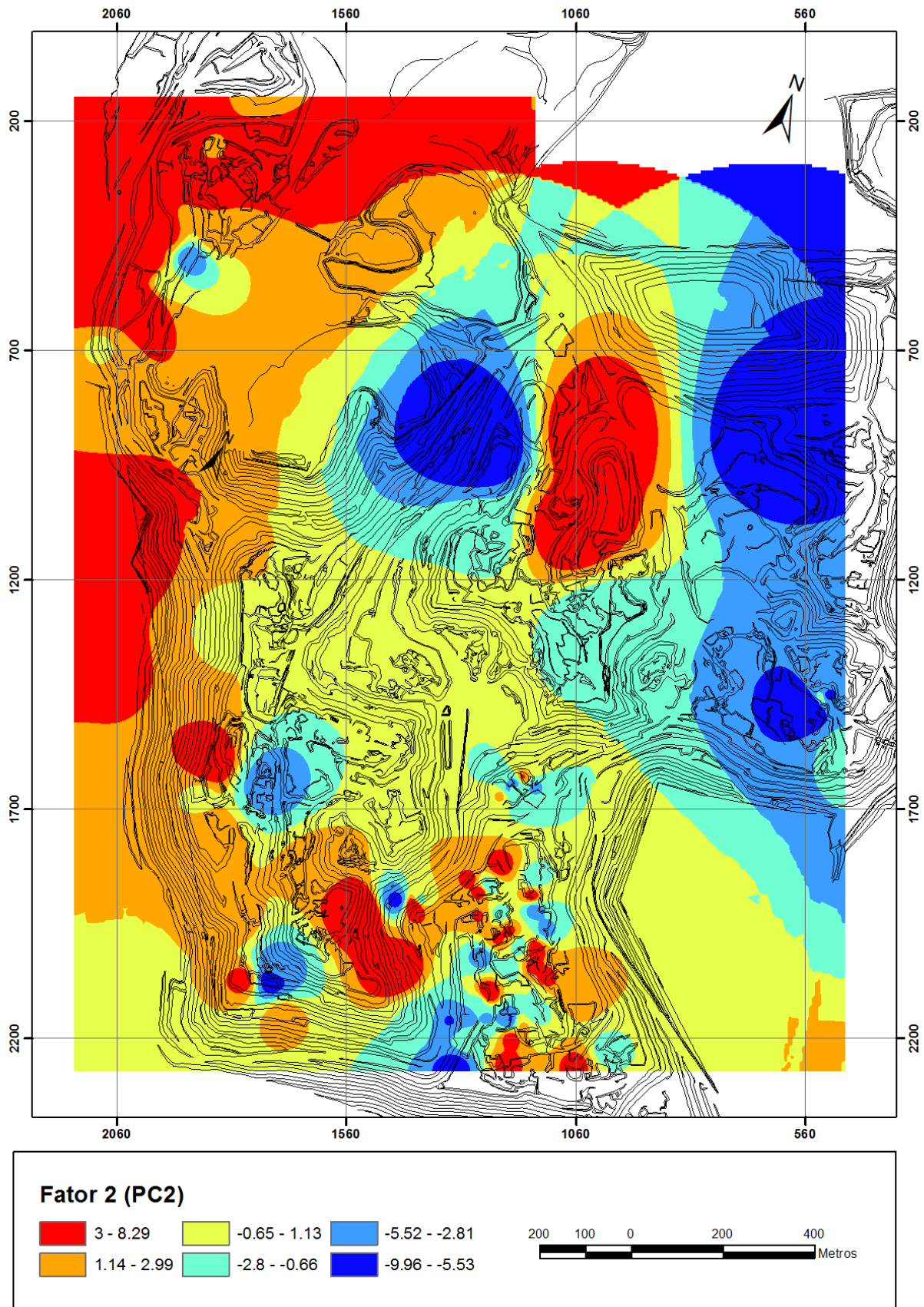


Figura 4.18: Mapa das assinaturas geoquímicas da segunda principal componente (PC2).

4.3.2 *Regressão Linear*

4.3.2.1 *Introdução – O Desafio da Predição de Variáveis Geometalúrgicas*

Diversos estudos na área de geometalurgia visam propor modelos sobre o comportamento geometalúrgico dos diferentes tipos de minérios num depósito. O objetivo fundamental da geometalurgia (Beniscelli, 2011) é agregar valor econômico à mineração, fornecendo, em tempo útil, informações de variáveis metalúrgicas representadas em modelos espaciais. Desse modo, a geometalurgia permite otimizar e apoiar os planos de produção e identificar e avaliar as oportunidades de negócio da mineração.

O desenvolvimento de modelos contendo dados geometalúrgicos deve seguir os mesmos cuidados práticos que o desenvolvimento de modelos de recursos e reservas minerais. No entanto, a maior parte dos métodos geoestatísticos de estimativa, como a krigagem ordinária, assume que a variável estimada é uma variável aditiva, pressuposto válido para teores de óxidos, mas não para índices de desempenho de processo mineral, devido à natureza multivariada dos últimos (Bye, 2011; Knight et al., 2011; MacMillan et al., 2011).

Nesse contexto, diversos autores (MacMillan et al., 2011; Newton e Graham, 2011; Fernandes, 2013; Carrasco et al., 2014, entre outros) têm proposto a utilização do método estatístico de regressão linear para predição das variáveis geometalúrgicas, e este foi o método adotado na presente pesquisa.

4.3.2.2 *O Método Estatístico da Regressão Linear*

Regressão linear é o método de análise apropriado quando o problema da pesquisa envolve uma única variável dependente relacionada a uma ou mais variáveis independentes. O objetivo da análise de regressão linear é usar as variáveis independentes, cujos valores são conhecidos, para prever valores e mudanças nas variáveis dependentes como resposta a mudanças nas variáveis independentes.

Na regressão linear simples, uma única variável independente é ponderada pelo procedimento de análise de regressão para dar previsão à variável dependente. O peso atribuído à variável independente denota a sua contribuição relativa para a previsão da variável dependente. De forma análoga, na regressão linear múltipla são utilizadas duas ou mais variáveis independentes, que são ponderadas para garantir máxima previsão da variável dependente. Os pesos denotam a

contribuição relativa das variáveis independentes para a previsão da variável dependente. O conjunto de variáveis independentes ponderadas forma a equação de regressão linear múltipla (Hair et al., 2005).

Na regressão linear, as variáveis independentes devem apresentar correlação com as variáveis dependentes. Essa propriedade existe quando as mudanças em uma variável são associadas a mudanças na outra variável. A habilidade de uma variável independente adicional melhorar a previsão da variável dependente está relacionada não apenas à sua correlação com a variável dependente, mas também com as suas correlações com as outras variáveis independentes do modelo de regressão múltipla.

A multicolinearidade ocorre quando qualquer variável independente é altamente correlacionada com um conjunto de outras variáveis independentes. O impacto da multicolinearidade é reduzir o poder preditivo de qualquer variável independente à medida que ela é associada a outras variáveis independentes. Quando a multicolinearidade aumenta, a variância única explicada por cada variável independente diminui e o percentual de previsão compartilhada aumenta. A previsão geral aumenta, portanto, mais vagarosamente quando variáveis independentes com multicolinearidade elevada são acrescentadas (Hall et al., 2005). Em outras palavras, a correlação entre as variáveis independentes torna algumas variáveis redundantes para efetuar previsões; desse modo, elas não são necessárias para produzir a melhor previsão. Para maximizar a previsão a partir de um determinado número de variáveis independentes, deve-se procurar variáveis independentes que possuam baixa multicolinearidade com as outras variáveis independentes, mas também que apresentem correlações elevadas com a variável dependente. Essas informações são obtidas calculando-se matrizes de correlação.

Para a construção de modelos de regressão, algumas suposições são assumidas, tais como variância constante do erro (homoscedasticidade) e erros não correlacionados e normalmente distribuídos. Tais suposições precisam ser examinadas para validação dos modelos construídos.

A homoscedasticidade foi analisada com gráficos de resíduos. Quando os dados são homoscedásticos, as variáveis dependentes exibem níveis iguais de variância ao longo do domínio das variáveis preditoras. A homoscedasticidade é uma característica desejável porque a variância da variável dependente não deveria se concentrar apenas em um domínio limitado dos valores independentes, e sim estar distribuída no domínio de valores. Quando ocorre heteroscedasticidade, as previsões tornam-se melhores em alguns níveis da variável independente e piores em outros.

O diagnóstico da normalidade da distribuição dos erros foi feito inicialmente por verificação visual dos histogramas dos resíduos, comparando-os com a distribuição normal. Porém, a análise de modelos formados a partir de uma quantidade pequena de amostras, cuja distribuição é mal

formada, torna-se difícil por esse método. Para complementar o diagnóstico, foram utilizados testes quantitativos, que são mais eficientes por não dependerem de interpretações subjetivas. Os testes de hipóteses para verificação da normalidade das distribuições consistem em calcular um parâmetro estatístico e verificar se o seu valor é significativo (p-valor menor que 0.05). Em caso afirmativo, a hipótese de que os dados seguem uma distribuição normal deve ser rejeitada. O teste de hipóteses para diagnóstico da normalidade da distribuição dos erros utilizado nesta pesquisa foi o teste de Kolmogorov-Smirnov.

Observações atípicas (observações que possuem grandes valores residuais) foram eliminadas dos modelos, de forma a garantir maior representatividade dos modelos para os dados das amostras.

Outro item de extrema importância considerado na elaboração de modelos de regressão foram os testes de significância dos coeficientes, que fornecem uma estimativa baseada na probabilidade de que os coeficientes obtidos sejam diferentes de zero, ou seja, que os coeficientes devem ser efetivamente considerados no modelo. O objetivo desses testes é verificar que as relações entre os coeficientes e as variáveis são válidas, também, para outras amostras da mesma população, de forma que os resultados possam ser generalizáveis. O teste estatístico apropriado para análise da significância dos modelos é o teste t (Hair et al., 2005). Os p-valores, por sua vez, são obtidos de forma a indicar a probabilidade de os coeficientes calculados nos modelos de regressão serem nulos. Esta pesquisa admitiu, de forma geral, um p-valor de 0.05 para aceitar a utilização dos coeficientes obtidos, indicativo de 95% de chance de o coeficiente ser diferente de zero.

4.3.2.3 Escolha das Variáveis Dependentes e Independentes

Nesta pesquisa, os modelos de regressão linear foram desenvolvidos para predição de teores de P_2O_5 no *overflow*, P_2O_5 no produto não magnético, P_2O_5 no produto grosso e rendimento mássico total por macrogrupo de protólito e horizonte de intemperismo. Ou seja, essas variáveis serão as variáveis dependentes dos modelos de regressão.

A predição do teor de P_2O_5 do *overflow* da etapa de deslamagem indica o conteúdo de perdas de fósforo nessa etapa, e pode contribuir para a determinação de quais minérios ou regiões da mina possuem maior potencial de perdas de conteúdo de P_2O_5 . Adicionalmente, subsidia a engenharia de processo mineral a atuar nas variáveis de processo do circuito e em equipamentos, de forma a reduzir perdas e melhorar a qualidade do produto deslamado. Os ajustes operacionais efetuados nos circuitos de deslamagem podem otimizar a recuperação metalúrgica de P_2O_5 no processo de concentração.

A predição do teor de P_2O_5 no produto não magnético permite estimar o conteúdo de P_2O_5 recuperado após a separação magnética e a razão de enriquecimento na etapa de preparação. Permite, de forma análoga, estimar o teor de P_2O_5 que irá alimentar os circuitos de flotação, contribuindo no controle dessa etapa do processo e na busca de aumento de recuperação metalúrgica.

A predição do P_2O_5 da fração de grossos associada à do P_2O_5 do produto não magnético subsidia definir variáveis operacionais de controle do circuito de flotação e da qualidade do produto concentrado.

O rendimento mássico é um parâmetro de fundamental importância para o planejamento de lavra, pois fornece previsibilidade de produção a uma determinada taxa de alimentação da usina de beneficiamento.

As variáveis independentes, por sua vez, serão teores de óxidos de ROM. Essa escolha foi feita para que os modelos de regressão possam ser aplicados em base de dados formadas apenas por teores químicos de ROM, sem a necessidade de bases de dados robustas, que envolvam variáveis tecnológicas e mineralógicas.

4.3.2.4 Grupo APC_P=1 (BEB/CC e BEB/DC)

De acordo com os resultados obtidos pela matriz de correlação do grupo APC_P=1 (tabela 4.18), CaO e P_2O_5 são os óxidos do ROM mais correlacionáveis com o P_2O_5 do *overflow* e o rendimento mássico, e também apresentam alta correlação entre si. Não devem, portanto, ser utilizados simultaneamente, de forma que o P_2O_5 foi escolhido como variável independente dos modelos de regressão linear para predição das referidas variáveis dependentes.

CaO, MgO, P_2O_5 e SiO_2 são os óxidos do ROM mais correlacionáveis com o P_2O_5 não magnético e o P_2O_5 dos grossos. Devido à multicolinearidade entre CaO, P_2O_5 e as variáveis dependentes, CaO foi desconsiderado como opção de variável independente. Os padrões de correlação similares obtidos para as variáveis dependentes P_2O_5 não magnético e P_2O_5 dos grossos refletem a similaridade entre essas duas variáveis, uma vez que a fração de grossos é formada por cerca de 85% da massa do produto não magnético (ver item 4.2.3).

Tabela 4.18: Matriz de correlação entre os óxidos do ROM, variáveis de preparação e recuperação mássica total do grupo APC_P=1 (BEB/CC e BEB/DC). *Over: overflow; Under: underflow; Mag: magnético; N Mag: não magnético; G: grossos; F: finos; Rend Mas Tot: rendimento mássico total.* Em azul: correlações maiores que 0.70. Em vermelho: correlações menores que -0.70.

Variável	Al ₂ O ₃ ROM	BaO ROM	CaO ROM	Fe ₂ O ₃ ROM	MgO ROM	P ₂ O ₅ ROM	SiO ₂ ROM	TiO ₂ ROM	P ₂ O ₅ <i>Over</i>	P ₂ O ₅ <i>Under</i>	P ₂ O ₅ Mag	P ₂ O ₅ N Mag	P ₂ O ₅ G	P ₂ O ₅ F	Rend Mas Tot
Al ₂ O ₃ ROM	1.00	0.36	-0.50	-0.02	0.03	-0.37	0.42	0.36	-0.29	-0.35	0.19	-0.36	-0.41	-0.38	-0.48
BaO ROM	0.36	1.00	-0.24	0.00	-0.06	-0.17	-0.18	-0.09	-0.24	-0.11	-0.17	-0.13	-0.13	-0.17	-0.24
CaO ROM	-0.50	-0.24	1.00	-0.34	-0.45	0.90	-0.73	-0.47	0.87	0.85	0.45	0.84	0.85	0.90	0.85
Fe ₂ O ₃ ROM	-0.02	0.00	-0.34	1.00	-0.16	-0.10	-0.14	0.35	-0.19	-0.06	-0.22	0.01	-0.04	-0.15	-0.24
MgO ROM	0.03	-0.06	-0.45	-0.16	1.00	-0.66	0.35	-0.28	-0.44	-0.71	-0.37	-0.66	-0.67	-0.61	-0.49
P ₂ O ₅ ROM	-0.37	-0.17	0.90	-0.10	-0.66	1.00	-0.71	-0.29	0.89	0.98	0.60	0.96	0.96	0.95	0.85
SiO ₂ ROM	0.42	-0.18	-0.73	-0.14	0.35	-0.71	1.00	0.44	-0.66	-0.71	-0.18	-0.76	-0.73	-0.69	-0.59
TiO ₂ ROM	0.36	-0.09	-0.47	0.35	-0.28	-0.29	0.44	1.00	-0.43	-0.27	-0.09	-0.26	-0.27	-0.39	-0.29
P ₂ O ₅ <i>Over</i>	-0.29	-0.24	0.87	-0.19	-0.44	0.89	-0.66	-0.43	1.00	0.83	0.61	0.82	0.82	0.91	0.73
P ₂ O ₅ <i>Under</i>	-0.35	-0.11	0.85	-0.06	-0.71	0.98	-0.71	-0.27	0.83	1.00	0.57	0.98	0.98	0.94	0.84
P ₂ O ₅ Mag	0.19	-0.17	0.45	-0.22	-0.37	0.60	-0.18	-0.09	0.61	0.57	1.00	0.55	0.51	0.54	0.37
P ₂ O ₅ N Mag	-0.36	-0.13	0.84	0.01	-0.66	0.96	-0.76	-0.26	0.82	0.98	0.55	1.00	0.98	0.93	0.84
P ₂ O ₅ G	-0.41	-0.13	0.85	-0.04	-0.67	0.96	-0.73	-0.27	0.82	0.98	0.51	0.98	1.00	0.93	0.87
P ₂ O ₅ F	-0.38	-0.17	0.90	-0.15	-0.61	0.95	-0.69	-0.39	0.91	0.94	0.54	0.93	0.93	1.00	0.87
Rend Mas Tot	-0.48	-0.24	0.85	-0.24	-0.49	0.85	-0.59	-0.29	0.73	0.84	0.37	0.84	0.87	0.87	1.00

Os modelos de regressão linear construídos para o grupo PCA_P=1 estão apresentados na tabela 4.19.

Tabela 4.19: Sumário dos modelos de regressão linear obtidos para o grupo APC_P=1 (BEB/CC e BEB/DC). N: número de amostras utilizadas. b: coeficientes do modelo. R: coeficiente de correlação. R²: coeficiente de determinação.

Variável Dependente	Sumário De Regressão Linear: APC_P=1			
P ₂ O ₅ <i>Overflow</i>	R= 0.90858786 R ² = 0.82553190 R ² Ajustado = 0.82280583 Erro Padrão da Estimativa: 1.1311			
	N=66	b	Erro Padrão de b	p-valor
	Intercepto	0.620582	0.373857	0.101818
	P ₂ O ₅ ROM	0.598063	0.034368	0.000000
P ₂ O ₅ Não Magnético	R= 0.98286062 R ² = 0.96601500 R ² Ajustado = 0.96412694 Erro Padrão da Estimativa: 0.85226			
	N=58	b	Erro Padrão de b	p-valor
	Intercepto	4.093838	1.056348	0.000290
	MgO ROM	-0.137438	0.046109	0.004305
	P ₂ O ₅ ROM	1.059752	0.045385	0.000000
SiO ₂ ROM	-0.060828	0.019001	0.002293	
P ₂ O ₅ Fração Grossa	R= .98457173 R ² = .96938150 R ² Ajustado = .96774122 Erro Padrão da Estimativa: 0.93147			
	N=60	b	Erro Padrão de b	p-valor
	Intercepto	5.258073	1.213202	0.000061
	MgO ROM	-0.162270	0.050174	0.002049
	P ₂ O ₅ ROM	1.161428	0.050289	0.000000
SiO ₂ ROM	-0.084170	0.022326	0.000395	
Rendimento Mássico Total	R= 0.97498839 R ² = 0.95060237 R ² Ajustado = 0.94967034 Erro Padrão da Estimativa: 2.1060			
	N=55	b	Erro Padrão de b	p-valor
	Intercepto	-5.992341	0.737099	0.000000
	P ₂ O ₅ ROM	2.304324	0.072154	0.000000

O coeficiente de correlação (R) indica a força da associação entre a variável dependente e os valores estimados pelos modelos de regressão. Todos os valores de R obtidos foram maiores que 0.97, com exceção do R associado ao modelo de P₂O₅ do *overflow*, no valor de 0.9086.

O coeficiente de determinação (R², tabela 4.19) é uma estatística de aderência de modelos de regressão linear simples e indica a percentagem de variabilidade da variável dependente explicada pelo modelo de regressão. O elevado valor de R² obtido no modelo de recuperação mássica (0.9506)

indica que o modelo é capaz de explicar 95.06% da variabilidade das variáveis dependentes, estando bem ajustado às amostras. De forma análoga a R, o valor de R^2 obtido para o modelo de P_2O_5 do *overflow* é mais baixo (0.8255) e indica que 82.55% da variabilidade dos dados de P_2O_5 do *overflow* são explicados pelo modelo.

O coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajustado), por sua vez, é uma medida modificada do coeficiente de determinação que considera o número de variáveis independentes incluídas na equação de regressão. Apesar de a adição de variáveis independentes sempre aumentar os coeficientes de determinação, o coeficiente de determinação ajustado pode cair se as variáveis independentes acrescentadas tiverem pouco poder de explicação. R^2 é, portanto, a estatística de aderência de modelos de regressão linear múltipla. Em ambos os modelos de regressão múltipla construídos (P_2O_5 da fração não magnética e P_2O_5 da fração grossa), os valores de R^2 ajustado são maiores que 0.96 e indicam que mais de 96% da variabilidade das variáveis dependentes é explicada pelos referidos modelos, que estão bem ajustados às amostras.

Os gráficos de valores preditos *versus* observados dos modelos de regressão linear para o grupo APC_P=1 (figura 4.19) refletem os elevados coeficientes de correlação (R) obtidos em cada modelo e demonstram, de uma forma geral, a forte relação linear entre as variáveis dependentes e independentes. A nuvem de pontos com menor dispersão ocorre na figura 4.19 C (modelo de P_2O_5 na fração grossa) e reflete o maior valor de R obtido nos modelos de regressão do grupo APC_P=1 (0.9846). Por outro lado, a maior dispersão observada entre valores preditos e observados ocorre no modelo de P_2O_5 do *overflow* (figura 4.19 A) e reflete o menor valor de R dentre os modelos elaborados para o grupo APC_P=1 (0.9086).

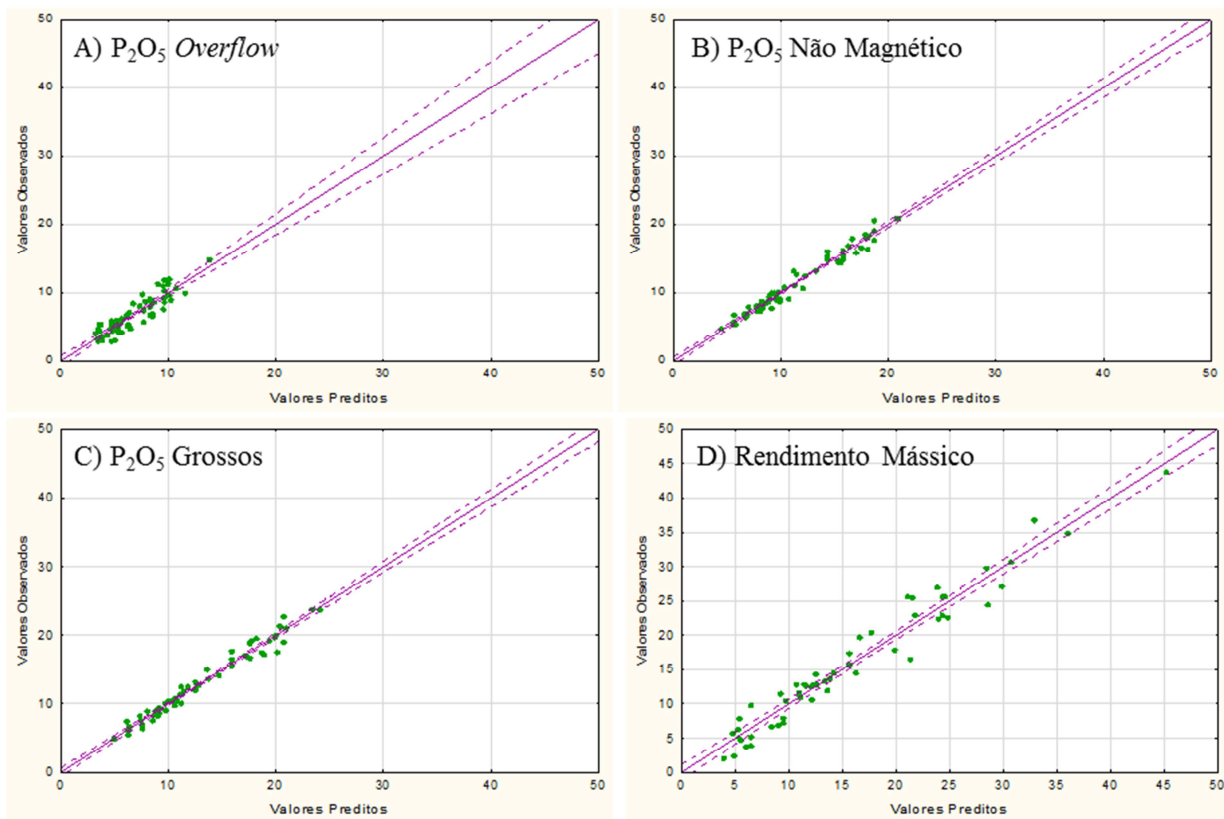


Figura 4.19: Valores preditos pelo modelo de regressão linear versus valores observados para o grupo APC_P=1 (BEB/CC e BEB/DC). Linhas roxas pontilhadas: intervalo de confiança de 95%.

A ausência de correlação entre os valores preditos e os resíduos dos modelos de regressão construídos para APC_P=1 (figura 4.20) confirma a hipótese de homoscedasticidade dos dados, ou seja, os valores preditos exibem níveis iguais de variância ao longo do domínio das variáveis predictoras.

Os resíduos obtidos nos quatro modelos apresentam desvios em relação à distribuição normal quando analisados por histogramas de frequências (figura 4.21). Por outro lado, a hipótese de normalidade dos resíduos foi confirmada através do teste de hipóteses Kolmogorov-Smirnov (tabela 4.20). A obtenção de p-valores maiores que 0.05 nos referidos testes induz à aceitação da hipótese nula, que é a hipótese de normalidade dos resíduos.

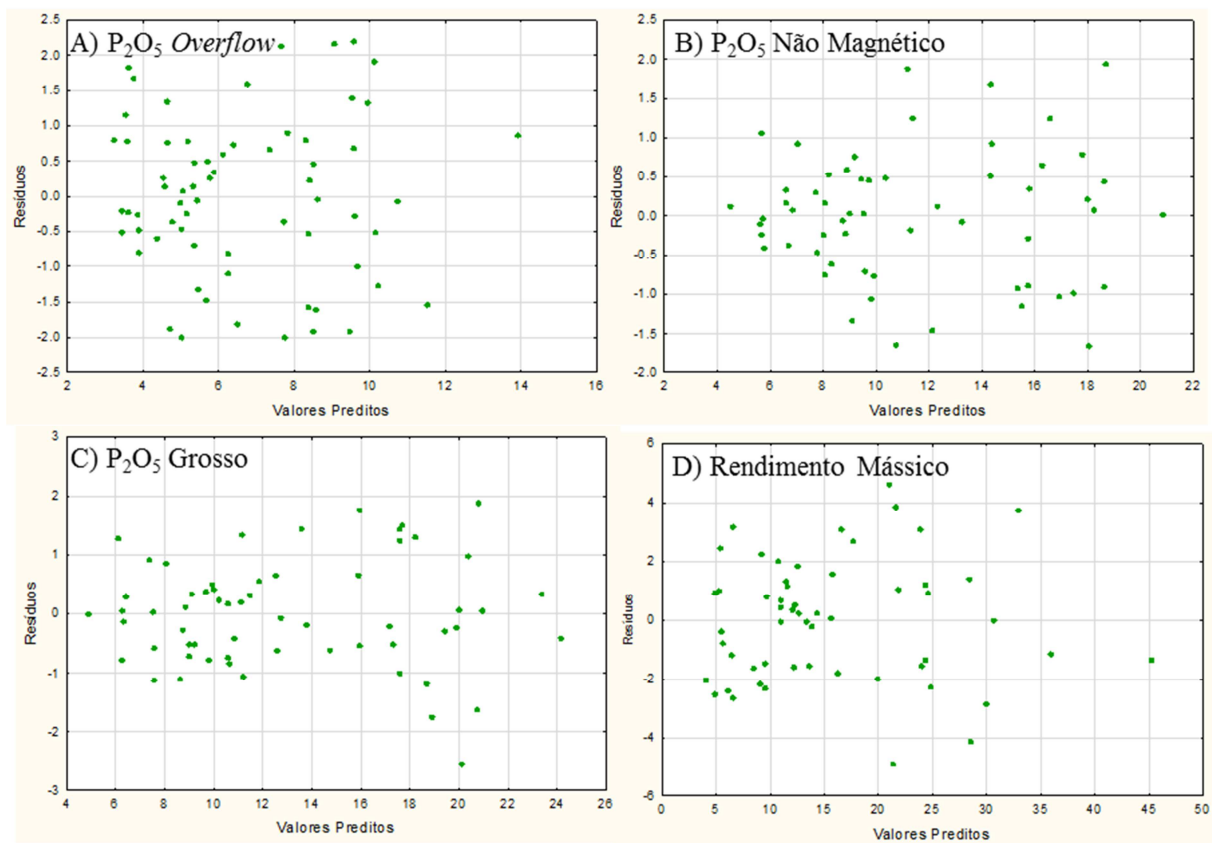


Figura 4.20: Valores preditos pelo modelo de regressão linear versus resíduos para o grupo APC_P=1 (BEB/CC e BEB/DC).

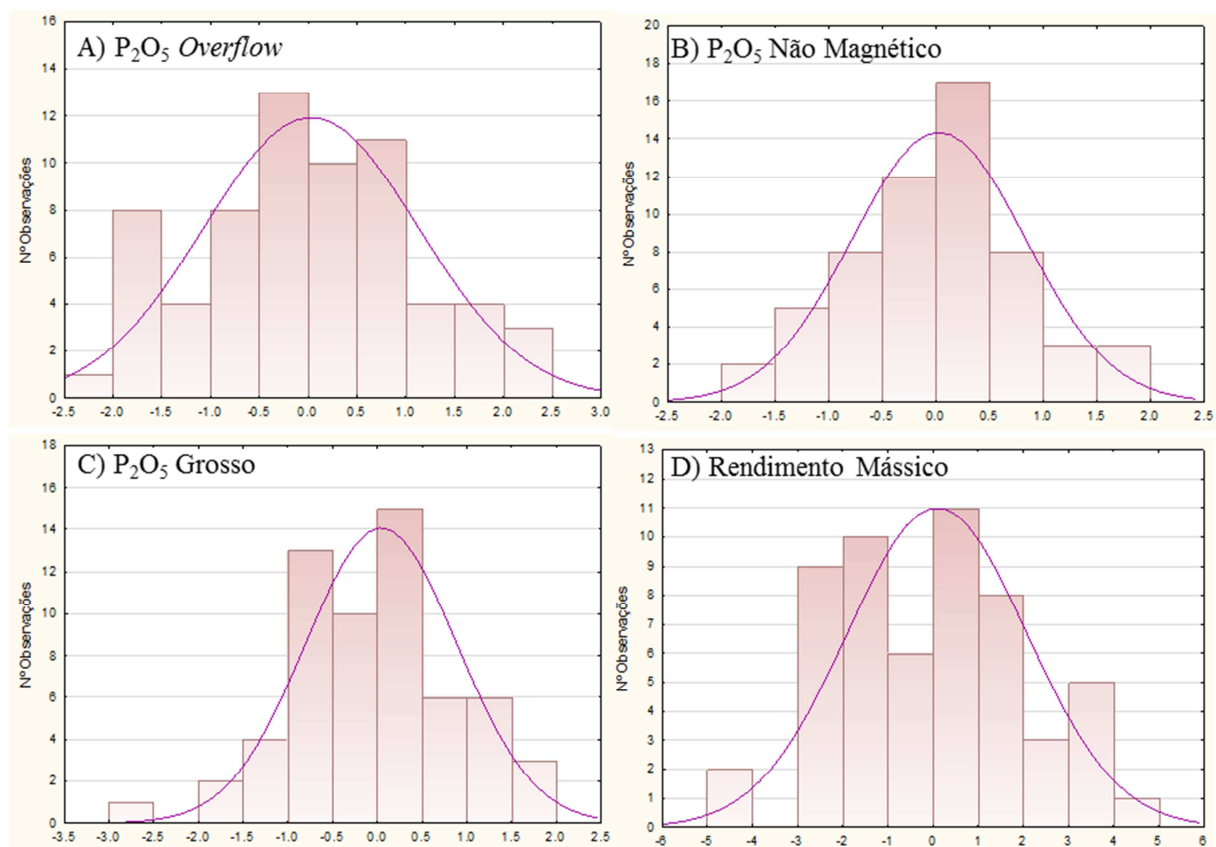


Figura 4.21: Teste de normalidade para os resíduos dos modelos de regressão linear do grupo APC_P=1 (BEB/CC e BEB/DC). Linha roxa: distribuição normal.

Tabela 4.20: Resultados do teste de hipóteses Kolmogorov-Smirnov para os resíduos dos modelos de regressão linear do grupo APC_P=1 (BEB/CC e BEB/DC).

	K-S d	K-S p-valor
Normal - P ₂ O ₅ <i>Overflow</i>	0.059103	0.955289
Normal - P ₂ O ₅ Não Mag	0.062386	0.956915
Normal - P ₂ O ₅ Grossos	0.067813	0.910705
Normal - Rendimento Mássico	0.071782	0.899961

4.3.2.5 Grupo APC_P=2 (ANF BEB/CC)

De acordo com a análise da matriz de correlação do grupo APC_P=2 (tabela 4.21), as variáveis Al₂O₃, CaO e P₂O₅ são os óxidos do ROM mais correlacionáveis com o P₂O₅ do *overflow*. Adicionalmente, CaO apresenta altas correlações com Al₂O₃ e P₂O₅ e não deve, portanto, ser utilizado simultaneamente com as demais variáveis para a construção do modelo de regressão. Durante a elaboração do modelo, o coeficiente de Al₂O₃ obtido foi associado a um p-valor maior de 0.05, que indica probabilidade menor de 95% de esse coeficiente ser diferente de zero, de forma que

esse óxido não foi considerado. Apenas o P₂O₅ foi utilizado como variável independente, e o modelo construído é, de modo análogo ao modelo de P₂O₅ do *overflow* para o grupo APC_P=1, um modelo de regressão linear simples (tabela 4.22).

Os teores de CaO e P₂O₅ são os óxidos do ROM mais correlacionáveis com o P₂O₅ não magnético e a recuperação mássica, e apresentam alta correlação entre si. Optou-se por utilizar a variável P₂O₅ nos modelos para ambas as variáveis dependentes, porque possui as maiores correlações com as variáveis dependentes.

Os teores de CaO, P₂O₅ e SiO₂ são os óxidos do ROM mais correlacionáveis com o P₂O₅ dos grossos. Retirou-se o CaO do modelo devido à sua alta correlação também com o P₂O₅. De forma análoga ao observado no modelo de predição do P₂O₅ do *overflow* quanto à variável Al₂O₃, o p-valor associado ao coeficiente de SiO₂ indicou que essa variável não é significativa na predição do P₂O₅ de grossos, de forma que o modelo foi construído com uma única variável independente, P₂O₅ (tabela 4.22).

Os resultados obtidos com a análise da matriz de correlação do grupo APC_P=2 conduziram à geração de modelos de regressão simples, que é uma opção bastante apropriada para se trabalhar com quantidades de amostras inferiores a 20 (Hair et al., 2005), como ocorre com o referido grupo APC (N, tabela 4.22).

Tabela 4.21: Matriz de correlação entre os óxidos do ROM, variáveis de preparação e recuperação mássica total do grupo APC_P=2 (ANF BEB/CC). *Over*: *overflow*; *Under*: *underflow*; Mag: magnético; N Mag: não magnético; G: grossos; F: finos; Rend Mas Tot: rendimento mássico total. Em azul: correlações maiores que 0.70. Em vermelho: correlações menores que -0.70.

Variável	Al ₂ O ₃ ROM	BaO ROM	CaO ROM	Fe ₂ O ₃ ROM	MgO ROM	P ₂ O ₅ ROM	SiO ₂ ROM	TiO ₂ ROM	P ₂ O ₅ <i>Over</i>	P ₂ O ₅ <i>Unde</i>	P ₂ O ₅ Mag	P ₂ O ₅ N Mag	P ₂ O ₅ G	P ₂ O ₅ F	Rend Mas Tot
Al ₂ O ₃ ROM	1.00	0.43	-0.81	0.32	0.21	-0.68	0.26	-0.32	-0.73	-0.56	-0.18	-0.61	-0.56	-0.71	-0.60
BaO ROM	0.43	1.00	-0.47	0.35	-0.48	-0.07	0.09	-0.03	-0.38	0.12	0.38	0.00	0.06	-0.20	-0.08
CaO ROM	-0.81	-0.47	1.00	-0.32	-0.04	0.90	-0.55	0.24	0.93	0.79	0.07	0.84	0.80	0.93	0.84
Fe ₂ O ₃ ROM	0.32	0.35	-0.32	1.00	0.51	-0.10	-0.56	0.46	-0.31	0.04	-0.04	-0.04	0.06	-0.20	-0.02
MgO ROM	0.21	-0.48	-0.04	0.51	1.00	-0.24	-0.47	0.43	-0.17	-0.28	-0.65	-0.22	-0.19	-0.23	-0.08
P ₂ O ₅ ROM	-0.68	-0.07	0.90	-0.10	-0.24	1.00	-0.65	0.25	0.89	0.98	0.31	0.98	0.97	0.98	0.91
SiO ₂ ROM	0.26	0.09	-0.55	-0.56	-0.47	-0.65	1.00	-0.59	-0.52	-0.68	0.06	-0.66	-0.72	-0.56	-0.62
TiO ₂ ROM	-0.32	-0.03	0.24	0.46	0.43	0.25	-0.59	1.00	0.18	0.26	-0.30	0.27	0.25	0.20	0.29
P ₂ O ₅ <i>Over</i>	-0.73	-0.38	0.93	-0.31	-0.17	0.89	-0.52	0.18	1.00	0.81	0.34	0.80	0.77	0.92	0.70
P ₂ O ₅ <i>Under</i>	-0.56	0.12	0.79	0.04	-0.28	0.98	-0.68	0.26	0.81	1.00	0.38	0.97	0.98	0.92	0.87
P ₂ O ₅ Mag	-0.18	0.38	0.07	-0.04	-0.65	0.31	0.06	-0.30	0.34	0.38	1.00	0.19	0.24	0.29	0.04
P ₂ O ₅ N Mag	-0.61	0.00	0.84	-0.04	-0.22	0.98	-0.66	0.27	0.80	0.97	0.19	1.00	0.98	0.94	0.93
P ₂ O ₅ G	-0.56	0.06	0.80	0.06	-0.19	0.97	-0.72	0.25	0.77	0.98	0.24	0.98	1.00	0.91	0.91
P ₂ O ₅ F	-0.71	-0.20	0.93	-0.20	-0.23	0.98	-0.56	0.20	0.92	0.92	0.29	0.94	0.91	1.00	0.91
Rend Mas Tot	-0.60	-0.08	0.84	-0.02	-0.08	0.91	-0.62	0.29	0.70	0.87	0.04	0.93	0.91	0.91	1.00

Tabela 4.22: Sumário dos modelos de regressão linear obtidos para o grupo APC_P=2 (ANF BEB/CC). N: número de amostras utilizadas. b: coeficientes do modelo. R: coeficiente de correlação. R²: coeficiente de determinação.

Variável Dependente	Sumário de Regressão Linear: APC_P=2			
P ₂ O ₅ <i>Overflow</i>	R= 0.93431004 R ² = 0.87293526 R ² Ajustado = 0.86234653 Erro Padrão da Estimativa: 0.56480			
	N=14	b	Erro Padrão de b	p-valor
	Intercepto	1.180435	0.457392	0.024062
	P ₂ O ₅ ROM	0.448215	0.049365	0.000001
P ₂ O ₅ Não Magnético	R= 0.99450402 R ² = 0.98903824 R ² ajustado = 0.98835314 Erro Padrão da Estimativa: 1.2838			
	N=17	b	Erro Padrão de b	p-valor
	P ₂ O ₅ ROM	1.130826	0.029762	0.000000
P ₂ O ₅ Fração Grossa	R= 0.99734628 R ² = 0.99469959 R ² Ajustado = 0.99436832 Erro Padrão da Estimativa: 0.99471			
	N=17	b	Erro Padrão de b	p-valor
	P ₂ O ₅ ROM	1.263679	0.023061	0.000000
Rendimento Mássico Total	R= 0.96336690 R ² = 0.92807579 R ² Ajustado = 0.92088337 Erro Padrão da Estimativa: 2.3551			
	N=12	b	Erro Padrão de b	p-valor
	Intercepto	-4.314813	1.867178	0.043443
	P ₂ O ₅ ROM	1.963942	0.172892	0.000000

Todos os coeficientes de correlação (R, tabela 4.22) obtidos foram maiores que 0.97, com exceção do R associado ao modelo de P₂O₅ do *overflow*, no valor de 0.9343. Valores de R menores no modelo de P₂O₅ do *overflow* em comparação com os demais foram obtidos tanto para os grupos APC_P=1 quanto para APC_P=2, e indicam que as menores correlações entre valores observados e estimados ocorrem com P₂O₅ do *overflow*. Entende-se que essa variável seja mais difícil de ser prevista que as demais.

Os coeficientes de determinação (R², tabela 4.22) obtidos nos quatro modelos construídos, acima de 0.96, indicam que os modelos são capazes de explicar os valores observados e estão bem ajustados. Os valores de R² obtidos para os modelos de P₂O₅ da fração não magnética e P₂O₅ dos grossos aproximam-se de 1, indicando que os modelos explicam a variabilidade das variáveis dependentes integralmente.

Os gráficos de valores preditos *versus* observados dos modelos de regressão linear para o grupo APC_P=2 (figura 4.22) refletem os elevados coeficientes de correlação (R) obtidos em cada modelo, com nuvens de pontos com baixa dispersão. As maiores dispersões ocorrem no modelo de P₂O₅ do *overflow* (figura 4.22 A), que reflete o menor R obtido (0.93431, tabela 4.22).

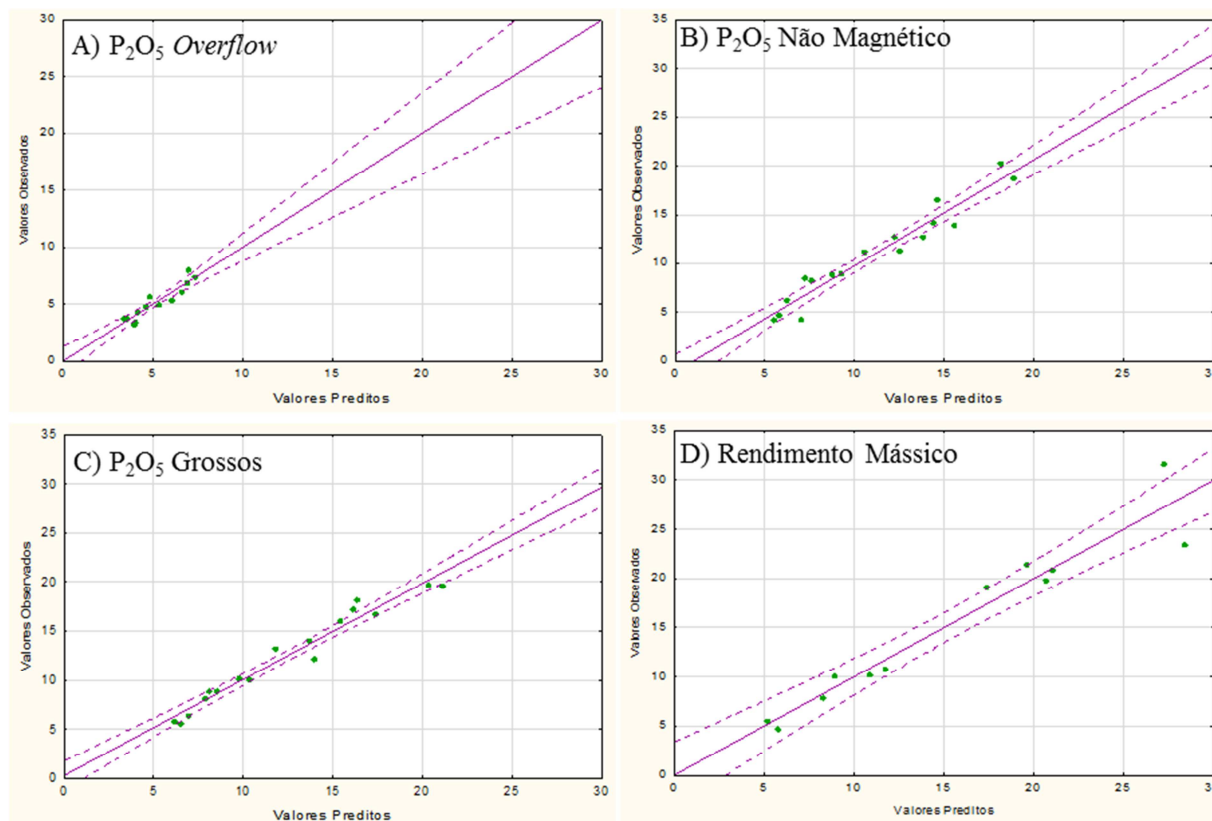


Figura 4.22: Valores preditos pelo modelo de regressão linear versus valores observados para o grupo APC_P=2 (ANF BEB/CC). Linhas roxas pontilhadas: intervalo de confiança de 95%.

Assim como observado nos modelos elaborados para o grupo APC_P=1, a ausência de correlação entre os valores preditos e os resíduos do modelo confirma a hipótese de homoscedasticidade dos dados (figura 4.23). No entanto, os resíduos não aparentam possuir uma distribuição normal (figura 4.24). Por outro lado, a hipótese de normalidade dos resíduos foi confirmada com o teste de hipóteses Kolmogorov-Smirnov (p-valores dos testes >0.05, tabela 4.23). Conclui-se que os histogramas não foram capazes de refletir a normalidade dos dados devido à baixa quantidade de amostras utilizadas (N<20).

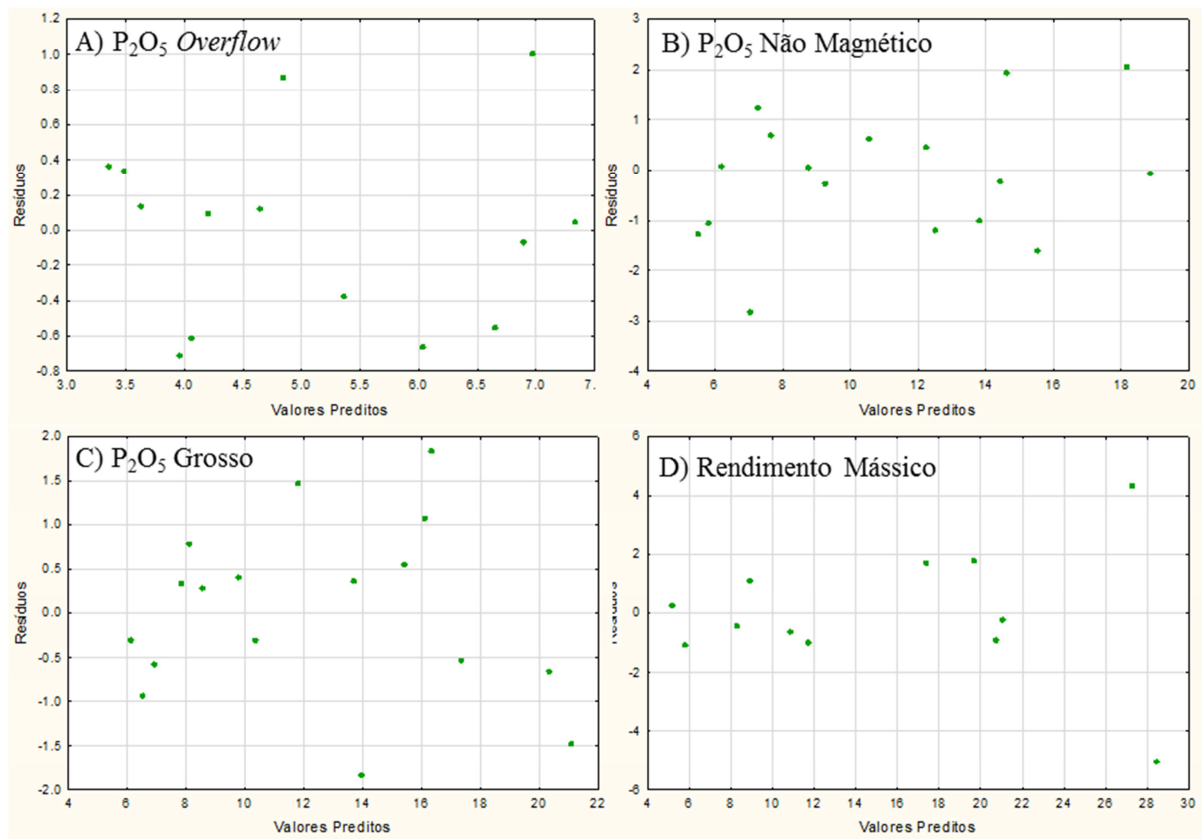


Figura 4.23: Valores preditos pelo modelo de regressão linear versus resíduos para o grupo APC_P=2 (ANF BEB/CC).

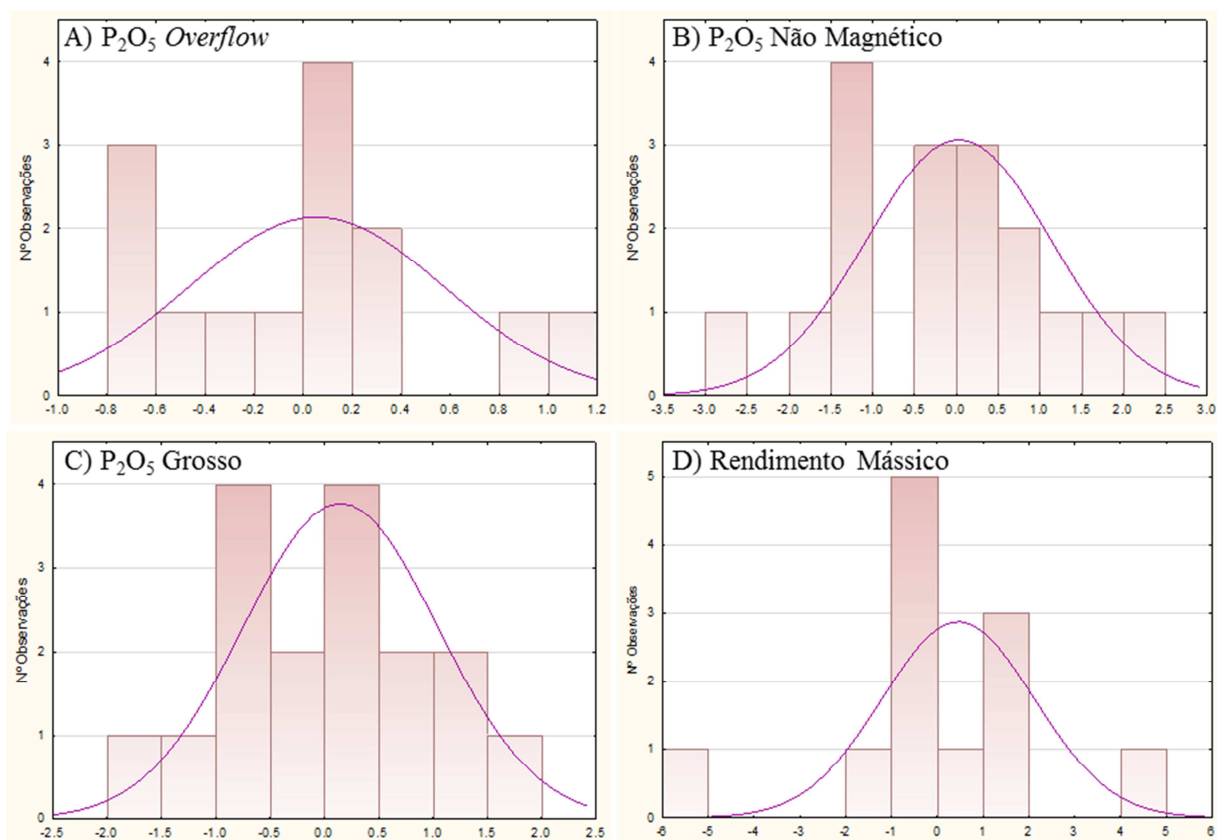


Figura 4.24: Teste de normalidade para os resíduos dos modelos de regressão linear do grupo APC_P=2 (ANF BEB/CC). Linha roxa: distribuição normal.

Tabela 4.23: Resultados do teste de hipóteses Kolmogorov-Smirnov para os resíduos dos modelos de regressão linear do grupo APC_P=2 (ANF BEB/CC).

	K-S d	K-S p-valor
Normal - P ₂ O ₅ <i>Overflow</i>	0.059103	0.955289
Normal - P ₂ O ₅ Não Mag	0.134319	0.795723
Normal - P ₂ O ₅ Grossos	0.116630	0.906320
Normal -Rendimento Mássico	0.225997	0.335254

4.3.2.6 Grupo APC_P=3 (FCR/DC)

De acordo com a análise da matriz de correlação do grupo APC_P=3 (tabela 4.24), as variáveis CaO, MgO e P₂O₅ são os óxidos do ROM mais correlacionáveis com o P₂O₅ do *overflow*. Adicionalmente, CaO apresenta alta correlação com P₂O₅. Durante a elaboração do modelo, o coeficiente de MgO obtido foi associado a um p-valor maior de 0.05, que indica probabilidade menor de 95% de esse coeficiente ser diferente de zero, de forma que esse óxidos não foi

considerado. Apenas o P_2O_5 foi utilizado como variável independente, e o modelo construído é, portanto, um modelo de regressão linear simples (tabela 4.25).

As variáveis BaO, CaO, MgO e P_2O_5 são os óxidos do ROM mais correlacionáveis com o P_2O_5 do produto não magnético. Adicionalmente, o BaO apresenta alta correlação também com CaO e P_2O_5 , e CaO, de forma que essas variáveis não devem ser utilizadas simultaneamente no modelo. O modelo de regressão para predição de P_2O_5 do produto não magnético (tabela 4.25) foi construído a partir das variáveis independentes MgO e P_2O_5 , que possuem alta correlação com a variável dependente, mas baixas correlações entre si. Pequenas quantidades de amostras tendem a produzir melhores modelos de regressão quando construídos com apenas uma variável independente. No entanto, o modelo de predição de P_2O_5 do produto não magnético elaborado a partir de MgO e P_2O_5 possui elevada significância estatística, demonstrada pelo baixo erro padrão da estimativa e pela estatística de aderência do modelo (R^2 ajustado, tabela 4.25).

As variáveis Al_2O_3 , BaO, CaO, MgO e P_2O_5 são os óxidos do ROM mais correlacionáveis com o P_2O_5 da fração grossa. Adicionalmente, Al_2O_3 , BaO, CaO e P_2O_5 são multicolineares. Da mesma forma que o modelo de predição do P_2O_5 do produto não magnético, o modelo de regressão para predição do P_2O_5 da fração grossa (tabela 4.25) foi construído a partir das variáveis independentes MgO e P_2O_5 . A utilização das mesmas variáveis independentes nos modelos de predição das variáveis P_2O_5 não magnético e P_2O_5 dos grossos reflete a similaridade entre esses dois produtos.

As variáveis Al_2O_3 , BaO, CaO e P_2O_5 são os óxidos do ROM mais correlacionáveis com o rendimento mássico, além de serem multicolineares entre si. O modelo e regressão para predição do rendimento mássico foi melhor ajustado para a variável independente P_2O_5 (tabela 4.25).

Tabela 4.24: Matriz de correlação entre os óxidos do ROM, variáveis de preparação e recuperação mássica total do grupo APC_P=3 (FCR/DC). *Over*: overflow; *Under*: underflow; Mag: magnético; N Mag: não magnético; G: grossos; F: finos; Rend Mas Tot: rendimento mássico total. Em azul: correlações maiores que 0.70. Em vermelho: correlações menores que -0.70.

Variável	Al ₂ O ₃ ROM	BaO ROM	CaO ROM	Fe ₂ O ₃ ROM	MgO ROM	P ₂ O ₅ ROM	SiO ₂ ROM	TiO ₂ ROM	P ₂ O ₅ <i>Over</i>	P ₂ O ₅ <i>Under</i>	P ₂ O ₅ Mag	P ₂ O ₅ N Mag	P ₂ O ₅ G	P ₂ O ₅ F	Rend Mas Tot
Al ₂ O ₃ ROM	1.00	-0.98	0.80	-0.80	-0.25	0.83	0.20	0.77	0.45	0.91	-0.17	0.67	0.78	0.09	0.73
BaO ROM	-0.98	1.00	-0.89	0.77	0.37	-0.90	-0.04	-0.69	-0.60	-0.94	0.31	-0.77	-0.86	-0.27	-0.84
CaO ROM	0.80	-0.89	1.00	-0.60	-0.57	0.98	-0.33	0.33	0.89	0.92	-0.56	0.92	0.92	0.62	0.98
Fe ₂ O ₃ ROM	-0.80	0.77	-0.60	1.00	-0.28	-0.56	-0.55	-0.80	-0.25	-0.57	-0.29	-0.28	-0.36	0.24	-0.55
MgO ROM	-0.25	0.37	-0.57	-0.28	1.00	-0.60	0.86	0.23	-0.70	-0.58	0.97	-0.82	-0.78	-0.89	-0.56
P ₂ O ₅ ROM	0.83	-0.90	0.98	-0.56	-0.60	1.00	-0.32	0.33	0.87	0.97	-0.56	0.95	0.95	0.59	0.97
SiO ₂ ROM	0.20	-0.04	-0.33	-0.55	0.86	-0.32	1.00	0.67	-0.66	-0.20	0.90	-0.58	-0.46	-0.94	-0.38
TiO ₂ ROM	0.77	-0.69	0.33	-0.80	0.23	0.33	0.67	1.00	-0.12	0.46	0.34	0.13	0.28	-0.45	0.21
P ₂ O ₅ <i>Over</i>	0.45	-0.60	0.89	-0.25	-0.70	0.87	-0.66	-0.12	1.00	0.74	-0.71	0.91	0.83	0.86	0.91
P ₂ O ₅ <i>Under</i>	0.91	-0.94	0.92	-0.57	-0.58	0.97	-0.20	0.46	0.74	1.00	-0.50	0.91	0.95	0.47	0.89
P ₂ O ₅ Mag	-0.17	0.31	-0.56	-0.29	0.97	-0.56	0.90	0.34	-0.71	-0.50	1.00	-0.77	-0.72	-0.94	-0.59
P ₂ O ₅ N Mag	0.67	-0.77	0.92	-0.28	-0.82	0.95	-0.58	0.13	0.91	0.91	-0.77	1.00	0.98	0.79	0.90
P ₂ O ₅ G	0.78	-0.86	0.92	-0.36	-0.78	0.95	-0.46	0.28	0.83	0.95	-0.72	0.98	1.00	0.68	0.89
P ₂ O ₅ F	0.09	-0.27	0.62	0.24	-0.89	0.59	-0.94	-0.45	0.86	0.47	-0.94	0.79	0.68	1.00	0.66
Rend Mas Tot	0.73	-0.84	0.98	-0.55	-0.56	0.97	-0.38	0.21	0.91	0.89	-0.59	0.90	0.89	0.66	1.00

Tabela 4.25: Sumário dos modelos de regressão linear obtidos para o grupo APC_P=3 (FCR/DC). N: número de amostras utilizadas. b: coeficientes do modelo. R: coeficiente de correlação. R²: coeficiente de determinação.

Variável Dependente	Sumário de Regressão Linear: APC_P=3			
P ₂ O ₅ <i>Overflow</i>	R= 0.99618675 R ² = 0.99238804 R ² Ajustado = 0.99143654 Erro Padrão da Estimativa: 1.0458			
	N=9	b	Erro Padrão de b	p-valor
	P ₂ O ₅ ROM	0.717114	0.022205	0.000000
P ₂ O ₅ Não Magnético	R= 0.99684923 R ² = 0.99370839 R ² Ajustado = 0.99119175 Erro Padrão da Estimativa: 0.44060			
	N=8	b	Erro Padrão de b	p-valor
	Intercepto	10.97290	1.269288	0.000342
	MgO ROM	-0.66031	0.090738	0.000766
	P ₂ O ₅ ROM	0.92104	0.051456	0.000010
P ₂ O ₅ Fração Grossa	R= 0.99150103 R ² = 0.98307429 R ² Ajustado = 0.97630400 Erro Padrão da Estimativa: 0.80599			
	N=8	b	Erro Padrão de b	p-valor
	Intercepto	8.316970	2.321921	0.015842
	MgO ROM	-0.519950	0.165989	0.025886
	P ₂ O ₅ ROM	1.113917	0.094129	0.000076
Rendimento Mássico Total	R= 0.99093380 R ² = 0.98194979 R ² Ajustado = 0.97969351 Erro Padrão da Estimativa: 3.6612			
	N=9	b	Erro Padrão de b	p-valor
	P ₂ O ₅ ROM	1.621710	0.077736	0.000000

Todos os coeficientes de correlação (R, tabela 4.25) obtidos foram maiores que 0.99 e indicam, portanto, elevada correlação entre as variáveis dependentes e os valores estimados pelos modelos de regressão. Nota-se que, para o grupo APC_P=3, o valor de R obtido para o modelo de P₂O₅ no *overflow* foi tão elevado quanto aos valores de R obtidos nos demais modelos de APC_P=3. Esse fato sugere que a perda de P₂O₅ nas lamaz é mais facilmente predita para minérios foscóricos.

Os coeficientes de determinação (R², tabela 4.25) obtidos nos modelos de regressão linear simples (P₂O₅ do *overflow* e rendimento mássico) são superiores a 0.98 e indicam modelos bem ajustados.

Os coeficientes de determinação ajustados (R² ajustados) obtidos nos modelos de regressão linear múltipla (P₂O₅ do produto não magnético e P₂O₅ da fração grossa) estão acima de 0.97 e

indicam, da mesma forma que R^2 para os modelos de regressão simples, que os modelos de regressão múltipla estão bem ajustados.

O tamanho da amostra (proporção entre observações e variáveis independentes) utilizada na construção de modelos de regressão tende a afetar a generalização dos resultados. De uma forma geral, espera-se de 15 a 20 observações para cada variável independente (Hair et al. 2005). Quando essa proporção não é alcançada, corre-se o risco de “superajustar” a variável estatística (combinação linear das variáveis independentes ponderadas) com a amostra, tornando os resultados demasiadamente específicos e perdendo-se o poder de generalização. A baixa quantidade de amostras do grupo APC_P=3 ($N < 10$), por sua vez, implica em perda do poder de generalização dos modelos obtidos.

Os gráficos de valores preditos *versus* observados dos modelos de regressão linear para o grupo APC_P=3 (figura 4.25) refletem os elevados coeficientes de correlação (R) obtidos em cada modelo.

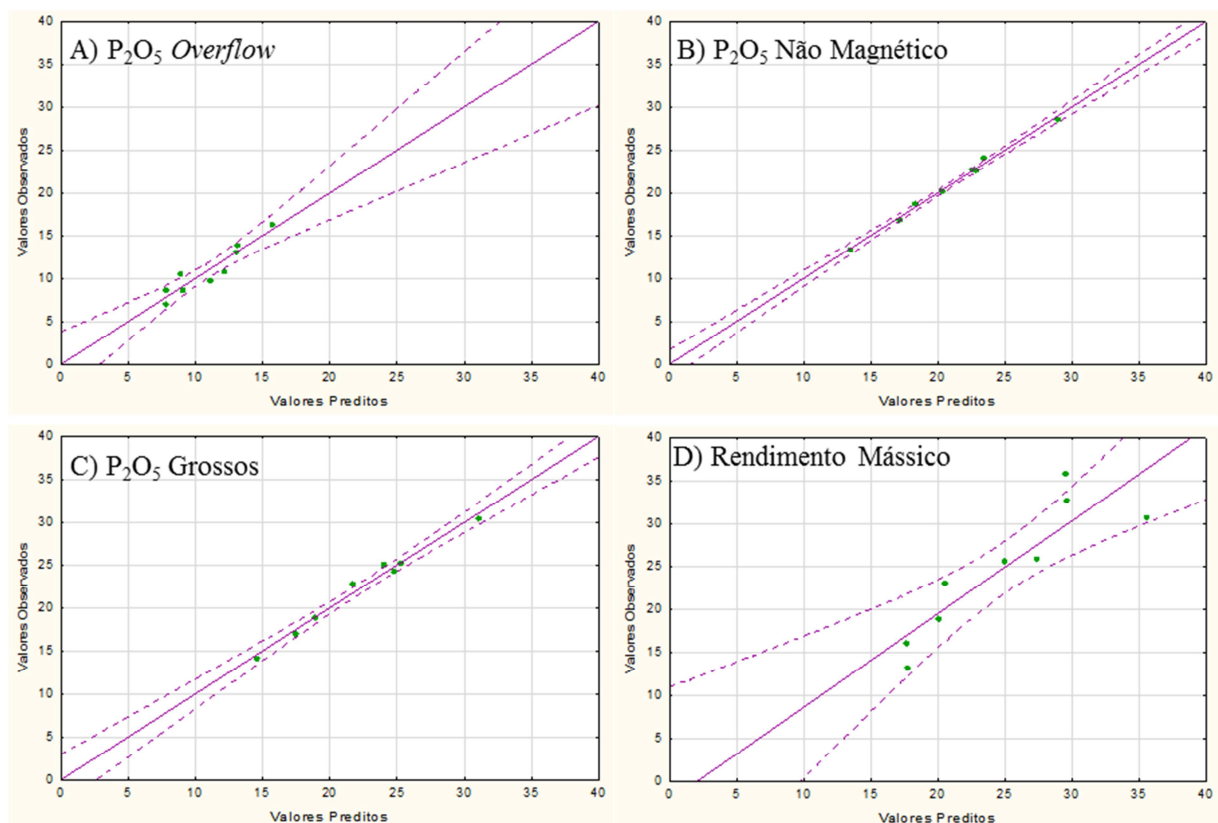


Figura 4.25: Valores preditos pelo modelo de regressão linear versus valores observados para o grupo APC_P=3 (FCR/DC). Linhas roxas pontilhadas: intervalo de confiança de 95%.

Não foi observada correlação entre os valores preditos e os resíduos do modelo (figura 4.26), confirmando-se a hipótese de homoscedasticidade dos dados. No entanto, assim como observado nos modelos do grupo APC_P=2, os resíduos não aparentam possuir uma distribuição normal (figura 4.27) devido ao baixo número de amostras desse grupo. A hipótese de normalidade dos resíduos foi confirmada com o teste de hipóteses Kolmogorov-Smirnov (p-valores dos testes > 0.05, tabela 4.26).

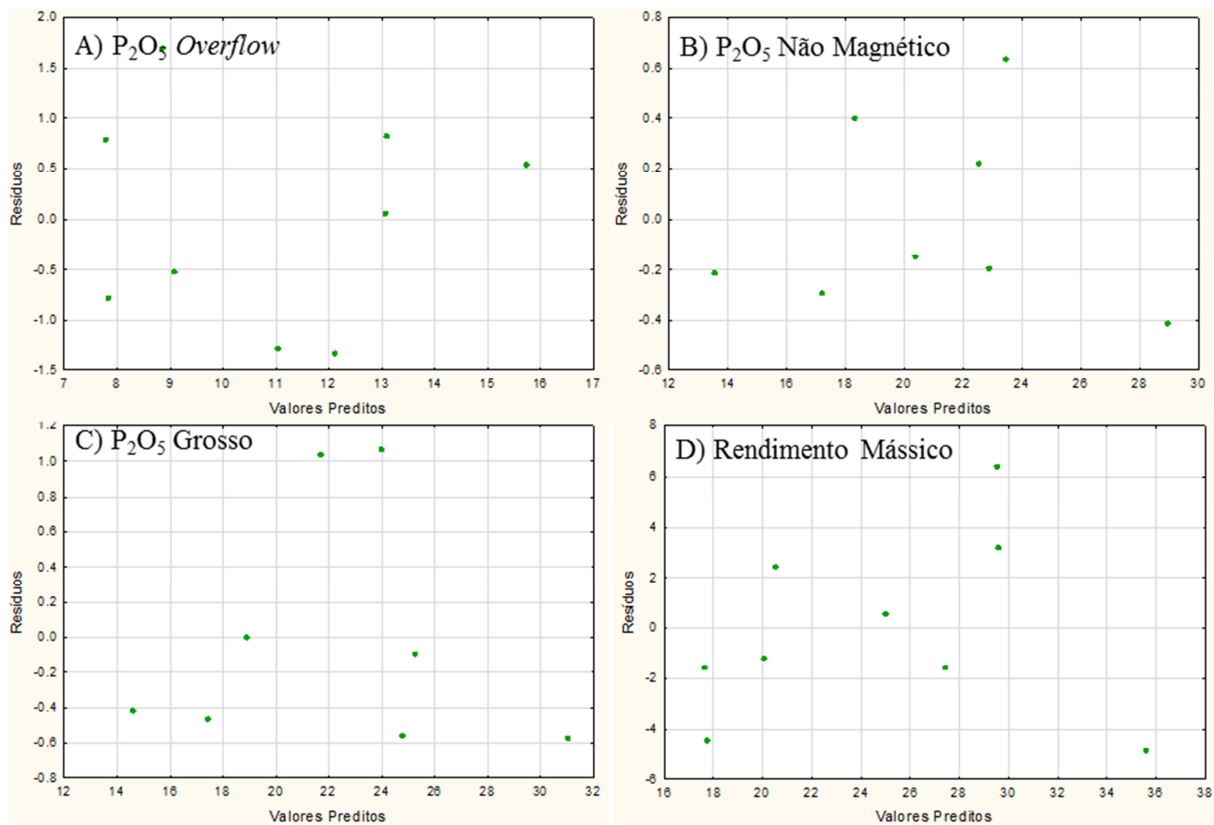


Figura 4.26: Valores preditos pelo modelo de regressão linear versus resíduos para o grupo APC_P=3 (FCR/DC).

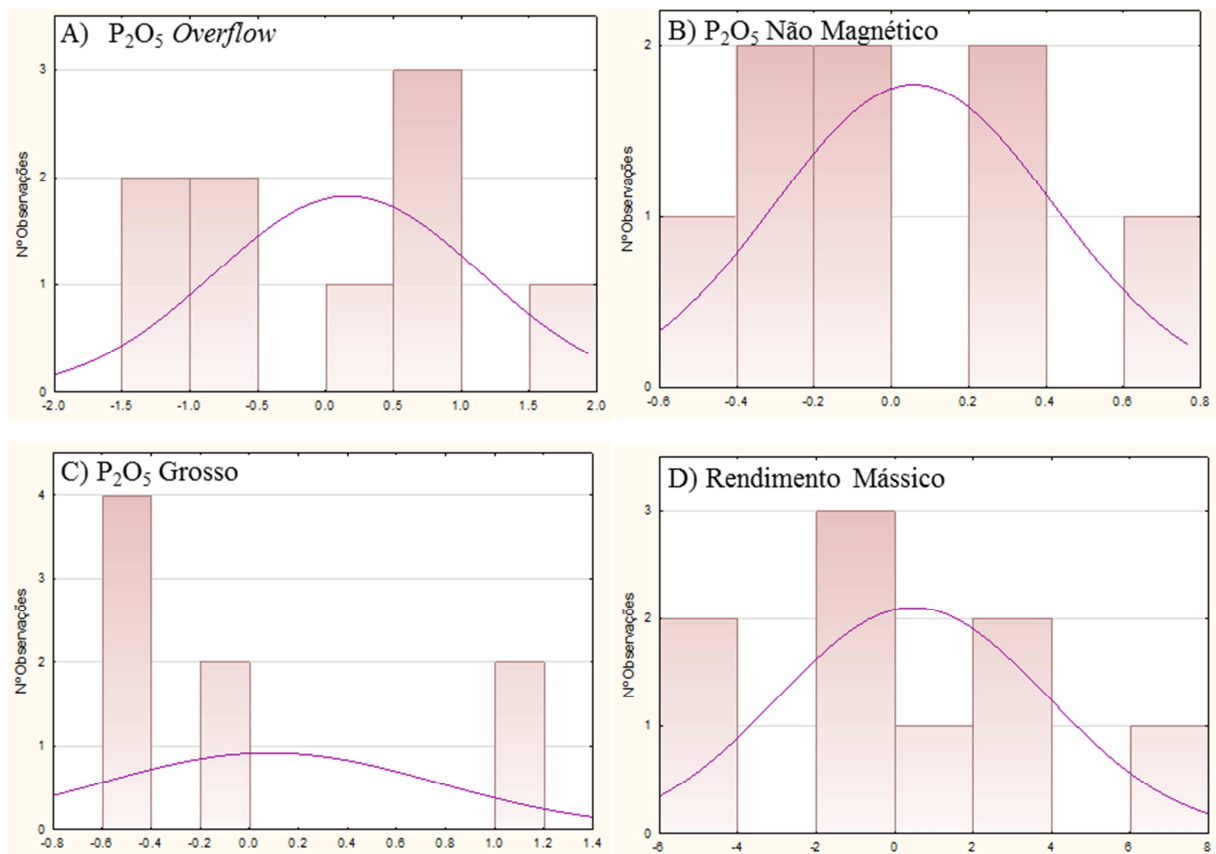


Figura 4.27: Teste de normalidade para os resíduos dos modelos de regressão linear do grupo APC_P=3 (FCR/DC). Linha roxa: distribuição normal.

Tabela 4.26: Resultados do teste de hipóteses Kolmogorov-Smirnov para os resíduos dos modelos de regressão linear do grupo APC_P=3 (FCR/DC).

	K-S d	K-S p-valor
Normal - P ₂ O ₅ <i>Overflow</i>	0.124365	0.973001
Normal - P ₂ O ₅ Não Mag	0.238827	0.433068
Normal - P ₂ O ₅ Grossos	0.262022	0.323537
Normal -Rendimento Mássico	0.155289	0.866063

4.3.2.7 Grupo APC_I=1 (Micáceo de Topo)

De acordo com a matriz de correlação do grupo APC_I=1 (tabela 4.27), as variáveis SiO₂, CaO e P₂O₅ são os óxidos do ROM mais correlacionáveis com o P₂O₅ do *overflow*, P₂O₅ do produto não magnético e P₂O₅ da fração de grossos. Devido à multicolinearidade entre eles, os modelos para as três referidas variáveis dependentes consideraram inicialmente apenas o P₂O₅. No entanto, foram obtidos p-valores menores que 0.05 associados à variável SiO₂ nos modelos de P₂O₅ do produto não magnético e P₂O₅ da fração de grossos, de forma que essa variável foi incorporada a esses dois

modelos. A utilização das mesmas variáveis independentes nos modelos de predição das variáveis P_2O_5 não magnético e P_2O_5 dos grossos reflete a similaridade entre esses dois produtos, assim como também observado nos modelos construídos para o grupo APC_P.

As variáveis CaO e P_2O_5 , multicolineares, são os óxidos do ROM com as maiores correlações com o rendimento mássico, de forma que o modelo para essa variável dependente considerou apenas o P_2O_5 como variável independente.

Tabela 4.27: Matriz de correlação entre os óxidos do ROM, variáveis de preparação e recuperação mássica total do grupo APC_I=1 (MT). *Over*: overflow; *Under*: underflow; Mag: magnético; N Mag: não magnético; G: grossos; F: finos; Rend Mas Tot: rendimento mássico total. Em azul: correlações maiores que 0.70. Em vermelho: correlações menores que -0.70.

Variável	SiO ₂ ROM	Al ₂ O ₃ ROM	Fe ₂ O ₃ ROM	MgO ROM	CaO ROM	TiO ₂ ROM	P ₂ O ₅ ROM	BaO ROM	P ₂ O ₅ <i>Over</i>	P ₂ O ₅ <i>Under</i>	P ₂ O ₅ Mag	P ₂ O ₅ N Mag	P ₂ O ₅ G	P ₂ O ₅ F	Rend Mas Tot
SiO ₂ ROM	1.00	0.16	-0.28	0.17	-0.73	0.49	-0.80	-0.10	-0.80	-0.80	-0.47	-0.88	-0.85	-0.80	-0.65
Al ₂ O ₃ ROM	0.16	1.00	-0.62	0.01	0.12	0.02	0.09	-0.14	0.08	0.06	0.30	-0.03	0.00	0.01	0.06
Fe ₂ O ₃ ROM	-0.28	-0.62	1.00	-0.07	-0.27	0.02	-0.11	0.47	-0.17	-0.07	-0.38	-0.01	-0.05	-0.15	-0.26
MgO ROM	0.17	0.01	-0.07	1.00	-0.38	-0.36	-0.49	-0.20	-0.19	-0.54	-0.20	-0.42	-0.48	-0.37	-0.26
CaO ROM	-0.73	0.12	-0.27	-0.38	1.00	-0.44	0.95	-0.28	0.92	0.92	0.81	0.91	0.91	0.94	0.85
TiO ₂ ROM	0.49	0.02	0.02	-0.36	-0.44	1.00	-0.40	0.01	-0.59	-0.38	-0.43	-0.44	-0.34	-0.53	-0.37
P ₂ O ₅ ROM	-0.80	0.09	-0.11	-0.49	0.95	-0.40	1.00	-0.10	0.89	0.98	0.78	0.95	0.96	0.94	0.82
BaO ROM	-0.10	-0.14	0.47	-0.20	-0.28	0.01	-0.10	1.00	-0.26	-0.01	-0.27	0.02	-0.03	-0.07	-0.15
P ₂ O ₅ <i>Over</i>	-0.80	0.08	-0.17	-0.19	0.92	-0.59	0.89	-0.26	1.00	0.84	0.76	0.86	0.86	0.92	0.79
P ₂ O ₅ <i>Under</i>	-0.80	0.06	-0.07	-0.54	0.92	-0.38	0.98	-0.01	0.84	1.00	0.74	0.97	0.97	0.94	0.81
P ₂ O ₅ Mag	-0.47	0.30	-0.38	-0.20	0.81	-0.43	0.78	-0.27	0.76	0.74	1.00	0.69	0.69	0.77	0.72
P ₂ O ₅ N Mag	-0.88	-0.03	-0.01	-0.42	0.91	-0.44	0.95	0.02	0.86	0.97	0.69	1.00	0.98	0.95	0.86
P ₂ O ₅ G	-0.85	0.00	-0.05	-0.48	0.91	-0.34	0.96	-0.03	0.86	0.97	0.69	0.98	1.00	0.94	0.86
P ₂ O ₅ F	-0.80	0.01	-0.15	-0.37	0.94	-0.53	0.94	-0.07	0.92	0.94	0.77	0.95	0.94	1.00	0.89
Rend Mas Tot	-0.65	0.06	-0.26	-0.26	0.85	-0.37	0.82	-0.15	0.79	0.81	0.72	0.86	0.86	0.89	1.00

Tabela 4.28: Sumário dos modelos de regressão linear obtidos para o grupo APC_I=1 (MT). N: número de amostras utilizadas. b: coeficientes do modelo. R: coeficiente de correlação. R²: coeficiente de determinação.

Variável Dependente	Sumário de Regressão Linear: APC_I=1			
P ₂ O ₅ <i>Overflow</i>	R= 0.98893061 R ² = 0.97798374 R ² Ajustado = 0.97737218 Erro Padrão da Estimativa: 1.3136			
	N=37	b	Erro Padrão de b	p-valor
	P ₂ O ₅ ROM	0.645989	0.016154	0.000000
P ₂ O ₅ Não Magnético	R= 0.97759479 R ² = 0.95569158 R ² Ajustado = 0.95300622 Erro Padrão da Estimativa: 1.2975			
	N=36	b	Erro Padrão de b	p-valor
	Intercepto	3.707336	1.492657	0.018255
	P ₂ O ₅ ROM	1.177087	0.069136	0.000000
	SiO ₂ ROM	-0.134671	0.034119	0.000391
P ₂ O ₅ Fração Grossa	R= 0.98547553 R ² = 0.97116203 R ² Ajustado = 0.96930152 Erro Padrão da Estimativa: 0.98050			
	N=34	b	Erro Padrão de b	p-valor
	Intercepto	2.825663	1.147846	0.019592
	P ₂ O ₅ ROM	1.264378	0.055345	0.000000
	SiO ₂ ROM	-0.075558	0.025853	0.006427
Rendimento Mássico Total	R= 0.98560188 R ² = 0.97141106 R ² Ajustado= 0.97011156 Erro Padrão da estimativa: 1.5408			
	N=24	b	Erro Padrão de b	p-valor
	Intercepto	-4.31124	1.002691	0.000290
	P ₂ O ₅ ROM	2.10357	0.076938	0.000000

Todos os coeficientes de correlação (R, tabela 4.28) obtidos foram maiores que 0.97 e indicam, portanto, elevada correlação entre as variáveis dependentes e os valores estimados pelos modelos de regressão. Nota-se que os valores de R, inferiores a 0.95, obtidos nos modelos de P₂O₅ do *overflow* para os grupos APC_P=1 e APC_P=2, não foram reproduzidos no grupo APC_I=1.

Os coeficientes de determinação (R², tabela 4.28) obtidos nos modelos de regressão linear simples (P₂O₅ do *overflow* e rendimento mássico) estão acima de 0.97 e indicam modelos bem ajustados.

Os coeficientes de determinação ajustados (R² ajustados) obtidos nos modelos de regressão linear múltipla (P₂O₅ do produto não magnético e P₂O₅ da fração grossa) estão acima de 0.95 e

indicam, da mesma forma que R^2 para os modelos de regressão simples, que os modelos de regressão múltipla estão bem ajustados.

Os gráficos de valores preditos *versus* observados dos modelos de regressão linear para o grupo APC_I=1 (figura 4.28) refletem os elevados coeficientes de correlação (R) obtidos em cada modelo.

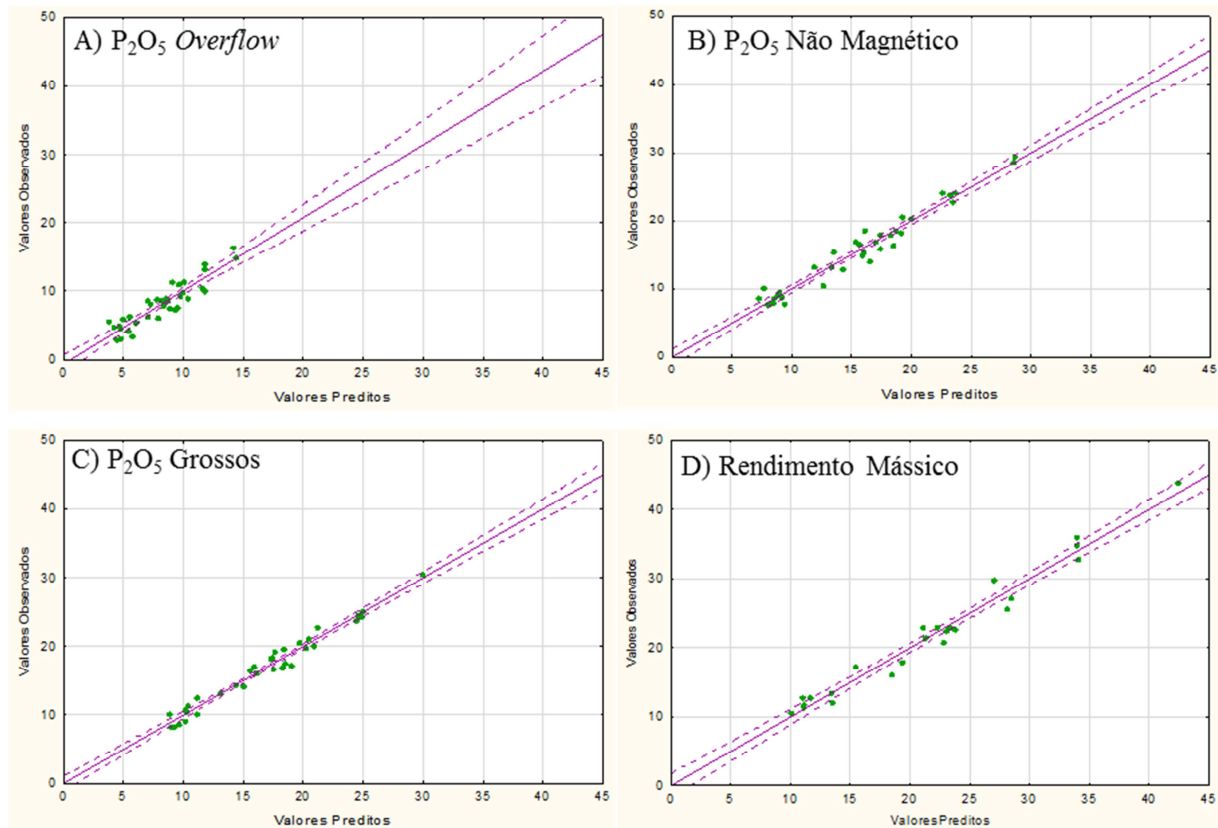


Figura 4.28: Valores preditos pelo modelo de regressão linear versus valores observados para o grupo APC_I=1 (MT). Linhas roxas pontilhadas: intervalo de confiança de 95%.

Não foi observada correlação entre os valores preditos e os resíduos do modelo, confirmando-se a hipótese de homoscedasticidade dos dados (figura 4.29). No entanto, os resíduos aparentam possuir desvios em relação a uma distribuição normal (figura 4.30). A hipótese de normalidade dos resíduos foi confirmada com o teste de hipóteses Kolmogorov-Smirnov (p-valores dos testes > 0.05 , tabela 4.29).

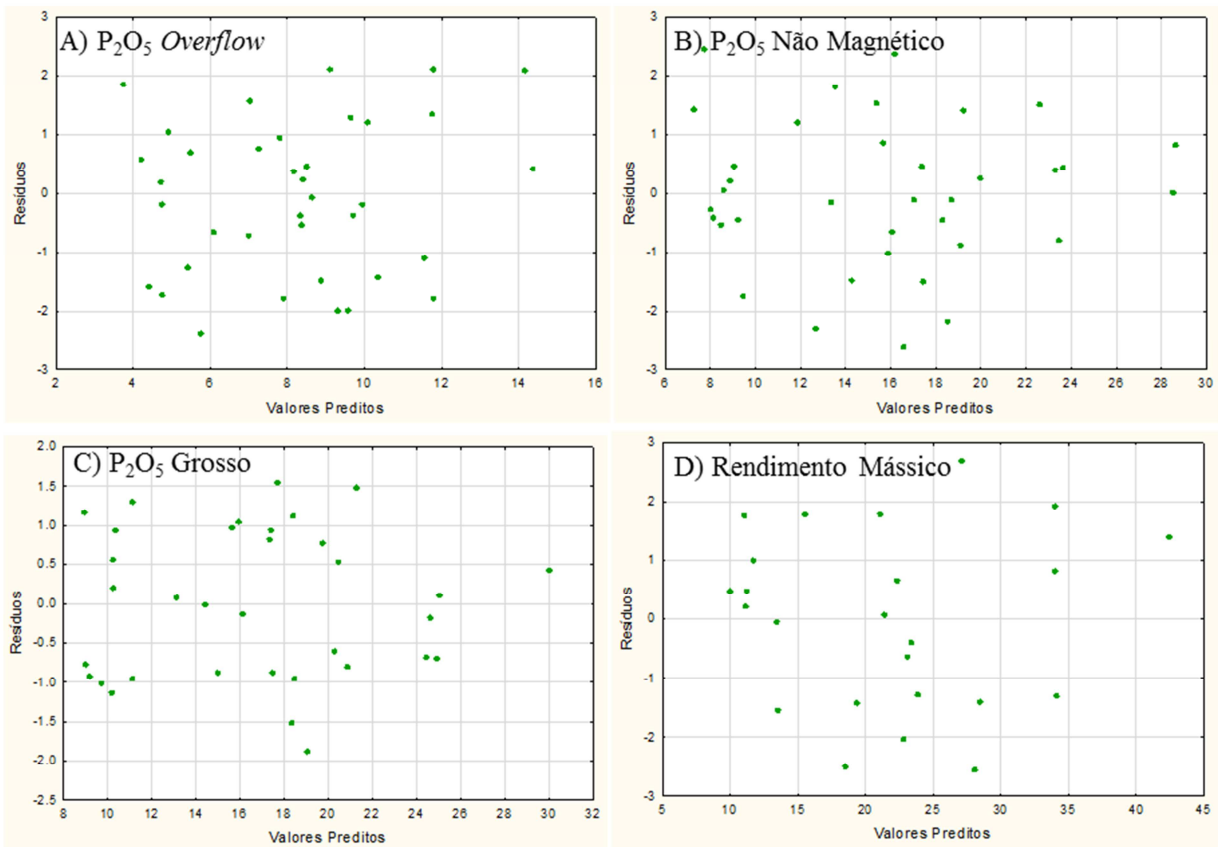


Figura 4.29: Valores preditos pelo modelo de regressão linear versus resíduos para o grupo APC_I=1 (MT).

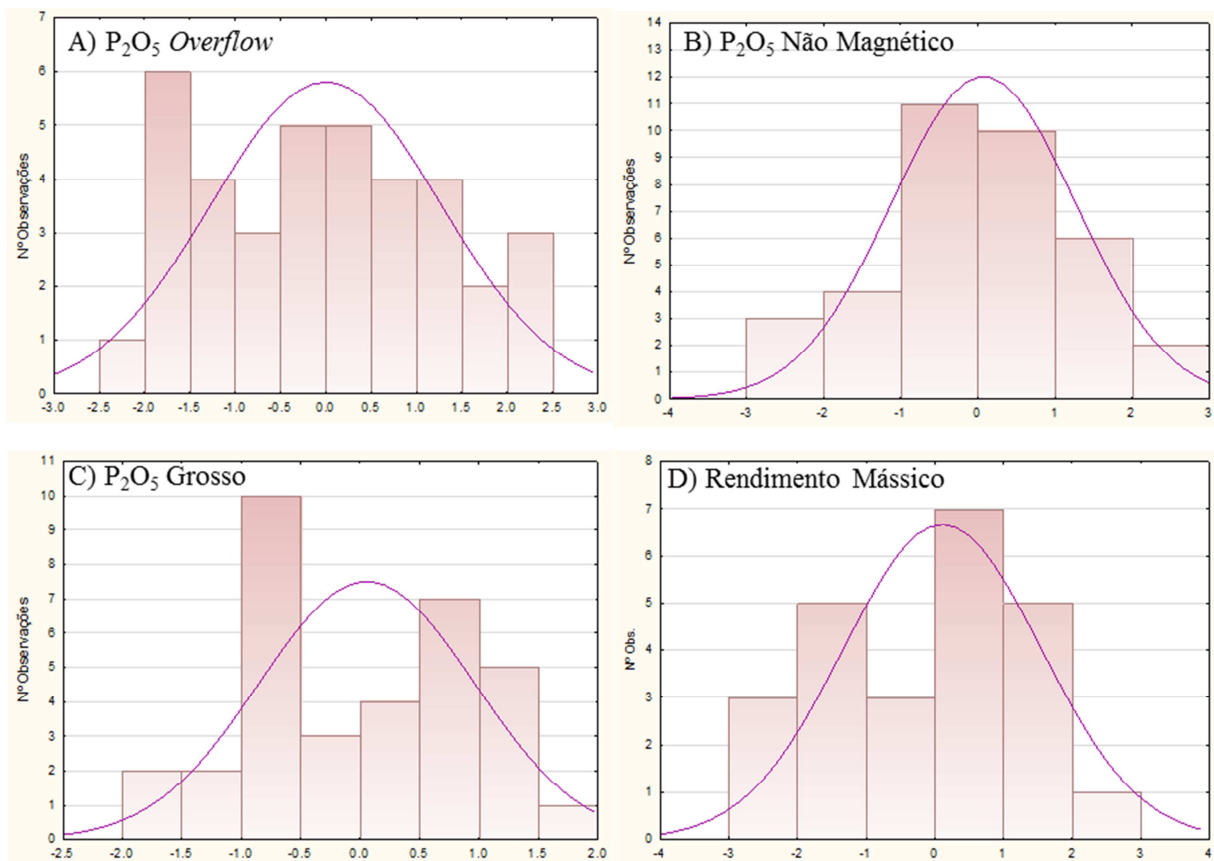


Figura 4.30: Teste de normalidade para os resíduos dos modelos de regressão linear do grupo APC_I=1 (MT). Linha roxa: distribuição normal.

Tabela 4.29: Resultados do teste de hipóteses Kolmogorov-Smirnov para os resíduos dos modelos de regressão linear do grupo APC_I=1 (MT).

	K-S d	K-S p-valor
Normal - P_2O_5 <i>Overflow</i>	0.087189	0.887530
Normal - P_2O_5 Não Mag	0.088434	0.885952
Normal - P_2O_5 Grossos	0.123311	0.567947
Normal - Rendimento Mássico	0.115712	0.806663

4.3.2.8 Grupo APC_I=2 (Micáceo de Base)

O grupo APC_I=2 possui características de correlação entre os óxidos do ROM e as variáveis dependentes escolhidas para modelagem similares às observadas para o grupo APC_I=1 (tabela 4.30). A tabela 4.31 apresenta os modelos obtidos para o grupo APC_I=2. Os padrões de correlação similares obtidos entre os óxidos e as variáveis dependentes para os grupos APC_I=1 e APC_I=2 refletem que, mesmo com graus de alteração intempérica distintos, ambos os grupos

mantêm similaridades nas correlações entre os principais óxidos e as variáveis dependentes consideradas nos modelos de regressão.

Tabela 4.30: Matriz de correlação entre os óxidos do ROM, variáveis de preparação e recuperação mássica total do grupo APC_I=2 (MB). *Over*: overflow; *Under*: underflow; Mag: magnético; N Mag: não magnético; G: grossos; F: finos; Rend Mas Tot: rendimento mássico total. Em azul: correlações maiores que 0.70. Em vermelho: correlações menores que -0.70.

Variável	SiO ₂ ROM	Al ₂ O ₃ ROM	Fe ₂ O ₃ ROM	MgO ROM	CaO ROM	TiO ₂ ROM	P ₂ O ₅ ROM	BaO ROM	P ₂ O ₅ <i>Over</i>	P ₂ O ₅ <i>Under</i>	P ₂ O ₅ Mag	P ₂ O ₅ N Mag	P ₂ O ₅ G	P ₂ O ₅ F	Rend Mas Tot
SiO ₂ ROM	1.00	0.32	-0.53	0.21	-0.64	0.30	-0.72	-0.51	-0.69	-0.71	-0.17	-0.77	-0.77	-0.73	-0.59
Al ₂ O ₃ ROM	0.32	1.00	-0.22	0.17	-0.52	0.38	-0.44	-0.10	-0.47	-0.39	-0.13	-0.46	-0.44	-0.52	-0.49
Fe ₂ O ₃ ROM	-0.53	-0.22	1.00	0.02	-0.12	-0.17	0.01	0.37	0.08	0.01	-0.04	0.19	0.15	0.22	-0.02
MgO ROM	0.21	0.17	0.02	1.00	-0.44	0.07	-0.57	-0.24	-0.42	-0.61	-0.01	-0.58	-0.57	-0.56	-0.45
CaO ROM	-0.64	-0.52	-0.12	-0.44	1.00	-0.35	0.94	0.06	0.89	0.91	0.13	0.88	0.88	0.87	0.86
TiO ₂ ROM	0.30	0.38	-0.17	0.07	-0.35	1.00	-0.33	-0.30	-0.46	-0.30	-0.04	-0.35	-0.36	-0.49	-0.30
P ₂ O ₅ ROM	-0.72	-0.44	0.01	-0.57	0.94	-0.33	1.00	0.17	0.91	0.98	0.20	0.96	0.96	0.92	0.85
BaO ROM	-0.51	-0.10	0.37	-0.24	0.06	-0.30	0.17	1.00	0.16	0.19	0.18	0.23	0.23	0.25	0.08
P ₂ O ₅ <i>Over</i>	-0.69	-0.47	0.08	-0.42	0.89	-0.46	0.91	0.16	1.00	0.85	0.18	0.88	0.85	0.94	0.76
P ₂ O ₅ <i>Under</i>	-0.71	-0.39	0.01	-0.61	0.91	-0.30	0.98	0.19	0.85	1.00	0.22	0.96	0.98	0.89	0.86
P ₂ O ₅ Mag	-0.17	-0.13	-0.04	-0.01	0.13	-0.04	0.20	0.18	0.18	0.22	1.00	0.15	0.18	0.12	0.00
P ₂ O ₅ N Mag	-0.77	-0.46	0.19	-0.58	0.88	-0.35	0.96	0.23	0.88	0.96	0.15	1.00	0.98	0.94	0.86
P ₂ O ₅ G	-0.77	-0.44	0.15	-0.57	0.88	-0.36	0.96	0.23	0.85	0.98	0.18	0.98	1.00	0.91	0.86
P ₂ O ₅ F	-0.73	-0.52	0.22	-0.56	0.87	-0.49	0.92	0.25	0.94	0.89	0.12	0.94	0.91	1.00	0.79
Rend Mas Tot	-0.59	-0.49	-0.02	-0.45	0.86	-0.30	0.85	0.08	0.76	0.86	0.00	0.86	0.86	0.79	1.00

Tabela 4.31: Sumário dos modelos de regressão linear obtidos para o grupo APC_I=2 (MB). N: número de amostras utilizadas. b: coeficientes do modelo. R: coeficiente de correlação. R²: coeficiente de determinação.

Variável Dependente	Sumário de Regressão Linear: APC_I=2			
P ₂ O ₅ <i>Overflow</i>	R= 0.92258243 R ² = 0.85115834 R ² Ajustado = 0.84818150 Erro Padrão da Estimativa: 0.83516			
	N=52	b	Erro Padrão de b	p-valor
	Intercepto	0.869681	0.319618	0.008931
	P ₂ O ₅ ROM	0.534619	0.031617	0.000000
P ₂ O ₅ Não Magnético	R= 0.96970029 R ² = 0.94031866 R ² Ajustado = 0.93806653 Erro Padrão da Estimativa: 1.1993			
	N=56	b	Erro Padrão de b	p-valor
	Intercepto	3.164879	1.025025	0.003208
	P ₂ O ₅ ROM	1.087304	0.054402	0.000000
	SiO ₂ ROM	-0.077365	0.021390	0.000665
P ₂ O ₅ Fração Grossa	R= 0.97929005 R ² = 0.95900900 R ² Ajustado = 0.95746217 Erro Padrão da Estimativa: 1.1081			
	N=56	b	Erro Padrão de b	p-valor
	Intercepto	3.375278	0.942732	0.000745
	P ₂ O ₅ ROM	1.233816	0.050303	0.000000
	SiO ₂ ROM	-0.084621	0.019743	0.000077
Rendimento Mássico Total	R= 0.91890682 R ² = 0.84438975 R ² Ajustado = 0.84077090 Erro Padrão da Estimativa: 3.4307			
	N=45	b	Erro Padrão de b	p-valor
	Intercepto	-4.95137	1.389377	0.000910
	P ₂ O ₅ ROM	2.16628	0.141817	0.000000

Todos os coeficientes de correlação (R, tabela 4.31) obtidos foram maiores que 0.91 e indicam elevada correlação entre as variáveis dependentes e os valores estimados pelos modelos de regressão. Apesar de ainda serem considerados elevados, foram os menores coeficientes de correlação obtidos até o momento, juntos com o R obtido para o modelo de P₂O₅ do *overflow* do grupo APC_P=1 (0.9086).

Os coeficientes de determinação (R², tabela 4.31) obtidos nos modelos de regressão linear simples (P₂O₅ do *overflow* e rendimento mássico) indicam que os modelos explicam mais que 84% da variabilidade das variáveis dependentes.

Os coeficientes de determinação ajustados (R^2 ajustados) obtidos nos modelos de regressão linear múltipla (P_2O_5 do produto não magnético e P_2O_5 da fração grossa) estão acima de 0.93 e indicam, da mesma forma que R^2 para os modelos de regressão simples, que os modelos de regressão múltipla estão bem ajustados.

Os gráficos de valores preditos *versus* observados dos modelos de regressão linear para o grupo APC_I=2 (figura 4.31) refletem os elevados coeficientes de correlação (R) obtidos em cada modelo. As maiores dispersões podem ser observadas nas figuras 4.31 A e 4.31 D, associadas aos menores valores de R .

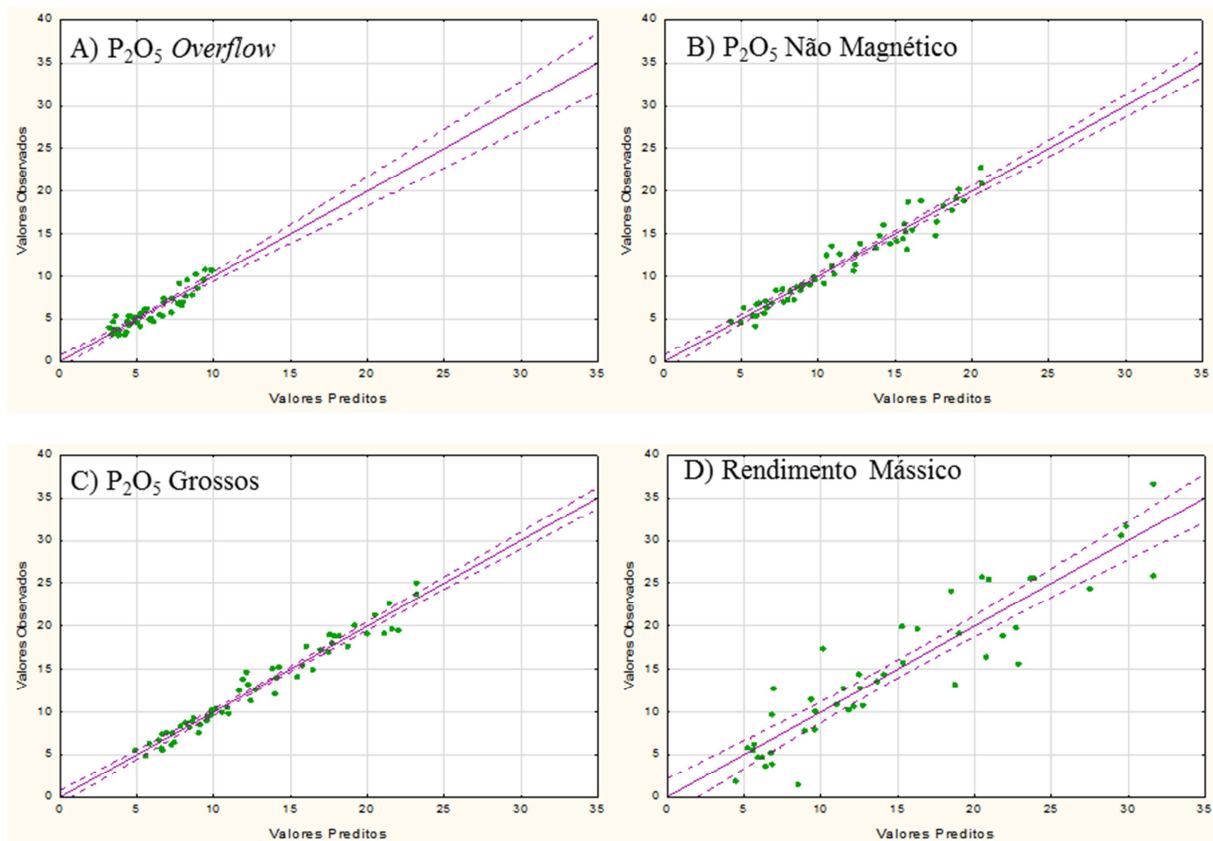


Figura 4.31: Valores preditos pelo modelo de regressão linear versus valores observados para o grupo APC_I=2 (MB). Linhas roxas pontilhadas: intervalo de confiança de 95%.

A ausência de correlação entre os valores preditos e os resíduos do modelo confirma a hipótese de homoscedasticidade dos dados (figura 4.32). No entanto, os resíduos aparentam possuir distribuições levemente desviadas da normal (figura 4.33). A distribuição mais destoante da normal foi obtida com os resíduos do modelo de rendimento mássico, devido ao menor número de amostras utilizado em sua elaboração (N=45) comparativamente aos demais modelos elaborados para esse grupo. A hipótese de normalidade dos resíduos foi confirmada com o teste de hipóteses Kolmogorov-Smirnov (p-valores dos testes > 0.05, tabela 4.32).

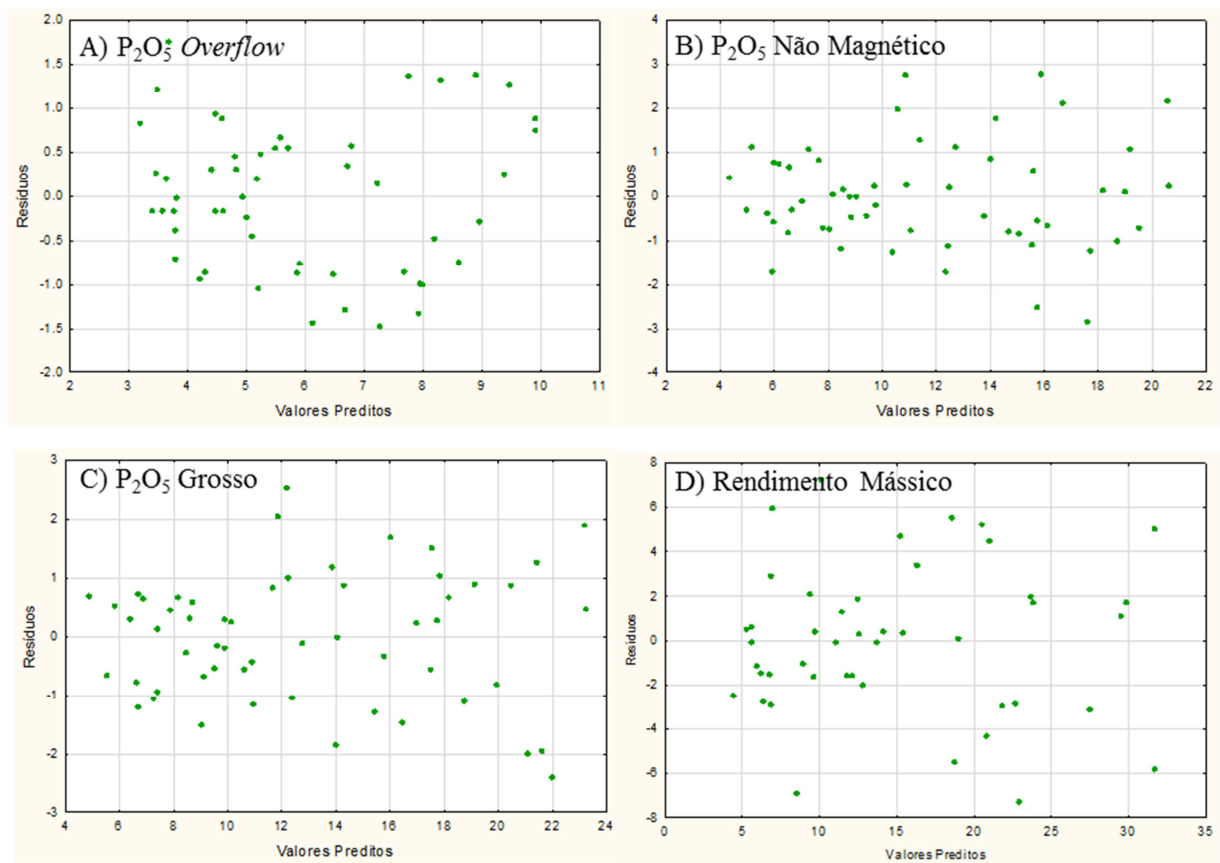


Figura 4.32: Valores preditos pelo modelo de regressão linear versus resíduos para o grupo APC_I=2 (MB).

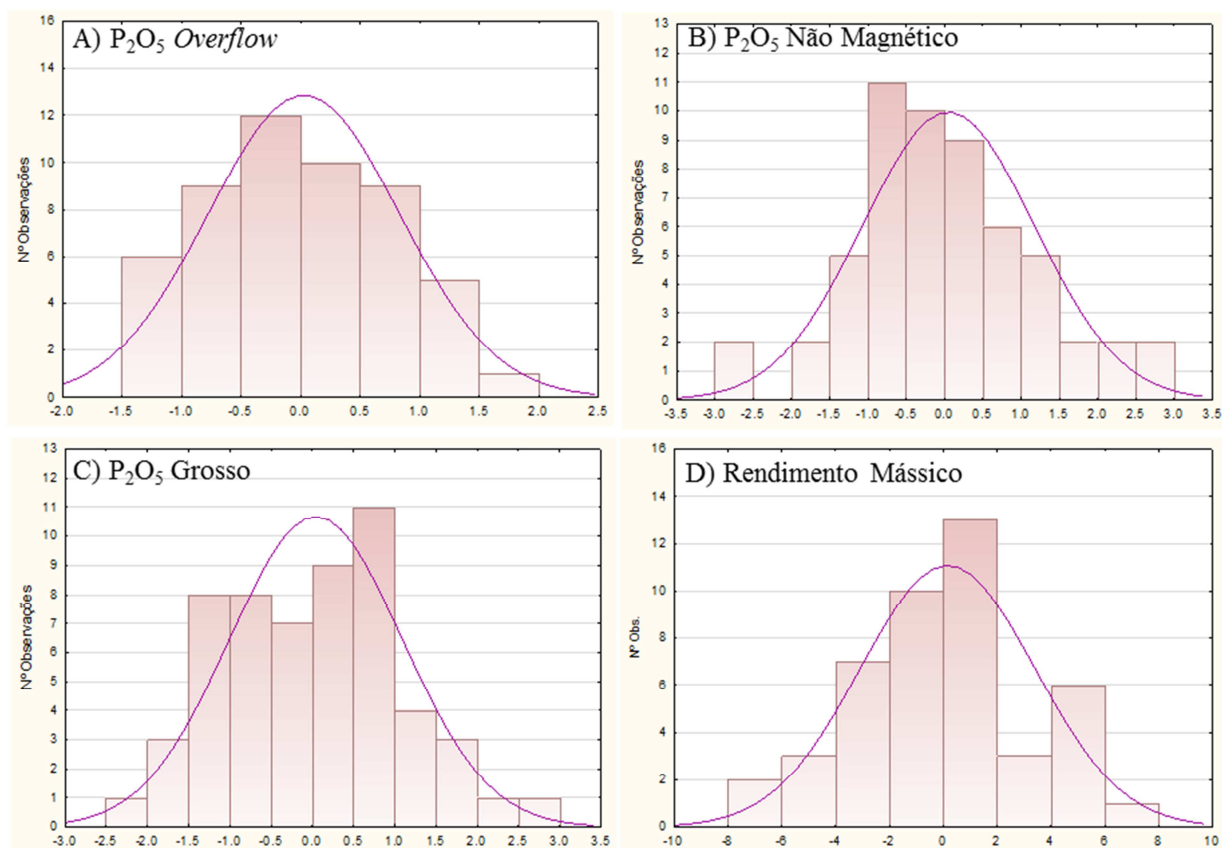


Figura 4.33: Teste de normalidade para os resíduos dos modelos de regressão linear do grupo APC_I=2 (MB). Linha roxa: distribuição normal.

Tabela 4.32: Resultados do teste de hipóteses Kolmogorov-Smirnov para os resíduos dos modelos de regressão linear do grupo APC_I=2 (MB).

	K-S d	K-S p-valor
Normal - P ₂ O ₅ <i>Overflow</i>	0.083627	0.797539
Normal - P ₂ O ₅ Não Mag	0.100707	0.543233
Normal - P ₂ O ₅ Grossos	0.063004	0.958981
Normal - Rendimento Mássico	0.083184	0.858925

4.3.2.9 Grupo APC_I=3 (Rocha Alterada)

De acordo com a análise da matriz de correlação dos dados do grupo APC_I=3 (tabela 4.333), as variáveis CaO e P₂O₅ são os óxidos do ROM mais correlacionáveis com o P₂O₅ do *overflow* e, devido à forte correlação entre elas, o P₂O₅ foi escolhido como variável independente. No entanto, o modelo foi melhor ajustado após inserção de Fe₂O₃ e SiO₂. Apesar de possuírem correlações com a variável dependente próximas a - 0.5, são estatisticamente válidas no modelo conforme indicam os p-valores inferiores a 0.05 (tabela 4.34).

As variáveis P₂O₅ e MgO são os óxidos do ROM mais correlacionados com o P₂O₅ do produto não magnético e apresentam alta correlação entre si (tabela 4.33). No entanto, ambas as variáveis apresentaram p-valores abaixo de 0.05, que indicam probabilidade maior que 95% de os coeficientes serem não nulos, ou seja, ambas devem ser consideradas no modelo (tabela 4.34).

Os modelos para predição de P₂O₅ da fração de grossos e de rendimento mássico são modelos de regressão linear simples, considerando-se apenas a variável independente P₂O₅, que é o óxido que possui maior correlação com ambas as variáveis dependentes (tabelas 4.33 e 4.34).

De forma contrária à observada nos demais modelos construídos tanto para o grupo APC_P quanto para APC_I, os modelos de P₂O₅ não magnético e P₂O₅ dos grossos do grupo APC_I=3 foram gerados a partir de diferentes conjuntos de variáveis independentes: no primeiro, foram considerados P₂O₅ e MgO, e no segundo, apenas P₂O₅. Essa diferença está sendo atribuída ao predominante empobrecimento da ALFG em MgO em relação ao minério ROM na rocha alterada (figura 4.5 D), e conseqüentemente, em relação ao produto não magnético, de forma que a influência do MgO nos teores de P₂O₅ da fração grossa torna-se pouco relevante. Exceção ocorre com FCR/DC, devido ao enriquecimento em dolomita em sua respectiva ALFG.

Tabela 4.33: Matriz de correlação entre os óxidos do ROM, variáveis de preparação e recuperação mássica total do grupo APC_I=3 (RA). *Over*: overflow; *Under*: underflow; Mag: magnético; N Mag: não magnético; G: grossos; F: finos; Rend Mas Tot: rendimento mássico total. Em azul: correlações maiores que 0.70. Em vermelho: correlações menores que -0.70.

Variável	SiO ₂ ROM	Al ₂ O ₃ ROM	Fe ₂ O ₃ ROM	MgO ROM	CaO ROM	TiO ₂ ROM	P ₂ O ₅ ROM	BaO ROM	P ₂ O ₅ Over	P ₂ O ₅ Under	P ₂ O ₅ Mag	P ₂ O ₅ N Mag	P ₂ O ₅ G	P ₂ O ₅ F	Rend Mas Tot
SiO ₂ ROM	1.00	0.43	0.69	0.15	-0.79	0.60	-0.32	-0.45	-0.50	-0.27	-0.82	-0.29	-0.27	-0.28	-0.27
Al ₂ O ₃ ROM	0.43	1.00	0.68	0.51	-0.54	0.58	-0.23	-0.47	0.00	-0.31	-0.37	-0.08	-0.18	-0.17	-0.16
Fe ₂ O ₃ ROM	0.69	0.68	1.00	0.68	-0.93	0.93	-0.36	-0.10	-0.44	-0.34	-0.54	-0.29	-0.29	-0.34	-0.29
MgO ROM	0.15	0.51	0.68	1.00	-0.69	0.81	-0.72	-0.08	-0.52	-0.74	0.11	-0.67	-0.67	-0.72	-0.67
CaO ROM	-0.79	-0.54	-0.93	-0.69	1.00	-0.93	0.59	0.18	0.72	0.54	0.58	0.55	0.52	0.58	0.54
TiO ₂ ROM	0.60	0.58	0.93	0.81	-0.93	1.00	-0.65	-0.17	-0.64	-0.61	-0.32	-0.58	-0.60	-0.64	-0.59
P ₂ O ₅ ROM	-0.32	-0.23	-0.36	-0.72	0.59	-0.65	1.00	0.46	0.79	0.99	-0.13	0.99	0.99	1.00	1.00
BaO ROM	-0.45	-0.47	-0.10	-0.08	0.18	-0.17	0.46	1.00	0.05	0.54	0.05	0.39	0.48	0.38	0.43
P ₂ O ₅ Over	-0.50	0.00	-0.44	-0.52	0.72	-0.64	0.79	0.05	1.00	0.68	0.28	0.82	0.76	0.82	0.80
P ₂ O ₅ Under	-0.27	-0.31	-0.34	-0.74	0.54	-0.61	0.99	0.54	0.68	1.00	-0.19	0.96	0.98	0.97	0.97
P ₂ O ₅ Mag	-0.82	-0.37	-0.54	0.11	0.58	-0.32	-0.13	0.05	0.28	-0.19	1.00	-0.16	-0.20	-0.14	-0.16
P ₂ O ₅ N Mag	-0.29	-0.08	-0.29	-0.67	0.55	-0.58	0.99	0.39	0.82	0.96	-0.16	1.00	0.98	0.99	0.99
P ₂ O ₅ G	-0.27	-0.18	-0.29	-0.67	0.52	-0.60	0.99	0.48	0.76	0.98	-0.20	0.98	1.00	0.99	0.99
P ₂ O ₅ F	-0.28	-0.17	-0.34	-0.72	0.58	-0.64	1.00	0.38	0.82	0.97	-0.14	0.99	0.99	1.00	1.00
Rend Mas Tot	-0.27	-0.16	-0.29	-0.67	0.54	-0.59	1.00	0.43	0.80	0.97	-0.16	0.99	0.99	1.00	1.00

Tabela 4.34: Sumário dos modelos de regressão linear obtidos para o grupo APC_I=3 (RA). N: número de amostras utilizadas. b: coeficientes do modelo. R: coeficiente de correlação. R²: coeficiente de determinação.

Variável Dependente	Sumário de Regressão Linear: APC_I=3			
P ₂ O ₅ <i>Overflow</i>	R= 0.98965989 R ² = 0.97942669 R ² Ajustado = 0.97674321 Erro Padrão da Estimativa: 0.94123			
	N=26	b	Erro Padrão de b	p-valor
	Fe ₂ O ₃ ROM	0.114092	0.025529	0.000175
	P ₂ O ₅ ROM	0.668465	0.048608	0.000000
	SiO ₂ ROM	-0.077805	0.025752	0.006077
P ₂ O ₅ Não Magnético	R= 0.98246338 R ² = 0.96523430 R ² Ajustado= 0.96221120 Erro Padrão da Estimativa: 0.65620			
	N=26	b	Erro Padrão de b	p-valor
	Intercepto	4.293099	1.202448	0.001624
	P ₂ O ₅ ROM	0.968310	0.055722	0.000000
	MgO ROM	-0.201851	0.075595	0.013672
P ₂ O ₅ Fração Grossa	R= 0.96101285 R ² = 0.92354570 R ² Ajustado = 0.92060515 Erro Padrão da Estimativa: 1.0341			
	N=28	b	Erro Padrão de b	p-valor
	Intercepto	1.049092	0.541897	0.063815
	P ₂ O ₅ ROM	1.181317	0.066658	0.000000
Rendimento Mássico Total	R= 0.99585779 R ² = 0.99173274 R ² Ajustado = 0.99007929 Erro Padrão da Estimativa: 0.87370			
	N=7	b	Erro Padrão de b	p-valor
	Intercepto	-10.80189	1.003169	0.000120
	P ₂ O ₅ ROM	2.95529	0.120670	0.000002

Todos os coeficientes de correlação (R, tabela 4.34) obtidos foram maiores que 0.96 e indicam, portanto, elevada correlação entre as variáveis dependentes e os valores estimados pelos modelos de regressão.

Os coeficientes de determinação (R², tabela 4.34) obtidos nos modelos de regressão linear simples para P₂O₅ da fração grossa e rendimento mássico, equivalentes a 0.92 e 0.99, respectivamente, indicam modelos bem ajustados.

Os coeficientes de determinação ajustados (R^2 ajustados) obtidos nos modelos de regressão linear múltipla (P_2O_5 do *overflow* e P_2O_5 do produto não magnético) estão acima de 0.96 e indicam, da mesma forma que R^2 para os modelos de regressão simples, que os modelos de regressão múltipla estão bem ajustados.

Os gráficos de valores preditos *versus* observados dos modelos de regressão linear para o grupo APC_I=3 (figura 4.34) refletem os coeficientes de correlação (R) obtidos em cada modelo.

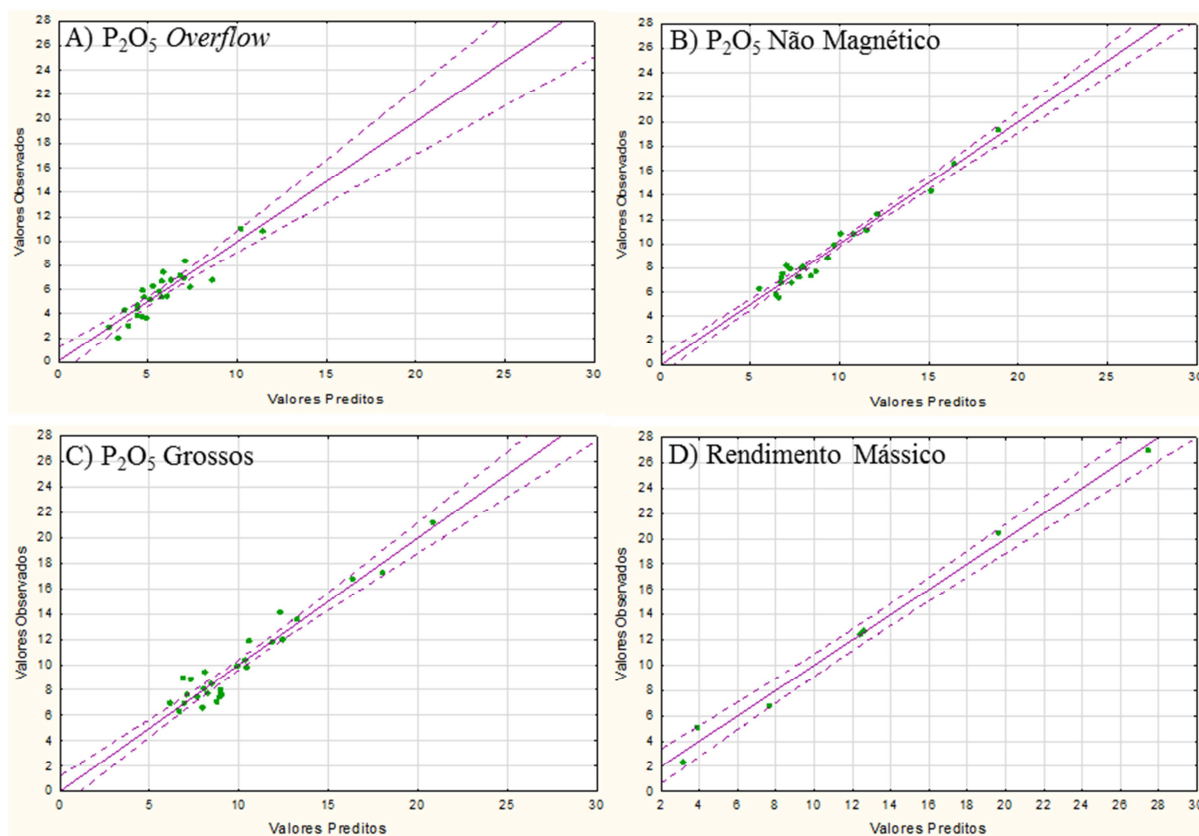


Figura 4.34: Valores preditos pelo modelo de regressão linear versus valores observados para o grupo APC_I=3 (RA). Linhas roxas pontilhadas: intervalo de confiança de 95%.

A ausência de correlação entre os valores preditos e os resíduos do modelo confirma a hipótese de homoscedasticidade dos dados (figura 4.35). No entanto, assim como observado nos demais grupo APC com número de amostras inferior a 20, os resíduos não aparentam possuir uma distribuição normal (figura 4.36). A hipótese de normalidade dos resíduos foi confirmada com o teste de hipóteses Kolmogorov-Smirnov (p-valores dos testes > 0.05, tabela 4.35).

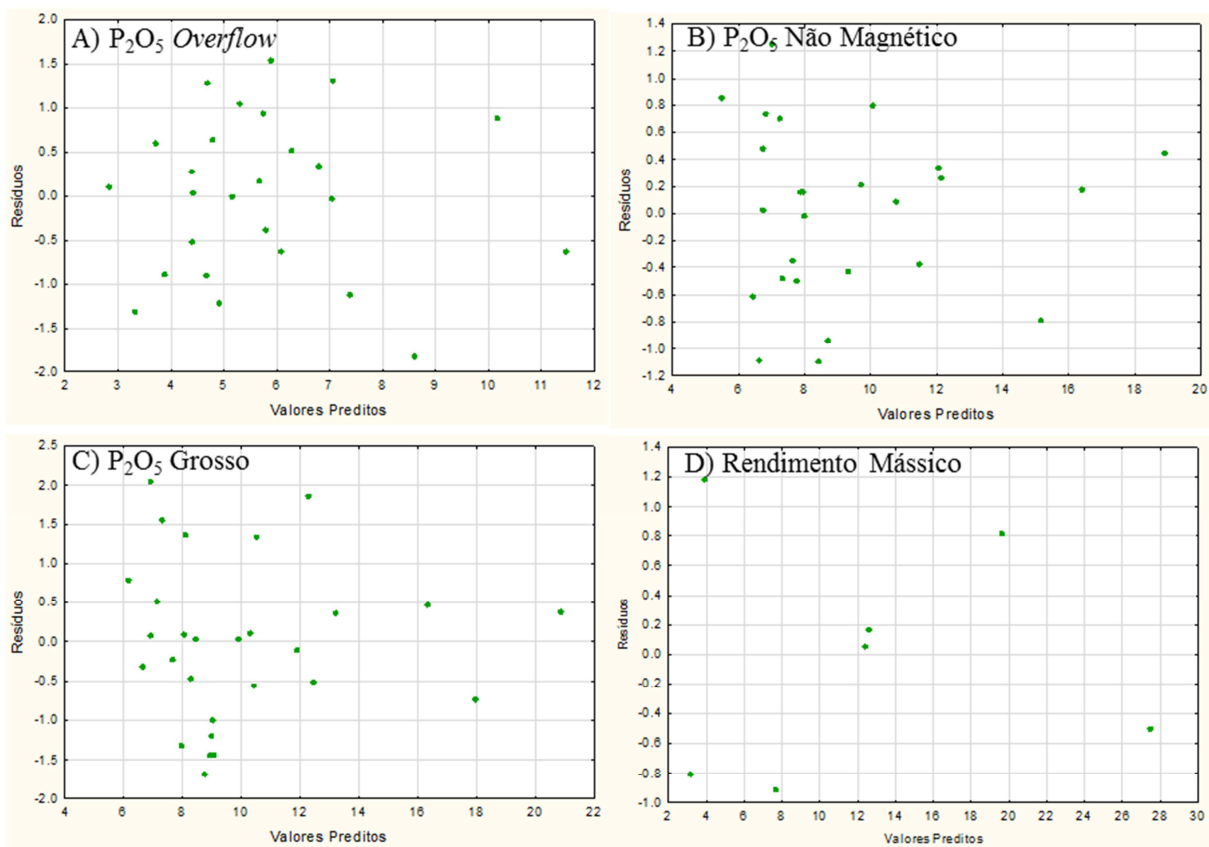


Figura 4.35: Valores preditos pelo modelo de regressão linear versus resíduos para o grupo APC_I=3 (RA).

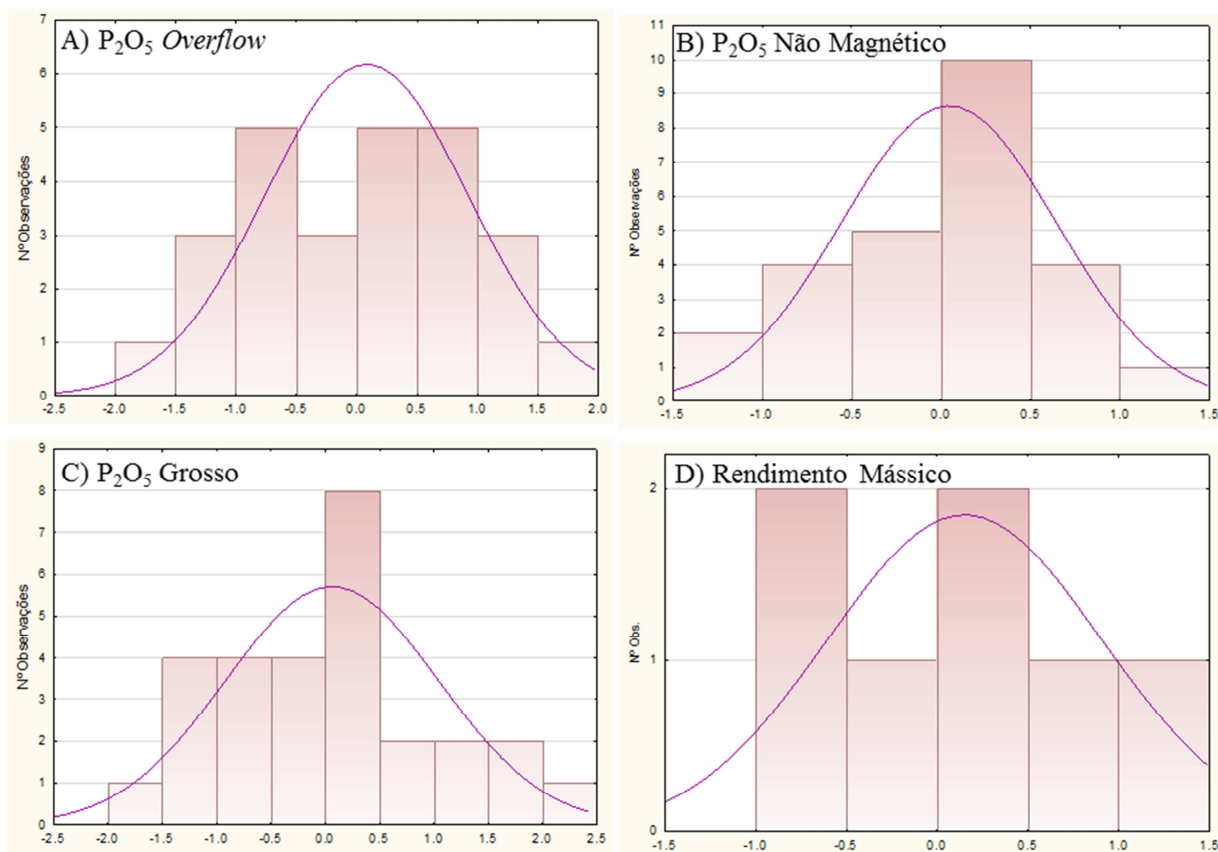


Figura 4.36: Teste de normalidade para os resíduos dos modelos de regressão linear do grupo APC_I=3 (RA). Linha roxa: distribuição normal.

Tabela 4.35: Resultados do teste de hipóteses Kolmogorov-Smirnov para os resíduos dos modelos de regressão linear do grupo APC_I=3 (RA).

	K-S d	K-S p-valor
Normal - P ₂ O ₅ <i>Overflow</i>	0.116864	0.764279
Normal - P ₂ O ₅ Não Mag	0.118446	0.750206
Normal - P ₂ O ₅ Grossos	0.119736	0.704117
Normal -Rendimento Mássico	0.157724	0.908550

4.4. MODELO GEOMETALÚRGICO 3D

Os modelos estatísticos de predição de variáveis geometalúrgicas, apresentados no item 4.3, podem ser aplicados a bases de dados que possuam os teores dos óxidos utilizados como variáveis independentes. Ao aplicar os modelos utilizando-se os teores de ROM de uma determinada amostra, por exemplo, obtêm-se os valores preditos das variáveis dependentes para aquela amostra. Com essa técnica, torna-se possível otimizar a demanda de ensaios tecnológicos, selecionando-se para testes de caracterização apenas amostras provenientes de regiões cujo comportamento geometalúrgico seja mais variável, e diminuir a quantidade de ensaios tecnológicos em regiões cujas predições indicam comportamentos geometalúrgicos mais homogêneos.

A aplicação de modelos geometalúrgicos estatísticos pode também ser feita em modelos de blocos, produzindo-se modelos geometalúrgicos tridimensionais. Os modelos estatísticos construídos na presente pesquisa foram aplicados ao modelo de blocos da mina do Barreiro, com objetivo de ilustrar a geração de um modelo geometalúrgico tridimensional.

O modelo de blocos da mina do Barreiro é formado por blocos com dimensão de 25x25x10 m que contêm, por sua vez, os valores estimados por krigagem ordinária das variáveis independentes utilizadas nos modelos estatísticos. Porém, o referido modelo de blocos não foi produzido nesta pesquisa, de forma que não possui carimbo dos protolitos nem dos horizontes de intemperismo estudados.

Uma vez que os modelos estatísticos foram elaborados por grupo APC, a aplicação desses modelos necessita ser feita por grupo APC que só ocorre, por sua vez, se os blocos possuírem carimbos de protolito e de horizonte de intemperismo. O método utilizado nesta pesquisa para inferência do protolito e do horizonte de intemperismo por bloco a partir dos teores químicos do ROM foi calcular os fatores 1 e 2 de cada bloco através de análise por principais componentes, considerando-se as mesmas variáveis utilizadas para cálculo dos referidos fatores na segunda análise (MgO, SiO₂, P₂O₅ e Al₂O₃, item 4.3.1.3), obter as coordenadas de cada bloco no plano fator 1 *versus* fator 2 (figura 4.37), identificar a qual grupo de protolito e horizonte intempérico cada bloco pertence, carimbar os atributos obtidos por bloco e, por fim, aplicar os modelos estatísticos por grupo APC, gerando-se um modelo geometalúrgico tridimensional.

A partir da figura 4.37 foram extraídos os limites de cada macrogrupo de protolito e horizonte de intemperismo no plano do fator 1 *versus* fator 2. Os limites dos grupos APC_I foram facilmente identificados a partir das variações do fator 2, por situarem-se paralelamente ao eixo das abcissas. Por outro lado, os limites dos grupos APC_P foram identificados tanto pelas variações do fator 1 quanto pela função linear entre fator 1 e fator 2, uma vez que seus limites interceptam

obliquamente o eixo das abcissas. A reta destacada em vermelho na figura 4.37 é definida por $y=1.09x+6$. A partir dessa reta, definiu-se que o fator 2 maior que $1.09*F1 + 6$ identifica o grupo APC_P=2. De forma análoga, fator 2 menor que $1.09*F1 + 6$ associado a um fator 1 <7 identifica o campo do grupo APC_P=1. Por fim, fator 1 maior que 7 identifica o grupo APC_P=3 (tabela 4.36).

Devido à maior simplicidade em se obter os grupos APC_I no plano do fator 1 *versus* fator 2, optou-se por carimbar nos blocos os atributos de intemperismo, e aplicar os modelos estatísticos obtidos para APC_I.

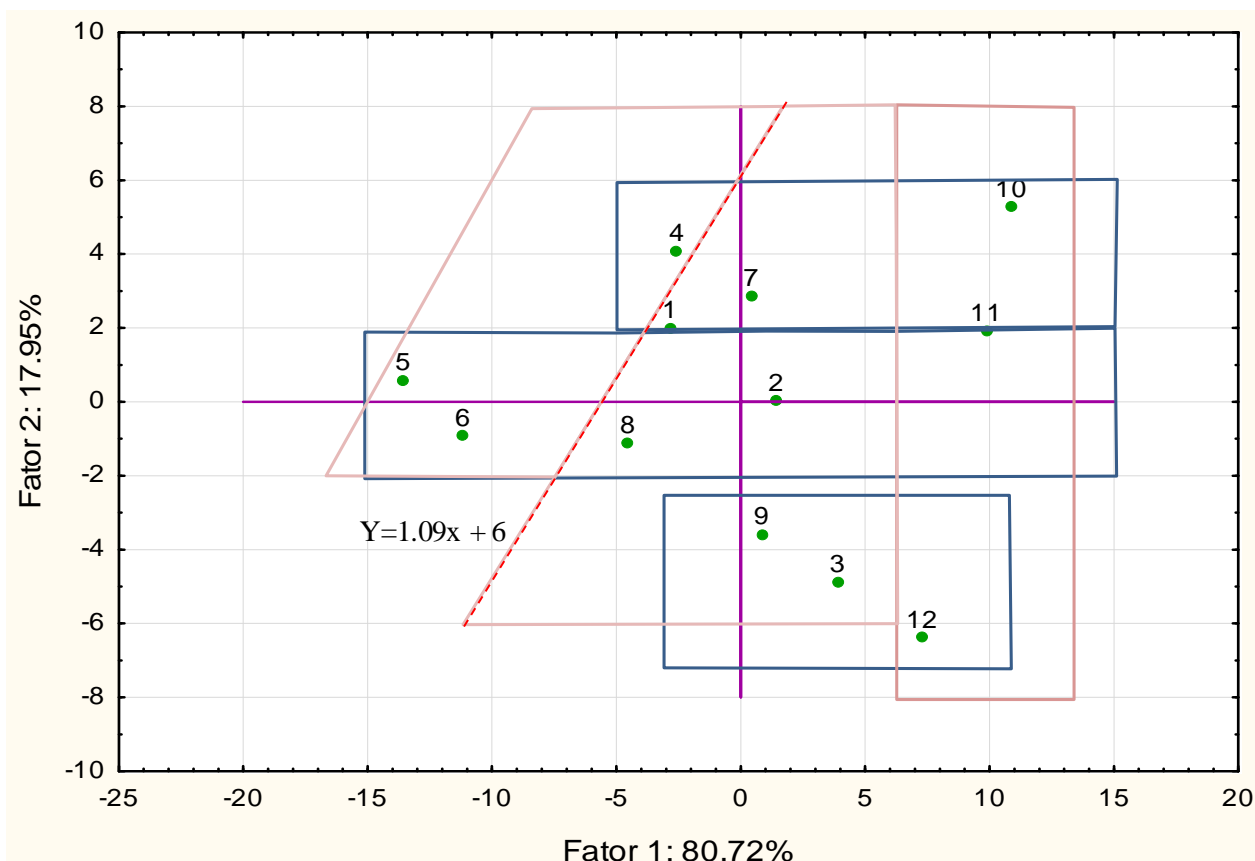


Figura 4.37: Projeção dos grupos M_I no plano fator 1 versus fator 2 utilizado para carimbar dos atributos de protolito e horizonte de intemperismo no modelo de blocos. A reta vermelha indica o limite aplicado para separação de APC_P=1 e APC_P=2.

Tabela 4.36: Características dos grupos APC e limites dos campos no plano fator 1 *versus* fator 2.

GEOLOGIA	GRUPO APC	PROTOLITO	HORIZONTE DE INTEMPERISMO	GRUPO M_I	CAMPO FATOR 1 x FATOR 2
PROTOLITO	APC_P=1	BEB/DC; BEB/CC	-	1, 2, 3, 7, 8, 9	$F2 < 1.09*F1 + 6$ e $F1 < 7$
	APC_P=2	ANF BEB/CC	-	4,5,6	$F2 > 1.09*F1 + 6$
	APC_P=3	FCR/DC	-	10,11,12	$F1 > 7$
INTEMPERISMO	APC_I=1	-	MT	1,4,7,10	$2 \leq F2 < 6$
	APC_I=2	-	MB	2,5,6,8,11	$-3 \leq F2 < 2$
	APC_I=3	-	RA	3,9,12	$-7 \leq F2 < -3$

Os autovalores obtidos pela análise do modelo de blocos da mina do Barreiro por principais componentes estão apresentados na tabela 4.37. De forma similar aos autovalores obtidos na segunda análise (tabela 4.16), as duas primeiras componentes explicam a maior parte da variabilidade dos dados. PC1 explica 84.64% de toda a variabilidade. Junto com PC2, explica 95.26% do total de variabilidade, característica que permite a utilização de ambos para representar as variações geológicas do modelo de blocos da mina do Barreiro.

Tabela 4.37: Autovalores obtidos pela análise do modelo de blocos da mina do Barreiro por principais componentes.

PC	Autovalor	Total (%)	Autovalor Acumulado	Autovalor Acumulado
1	108.0195	84.64122	108.0195	84.6412
2	13.5539	10.62045	121.5734	95.2617
3	5.3662	4.20481	126.9396	99.4665
4	0.6809	0.53352	127.6205	100.0000

As correlações obtidas entre as principais componentes e as variáveis utilizadas na análise do modelo de blocos são similares às observadas na segunda análise (item 4.3.1.3): PC1 apresenta alta correlação negativa com SiO₂, e PC2, alta correlação negativa com MgO e positiva com P₂O₅. De forma análoga ao observado na segunda análise, SiO₂ contribuiu em 98% na construção de PC1, enquanto MgO e P₂O₅ contribuíram com pesos similares à construção de PC2 (tabela 4.38). Tais características comprovam que a PC1 gerada na análise do modelo de blocos é, assim como a PC1 gerada na segunda análise, um indicador de protolitos, e PC2, de horizontes intempéricos, de forma que podem ser aplicados para inferência desses atributos nos blocos do modelo.

O campo *Grupo APC_I* foi criado no modelo de blocos, e cada bloco recebeu o atributo APC_I=1, APC_I=2 ou APC_I=3, de acordo com sua posição no plano fator 1 *versus* fator 2. A figura 4.38 ilustra o modelo de blocos da mina do Barreiro na cota 1000 m, colorido de acordo com seu respectivo grupo APC_I.

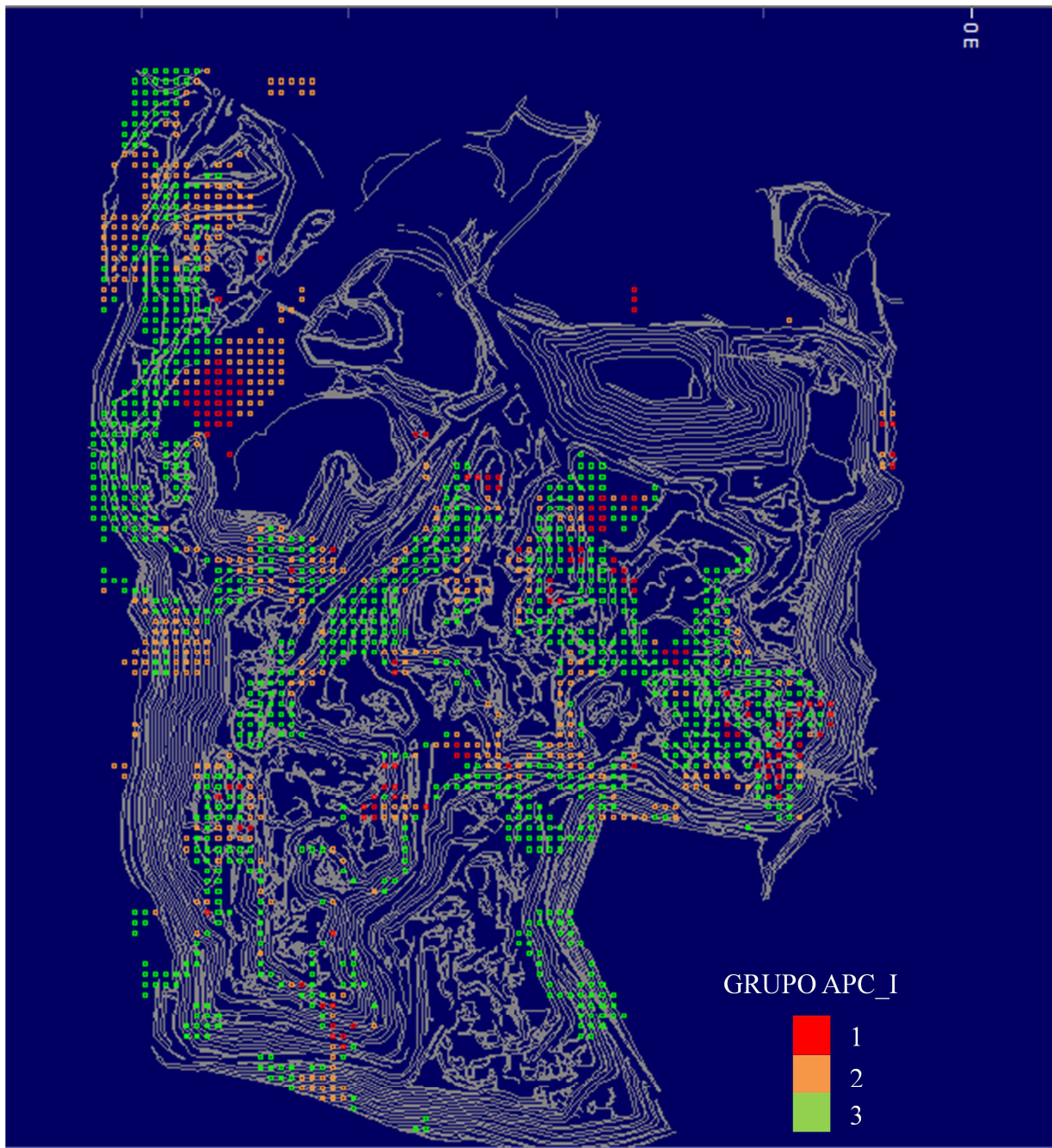


Figura 4.38: Modelo de recursos da mina do Barreiro com carimbo de APC_I. Cota: 1000 m.

O passo seguinte foi criar quatro novos campos no modelo de blocos, correspondentes às quatro variáveis dependentes modeladas estatisticamente. Os modelos estatísticos de cada variável dependente foram, então, inseridos nos blocos por grupo APC_I.

A figura 4.39 ilustra as variações de teores de P_2O_5 do *overflow* da deslamagem. Os menores teores ocorrem na região noroeste do *pit*, que corresponde ao macrogrupo de protólito ANF BEB/CC (figura 2.14), conforme indicado no gráfico da figura 4.3 E. A maior parte dos blocos possui valores intermediários, entre 6 e 9%, parcialmente coincidentes com o predomínio de blocos

APC_I=2 (micáceo de base). Por outro lado, valores acima de 12% são raros, sendo essa uma característica desejada uma vez que o P_2O_5 do *overflow* corresponde a perdas de P_2O_5 no processo de concentração.

Tabela 4.38: Correlações entre principais componentes e variáveis, e contribuição das variáveis obtidas na análise do modelo de blocos por principais componentes, comparativamente aos resultados obtidos pela segunda análise por principais componentes. Em negrito destacam-se os valores de correlação mais próximos de 1 ou -1 e as contribuições mais elevadas.

Base de Dados	Variável	PC1		PC2	
		Correlação	Contribuição (%)	Correlação	Contribuição (%)
Modelo de Blocos	MgO	-0.010451	0.000009	-0.840348	0.487683
	SiO ₂	-0.999337	0.981585	0.031094	0.007573
	P ₂ O ₅	0.385667	0.015159	0.785937	0.501713
	Al ₂ O ₃	-0.569706	0.003246	0.194989	0.003031
2ª análise APC	MgO	0.100290	0.000996	-0.949067	0.400982
	SiO ₂	-0.999482	0.985764	0.030122	0.004026
	P ₂ O ₅	0.289611	0.012467	0.936886	0.586631
	Al ₂ O ₃	-0.419005	0.000773	0.649949	0.008361

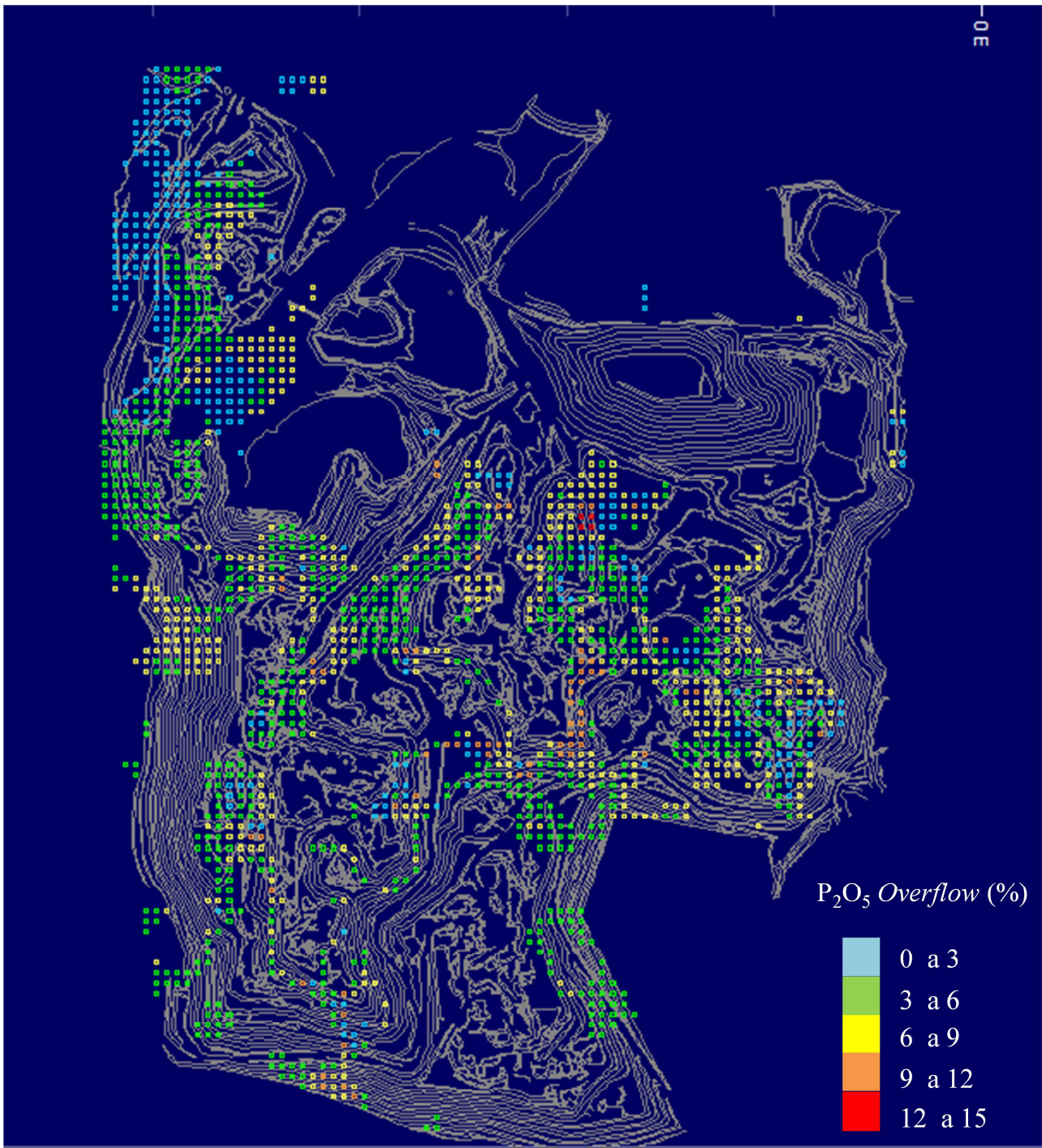


Figura 4.39: Modelo de recursos da mina do Barreiro com valores estimados de P₂O₅ do overflow da deslamagem. Cota: 1000 m.

A figura 4.40 ilustra as variações de teores de P₂O₅ do produto não magnético. O macrogrupo de protolito FCR/DC apresenta valores predominantemente entre 15 e 20%, e a tendência de valores mais elevados nesse macrogrupo comparativamente aos demais já fora evidenciada no gráfico da figura 4.3 J. Valores intermediários predominam no pit, e os menores

valores estão associados, analogamente ao observado para o P_2O_5 do *overflow*, à região noroeste da mina, correspondente ao macrogrupo ANF BEB/CC.

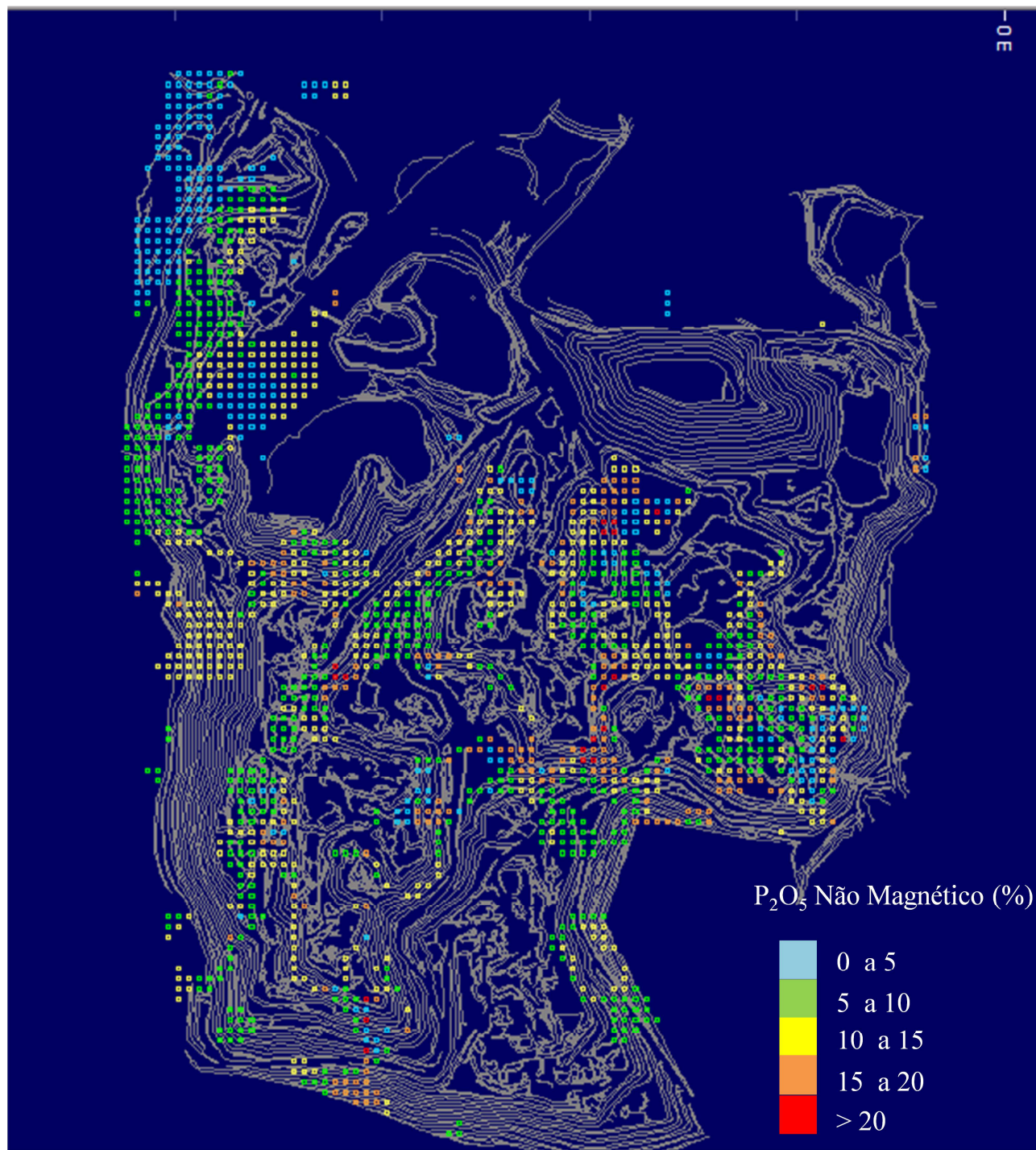


Figura 4.40: Modelo de recursos da mina do Barreiro com valores estimados de P_2O_5 do produto não magnético. Cota: 1000 m.

A variação de teores de P_2O_5 da fração de grossos (figura 4.41) é, de modo esperado, similar à observada dos teores de P_2O_5 do produto não magnético, uma vez que a partição de massa de

grossos proveniente do produto não magnético é cerca de 85%. Esses dois modelos são os que melhor predizem o potencial de recuperação de P_2O_5 na etapa de preparação, já que tanto o produto não magnético quanto a fração de grossos foram submetidos a todas as etapas de preparação e seus respectivos teores de P_2O_5 são os teores recuperados nessa etapa.

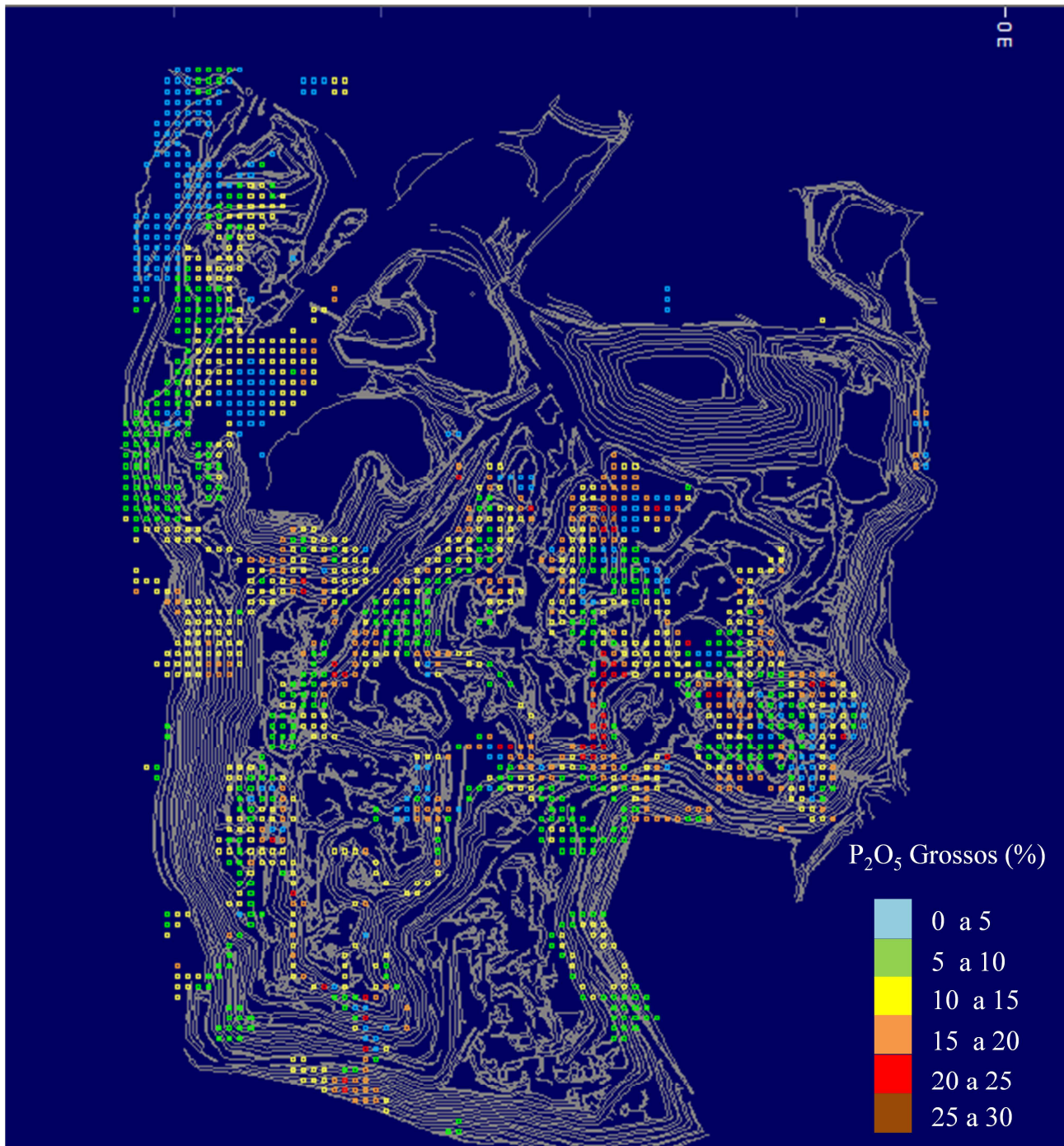


Figura 4.41: Modelo de recursos da mina do Barreiro com valores estimados de P_2O_5 da fração de grossos. Cota: 1000 m.

O rendimento mássico (figura 4.42) é bastante variável e apresenta-se fortemente controlado pelos protolitos: os maiores valores estão associados a FCR/DC, valores intermediários a BEB/DC que decrescem em direção a BEB/CC, e menores valores associados a ANF BEB/CC. Uma vez que os modelos estatísticos para predição de rendimento mássico para os três grupos APC_I possuem apenas P_2O_5 como variável independente, o modelo de rendimento mássico reflete diretamente as variações do conteúdo de P_2O_5 do ROM.

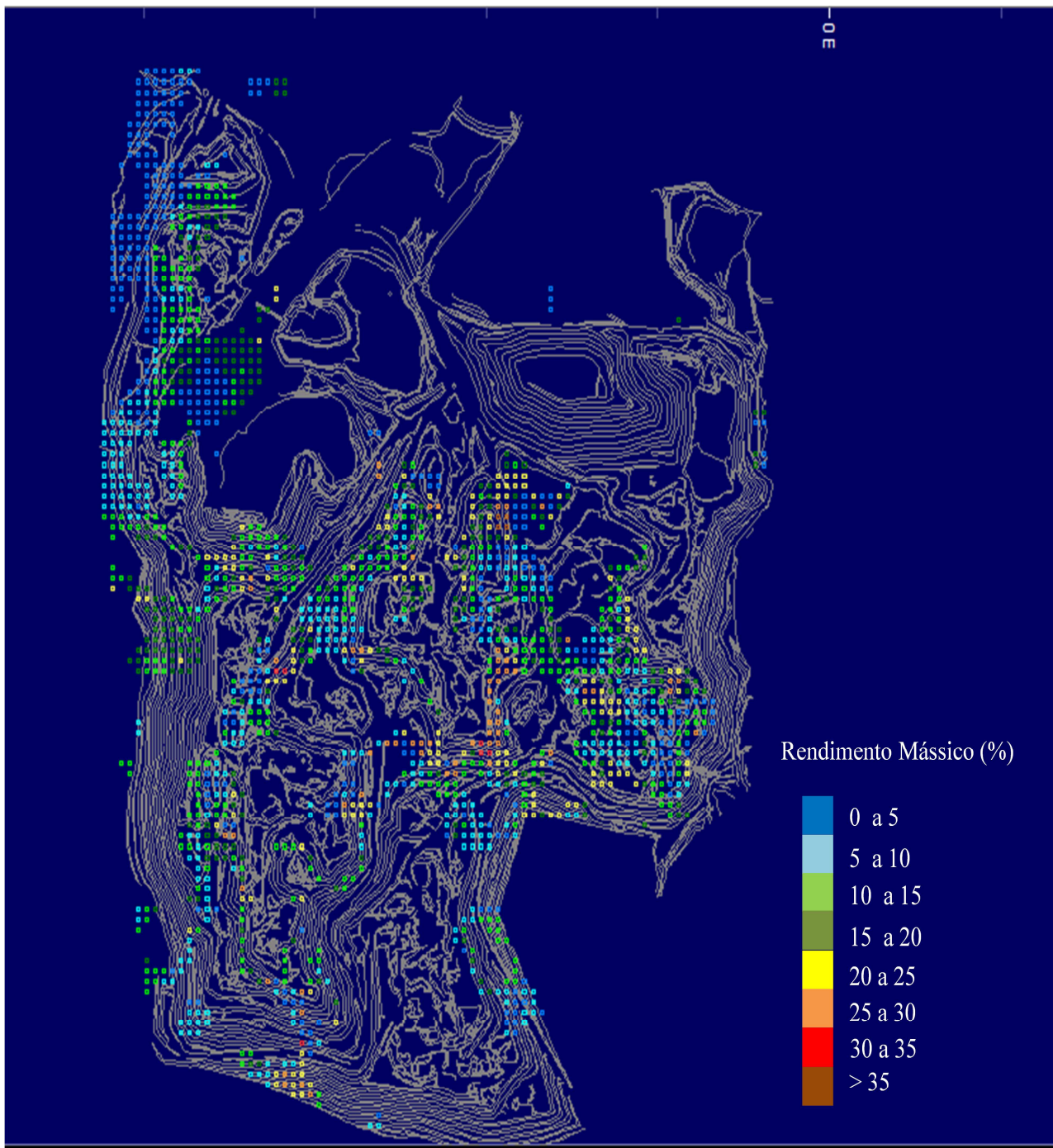


Figura 4.42: Modelo de recursos da mina do Barreiro com valores estimados rendimento mássico. Cota: 1000 m.

O controle intempérico sobre os teores de ROM e consequentemente sobre o rendimento mássico pode ser facilmente observado na porção nordeste da figura, aonde há um predomínio de blocos com valores de rendimento mássico menores que 5%. Apesar de ser uma região correspondente a FCR/DC, os baixos valores estão associados à rocha alterada. Assim como já discutido no item 3.4, os teores de P_2O_5 do ROM em FCR/DC decrescem bruscamente dos horizontes micáceos em direção à rocha alterada, devido ao elevado conteúdo de carbonatos na última. Uma vez que o rendimento mássico é função do P_2O_5 do ROM, a rocha alterada irá apresentar, consequentemente, valores de rendimento mássico tipicamente baixos, conforme apontados também nas figuras 4.12 C e D.

CAPÍTULO V - CONCLUSÕES

5.1. CONCLUSÕES

O depósito de fosfato do Barreiro tem sido lavrado há quatro décadas. A lavra foi naturalmente iniciada com minérios situados nas porções mais rasas do manto de intemperismo, oxidados, com teores de P_2O_5 mais elevados e baixos de contaminantes e conseqüentemente, melhores desempenhos na usina de beneficiamento mineral. Com o aprofundamento da cava, a lavra aproximou-se da rocha fresca, acarretando diminuição de teores, significativas mudanças em suas características físicas e químicas e, conseqüentemente, queda de rendimento mássico, o que gerou impactos significativamente negativos na produção dos concentrados fosfáticos.

Diante de um cenário de exaustão de minério oxidado, tornou-se iminente a necessidade de lavar e beneficiar os minérios situados nos horizontes mais profundos do manto de intemperismo. Esta necessidade, por sua vez, está acompanhada por uma crescente dificuldade em produzir concentrados fosfáticos a partir desses minérios. Desenvolver o conhecimento geológico e geometalúrgico da base do manto de intemperismo tem importantes conseqüências para a vida útil da mina do Barreiro. Os resultados obtidos na presente tese podem, também, dar suporte ao desenvolvimento de processos de minérios menos alterados em outras minas de fosfato ígneo, tais como Catalão I e Tapira.

A abordagem geometalúrgica proposta nesta pesquisa teve como principal objetivo compreender os efeitos da geologia e da mineralogia no desempenho metalúrgico dos minérios da base do manto de intemperismo da mina do Barreiro. A compreensão da variabilidade de parâmetros metalúrgicos a partir de informações de mineralogia, protolitos, teores químicos e horizontes de intemperismo permitiu obter controles geológicos para previsão do comportamento dos distintos tipos de minérios frente ao processo de beneficiamento mineral. Foi claramente identificado que a variação dos protolitos, da mineralogia e das alterações intempéricas dos minérios estudados controlam seus comportamentos metalúrgicos, e a aplicação desse conhecimento é essencial para viabilizar e otimizar a o aproveitamento econômico do depósito.

A compreensão da evolução mineralógica e química da base do manto de intemperismo foi iniciada com o estudo dos protolitos. A mina do Barreiro é formada predominantemente por rochas bebedouríticas, além de carbonatitos e foscoritos em forma de diques encaixados nas demais rochas do complexo. As estreitas relações de contato entre as rochas das distintas séries magmáticas geram associações em campo indissociáveis numa escala de lavra, razão pela qual a caracterização mineralógica foi feita a partir das seguintes associações entre protolitos: bebedouritos/calcita carbonatitos (BEB/CC), anfibólio bebedouritos/calcita carbonatitos (ANF BEB/CC), bebedouritos/dolomita carbonatitos (BEB/DC) e foscoritos/dolomita carbonatitos (FCR/DC), para

cada horizonte da base do manto de intemperismo: micáceo de topo, micáceo de base e rocha alterada.

Uma característica inerente à rocha alterada é a preservação parcial de carbonatos e sulfetos provenientes do protolito; adicionalmente, encontram-se preservadas apatita, flogopita, titanita, magnetita e ilmenita. Uma característica distintiva de rocha alterada proveniente de bebedouritos é a preservação de diopsídio e perovskita, além de anatásio metassomático em BEB/DC. Esses minerais são ausentes do manto de intemperismo produzido a partir de foscoritos, porque não ocorrem nesses protolitos. Por outro lado, tetraferroflogopita é um mineral residual observado apenas em FCR/DC. Richterita é um mineral metassomático abundantemente observado em ANF BEB/CC, e ocorre também nos demais macrogrupos associados a bebedouritos, porém em quantidades menos pronunciadas. Na rocha alterada, minerais de alteração intempélica são reconhecíveis, porém em quantidades pouco significativas, como anatásio, goethita, quartzo, vermiculita, filossilicatos interestratificados, barita e monazita. Os teores químicos observados no horizonte de rocha alterada refletem a mineralogia identificada, sendo elevados os conteúdos de CO_2 , MgO , SiO_2 , e baixos os de P_2O_5 e TiO_2 .

O isalterito micáceo de base não possui carbonatos reconhecíveis em campo ou em amostras macroscópicas. Adicionalmente, perovskita fora completamente convertida em anatásio, e pirita, em goethita, enquanto apatita, flogopita, titanita, richterita, magnetita e ilmenita podem ser identificadas. A assembleia de minerais supergênicos cresce em quantidade e diversidade: além dos minerais já reconhecidos na rocha alterada, passa a apresentar fosfatos aluminosos neoformados. A mudança na assembleia mineralógica da rocha alterada ao micáceo de base está refletida nas características químicas do último horizonte: queda brusca nos conteúdos de CO_2 , queda de MgO , SiO_2 e enriquecimento supergênico de P_2O_5 , TiO_2 e Fe_2O_3 .

O isalterito micáceo de topo possui apatita, magnetita, ilmenita, titanita e richterita como minerais residuais remanescentes do protolito. Diopsídio e flogopita foram completamente lixiviados. A assembleia de minerais supergênicos torna-se mais expressiva. Quimicamente, torna-se ainda mais pobre em MgO e SiO_2 , e rico em P_2O_5 , TiO_2 e Fe_2O_3 . Valores altos de SiO_2 podem, no entanto, estar associados à silicificação secundária. Na base do manto de intemperismo, o horizonte isalterito de topo é o que possui maior enriquecimento supergênico de apatita e alteração dos minerais contaminantes. Contudo, a significativa presença de filossilicatos interestratificados e anfíbólio (este, apenas em protolitos bebedouríticos) é a principal assinatura mineralógica que distingue os horizontes isalteríticos micáceo de topo e oxidado.

Os minérios situados na rocha alterada podem ser facilmente distinguidos de minérios micáceos por seus conteúdos de C. Os minérios micáceos possuem conteúdos médios de 0.4% de C,

e não ultrapassam 0.8%, de forma que o valor de 0.8% pode ser utilizado como um limite químico para identificação desses horizontes intempéricos. Por outro lado, a distinção entre os minérios micáceo de base e micáceo de topo com C é mais difícil de ser feita, devido ao seu baixo conteúdo em ambos. Nesse caso, critérios mineralógicos, tais como predominância de flogopita ou vermiculita nos filossilicatos interestratificados, e diopsídio em protolitos bebedouríticos (presente no micáceo de base e ausente no micáceo de topo) são mais eficientes. A relação $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$, amplamente utilizada em Catalão I (Ribeiro, 2008) para distinção dos horizontes intempéricos, nem sempre auxilia essa distinção em Araxá, devido à predominância de bebedouritos no último. Ou seja, diferentemente de Catalão, aonde a evolução do intemperismo é acompanhada por uma contínua queda na relação $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ devido à dissolução dos carbonatos, em Araxá, relações elevadas podem ser encontradas no horizonte micáceo de base devido à abundância principalmente de diopsídio em protolitos bebedouríticos. A relação $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ poderia ser utilizada localmente para análise do intemperismo em protolitos foscoríticos, mas devido à restrita ocorrência de foscoritos na mina do Barreiro e às blendagens de minérios de distintas frentes de lavra, a utilização localizada desse parâmetro torna-se pouco aplicável.

Os controles primários de mineralização estão associados à natureza protolítica dos protominérios. Os bebedouritos ricos em perovskita formam protominérios de titânio. No entanto, sua presença é restrita no Barreiro e por isso não formam uma mineralização de titânio em larga escala. Os bebedouritos evoluídos, ricos em apatita, são o principal protominério de fosfato no Barreiro. Os foscoritos contribuem, também, à mineralização primária de fosfato. Os nelsonitos com pirocloro formam o protominério de nióbio, enquanto dolomita carbonatitos com pirocloro, norsethita e monazita formam os protominérios de nióbio, barita e terras raras.

O papel do intemperismo nas mineralizações de Araxá foi promover o enriquecimento residual dos minerais de minério no manto de intemperismo.

O comportamento geometalúrgico dos minérios estudados é fortemente dependente de seus respectivos protolitos e horizontes de intemperismo ao qual pertencem. Os resultados obtidos na etapa de preparação das amostras para os testes de flotação já refletem essa dependência como, por exemplo, os teores de P_2O_5 do *overflow* e do *underflow*, que são mais elevados em FCR/DC porque seus teores de ROM tendem a ser superiores aos dos demais macrogrupos de protolitos. No entanto, na rocha alterada, o menor valor de P_2O_5 do *underflow* ocorre com FCR/DC, mantendo a tendência encontrada nos teores de ROM, uma vez que FCR/DC possui teores de P_2O_5 de ROM na rocha alterada bastante baixos, e o enriquecimento nos horizontes superiores é devido à dissolução dos carbonatos que existem em abundância em FCR/DC na rocha alterada.

Os teores de P_2O_5 do *overflow* e do *underflow* também seguem uma tendência quanto ao intemperismo: os valores crescem da rocha alterada em direção ao micáceo e topo, e refletem o comportamento do P_2O_5 no ROM. A massa de produto magnético está controlada predominantemente pelos protolitos, sendo pouco expressiva em ANF BEB/CC e alcançando os maiores valores em FCR/DC. Os teores de P_2O_5 dos produtos magnético, não magnético, fração de grossos e fração de finos estão controlados tanto pelo protolito quanto pelo intemperismo: são maiores em FCR/DC, e tendem a crescer da rocha alterada em direção ao micáceo de topo.

O rendimento mássico na etapa de preparação é maior nas amostras de rocha alterada, e decresce em direção ao micáceo de topo, devido principalmente aos menores conteúdos de lama na rocha alterada. De forma análoga, o valor quase nulo de lama em ANF BEB/CC é a causa principal de seus elevados rendimentos mássicos. A recuperação metalúrgica de P_2O_5 total na preparação está, por sua vez, associada ao rendimento mássico obtido nessa etapa, pois há uma tendência de se recuperar maior conteúdo de P_2O_5 nas amostras com maior massa recuperada.

Os rendimentos mássicos totais dos grossos diminuem em direção à rocha alterada, devido aos seus menores conteúdos de apatita. O rendimento mássico total dos finos apresenta um padrão similar.

A recuperação metalúrgica de P_2O_5 na flotação de grossos e de finos diminui, de forma geral, em direção à rocha alterada. Dado que a apatita da rocha alterada possui menor quantidade de impregnação por óxidos/hidróxidos de ferro e maior cristalinidade, a rocha alterada deveria apresentar as maiores recuperações de P_2O_5 que as obtidas nos horizontes micáceos. Os resultados obtidos na presente pesquisa sugerem que o processo de concentração dos minérios da base do manto de intemperismo de Araxá necessita de ajustes, de forma a se obter melhores resultados de recuperação metalúrgica de P_2O_5 .

Os teores de contaminantes dos concentrados de grossos e de finos são baixos e contidos nas especificações técnicas da produção de GCA e FCA. Excetuam-se os concentrados de grossos formados a partir de FCR/DC, cujos teores de Fe_2O_3 ultrapassam 4%. No entanto, podem ser corrigidos com uma etapa posterior de separação magnética de alto campo.

Cabe destacar que o aproveitamento industrial dos minérios situados no horizonte de rocha alterada só poderá ser realizado com profundas modificações no circuito da usina, devido principalmente à necessidade de flotação prévia de carbonatos.

O comportamento geometalúrgico, uma vez considerado no planejamento de lavra, subsidia a área de engenharia de processos na busca de melhorias ou adequações operacionais e de processo para obtenção de melhores rendimentos mássicos e recuperações metalúrgicas de P_2O_5 . O método

apresentado na presente pesquisa para predição de variáveis geometalúrgicas considerou análises estatísticas multivariadas por principais componentes e modelos estatísticos de regressão linear.

A análise por principais componentes demonstrou que a distinção entre os grupos de protolitos e os horizontes de intemperismo pode ser feita a partir das relações multivariadas entre MgO, SiO₂, P₂O₅ e Al₂O₃. A característica multivariada associada a teores de óxidos do ROM simplifica a aplicação do conhecimento geometalúrgico obtido nesta pesquisa, uma vez que bases de dados formadas por teores de óxidos são frequentes e fáceis de serem geradas na mineração, em comparação com bases de dados mais robustas formadas por resultados mineralógicos e tecnológicos.

Os modelos geometalúrgicos estatísticos foram elaborados para predição P₂O₅ do *overflow*, P₂O₅ do produto não magnético, P₂O₅ de grossos e rendimento mássico. Tais variáveis geometalúrgicas foram selecionadas com objetivo de prever perdas de P₂O₅ no processo e necessidades de ajustes operacionais nos circuitos da usina em busca de otimizar a recuperação metalúrgica de P₂O₅, assim como prever a produção da usina de beneficiamento.

Uma vez aplicadas em modelos tridimensionais, as variáveis geometalúrgicas e suas variações tornam-se espacialmente definidas e podem ser utilizadas em sequenciamentos de lavra, para obtenção de resultados que melhor se adequem aos planos de lavra e de produção de concentrados fosfáticos e fertilizantes.

Os resultados obtidos na presente pesquisa subsidiam os atuais estudos de desenvolvimento de processo para a viabilização econômica da lavra e do beneficiamento dos minérios situados na base do manto de intemperismo. O caráter promissor dos referidos resultados, por sua vez, deve-se à identificação dos controles geológicos, mineralógicos e químicos na distinção dos diversos tipos de minérios da base do manto de intemperismo e à idealização de uma metodologia prática, de caráter estatístico multivariado, para inserção dos resultados geometalúrgicos em modelos de blocos tridimensionais que contenham apenas os teores dos principais óxidos analisados no depósito.

Finalmente, enfatiza-se que os estudos de geologia e geometalurgia dos minérios de fosfato na base do manto de intemperismo do complexo de Araxá visam dar subsídios para torná-los economicamente viáveis, contribuindo com o país à busca de novas fontes de fósforo para as gerações futuras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcover Neto, A., Toledo, M.C.M. 1993. Evolução supérgena do carbonatito de Juquiá (SP). *Revista do Instituto de Geociências, São Paulo* 14 (1): 31-43.
- Antonini, P., Comin-Chiraramonti, P., Gomes, C.B., Censi, P., Riffel, B.F., Yamamoto, E. 2003. The early proterozoic carbonatite complex of Angico dos Dias, Bahia state, Brazil: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence for an enriched mantle origin. *Mineralogical Magazine* 67 (5): 1039-1057.
- Annual Report Anglo American. 2013. Focused on delivery. London, 260p.
- Araújo, D.P. 1996. Metassomatismo no complexo carbonatítico Catalão I: implicações para a composição do magma carbonatítico e para o metassomatismo carbonatítico no manto superior. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, Brasil.
- Azzone, R.G., Ruberti, E. 2010. Evolução composicional dos filossilicatos no perfil intempérico do complexo ultramáfico alcalino-carbonatítico de Catalão I (GO). *Revista do Instituto de Geociências – USP. Série Científica* 10 (2): 23-43.
- Barbosa, E. S. R., Brod, J. A., Junqueira-Brod, T. C., Cordeiro, P. F. O., Santos, R. V., and Dantas, E. L., 2012b. Mineralogy and Petrology of the Salitre I phoscorite-carbonatite-alkaline complex, Brazil. 10th International Kimberlite Conference, Bangalore, Extend Abstracts.
- Barbosa, E. S. R., Brod, J. A., Junqueira-Brod, T. C., Cordeiro, P. F. O., Santos, R. V., and Dantas, E. L., 2012c. Phoscorites from the Salitre alkaline complex, Brazil: origin and petrogenetic implications. 10th International Kimberlite Conference, Bangalore, Extend Abstracts.
- Barbosa, E.S.R., Brod, J.A., Junqueira-Brod, T.C., Dantas, E.L., Cordeiro, P.F.O., Gomide, C.S. 2012a. Bebedourite from its type area (Salitre I complex): A key petrogenetic series in the Late-Cretaceous Alto Paranaíba kamafugite–carbonatite–phoscorite association, central Brazil. *Lithos* 144/145: 56-72.
- Barros, L.A.F. 1997. Flotação da apatita da jazida de Tapira, MG. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Brasil.
- Barros, L.A.F. 2005. Caracterização tecnológica de minério fosfático de Salitre, Patrocínio, Minas Gerais. Tese de Doutorado, Universidade de Minas Gerais, Brasil.
- Beccaluva, L., Barbieri, M., Born, H., Brotzu, P., Coltorti, M., Conte, A., Garbarino, C., Gomes, C.B., Macciotta, G., Morbidelli, L., Ruberti, E., Siena, F., Traversa, G. 1992. Fractional crystallization and liquid immiscibility processes in the alkaline-carbonatite complex of Juquia (São Paulo, Brazil). *Journal of Petrology* 33: 1371-1404.
- Beniscelli, J. 2011. Geometallurgy – Fifteen years of developments in Codelco: Pedro Carrasco contributions. The first AUSIMM International Geometallurgy Conference, Brisbane. Proceedings: 3-7.

- Born, H. 1989. The Ipanema phosphate deposit, São Paulo, Brazil. In: A.J.G. Notholt., R.P. Sheldon., D.F. Davidson. Ed., Phosphate deposits of the world (2): Phosphate rock resources. Cambridge, Cambridge University Press, 116-119.
- Braga, J.R.K., Born, H. 1988. Características geológicas e mineralógicas da mineralização apatítica de Araxá. 35º Congresso Brasileiro de Geologia, Pará. Anais 1: 219-226.
- Braga, S.A., Tavares, S.T.P., Saito, M.M. 2010. Reavaliação de recursos de minério de fosfato da mina do Barreiro com a incorporação dos novos dados de sondagem. Relatório interno Vale Fertilizantes, Araxá, 55p.
- Brod, J.A., Gaspar, J.C., Araújo, D.P., Gibson, S.A., Thompson, R.N., Junqueira-Brod, T.C. 2001. Phlogopite and tetra-ferriphlogopite from brazilian carbonatite complexes: petrogenetic constraints and implications for mineral-chemistry systematics. *Journal of Asian Earth Sciences* 19: 265-296.
- Brod, J.A., Gibson, S.A., Thompson, R.N., Junqueira-Brod, T.C., Seer, H.J., Moraes, L.C., Boaventura, G.R. 2000. Kamafugite affinity of the Tapira alkaline-carbonatite complex (Minas Gerais, Brazil). *Revista Brasileira de Geociências* 30: 404-408.
- Brod, J.A., Ribeiro, C.C., Gaspar, J.C., Junqueira-Brod, T.C., Barbosa, E.S.R., Riffel, B.F., Silva, J.F., Chaban, N., Ferrarri, A.J.D. 2004. Geologia e Mineralizações dos Complexos Alcalino-Carbonatíticos da Província Ígnea do Alto Paranaíba. In: 42º Congresso Brasileiro de Geologia, Araxá, Minas Gerais, Excursão 1: 1-29 (CD-ROM).
- Brod, J.A. 1999. Petrology and geochemistry of the Tapira alkaline complex, Minas Gerais State, Brazil. PhD Thesis, University of Durham, UK.
- Bye, A.R. 2011. Case studies demonstrating value from geometallurgy initiatives. The first AUSIMM International Geometallurgy Conference, Brisbane. Proceedings: 9-30.
- Carrasco, P., Cáceres, A., Riquelme, R., Emery, Xavier. 2014. A review of metallurgical recovery estimation practices in the mining industry. 2º International Seminar on Geometallurgy, Chile. Proceedings: Chapter 5.
- Chakhmouradian, A.R., Mitchell, R.H. 2000. Occurrence, alteration patterns and compositional variation of perovskite in kimberlites. *Canadian Mineralogist* 38: 975-994.
- Chaves, A.P. 2010. Rotas tecnológicas convencionais e alternativas para a obtenção de fertilizantes. In: *Agrominerais para o Brasil*. CETEM, Rio de Janeiro, 45-60.
- Comin-Chiaramonti, P., Gomes, C.B., Castorina, F., Censi, P., Antonini, P., Furtado, S., Ruberti, E., Scheibe, L.F. 2002. Geochemistry and geodynamic implications of the Anitápolis and Lages alkaline – carbonatites complexes, Santa Catarina state, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências* 32 (1): 43-58.
- Comin-Chiaramonti, P., Gomes, C.B., Cundari, A., Castorina, F., Censi, P. 2007. A review of carbonatitic magmatism in the Paraná-Angola-Namíbia (PAN) system. *Periodico di Mineralogia* 76:2-3, 25-78.

- Cordeiro, P.F.O., Brod, J.A., Dantas, E.L., Barbosa, E.S.R., 2010. Mineral chemistry, isotope geochemistry and petrogenesis of niobium-rich rocks from the Catalão I carbonatite-phoscorite complex, Central Brazil. *Lithos* 118: 223-237.
- Cordeiro, P.F.O., Brod, J.A., Palmieri, M., Oliveira, C.G., Barbosa, E.S.R., Santos, R.V., Gaspar, J.C., Assis, L.C. 2011b. The Catalão I niobium deposit, central Brazil: resources, geology and pyrochlore chemistry. *Ore Geology Reviews* 41: 112-121.
- Cordeiro, P.F.O., Brod, J.A., Santos, R.V., Dantas, E.L., Oliveira, C.G., Barbosa, E.S.R. 2011a. Stable (C, O) and radiogenic (Sr, Nd) isotopes of carbonates as indicators of magmatic and post-magmatic processes of phoscorite-series rocks and carbonatites from Catalão I, central Brazil. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 161: 451-464.
- Costa, M.L., Fonseca, L.R., Angélica, R.S., Lemos, V.P., Lemos, R.L. 1991. Geochemical exploration of the Maicuru alkaline-ultramafic-carbonatite complex, northern Brazil. *Journal of Geochemical Exploration* 40: 193-204.
- Descritivos de Processos - Complexo Mineraloquímico de Araxá. 2011. Relatório interno Vale Fertilizantes, Araxá, 73p.
- Dias, V.P., Fernandes, E. 2006. Fertilizantes: uma visão global sintética. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro 24: 97-138.
- Dunham, S., Vann, J. 2007. Geometallurgy, geostatistics and Project value – does your block model tell you what you need to know? Project Evaluation Conference. Melbourne.
- Fava N. 2001. O manto de intemperismo e a química do pirocloro de Catalão I: um estudo preliminar. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasil.
- Fernandes, F.G. 2013. Estudo do melhor método de extrapolação de regressão múltipla para construção do modelo geometalúrgico de uma mina de fosfato brasileira. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil.
- Ferrari, V.C., Toledo, M.C.M., Santos, C.N., Kahn, H. 2001. Aspectos cristaloquímicos, mineralógicos e tecnológicos da apatita de Tapira (MG). *Geochimica Brasiliensis* 15 (1/2): 93-112.
- Ferrari, V.C. 2000. Fosfatos primários e secundários nos perfis de intemperismo sobre os maciços alcalino-carbonatíticos de Juquiá (SP), Anitápolis (SC) e Tapira (MG). Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Brasil.
- Ferreira, E., Avelar, A., Fonseca, E., Grasso, C.B., Barros, L.A.F. 2014. Relatório de consolidação dos estudos de desenvolvimento de rota de processo para o minério com alto conteúdo de carbonato. Relatório Interno Vale, Santa Luzia, 87p.
- Ferreira, E., Tavares, A.C., Cantuário, L.L., Avelar, A., Fonseca, E., Grasso, C.B., Alves, A.D., Alves, V. 2013. Relatório consolidado de desenvolvimento de processo e mapeamento geometalúrgico (fase I) do minério sílico carbonatado de Araxá. Relatório interno Vale, Santa Luzia, 138p.

- Filho, A., Riffel, B. F., and Sousa, C. A. F., 2005. Some aspects of the mineralogy of CBMM niobium deposit and mining and pyrochlore ore processing, Araxá, MG, Brazil. Companhia Brasileira de Mineração e Metalurgia, Araxá, 12p.
- Filho, O.M., Moraes, L.C. 2001. Síntese dos jazimentos, áreas potenciais e mercados de insumos minerais para agricultura no estado da Bahia. Série insumos minerais para a agricultura - -11. CPRM, Salvador, 26p.
- Florêncio, R.V.S., Toledo, M.C.M. 1997. Estudo da alteração intempérica sobre rochas ricas em apatita no maciço alcalino carbonatítico de Ipanema, SP. *Geochimica Brasiliensis* 11(3): 261-284.
- Gaspar, J.C., Conceição e Silva, A.J.G., Araújo, D.P. 1994. Composition of priderite in phlogopitites from the Catalão I carbonatite complex, Brazil. *Mineralogical Magazine* 58: 409-415.
- Gaspar, J.C., Wyllie, P.J. 1983a. Magnetite in the carbonatites from the Jacupiranga Complex, Brazil. *American Mineralogist* 68:195-213.
- Gaspar, J.C., Wyllie, P.J. 1983b. Ilmenite (high Mg, Mn, Nb) in the carbonatites from the Jacupiranga Complex, Brazil. *American Mineralogist* 68:960-971.
- Gaspar, J.C. 1989. *Geologie et mineralogie du complexe carbonatitique de Jacupiranga, Bresil. Tese de Doutorado, Universite D'Orleans, França.*
- Gibson, S.A., Thompson, R.N., Dickin, A.P., Leonardos, O.H. 1995b. High-Ti and low-Ti mafic potassic magmas: key to plume-lithosphere interactions and continental flood-basalt genesis. *Earth and Planetary Science Letters* 136: 149-165.
- Gibson, S.A., Thompson, R.N., Leonardos, O.H., Dickin, A.P., Mitchell, J.G. 1995a. The Late Cretaceous impact of the Trindade mantle plume – evidence from large-volume, mafic, potassic magmatism in SE Brazil. *Journal of Petrology* 36: 189-229.
- Gomes, C.B., Comin-Chiaramonti, P. 2005. Some notes on the Alto Paranaíba Igneous Province. In: P. Comin-Chiaramonti, C.B. Gomes (Editors), *Mesozoic to Cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian Platform*. EDUSP/FAPESP, São Paulo, Brazil, pp. 317-340.
- Gomes, C.B., Ruberti, E., Morbideli, L. 1990. Carbonatite complexes from Brazil: a review. *Journal of South American Earth Sciences* 3: 51-63.
- Grasso, C.B., Brod. J.A. 2009. As séries bebedourítica, carbonatítica e foscorítica no complexo de Serra Negra, MG. XI Simpósio de Geologia do Centro Oeste. Cuiabá, Brasil (CD-ROM).
- Grasso, C.B., Ribeiro, C.C., Brod, J. A., Gaspar, J.C. 2006. Mapeamento Geológico de detalhe (1:2000) das frentes de lavra da mina da Fosfertil Fertilizantes Fosfatados S.A. 43º Congresso Brasileiro de Geologia, Aracaju (CD-ROM).
- Grasso, C.B. 2010. *Petrologia do complexo alcalino-carbonatítico de Serra Negra. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasil.*

- Grossi Sad, J. H., Torres, N. 1976, Geology and mineral resources of the Barreiro complex, Araxá, Minas Gerais. International Symposium on Carbonatites, Poços de Caldas. Anais: 307-312.
- Hair, J.F., Anderson, R.E., Tatham, R.L., Black, W.C. 2005. Análise multivariada de dados. Artmed Ed. São Paulo. pp.131-204.
- Hall, A. 1996. Igneous Petrology. Prentice Hall, pp. 220-286.
- Imbernon R.A.L., Oliveira S.M.B., Figueiredo A.M. 1994. Concentração dos ETR nos produtos de alteração intempérica do complexo alcalino-carbonatítico de Catalão I, GO. Boletim de Geociências do Centro-Oeste, 17: 25-28.
- Imbernon, R.A.L., 1993. Evolução geoquímica e mineralógica dos produtos de alteração intempérica sobre as rochas do Complexo Alcalino-Carbonatítico de Catalão I, Goiás. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Brasil.
- Issa Filho, A., Lima, P.R.A.S., Souza, O.M. 1984. Aspectos da Geologia do complexo carbonatítico do Barreiro, Araxá, MG, Brasil. In: Complexos carbonatíticos do Brasil: Geologia. Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, Araxá, 21-44.
- Kamitani, M., Hirano, H. 1990. Araxa carbonatite deposit and its lateritization. Bulletin of the Geological Survey of Japan 41 (11): 595-604.
- Kjarsgaard, B.A., Hamilton, D. L. 1989. The genesis of carbonatites by immiscibility. In: K. Bell, Ed., Carbonatites: genesis and evolution. London, Unwin Hyman, 388-404.
- Knight, R., Hoal, K.O., Abraham, A.P.G. 2011. Three-dimensional geometallurgical data integration for predicting concentrate quality and tailings composition in a massive sulfide deposit. The first AUSIMM International Geometallurgy Conference, Brisbane. Proceedings: 227-232.
- Krasnova, N.I., Petrov, T.G., Balaganskaya, E.G., Garcia, D., Moutte, D., Zaitsev, A.N., Wall, F. 2004a. Introduction to phoscorites: occurrence, composition, nomenclature and petrogenesis. In: Wall F and Zaitsev AN (eds) Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: the Key Example of the Kola Alkaline Province, 1st ed. Mineralogical Society Series, London, pp. 45-79.
- Kulaif, Y., Fernandes, F.R.C. 2010. Panorama dos agrominerais no Brasil: atualidade e perspectivas. In: Agrominerais para o Brasil. CETEM, Rio de Janeiro, 1-21.
- Lapin, A.V., W., Ploshko, V.V. 1999. Carbonatitos lineares de cinturões móveis: uma síntese. Revista Brasileira de Geociências 29 (4): 483-490.
- Leal Filho, L.S. 1995. Concentração por flotação. Convênio CVRD/EPUSP, São Paulo.
- Lee, W.J., Wyllie, P.J. 1998b. Processes of crustal carbonatite formation by liquid immiscibility and differentiation elucidated by model systems. Journal of Petrology 39: 2005-2014.
- Le Maitre, R.W., 2002. Igneous Rocks: a Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

- Lemos, R.L., Gaspar, J.C., 1984. Ocorrências de titânio no Complexo Ultramáfico Alcalino de Maracóai no Estado do Pará. 33º Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro-RJ. Anais: 3842 e 3844.
- Lemos, R.L., Gaspar, J.C. 1998. Geologia do complexo ultramáfico-alcalino-carbonatítico de Maicuru, noroeste do estado do Pará. 40º Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte. Anais: 466.
- Lemos, R.L., Gaspar, J.C. 2002a. Inversão na ordem de cristalização dos minerais, em Maicuru. 41º Congresso Brasileiro de Geologia, João Pessoa. Anais: 538.
- Lemos, R.L., Gaspar, J.C. 2002b. O magmatismo kamafugítico em Maicuru e seu ambiente tectônico. 41º Congresso Brasileiro de Geologia, João Pessoa. Anais: 539.
- Lemos, R.L., Quadros, M.L.E.S. 1992. Fenitização e contaminação no complexo alcalino-ultramáfico-carbonatítico de Maicuru, noroeste do Pará. 37º Congresso Brasileiro de Geologia, São Paulo. Anais: 96-97.
- Lenharo, S. L.R. 1994. Caracterização mineralógica/tecnológica das apatitas de alguns depósitos brasileiros de fosfatos. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Brasil.
- Lipton, I. 2002. Geology, metallurgy and mining engineering - why we must strengthen the links. Value Tracking Symposium, Brisbane. Conference Proceedings: 35-40.
- Lorenzen, L., Barnard, M.J. 2011. Why is mineralogical data essential for designing a metallurgical test work program for process selection and design? The first AUSIMM International Geometallurgy Conference, Brisbane. Proceedings: 163-172.
- Machado Junior, D.L. 1992. Geologia do complexo alcalino-carbonatítico de Catalão II (GO). 37º Congresso Brasileiro de Geologia, São Paulo. Anais: 94-95.
- Macmillan, E., Ehrig, K., Liebezeit, V., Kittler, P., Lower, C. 2011. Use of geometallurgy to predict tailings leach acid consumption at Olympic Dam. The first AUSIMM International Geometallurgy Conference, Brisbane. Proceedings: 93-102.
- Mariano, A.N., Marchetto, M. 1991. Serra Negra and Salitre – carbonatite alkaline igneous complex. In: O.H. Leonardos, H.O.A. Meyer, J.C. Gaspar (Eds.), 5th International Kimberlite Conference (Field Guide Book). Araxá, CPRM, Special Publication, Brazil 3 (91): 75-79.
- Mariano, A.N. 1989. Nature of economic mineralization in carbonatites and related rocks. In Bell K (ed) Carbonatites – Genesis and evolution, Unwin Hyman, London, pp 149–176.
- Melo, M.T.V. 1997. Depósitos de fosfato, titânio e nióbio de Tapira, Minas Gerais. In: Schobbenhaus Filho, C., Queiroz, E.T., Coelho, C.E.S. (Eds.), Principais depósitos minerais do Brasil. DNPM/CPRM, Brasília, pp. 41-56.
- Moita Neto, J.M. 2004. Estatística multivariada: uma visão didática – metodológica. 11p.

- Morbidelli, L., Gomes, C.B., Beccaluva, L., Brotzu, P., Conte, A.M., Ruberti, E., Traversa, G. 1995. Mineralogical, petrological and geochemical aspects of alkaline and alkaline-carbonatite associations from Brazil. *Earth Sciences Reviews* 39: 135-168.
- Morbidelli L., Gomes C.B., Beccaluva L., Brotzu P., Garbarino C., Riffel B.F., Ruberti E., Traversa G., 1997. Parental magma characterization of Salitre cumulate rocks (Alto Paranaíba Alkaline Province, Brazil) as inferred from mineralogical, petrographic, and geochemical data. *International Geology Review* 39: 723-743.
- Nascimento, A.C. 2014. Complexo de Mineração de Tapira – mapeamento geológico-estrutural das frentes de lavra. Relatório interno Vale Fertilizantes, Tapira, 17p.
- Neumann, R., Costa, G. E. L., Gaspar, J. C., Palmieri, M., Silva, S. E. E. 2011. The mineral phase quantification of vermiculite and interstratified clay minerals-containing ores by X-ray diffraction and Rietveld method after K cation exchange: *Minerals Engineering* 24: 1323-1334.
- Neumann, R., Schneider, C.L., Alcover Neto, A. 2002. Caracterização Tecnológica de Minérios. Tratamento de Minérios. 3ª Edição. CETEM. Rio de Janeiro.
- Neumann, R. 1999. Caracterização tecnológica dos potenciais minérios de terras-raras de Catalão I, GO. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Brasil.
- Newton, M.J., Graham, J.M. 2011. Spatial modelling and optimisation of geometallurgical indices. The first AUSIMM International Geometallurgy Conference, Brisbane. Proceedings: 247-261.
- Ogasawara, E., Kulaif, Y., Fernandes, F.R.C. 2010. A indústria brasileira de fertilizantes (cadeia NPK, enxofre, rocha fosfática e potássio) – projeções de 2010 a 2030. In: *Agrominerais para o Brasil*. CETEM, Rio de Janeiro, 145-168.
- Oliveira, I.W.B., Sachs, L.L.B., Silva, V.A., Batista, I.H., 2004. Folha SE.23-Belo Horizonte. In: C. Schobbenhaus, J.H. Gonçalves, J.O.S. Santos, M.B. Abram, R. Leão Neto, G.M.M. Matos, R.M. Vidotti, M.A.B. Ramos, J.D.A. Jesus (Editors). *Carta geológica do Brasil ao millionésimo: Sistema de Informações Geográficas – SIG e 46 folhas na escala 1: 1.000.000*. Brasília: CPRM. 41 (CD-ROM).
- Oliveira, S.M.B., Imbernon, R.A.L. 1998. Weathering and REE concentration in Catalão I carbonatite complex, central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 11 (4): 379-388.
- Paiva, P.R.P., Monte, M.B.M., Gaspar, J.C. 2011. Concentração por flotação da apatita proveniente de rochas de filiação carbonática. *Revista Escola de Minas* 64 (1): 111-116.
- Paiva, P.R.P. 2011. Propriedades de superfície de apatita proveniente de rochas de filiação carbonatítica e sua concentração por flotação. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Brasil.
- Palmieri, M., Ferrari, A.J.D., Brod, J.A., Barbosa, P.A.R. 2006. Geologia da mina de fosfato da Copebrás no Complexo Foscorítico-Carbonatítico de Catalão I. 43º Congresso Brasileiro de Geologia. Sociedade Brasileira de Geologia, Aracaju (CD-ROM).

- Palmieri, M. 2011. Modelo geológico e avaliação de recursos minerais do depósito de nióbio Morro do Padre, complexo alcalino-carbonatítico de Catalão II, GO. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasil.
- Pereira, V.P., Conceição, R.V., Formoso, M.L.L., Pires, A.C. 2005. Alterations of perovskite to anatase in silica-undersaturated rocks of the Catalão I carbonatite complex, Brazil: a raman study. *Revista Brasileira de Geociências* 35 (2): 239-244.
- Pereira, V. P. 1995. Alteração no maciço alcalino-carbonatítico de Catalão I. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- Relatório Anual Vale. 2014. Comissão de valores mobiliários dos Estados Unidos, Washington, 177p.
- Relatório do teste industrial com o minério micáceo da área prioritária da mina do Barreiro – Araxá. 2015. Relatório Interno Vale, Santa Luzia, 59p.
- Rezende, N.G.A.M. 2001. Insumos minerais para agricultura e áreas potenciais nos estados do Pará e Amapá. Série insumos minerais para a agricultura 10. CPRM, Belém. 50p.
- Ribeiro, C.C., Brod, J. A.; Gaspar, J.C.; Petrinovic, I.A.; Grasso, C.B.; Junqueira-Brod, T.C. 2005c. Textural evidence for liquid immiscibility in the kamafugite-carbonatite association: the alkaline-carbonatite complex of Catalão I, Alto Paranaíba Igneous Province. III Simpósio sobre Vulcanismo e Ambientes Associados, Cabo Frio. Anais: 137-141.
- Ribeiro, C.C., Brod, J.A., Junqueira-Brod, T.C., Gaspar, J.C., Palmieri, M., Cordeiro, P.F.O., Torres, M., Grasso, C.B., Barbosa, E.S., Barbosa, P.A.R., Ferrari, A.J.D., Gomide, C.S. 2014. Potencial e controles metalogenéticos de ETR, Ti e Nb em províncias alcalino-carbonatíticas brasileiras. In: Metalogênese das províncias tectônicas brasileiras. CPRM, Belo Horizonte.
- Ribeiro, C.C., Brod, J.A., Petrinovic, I.A., Gaspar, J.C., Junqueira-Brod, T.C. 2001. Pipes de brechas e atividade magmática explosiva no complexo alcalino-carbonatítico de Catalão I, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências* 31 (4): 417-426.
- Ribeiro, C.C., Gaspar, J.C., Brod, J.A. 2005b. Controle e gênese dos depósitos de monazita no Complexo Carbonatítico de Catalão I. I Simpósio Brasileiro de Metalogenia, Gramado (CD-ROM).
- Ribeiro, C.C. 2008. Geologia, geometalurgia, controles e gênese dos depósitos de fósforo, terras raras e titânio do complexo carbonatítico Catalão I, GO. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasil.
- Rodrigues, A.F.S., Fonseca, D.S., Hilder, M., Parahyba, R.E., Cavalcante, V.M.M. 2010. Agrominerais: recursos e reservas. In: Agrominerais para o Brasil. CETEM, Rio de Janeiro, 23-44.
- Rodrigues, C.S., Lima, P.R.A.S.1984. Complexos carbonatíticos do Brasil. In: Complexos carbonatíticos do Brasil: Geologia. Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração: 3-17.

- Ruberti, E., Castorina, F., Censi, P., Comin-Chiaramonti, P., Gomes, C.B., Antonini, P., Andrade, F.R.D. 2002. The geochemistry of the Barra do Itapitapuã carbonatites (Ponta Grossa Arch, Brazil): a multiple stockwork. *Journal of South American Earth Sciences* 15: 215-228.
- Sant'Agostino, L.M. 1996. Caracterização tecnológica de um depósito mineral – um estudo de caso: o nióbio de Catalão I, Goiás. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Brasil.
- Santos, R.L.C., Sobral, L.G.S., Araújo, R.V.V e equipe técnica da Fosfertil/CMT. 2002. Produção de fosfato no Brasil: Complexo de Mineração de Tapira/Fosfertil. IX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Recife.
- Seer, H.J., Dardenne, M.A., Pimentel, M.M., Fonseca, M.A., Moraes, L.C. 2000. A Grupo Ibiá na sinforma de Araxá: um terreno tectonoestratigráfico ligado à evolução de arcos magmáticos. *Revista Brasileira de Geociências* 30 (4): 737-744.
- Seer H.J. 1999. Evolução tectônica dos Grupos Araxá, Ibiá e Canastra na Sinforma de Araxá, Minas Gerais. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasil.
- Simões, L.S.A., Navarro G. 1996. Estruturação da Faixa Brasília na região de Araxá, MG. 39º Congresso Brasileiro de Geologia. Salvador. Anais: 92-95.
- Silva, A.B., Liberal, G.S., Grossi Sad, J.H., Issa Filho, A., Rodrigues, C.S., Riffel, B.F. 1988. Geologia e petrologia do complexo Angico dos Dias (Bahia, Brasil): uma associação carbonatítica Pré-Cambriana. *Geochimica Brasiliensis* 2 (1): 81-108.
- Silva, A.B., Marchetto, M., Souza, O.M. 1979. Geologia do complexo carbonatítico de Araxá (Barreiro), MG. *Mineração e Metalurgia* 415: 14-18.
- Silva, A.B. 1986. Jazida de nióbio de Araxá, Minas Gerais. In: Schobbenhaus, C. (Ed.). Principais depósitos minerais do Brasil. MME/DNPM, Brasília: 435-453.
- Sonoki, I.K., Garda, G.M. 1988. Idades K-Ar de rochas alcalinas do Brasil meridional e Paraguai oriental: compilação e adaptação às novas constantes de decaimento. *Boletim IG-USP, Série Científica* 19: 63-85.
- Takata, L. 2000. Caracterização tecnológica de minérios – uma revisão do método. Relatório Interno Vale Fertilizantes, Araxá, 4p.
- Tassinari, M.M.L., Kahn, H., Ratti, G. 2001. Process mineralogy studies of Corrego do Garimpo REE ore, Catalão I alkaline complex, Goiás, Brazil. *Minerals Engineering* 14 (12): 1609-1617.
- Tassinari, M.M.L. 2001. Caracterização tecnológica do depósito de terras raras de Catalão I, GO. Áreas: Córrego do Garimpo e Lagoa Seca. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Brasil.
- Tavares, S.T.P. 2010. Histórico da pesquisa geológica na mina do Barreiro, Araxá, MG. Relatório interno Vale Fertilizantes, Araxá, 13p.
- Thompson, R.N., Gibson, S.A., Mitchell, J.G., Dickin, P., Leonardos, O.H., Brod, J.A., Greenwood, J.C. 1998. Migrating Cretaceous-Eocene magmatism in the Serra do Mar alkaline province, SE

Brazil: melts from the deflected Trindade mantle plume? *Journal of Petrology* 39 (8): 1493-1526.

Toledo, M.C.M., Ferrari, V.C., Alcover Neto, A., Fontan, F., Martin, F., Santos, C.N., Carvalho, F.M.S. 2002. Fosfatos aluminosos com ferro do grupo da crandallita nas coberturas lateríticas de Catalão I, Juquiá e Tapira (Brasil) e Chiriguelo (Paraguai). *Revista Brasileira de Geociências* 32 (4): 393-406.

Toledo, M.C.M., Lenharo, S.L.R., Ferrari, V.C., Fontan, F., Paserval, P. 2004. The compositional evolution of apatite in the weathering profile of the Catalao I alkaline-carbonatitic complex, Goiás, Brazil. *Canadian Mineralogist*, 42: 1259-1278.

Toledo, M.M.C., Pereira, V.P. 2001. A variabilidade de composição da apatita associada a carbonatitos. *Revista do Instituto Geológico, São Paulo* 22 (1/2): 27-64.

Toledo, M.C M., Souza, R.V. 1991. Estudo preliminar da alteração intempérica das rochas ultramáficas ricas em apatita da mina Gonzaga de Campos, maciço alcalino de Ipanema, SP. 3º Congresso Brasileiro de Geoquímica, São Paulo. Resumos expandidos: 91-94.

Toledo, M.C.M. 1999. Mineralogia dos principais fosfatos do maciço alcalino-carbonatítico de Catalão I (GO) e sua evolução no perfil laterítico. Tese de Livre Docência, Universidade de São Paulo, Brasil.

Toledo, M.C.M. 2000. O grupo da crandallita no manto laterítico sobre o maciço carbonatítico de Catalão I, GO – Brasil. *Geochimica Brasiliensis* 14 (1): 71-75.

Torres, M.G., Gaspar, J.C., Brod, J.A. 2005. Controle genético do depósito de fosfato apatítico do complexo alcalino-carbonatítico do Barreiro, Araxá-MG. I Simpósio Brasileiro de Metalogenia, Gramado (CD-ROM).

Torres, M.G., Gaspar, J.C. 1995a. Geoquímica do manto de intemperismo da mina de fosfato do complexo alcalino-carbonatítico do Barreiro, Araxá, MG. V Congresso Brasileiro de Geoquímica e III Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, Niterói. Resumos expandidos (CD-ROM).

Torres, M.G., Gaspar, J.C. 1995b. Estudo mineralógico dos veios de apatita e magnetita do complexo alcalino-carbonatítico do Barreiro, Mineração Arafertil, Araxá, MG. V Congresso Brasileiro de Geoquímica e III Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, Niterói. Resumos expandidos (CD-ROM).

Torres, M., Gaspar, J.C. 1995. Estudo mineralógico dos veios de apatita e magnetita do complexo alcalino-carbonatítico do Barreiro, Mineração Arafertil, Araxá, MG.

Torres M. G. 1996. Caracterização mineralógica do minério fosfático da mina da Arafertil S. A., no complexo carbonatítico do Barreiro, Araxá, MG. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasil.

Torres, M.G. 2008. Composição química superficial e nanotopográfica da apatita do proto-minério da mina do Barreiro, Araxá-MG. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasil.

- Traversa, G., Gomes, C.B., Brotzu, P., Buraglini, N., Morbidelli, L., Principato, M.S., Ronca, S., Ruberti, E. 2001. Petrography and mineral chemistry of carbonatites and mica-rich rocks from the Araxá complex (Alto Paranaíba Province, Brazil). *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 73: 71-98.
- Treiman A.H. 1989. Carbonatite magma: properties and processes. In: K. Bell. Ed., *Carbonatites: genesis and evolution*. London, Unwin Hyman, 89-104.
- Tröger, E. 1928. Alkaligesteine aus der Serra do Salitre im westlichen Minas Geraes, Brasilien. *Centralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, Abt A*: 202-204.
- Uliana, D., Kahn, H., Braz, A.B. 2009. Caracterização tecnológica dos tipos de minério de fosfato do complexo alcalino de Salitre, MG – Área Fosfertil. *Revista Escola de Minas* 62 (4): 511-516.
- United States Geological Survey. 2010. Phosphate rock - mineral commodity summaries, Washington. In: <http://www.usgs.gov>.
- Vann, J., Jackson, J., Coward, S., Dunham, S. 2011. The geomet curve – a model for implementation of geometallurgy. The first AUSIMM International Geometallurgy Conference, Brisbane. Proceedings: 35-43.
- Valente, J. 2004. Laudo técnico para avaliação da jazida (mina) denominada Barreiro de Araxá. Relatório interno Vale Fertilizantes, Araxá, 79p.
- Vergara, V.D. 1980. Pesquisa de fosfato em Anitápolis – relatório final. Porto Alegre. In: Ferrari, V.C. 2000. Fosfatos primários e secundários nos perfis de intemperismo sobre os maciços alcalino-carbonatíticos de Juquiá (SP), Anitápolis (SC) e Tapira (MG). Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Brasil.
- Wall, F., Zaitsev, A.N. 2004. Phoscorites and carbonatites from mantle to mine: the key Example of the Kola Alkaline Province. *The Mineralogical Society Series* 10. London. 498p.
- Wang, X., Miller, J.D. 2011. Developing a beneficiation process for a siliceous carbonate phosphate ore from Catalão – CO₂ effect on flotation response-literature review. Internal report of University of Utah, Catalão, 10p.
- Woolley, A.R., Kempe, D.R.C. 1989. Carbonatites: nomenclature, average chemical compositions, and element distribution. In: K. Bell. Ed., *Carbonatites: genesis and evolution*. London, Unwin Hyman, 1-14.
- Woolley, A.R., Kjarsgaard, B.A. 2008. Paragenetic types of carbonatite as indicated by the diversity and relative abundances of associated silicate rocks: evidence from a global database. *Canadian Mineralogist* 46: 741 - 752.
- Yang, X.Y., Sun, W.D., Zhang, Y.X., Zheng, Y.F. 2009. Geochemical constraints on the genesis of the Bayan Obo Fe–Nb–REE deposit in Inner Mongolia, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73: 1417–1435.
- Yang, Z., Woolley, A. 2006. Carbonatites in China: a review. *Journal of Asian Earth Sciences* 27: 559-575.

Yegorov, L.S. 1993. Phoscorites of the Maymecha-Kotuy ijolite-carbonatite association. International Geological Reviews 35: 346-358.

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1: Lista das amostras utilizadas nesta pesquisa

ANEXO 2: Composição química dos carbonatitos

ANEXO 3: Análises químicas semi-quantitativas por MEV-EDS

ANEXO 4: Compilação de resultados de difração de raios X

ANEXO 5: Descrição geológica de testemunhos de sondagem

ANEXO 6: Base de dados de Geometalurgia