

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**CONTROLE NA DISTRIBUIÇÃO DAS LATERITAS E  
SAPROLITOS DE ALTO TEOR NO DEPÓSITO DE  
NÍQUEL LATERÍTICO DO JACARÉ, DISTRITO DE  
CARAJÁS, BRASIL**

**FRANCISCO TOMAZONI NETO**

ORIENTADOR – Dr. Marcus Vinicius Dorneles Remus  
CO-ORIENTADOR – Dr. Norberto Dani

Volume Único

Porto Alegre – 2011

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**CONTROLE NA DISTRIBUIÇÃO DAS LATERITAS E  
SAPROLITOS DE ALTO TEOR NO DEPÓSITO DE  
NÍQUEL LATERÍTICO DO JACARÉ, DISTRITO DE  
CARAJÁS, BRASIL**

**FRANCISCO TOMAZONI NETO**

ORIENTADOR – Dr. Marcus Vinicius Dorneles Remus  
CO-ORIENTADOR – Dr. Norberto Dani

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. Adolpho José Melfi – Universidade de São Paulo  
Prof. Dr. Milton Luiz Laquintinie Formoso – Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul  
Prof. Dr. José Carlos Frantz - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dissertação de Mestrado  
apresentada como requisito  
parcial para a obtenção do Título  
de Mestre em Geociências.

Porto Alegre, Abril/2011

Tomazoni Neto, Francisco

Controle na distribuição das lateritas e saprolitos de alto teor no depósito de níquel laterítico do jacaré, Distrito de Carajás, Brasil. / Francisco Tomazoni Neto. - Porto Alegre : IGEO/UFRGS, 2011.

[215 f.] il.

Dissertação (Mestrado). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2011.

Orientação: Prof. Dr. Marcus Vinicius Dorneles Remus

Co-Orientador: Prof. Dr. Norberto Dani

1. Níquel. 2. Rochas Ultramáficas. 3. Laterita. 4. Depósito do Jacaré. 5. Carajás. I. Título.

---

Catálogo na Publicação  
Biblioteca Geociências - UFRGS  
Renata Cristina Grun CRB 10/1113



## DEDICATÓRIA

Como diria Raul.... "Sonho que se sonha só, é só um sonho que se sonha só, mas sonho que se sonha junto é realidade".

Helena, João Pedro e Gael. Vocês são os verdadeiros responsáveis pela realização deste sonho.



## AGRADECIMENTO

Helena, João Pedro, Gael, mãe. Muito obrigado pelo apoio incondicional.

Gostaria de agradecer a Anglo American pelo apoio, fomento e liberação das informações que permitiram o desenvolvimento e término desta dissertação de mestrado. Em especial, aos geólogos Lúcio Molinari, Romero Queiroz, Leonardo de Souza, José Félix de Melo, Roque Coelho e Jomar Stabili, os quais tive o privilégio de trabalhar e aprender ao longo desta etapa.

Igualmente agradeço ao corpo técnico do Projeto Jacaré, bem como os incansáveis auxiliares de campo, entre eles Alcenor, Deocleciano e Gonçalo pelas inúmeras picadas abertas, horas de conversa e aprendizado sobre como andar na selva amazônica.

Muito obrigado aos fiéis escudeiros Pozocco, China e Boto, amigo Edvaldo e Carlos Carvalho; aprendi muito com cada um de vocês.

Agradeço aos meus orientadores Marcus Remus e Norberto Dani, bem como todos os bolsistas que se envolveram neste projeto pela dedicação, apoio e horas de discussão.

Por fim, gostaria de deixar meu muito obrigado a todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram para este trabalho (que não foram poucos), dedicando parte do seu tempo para elucidar problemas e devaneios gerados no escopo do projeto.

*"Crear visiones de lugares venideros y saber que siempre serán lejanos, inalcanzables como todo ideal. Huir lo viejo. Mirar el filo que corta un agua espumosa y pesada. Arrancarse de lo conocido. Beber lo que viene. Tener alma de proa".*

Ricardo Güiraldes

---

## RESUMO

O Depósito de classe mundial de níquel laterítico do Jacaré (495Mt @ 1,19% Ni) localiza-se cerca de 52 Km em linha reta, a NNE do município de São Félix do Xingu/PA - Província Mineral de Carajás. O depósito ocorre em rochas essencialmente duníticas e gabróicas magmaticamente acamadadas, com níveis peridotíticos e/ou piroxeníticos subordinados. Os horizontes saprolíticos são, de fato, os portadores das maiores concentrações de Ni e estas, por sua vez, apresentam os minerais do grupo da serpentina como seus detentores principais, entre eles a lizardita, antigorita e crisotilo, com texturas não-psudomórficas (e.g. *interpenetrating*, *interlocking*), pseudomórficas (*hourglass* e minoritariamente *mesh*) e veios. Todavia, ficou clara a participação dos minerais oxidados como goetita ( $\alpha\text{FeO.OH}$ ) e hematita ( $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) nas zonas de alta concentração de Ni nos horizontes saprolíticos, onde este elemento se ligou de forma absorvida e/ou adsorvida junto aos minerais supra-citados. À medida que ascende no perfil, os minerais oxidados passam a compor a grande maioria da mineralogia, sendo responsáveis pela fixação do Ni nos horizontes de forma inversamente proporcional a diminuição do pH no ambiente, onde a aeração é tal que a oxidação não permite mais a fixação do  $\text{Ni}^{2+}$  com o  $\text{Fe}^{3+}$ , o que o deixa móvel novamente no sistema. Quanto mais próxima da superfície, em zonas secas de caráter ácido, o processo de oxidação vai enriquecendo o sistema em ferro e formando nódulos e carapaças lateríticas, podendo evoluir até "chapéu de ferro" (bloco sul). O processo de oxidação e redução foi favorecido pelas estruturas, uma vez que permitem maior percolação de fluidos meteóricos até a zona de oxi-redução, acarretando a maior concentração de Ni ligado de forma preferencialmente adsorvida nos gels de Si-Fe e, principalmente, nos óxidos e proto-óxidos. Em contrapartida, as chamadas concentrações de "minerais garnieríticos", apesar de existirem no depósito, não se repetiram nas análises da presente dissertação, o que descarta esta possibilidade como portadora principal das zonas de alto teor em Ni, bem como argilominerais do grupo das esmectitas. Assim, apesar da alta concentração de Ni estar associada às zonas saprolíticas, o que respeita a rota pirometalúrgica para a produção da liga ferro-níquel, existe marcante concentração de níquel em meio aos óxidos e hidróxidos existentes nestes mesmos horizontes, o pode

impactar diretamente no processo de pré-calcinação e calcinação do material em escala de planta, uma vez que o consumo de energia para realizar tal atividade pode ser aumentado consideravelmente, acarretando em custos adicionais de operação. As lateritas silicosas e ferruginosas não apresentaram divergências na sua composição química ou mineralógica quando comparadas aos depósitos minerais de mesma característica conhecidos mundialmente, assim, podendo ser inseridas nas rotas hidrometalúrgicas. A dinâmica e consecutiva evolução geomorfológica do Depósito do Jacaré mostra que a área se encontra em franco desenvolvimento de uma segunda inversão de relevo, onde o bloco sul teve boa parcela de sua massa inicial erodida e mostra desenvolvimento de "capa e ferro", enquanto a porção norte passa por processo de dessilisificação, formação de horizontes ferruginosos na zona de oxi-redução e forte dissecação do seu relevo.

## ABSTRACT

The Jacaré world class nickel lateritic deposit (495Mt @ 1,19% Ni) is positioned about 52 Km NNE straight line from São Félix do Xingu/PA State - Carajás Mineral Province. The deposit occurs in essentially dunitic and gabbroic rocks magmatically layered with subordinated peridotites and pyroxenites levels. The saprolitic zones host the main Ni ores and the serpentine mineral group contain the main Ni grades, where lizardite, antigorite and crisotile with non-pseudomorphic texture (e.g. *interpenetrating*, *interlocking*), pseudomorphic (*hourglass* and minor *mesh*) and venulets are the main minerals. However, the participation of oxidized minerals as goethite ( $\alpha\text{FeO}\cdot\text{OH}$ ) and hematite ( $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) in zones of high Ni concentration in saprolites layers is clear, where this element is absorbed and/or adsorbed in the related minerals. As the oxidized minerals rising up in profile, they compose the main mineral assembly, being responsible for Ni fixation in some levels proportionally inverse to environment pH diminution, where the oxidation state do not permit the  $\text{Ni}^{2+}$  fixation with  $\text{Fe}^{3+}$ , which leaves the element mobile in the system. As closer to the surface, in dryer zones of acid character, the oxidation process enrich the system in iron and generate nodules and lateritic covers, evolving to "duricrusts" (south block). The oxi-reduction process is favored by structures, once they permit a free circulation of meteoric waters until the oxi-reduction zone, causing an increasing in Ni links, preferentially in oxide and protho-oxides. However, the so called "garnieritic minerals" previously identified in the deposit, did not repeat their assay results in this thesis, Hence, it discards the possibility of garnierite to be the main high grade Ni- ore, as well clay minerals of smectite group. Beside high grade Ni-ores have been associated with saprolitic zones, which respect the pyrometallurgic route to Fe-Ni production, there are remarkable nickel concentration in oxides and hydroxides in the same level, which can impact directly in pre- calcination and calcination process of material at the plant scale, once the energy consumption used for this activity will be considerably increased causing in additional OPEX expenses. The siliceous laterites and ferruginous laterites did not show divergences in chemical or mineralogical composition when compared to mineral deposits of similar characteristics worldwide, in this way, these ores are able to be inserted in hydrometallurgical routs. The dynamics and consecutive geomorphologic evolution of

---

Jacaré Deposit shows that the area is in clear development of a second relief inversion, where the south portion had an initial mass eroded and nowadays shows the development of "duricrust" where the north portion is passing through dessilicification process, formation a ferruginous levels in oxi-reduction zones with strong relief dissection.

## Lista de Figuras

<b>FIGURA 01</b> - SÉRIE DE CRISTALIZAÇÃO .....	19
<b>FIGURA 02</b> : CLASSIFICAÇÃO DE ROCHAS MÁFICO-ULTRAMÁFICAS BASEADA EM STRECKEISEN, 1973 E LE MAITRE, 1989 IN HIBBARD, M.J. 1995. (FONTE: WWW.UNB.COM.BR/IG) .....	19
<b>FIGURA 03</b> - DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DAS ZONAS MORFOCLIMÁTICAS ATUAIS (MODIFICADO DE BUEDEL, 1982) E SUA RELAÇÃO COM AS FORMAÇÕES LATERÍTICAS ANTIGAS (DOMINANTEMENTE CENOZÓICAS) E ATUAIS. ....	24
<b>FIGURA 04</b> - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS DIFERENTES PROCESSOS INTEMPÉRICOS EM SITUAÇÃO TOPOGRÁFICA SEMELHANTE, PORÉM SOB DIFERENTES CLIMAS (A) ÚMIDO E (B) ÁRIDO (MODIFICADO DE BUTT & ZEEGERS, 1992. .96.).	25
<b>FIGURA 05</b> - FORMAÇÃO DIRETA DE DEPÓSITOS OXIDADOS (A) E SILICATADOS (B) EM CLIMAS ÚMIDOS DE SAVANA E TROPICAL, COM RELEVO MODERADO A BAIXO. MODIFICADO DE FREYSSINET <i>ET AL.</i> 2005. ....	28
<b>FIGURA 06</b> - PROCESSO IDEALIZADO DE FORMAÇÃO DE PERFIL LATERÍTICO-SAPROLÍTICO (MODIFICADO DE ALLEVA, 1994).....	33
<b>FIGURA 07</b> - PERFIL ESQUEMÁTICO DOS TIPOS DE LATERITAS NIQUELÍFERAS (MODIFICADO DE ELIAS, 2004).....	37
<b>FIGURA 08</b> - DISTRIBUIÇÃO GLOBAL DOS DEPÓSITOS DE NI LATERÍTICO, CLASSIFICADOS DE ACORDO COM O TIPO DE DEPÓSITO, DISPOSTOS NUM MAPA MORFOCLIMÁTICO NO MAPA MORFOCLIMÁTICO DE BUDEL (1982). MODIFICADO DE FREYSSINET <i>ET AL.</i> , (2005).....	38
<b>FIGURA 09</b> - COMPARAÇÃO DE POTENCIAIS DE RECURSOS E PRODUÇÃO ENTRE DEPÓSITOS LATERÍTICOS E SULFETADOS (MODIFICADO DE INCO). ....	41
<b>FIGURA 10</b> - DISTRIBUIÇÃO DOS RECURSOS DE NÍQUEL LATERÍTICO NO MUNDO (MODIFICADO DE INCO). ....	42
<b>FIGURA 11</b> - PROPORÇÃO ENTRE OS DEPÓSITOS LIMONÍTICOS E SILICATADOS (MODIFICADO DE ELIAS, 2004). ....	42
<b>FIGURA 12</b> - MAPA COM AS OCORRÊNCIAS E DEPÓSITOS DE NÍQUEL DO BRASIL (MODIFICADO DE MICK ELIAS, 2001. GLOBAL LATERITIC NICKEL RESOURCES, NEW CALEDONIAN NICKEL CONFERENCE 25 JUNHO DE 2001). ....	43
<b>FIGURA 13</b> - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO PROJETO JACARÉ. A) LOCALIZAÇÃO DO ALVO EM RELAÇÃO AO CONTINENTE SUL AMERICANO; B) MAPA TOPOGRÁFICO EM TONS DE CINZA DA SERRA DO JACARÉ; C) POSICIONAMENTO DA ÁREA NO CONTEXTO DO DISTRITO MINEIRO DE CARAJÁS E INFRA-ESTRUTURA. ....	49
<b>FIGURA 14</b> - COLUNA ESTRATIGRÁFICA SIMPLIFICADA. ....	51
<b>FIGURA 15</b> - MAPA GEOLÓGICO SIMPLIFICADO DA PARTE SUL DA PROVÍNCIA MINERAL CARAJÁS (ADAPTADO DE CPRM 2001). ....	52
<b>FIGURA 16</b> - COMPARTIMENTAÇÃO GEOTECTÔNICA E ESTRUTURAS DO SUDESTE DA AMAZÔNIA (ADAPTADO CPRM, 2001).....	55
<b>FIGURA 17</b> - COMPARTIMENTAÇÃO GEOLÓGICA/GEOMORFOLÓGICA DO DEPÓSITO DO JACARÉ. ....	57
<b>FIGURA 18</b> - GRUPOS PRINCIPAIS DE FALHAMENTO/FRATURAMENTO. ....	61
<b>FIGURA 19</b> - ESPAÇOS GERADOS DURANTE A EVOLUÇÃO TECTÔNICO-ESTRUTURAL DA ÁREA SERVEM DE ACOMODAÇÃO PARA MINERAIS SECUNDÁRIOS ENRIQUECIDOS EM NI, TAIS COMO “GARNIERITAS” E CRISOPRÁSIOS. ....	62
<b>FIGURA 20</b> - PERFIL LATERÍTICO IDEALIZADO SOBRE ROCHAS DUNÍTICAS E PERIDOTÍTICAS SERPENTINIZADAS DO DEPÓSITO DO JACARÉ. ....	63
<b>FIGURA 21</b> - FORNOS A GÁS PARA SECAGEM DE AMOSTRAS. ....	67
<b>FIGURA 22</b> - SETOR DE PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS EM BARRO ALTO. A) PULVERIZADOR; B) BRITADOR. ....	67
<b>FIGURA 23</b> - MICROSCÓPIO ÓTICO COM CÂMERA CCD CONECTADA AO MICROCOMPUTADOR. ....	70
<b>FIGURA 24</b> - VISÃO GERAL DO MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA – JEOL JSM-5800, EQUIPADO COM UM ESPECTRÔMETRO EDS UTILIZADO NO PROJETO. ....	71
<b>FIGURA 25</b> - VISUALIZAÇÃO DE UMA DAS JANELAS DO SISTEMA DE PROCESSAMENTO DAS CONTAGENS OBTIDAS PELO DETECTOR EDS, CONSTITUÍDO PELO PROGRAMA NORAN SYSTEM Six 88®. ....	72
<b>FIGURA 26</b> - PARTE FRONTAL DO PICOAMPERÍMETRO KEITHLEY®. ESTE EQUIPAMENTO, ACOPLADO AO MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA É CAPAZ DE MEDIR VARIAÇÕES NA CORRENTE NA ORDEM DE $10^{-13}$ A OU 10PA. ....	72
<b>FIGURA 27</b> – VISTA DAS LÂMINAS PETROGRÁFICAS E DO CONJUNTO DE PADRÕES DE MINERAIS UTILIZADOS NO PROCESSO DE ANÁLISE. ....	73
<b>FIGURA 28 - A)</b> DESAGREGADOR DE PARTÍCULAS POR ULTRA-SOM, MODELO SONICS. <b>B)</b> ESQUEMA DE SEPARAÇÃO DE FRAÇÃO EMPREGADO NO ESTUDO DOS ARGILOMINERAIS PELO PROCESSO DE DECANTAÇÃO NORMAL. ....	75
<b>FIGURA 29</b> - DIFRATÔMETRO DE RAIOS-X MODELO SIEMENS D5000, GONIÔMETRO $\Theta$ - $\Theta$ , UTILIZADO NOS ESTUDOS MINERALÓGICOS DOS ARGILOMINERAIS DO PROJETO. ....	77

<b>FIGURA 30</b> - MAPA DAS UNIDADES DE ALTERAÇÃO ASSOCIADAS AO COMPLEXO ULTRAMÁFICO DO JACARÉ E DE LOCALIZAÇÃO DO FURO FJA 146 (15M).....	80
<b>FIGURA 31</b> - VARIAÇÃO EM PORCENTAGEM DA CONCENTRAÇÃO DE NI AO LONGO DO PERFIL DE ALTERAÇÃO DO FURO FJA 146 .	81
<b>FIGURA 32</b> - VARIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO FURO FJA 146 EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE (M) E DOS DIFERENTES NÍVEIS DE MINÉRIO ESTABELECIDOS PARA O PERFIL.....	83
<b>FIGURA 33</b> - GRÁFICOS DE BALANÇO DE MASSA DO FURO FJA 146. ....	85
<b>FIGURA 34</b> – AM 183836 - FOTOMICROGRAFIA DE FRAGMENTOS DE SAPROLITO MOSTRANDO SERPENTINA EM VEIOS ASBESTIFORMES (DOMINANTES) E NÃO ASBESTIFORMES. SERPENTINAS EM TEXTURAS <i>MESH</i> E <i>INTERLOCKING</i> TAMBÉM OCORREM, MAS SÃO MINORITÁRIAS. A SERPENTINA DOS VEIOS É DOMINANTEMENTE DO TIPO CRISOTILO. (LP 50X). LP: POLARIZADORES CRUZADOS.....	87
<b>FIGURA 35</b> - MOSAICO DE FOTOMICROGRAFIAS REFERENTES À AMOSTRA 183836. A) SEPENTINITO COM VEIOS ASBESTIFORMES E TEXTURA <i>MESH</i> PARCIALMENTE TRANSFORMADA EM <i>INTERPENETRATING</i> (LP – 50X); B) IDEM ANTERIOR (LN – 50X); C) CROMITA COM FORMA IRREGULAR PARCIALMENTE HEMATITIZADA (LR – 5X); D) DETALHE DA ALTERAÇÃO DE MAGNETITA PARA GOETITA E HEMATITA (LP – 50X); E) IDEM ANTERIOR COM DETALHE À CROMITA E ALTERAÇÃO PARA HEMATITA (LR – 50X); F) VÊNULA DE SERPENTINA SUBSTITUÍDA POR QUARTZO (LP – 10X). LN: LUZ NATURAL; LP: POLARIZADORES CRUZADOS; LR: LUZ REFLETIDA.....	88
<b>FIGURA 36</b> – AM 183836 - CLORITA SERPENTINIZADA COM PROCESSO DE ALTERAÇÃO PARA GOETITA.....	89
<b>FIGURA 37</b> – FOTOMICROGRAFIA DE FRAGMENTOS DE SAPROLITO MOSTRANDO SERPENTINA NA TEXTURA <i>INTERPENETRATING</i> COM GRÃOS LAMELARES (MATRIZ) E SERPENTINA EM VEIOS ASBESTIFORMES E NÃO ASBESTIFORME. A SERPENTINA DOS VEIOS É DOMINANTEMENTE DO TIPO CRISOTILO (LP 50X).....	90
<b>FIGURA 38</b> – MOSAICO DE FOTOMICROGRAFIAS REFERENTES À AMOSTRA 183819. A) SERPENTINITO COM TEXTURA <i>HOURLASS</i> (LIZARDITA) PARCIALMENTE ALTERADA PARA TEXTURA <i>INTERPENETRATING</i> (LP – 20X); B) DETALHE DE VEIO DE “A” COM HEMATITIZADA E GOETITA (LR –20); C) CLORITA SERPENTINIZADA (LN – 20X); D) ÍDEM ANTERIOR. LN: LUZ NATURAL; LP: POLARIZADORES CRUZADOS; LR: LUZ REFLETIDA. ....	91
<b>FIGURA 39</b> – FOTOMICROGRAFIAS REFERENTES À AMOSTRA 183819. A) GRÃOS DISCRETOS DE ROMITA EUÉDRICA E HEMATITADEPOSITADA EM VEIOS (LR – 20X); B) CRISTAL DISCRETO DE CROMO-ESPINÉLIO E VEIO CORTANDO A MATRIZ DE SERPENTINITO, CONSTITUÍDO POR CRISOTILO E MAGNETITA COM POSTERIOR ALTERAÇÃO PARA GOETITA E HEMATITA (LR – 20). LR: LUZ REFLETIDA. ....	92
<b>FIGURA 40</b> - SUPERPOSIÇÃO DOS DIFRATOGRAMAS EM RELAÇÃO AO PERFIL GEOLÓGICO E CONSECUTIVA VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE NI DO FURO DE SONDA FJA 146. LEGENDA: SP – SERPENTINA; CR – CROMITA; OL – OLIVINA; HM – HEMATITA; C – CLORITA; QZ – QUARTZO.....	93
<b>FIGURA 41</b> - SUPERPOSIÇÃO DE DIFRATOGRAMAS (FRAÇÃO < 20µm), ORDENADOS SEGUNDO A PROFUNDIDADE, DO FURO DE SONDA FJA 146. LEGENDA: SP – SERPENTINA; C – CLORITA; HT – HIDROTALCITA; CR – MAGNETITA/CROMITA/CR-ESPINÉLIO; OL – OLIVINA; HM – HEMATITA; QZ – QUARTZO; GT - GOETITA.....	94
<b>FIGURA 42</b> - SUPERPOSIÇÃO DE DIFRATOGRAMAS (FRAÇÃO < 2µm), ORDENADOS SEGUNDO A PROFUNDIDADE, DO FURO DE SONDA FJA 146. LEGENDA: SP – SERPENTINA; C – CLORITA; HM – HEMATITA; GT - GOETITA. ....	95
<b>FIGURA 43</b> - DISTRIBUIÇÃO MINERALÓGICA ESTIMADA A PARTIR DA ANÁLISE MODAL SEMI-QUANTITATIVA POR MEIO DE DRX (CÁLCULO A PARTIR DA INTEGRAÇÃO DAS ÁREAS E DO NÍVEL DE CONTAGEM DOS PICOS IDENTIFICADOS DOS MINERAIS) DO FURO DE SONDA FJA 146. LEGENDA - OL: OLIVINA; CR: MAGNETITA/CROMITA/CROMO-ESPINÉLIO; SP: SERPENTINA; C: CLORITA; HT: HIDROTALCITA; HM: HEMATITA; GT: GOETITA; K: KAOLINITA; QZ: QUARTZO.....	96
<b>FIGURA 44</b> - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO FURO FJA 245.....	98
<b>FIGURA 45</b> - PERFIL DE ALTERAÇÃO DO FURO FJA 245 E SUA CONSECUTIVA VARIAÇÃO EM NI.....	99
<b>FIGURA 46</b> - GRÁFICOS DE VARIAÇÃO GEOQUÍMICA DO FURO FJA 245.....	101
<b>FIGURA 47</b> - GRÁFICOS DE BALANÇO DE MASSA DO FURO FJA 245. ....	103
<b>FIGURA 48</b> - AM 201204: FOTOMICROGRAFIA DE FRAGMENTOS DE SAPROLITO MOSTRANDO SERPENTINA NA TEXTURA <i>INTERLOCKING</i> COM GRÃOS GRANULARES PRODUZIDOS PELA RECRISTALIZAÇÃO DE SERPENTINA DE TEXTURA <i>MESH</i> ( LP 50x). LP: POLARIZADORES CRUZADOS. ....	105
<b>FIGURA 49</b> - FOTOMICROGRAFIA REFERENTE À AMOSTRA 201204. MATRIZ LIZARDÍTICA/ANTIGORÍTICA COM VENULAÇÃO DE CRISOTILO PARCIALMENTE PREENCHIDO POR MAGNETITA E ASSOCIAÇÃO DE GOETITA. (LP –25X). LP: POLARIZADORES CRUZADOS. ....	106
<b>FIGURA 50</b> - FOTOMICROGRAFIAS REFERENTES À AMOSTRA 201204. A) CROMITA HEMATITIZADA (LR – 100x). B) IDEM ANTERIOR COM DESTAQUE À GERAÇÃO DE GOETITA (LP – 10x). LP: POLARIZADORES CRUZADOS.....	106



<b>FIGURA 51</b> - MOSAICO DE FOTOMICROGRAFIAS DA SEÇÃO DELGADA REFERENTE À AMOSTRA AM 201204, REPRESENTANTE DA BASE DO FURO DE SONDA FJA 245. A) ASSOCIAÇÃO SERPENTINÍTICA LIZARDITA/ANTIGORITA E CRISOTILO COM CLORITA (LP – 100x). B) IDEM ANTERIOR COM DESTAQUE PARA CROMITA E MAGNETITA ASSOCIADAS À SERPENTINA (LR – 100x). C) CARBONATO DO GRUPO HIDROTALCITA (LP – 200x). D) IDEM ANTERIOR COM DESTAQUE AO DESENVOLVIMENTO DE HEMATITA E CROMITA ASSOCIADA (LR – 200x). LP: POLARIZADORES CRUZADOS; LR: LUZ REFLETIDA. ....	107
<b>FIGURA 52</b> - FOTOMICROGRAFIA DA AMOSTRA AM 201181, DEMONSTRANDO A RELAÇÃO ENTRE A MATRIZ OXIDADA E OS RELÍCTOS SERPENTINÍTICOS ALTERADOS SUPERGENICAMENTE. (LP – 50x). LP: POLARIZADORES CRUZADOS. ....	109
<b>FIGURA 53</b> - FOTOMICROGRAFIA DA AMOSTRA AM 201181. A) AGREGADO DE CRISTAIS DE LIZARDITA CORTADO POR PEQUENA VÊNULA DE CRISOTILO, ENVOLVIDO POR HEMATITA (MANCHAS VERMELHAS) E FRANJAS DE GOETITA (AMARELO). (LP – 200x). B) IDEM ANTERIOR COM DESTAQUE AO PROCESSO DE HEMATITIZAÇÃO, BEM COMO “QUEBRA” DA CROMITA. (LR – 200x). LP: POLARIZADORES CRUZADOS; LR: LUZ REFLETIDA. ....	109
<b>FIGURA 54</b> - AM 201181 - CRISTAL DE CR-ESPINÉLIO EM MEIO À MASSA HEMATÍTICA. (LR – 200x). LR: LUZ REFLETIDA.....	110
<b>FIGURA 55</b> - FOTOMICROGRAFIAS REFERENTE À AMOSTRA AM 201181. A) RELAÇÃO MINERALÓGICA ENTRE OS VEIOS DE CRISOTILO, E O DESENVOLVIMENTO DE CLORITA, MAGNETITA, GOETITA E HEMATITA. (LP- 200x) B) AGREGADO DE CRISTAIS DE CALCEDÔNIA IMERSO EM MEIO À MATRIZ OXIDADA. PERCEBEM-SE CRISTAIS DE CROMITA PARCIALMENTE QUEBRADOS PRESERVADOS. (LR – 100x). LP: POLARIZADORES CRUZADOS. LR: LUZ REFLETIDA. ....	110
<b>FIGURA 56</b> - SUPERPOSIÇÃO DE DIFRATOGRAMAS (FRAÇÃO < 20µm), SEGUNDO A PROFUNDIDADE, EM RELAÇÃO AO PERFIL GEOLÓGICO E CONSECUTIVA VARIAÇÃO DE NI DO FURO DE SONDA FJA 245. LEGENDA: SP – SERPENTINA; C – CLORITA; HT – CARBONATO; CR – MAGNETITA\CROMITA\CRO-ESPINÉLIO; OL – OLIVINA; HM – HEMATITA; QZ – QUARTZO; GT - GOETITA. ....	111
<b>FIGURA 57</b> - SUPERPOSIÇÃO DE DIFRATOGRAMAS (FRAÇÃO < 20µm), SEGUNDO A PROFUNDIDADE, DO FURO DE SONDA FJA 245. LEGENDA: SP – SERPENTINA; C – CLORITA; HT – HIDROTALCITA; CR – MAGNETITA\CROMITA\CRO-ESPINÉLIO; OL – OLIVINA; HM – HEMATITA; QZ – QUARTZO; GT - GOETITA.....	112
<b>FIGURA 58</b> - SUPERPOSIÇÃO DE DIFRATOGRAMAS (FRAÇÃO < 2µm), SEGUNDO A PROFUNDIDADE, DO FURO DE SONDA FJA 245. LEGENDA: SP – SERPENTINA.....	113
<b>FIGURA 59</b> - DISTRIBUIÇÃO MINERALÓGICA ESTIMADA A PARTIR DA ANÁLISE MODAL SEMI-QUANTITATIVA POR MEIO DE DRX (CÁLCULO A PARTIR DA INTEGRAÇÃO DAS ÁREAS E DO NÍVEL DE CONTAGEM DOS PICOS IDENTIFICADOS DOS MINERAIS) DO FURO DE SONDA FJA 245. LEGENDA - OL: OLIVINA; CR: MAGNETITA/CROMITA/CROMO-ESPINÉLIO; SP: SERPENTINA; C: CLORITA; HT: HIDROTALCITA; HM: HEMATITA; GT: GOETITA; K: KAOLINITA; QZ: QUARTZO.....	114
<b>FIGURA 60</b> - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO FURO FJA 255. ....	116
<b>FIGURA 61</b> - PERFIL DE ALTERAÇÃO DO FURO FJA 255 E SUA CONSECUTIVA VARIAÇÃO EM Ni. ....	117
<b>FIGURA 62</b> - GRÁFICOS DE VARIAÇÃO GEOQUÍMICA DO FURO FJA 255. ....	120
<b>FIGURA 63</b> - GRÁFICOS DE BALANÇO DE MASSA DO FURO FJA 255. ....	123
<b>FIGURA 64</b> - FOTOMICROGRAFIA DE FRAGMENTOS DE SAPROLITO DA BASE DO FURO FJA 255 ( LP 50x.) MOSTRANDO O CONTROLE ORIGINAL DOS GRÃOS DE OLIVINA MARCADOS PELA CONCENTRAÇÃO DE OPACOS (MAGNETITA PRINCIPALMENTE). LP: POLARIZADORES CRUZADOS. ....	125
<b>FIGURA 65</b> - MOSAICO DE FOTOMICROGRAFIAS DA SEÇÃO DELGADA REFERENTE À AMOSTRA AM 201376, REPRESENTANTE DA BASE DO FURO DE SONDA FJA 255. A) ASSOCIAÇÃO SERPENTINÍTICA LIZARDITA/ANTIGORITA ONDE A MAGNETITA MARCA O CONTO DO GRÃOS ORIGINAIS DE OLIVINA COM HÁBITO GRANULAR (LN – 25x). B) IDEM ANTERIOR COM DESTAQUE PARA TEXTURA <i>INTERPENETRATING</i> (LP – 25x). C) CROMITA PREENCHENDO VENUAÇÃO DE MAGNETITA HEMATITIZADA (LR – 25x). D) DETALHE PARA "c", ONDE A CROMITA SE MOSTRA PARCIALMENTE ALTERADA PARA GOETITA E ESTA ALTERADA PARA HEMATITA ATRAVÉS DE PROCESSO DE HIDRATAÇÃO (LR – 200x). LN: LUZ NATURAL; LP: POLARIZADORES CRUZADOS; LR: LUZ REFLETIDA. ....	126
<b>FIGURA 66</b> - MOSAICO DE FOTOMICROGRAFIAS DA SEÇÃO DELGADA REFERENTE À AMOSTRA AM 201376, REPRESENTANTE DA BASE DO FURO DE SONDA FJA 255. A) CLORITA SERPENTINIZADA COM PRESENÇA DE MAGNETITA E MANCHAS DE OXIDAÇÃO (LN – 200x). B) IDEM ANTERIOR COM DESTAQUE À PRESENÇA DE GOETITA E HEMATITA (LP – 200x). LN: LUZ NATURAL; LP: POLARIZADORES CRUZADOS. ....	127
<b>FIGURA 67</b> - MOSAICO DE FOTOMICROGRAFIAS DA SEÇÃO DELGADA REFERENTE À AMOSTRA AM 201345, REPRESENTANTE DO TOPO DO FURO DE SONDA FJA 255. A) PSEUDOMORFOSE DE OLIVINA ONDE OS GRÃOS PRIMÁRIOS ENCONTRAM-SE TOTALMENTE ALTERADOS PARA SERPENTINA, MANTENDO PARCIALMENTE A FORMA ORIGINAL (LP – 25x). B) IDEM ANTERIOR DESTACANDO CROMITAS E MAGNETITAS ACOMPANHANDO A VENUAÇÃO (LR – 25x). C) CRISTAL DE LIZARDITA SECCIONADA POR VENUAÇÃO ASBESTIFORME (LP – 200x). D) IDEM ANTERIOR COM DESTAQUE PARA CROMITA HEMATITIZADA (LR – 200x). LP: POLARIZADORES CRUZADOS; LR: LUZ REFLETIDA. ....	128

<b>FIGURA 68</b> - SUPERPOSIÇÃO DE DIFRATOGRAMAS (FRAÇÃO < 20µm), SEGUNDO A PROFUNDIDADE, EM RELAÇÃO AO PERFIL GEOLÓGICO E CONSECUTIVA VARIAÇÃO QUÍMICA DE NI DO FURO DE SONDA FJA 255. LEGENDA: SP – SERPENTINA; C – CLORITA; CR – CROMITA; OL – OLIVINA; HM – HEMATITA; QZ – QUARTZO; GT - GOETITA. ....	130
<b>FIGURA 69</b> - SUPERPOSIÇÃO DE DIFRATOGRAMAS (FRAÇÃO < 20µm), SEGUNDO A PROFUNDIDADE, DO FURO DE SONDA FJA 255. LEGENDA: SP – SERPENTINA; C – CLORITA; CR – MAGNETITA\CROMITA\CROMO-ESPINÉLIO; OL – OLIVINA; HM – HEMATITA; QZ – QUARTZO; GT - GOETITA.....	131
<b>FIGURA 70</b> - SUPERPOSIÇÃO DE DIFRATOGRAMAS (FRAÇÃO < 2µm), SEGUNDO A PROFUNDIDADE, DO FURO DE SONDA FJA 255. LEGENDA: SP – SERPENTINA; SP_1 - AMESITA.....	132
<b>FIGURA 71</b> - DISTRIBUIÇÃO MINERALÓGICA ESTIMADA A PARTIR DA ANÁLISE MODAL SEMI-QUANTITATIVA POR MEIO DE DRX (CÁLCULO A PARTIR DA INTEGRAÇÃO DAS ÁREAS E DO NÍVEL DE CONTAGEM DOS PICOS IDENTIFICADOS DOS MINERAIS) DO FURO DE SONDA FJA 255. LEGENDA - OL: OLIVINA; CR: MAGNETITA/CROMITA/CROMO-ESPINÉLIO; SP: SERPENTINA; C: CLORITA; HT: HIDROTALCITA; HM: HEMATITA; GT: GOETITA; K: KAOLINITA; QZ: QUARTZO.....	133
<b>FIGURA 72</b> : MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO FURO FJA 337.....	135
<b>FIGURA 73</b> - PERFIL DE ALTERAÇÃO DO FURO FJA 337 E SUA CONSECUTIVA VARIAÇÃO EM NI.....	136
<b>FIGURA 74</b> - GRÁFICOS DE VARIAÇÃO GEOQUÍMICA DO FURO FJA 337. ....	138
<b>FIGURA 75</b> - GRÁFICOS DE BALANÇO DE MASSA DO FURO FJA 337. ....	141
<b>FIGURA 76</b> - MOSAICO DE FOTOMICROGRAFIAS DA SEÇÃO DELGADA REFERENTE À AMOSTRA AM 2015187, REPRESENTANTE DA BASE DO FURO DE SONDA FJA 337. A) MATRIZ LÍTICA OXIDADA COM RELICTOS DE SERPENTINA E CRISTAIS DE CLORITA (LP – 50X). B) IDEM ANTERIOR COM DESTAQUE PARA PEQUENOS CRISTAIS DE CROMITA (LR – 50X). C) RELICTOS DE SERPENTINA COM TEXTURA MESH E INTERPENETRATING PRESERVADA. VENULAÇÃO DE CRISOTILO COM MAGNETITA E GOETITA ASSOCIADA (LP – 200X). D) IDEM ANTERIOR COM DETALHE PARA CROMITA (LR – 200X). LP: POLARIZADORES CRUZADOS; LR: LUZ REFLETIDA. ....	143
<b>FIGURA 77</b> - FOTOMICROGRAFIAS REFERENTE À AMOSTRA AM 2015183. A) MATRIZ OXIDADA COM CRISTAIS TABULARES DE CLORITA E RELICTOS DE SERPENTINA (LP- 25x). B) IDEM ANTERIOR COM DESTAQUE AOS MICROCISTAIS DE CROMITA (LR – 25x). C) RELICTO DE SERPENTINA PARCIALMENTE TRANSFORMADA EM GOETITA E HEMATITA (LP – 50x). D) IDEM ANTERIOR COM DESTAQUE A CRISTAIS REMANESCENTES DE CROMITA (LR – 50x). E) CRISTAIS TABULARES DE CLORITA (LP – 200x). F) IDEM ANTERIOR COM DESTAQUE A CROMITA HEMATITIZADA E "MANCHAS DE GOETITA" (LR – 200x). LP: POLARIZADORES CRUZADOS. LR: LUZ REFLETIDA. ....	145
<b>FIGURA 78</b> - FOTOMICROGRAFIA REFERENTE À AMOSTRA AM 2015183 DEMONSTRANDO CRISTAIS SUBÉDRICOS DE CROMITA, PARCIALMENTE ALTERADA PARA GOETITA E HEMATITA (LR – 50x).....	146
<b>FIGURA 79</b> - MOSAICO DE FOTOMICROGRAFIAS DA SEÇÃO DELGADA REFERENTE À AMOSTRA AM 2015147, REPRESENTANDO O TOPO DO FURO DE SONDA FJA 337. A) GIBSITA COM MACLA POLISSINTÉTICA E BORDA ALTERADA PARA GOETITA E HEMATITA (LP 50x). B) MATRIZ OXIDADA (LP – 50x). C) PISÓLITO HEMATÍTICO CONCÊNTRICO (LP – 25x). D) IDEM ANTERIOR COM DETALHE PARA BORDA HEMATÍTICA (LR – 25x). E) NUVEM DE HEMATITA E MAGNETITA (LR 50x). F) GRÃO DE CROMITA RESISTATO (LR 200x). LP: POLARIZADORES CRUZADOS; LR: LUZ REFLETIDA.....	147
<b>FIGURA 80</b> - SUPERPOSIÇÃO DE DIFRATOGRAMAS (FRAÇÃO < 20µm), SEGUNDO A PROFUNDIDADE, EM RELAÇÃO AO PERFIL GEOLÓGICO E CONSECUTIVA VARIAÇÃO DE NI DO FURO DE SONDA FJA 337. LEGENDA: SP – SERPENTINA; C – CLORITA; K - CAOLINITA; O - OLIVINA; GB - GIBSITA; CR – MAGNETITA\CROMITA\CROMO-ESPINÉLIO; HM – HEMATITA; GT - GOETITA.....	149
<b>FIGURA 81</b> - SUPERPOSIÇÃO DE DIFRATOGRAMAS (FRAÇÃO < 20µm), SEGUNDO A PROFUNDIDADE, DO FURO DE SONDA FJA 337. LEGENDA: SP – SERPENTINA; C – CLORITA; K - CAOLINITA; GB - GIBSITA; CR – MAGNETITA\CROMITA\CROMO-ESPINÉLIO; OL – OLIVINA; HM – HEMATITA; GT - GOETITA. ....	150
<b>FIGURA 82</b> : SUPERPOSIÇÃO DE DIFRATOGRAMAS (FRAÇÃO < 2µm), SEGUNDO A PROFUNDIDADE, DO FURO DE SONDA FJA 337. LEGENDA: SP – SERPENTINA; K - CAOLINITA; GB - GIBSITA; GT - GOETITA; CA - CALCITA E HM - HEMATITA.....	151
<b>FIGURA 83</b> - DISTRIBUIÇÃO MINERALÓGICA ESTIMADA A PARTIR DA ANÁLISE MODAL SEMI-QUANTITATIVA POR MEIO DE DRX (CÁLCULO A PARTIR DA INTEGRAÇÃO DAS ÁREAS E DO NÍVEL DE CONTAGEM DOS PICOS IDENTIFICADOS DOS MINERAIS) DO FURO DE SONDA FJA 337. LEGENDA - OL: OLIVINA; CR: MAGNETITA/CROMITA/CROMO-ESPINÉLIO; SP: SERPENTINA; C: CLORITA; HM: HEMATITA; GT: GOETITA; K: CAOLINITA; QZ: QUARTZO; GB: GIBSITA. ....	152
<b>FIGURA 84</b> - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO FURO FJA 373.....	154
<b>FIGURA 85</b> - VARIAÇÃO EM PORCENTAGEM DA CONCENTRAÇÃO DE NI AO LONGO DO PERFIL DE ALTERAÇÃO DO FURO FJA 373. ....	155
<b>FIGURA 86</b> - VARIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO FURO FJA 373 EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE (M) E DOS DIFERENTES NÍVEIS DE MINÉRIO ESTABELECIDOS PARA O PERFIL.....	158
<b>FIGURA 87</b> - GRÁFICOS DE BALANÇO DE MASSA DO FURO FJA 373. ....	161

<b>FIGURA 88</b> - FOTOMICROGRAFIAS REFERENTES A AMOSTRA AM 235248. A) SERPENTINA COM TEXTURA <i>MESH</i> DOMINANTE, PARCIALMENTE ALTERADA (OXIDADA) COM VENULAÇÕES E GERAÇÃO DE TEXTURA <i>BOXWORK</i> . (LP 2.5x). B) IDEM ANTERIOR COM DESTAQUE AOS CRISTAIS DE CROMITA (LR 25x). C) SERPENTINA COM TEXTURA <i>INTERPENETRATING</i> E CRISTAIS DE OLIVINA PARCIALMENTE PRESERVADOS NA TEXTURA <i>MESH</i> (LP 25x). D) DETALHE DE RELICTO DE OLIVINA E TEXTURA <i>MESH</i> EM MEIO A MASSA DE SERPENTINA E BORDA DE ALTERAÇÃO DE GOETITA (LP 200x) LP: POLARIZADORES CRUZADOS. LR: LUZ REFLETIDA. ....	163
<b>FIGURA 89</b> - FOTOMICROGRAFIAS REFERENTES À AMOSTRA 235248. A) CRISTAIS FRAGMENTADOS DE SERPENTINA IMERSOS NUMA MATRIZ DE ÓXIDO/HIDRÓXIDO DE FERRO (LP 25x). B) DETALHE DE CRISTAL DE QUARTZO SECUNDÁRIO (LP 200x). LP: POLARIZADORES CRUZADOS. ....	164
<b>FIGURA 90</b> - FOTOMICROGRAFIAS REFERENTES À AMOSTRA 235248. A) CR-ESPINÉLIO EM MEIO À MASSA DE SERPENTINA (LP 100x). B) IDEM ANTERIOR DEMONSTRANDO BORDA DE OXIDAÇÃO (LR 100x). LP: POLARIZADORES CRUZADOS. LR: LUZ REFLETIDA. ....	164
<b>FIGURA 91</b> - MOSAICO DE FOTOMICROGRAFIAS REFERENTES A AMOSTRA AM 235239. A) RELICTOS DE SERPENTINA COM TEXTURA <i>MESH</i> E <i>INTERLOCKING</i> ALTERADA PARA <i>BOXWORK</i> (LP 25x). B) DETALHE DA SERPENTINA COM MAGNETITA PARCIALMENTE ALTERADA PARA GOETITA E HEMATITA (LP 100x). C) CLORITIZAÇÃO (LP 50x). D) DETALHE DA CLORITIZAÇÃO (LP 200x). LP: POLARIZADORES CRUZADOS. ....	165
<b>FIGURA 92</b> - MOSAICO DE FOTOMICROGRAFIAS REFERENTES À AMOSTRA AM 235237. A) RELICTOS DE SERPENTINA COM TEXTURA <i>MESH</i> (LP 200x). B) CROMITA PARCIALMENTE HEMATITIZADA (LR 100x). C) MATRIZ DE ÓXIDO/HIDRÓXIDO DE FE (LP 25x). D) AGREGADO DE QUARTZO COM GOETITA E HEMATITA (LP 200x). LP: POLARIZADORES CRUZADOS. LR: LUZ REFLETIDA. ....	167
<b>FIGURA 93</b> - MOSAICO DE FOTOMICROGRAFIAS REFERENTES À AMOSTRA AM 235231. A) TEXTURA ASBESTIFORME ALTERADA PARA <i>BOXWORK</i> ATRAVÉS DE LIXIVIAÇÃO E SILICIFICAÇÃO (LP 25x). B) DETALHE DA SUBSTITUIÇÃO DE SERPENTINA POR QUARTZO (LP 100x). C) IDEM ANTERIOR COM PRESENÇA DE CROMITA E HEMATITA (LR 100x). D) DETALHE DA CROMITA HEMATITIZADA (LR 200x). E) CLORITA ASSOCIADA COM MAGNETITA (LP 100x). F) IDEM ANTERIOR COM DETALHE A CROMITA HEMATITIZADA ASSOCIADA A CLORITA (LP 100x). LP: POLARIZADORES CRUZADOS. LR: LUZ REFLETIDA. ....	168
<b>FIGURA 94</b> - MOSAICO DE FOTOMICROGRAFIAS REFERENTES À AMOSTRA AM 235170. A) QUARTZO SECUNDÁRIO E GOETITA ASSOCIADA (LN 25x). B) DESTRUIÇÃO TOTAL DO PROTÓLITO SERPENTINÍTICO E ALTA CONCENTRAÇÃO DE GOETITA, HEMATITA E MAGNETITA (LP 25x). C) DETALHE DE QUARTZO SECUNDÁRIO ASSOCIADO COM GOETITA E HEMATITA (LP 100x). D) DETALHE DA CROMITA HEMATITIZADA (LR 100x). LN: LUZ NATURAL. LP: LUZ POLARIZADA. LR: LUZ REFLETIDA. ....	170
<b>FIGURA 95</b> - SUPERPOSIÇÃO DE DIFRATOGRAMAS EM RELAÇÃO AO PERFIL GEOLÓGICO E CONSECUTIVA VARIAÇÃO DE NI DO FURO DE SONDA FJA 373. LEGENDA: SP – SERPENTINA; CR – MAGNETITA\CROMITA\CR-ESPINÉLIO; OL – OLIVINA; HM – HEMATITA; C – CLORITA; QZ – QUARTZO, HT - HIDROTALCITA, K - CAOLINITA. ....	172
<b>FIGURA 96</b> - SUPERPOSIÇÃO DE DIFRATOGRAMAS (FRAÇÃO < 20µM), SEGUNDO A PROFUNDIDADE, DO FURO DE SONDA FJA 373. LEGENDA: SP – SERPENTINA; C – CLORITA; HT – HIDROTALCITA; CR – MAGNETITA\CROMITA\CR-ESPINÉLIO; OL – OLIVINA; HM – HEMATITA; QZ – QUARTZO; GT - GOETITA; K - CAOLINITA. ....	174
<b>FIGURA 97</b> - MOSAICO DE DIFRATOGRAMAS (FRAÇÃO < 2µM) DO FURO DE SONDA FJA 373. LEGENDA: SP – SERPENTINA; K – CAOLINITA; HM – HEMATITA; GT - GOETITA; QZ - QUARTZO.....	176
<b>FIGURA 98</b> - DISTRIBUIÇÃO MINERALÓGICA ESTIMADA A PARTIR DA ANÁLISE MODAL SEMI-QUANTITATIVA POR MEIO DE DRX (CÁLCULO A PARTIR DA INTEGRAÇÃO DAS ÁREAS E DO NÍVEL DE CONTAGEM DOS PICOS IDENTIFICADOS DOS MINERAIS) DO FURO DE SONDA FJA 373. LEGENDA - OL: OLIVINA; CR: MAGNETITA/CROMITA/CROMO-ESPINÉLIO; SP: SERPENTINA; C: CLORITA; HT: HIDROTALCITA; HM: HEMATITA; GT: GOETITA; K: CAOLINITA; QZ: QUARTZO.....	177
<b>FIGURA 99</b> - IMAGEM EM ELETRONS RETROESPALHADOS DA SEÇÃO ANALISADA E RESULTADOS SEMI-QUANTITATIVOS OBTIDOS EM RELACÃO A CONCENTRAÇÃO DE NÍQUEL. ....	178
<b>FIGURA 100</b> - IMAGEM EM ELETRONS RETROESPALHADOS DA SEÇÃO ANALISADA E RESULTADOS SEMI-QUANTITATIVOS OBTIDOS EM RELACÃO A CONCENTRAÇÃO DE MAGNÉSIO. ....	179
<b>FIGURA 101</b> - IMAGEM EM ELETRONS RETROESPALHADOS DA SEÇÃO ANALISADA E RESULTADOS SEMI-QUANTITATIVOS OBTIDOS EM RELACÃO A CONCENTRAÇÃO DE SÍLICA. ....	180
<b>FIGURA 102</b> - IMAGEM EM ELETRONS RETROESPALHADOS DA SEÇÃO ANALISADA E RESULTADOS SEMI-QUANTITATIVOS OBTIDOS EM RELACÃO A CONCENTRAÇÃO DE FERRO. ....	181
<b>FIGURA 103</b> - MODELO DE EVOLUÇÃO GEOMORFOLÓGICA DO DEPÓSITO DO JACARÉ (1ª INVERSÃO DE RELEVO). ....	183
<b>FIGURA 104</b> - MODELO DE EVOLUÇÃO GEOMORFOLÓGICA DO DEPÓSITO DO JACARÉ (2ª INVERSÃO DE RELEVO). ....	185

---

**Sumário**

<b><i>Dedicatória</i></b> .....	<b><i>III</i></b>
<b><i>Agradecimentos</i></b> .....	<b><i>VI</i></b>
<b><i>Epígrafe</i></b> .....	<b><i>V</i></b>
<b><i>Resumo</i></b> .....	<b><i>VI</i></b>
<b><i>Abstract</i></b> .....	<b><i>VIII</i></b>
<b><i>Lista de Figuras</i></b> .....	<b><i>X</i></b>
<b><i>1 Introdução</i></b> .....	<b><i>17</i></b>
1.1 <i>Rochas Ultramáficas</i> .....	<i>18</i>
1.2 <i>Serpentinização</i> .....	<i>20</i>
1.3 <i>Intemperismo</i> .....	<i>23</i>
1.4 <i>Laterização de rochas ultramáficas</i> .....	<i>26</i>
1.5 <i>Perfil Laterítico</i> .....	<i>32</i>
1.6 <i>Classificação dos depósitos de Ni laterítico</i> .....	<i>35</i>
1.7 <i>Controles na Mineralização</i> .....	<i>39</i>
1.8 <i>Importância Econômica</i> .....	<i>40</i>
1.9 <i>Processo Metalúrgico</i> .....	<i>45</i>
1.9.1 <i>Processo Pirometalúrgico</i> .....	<i>46</i>
1.9.2 <i>Processo Hidrometalúrgico</i> .....	<i>47</i>
1.9.2.1 <i>Processo Caron</i> .....	<i>47</i>
1.9.2.2 <i>Processo HPAL</i> .....	<i>47</i>
<b><i>2 Localização e Histórico</i></b> .....	<b><i>48</i></b>
<b><i>3 Contexto Geológico</i></b> .....	<b><i>50</i></b>
3.1 <i>Geologia Regional de Carajás</i> .....	<i>50</i>
3.2 <i>Estruturas e Tectônica Regional</i> .....	<i>52</i>
3.3 <i>Geologia Local do Depósito do Jacaré</i> .....	<i>55</i>
3.3.1 <i>Geologia Estrutural do Depósito do Jacaré</i> .....	<i>58</i>
3.3.2 <i>Perfil de Alteração do Depósito do Jacaré</i> .....	<i>63</i>

---

<b>4</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>65</b>
<b>5</b>	<b>Metodologia .....</b>	<b>66</b>
5.1	<i>Preparação de Amostras.....</i>	<i>66</i>
5.2	<i>Análise Química.....</i>	<i>68</i>
5.3	<i>Petrografia Ótica.....</i>	<i>69</i>
5.4	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura.....</i>	<i>70</i>
5.5	<i>Análise por Difratomia de Raios-X: Preparação das amostras e separação das frações .....</i>	<i>75</i>
5.6	<i>Análise por Difratomia de Raios-X.....</i>	<i>76</i>
5.7	<i>Balanço de Massa.....</i>	<i>77</i>
<b>6</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>78</b>
6.1	<i>Furo FJA 146.....</i>	<i>79</i>
6.1.1	<i>Geomorfologia e Descrição .....</i>	<i>79</i>
6.1.2	<i>Análises Químicas .....</i>	<i>81</i>
6.1.3	<i>Balanço de Massa .....</i>	<i>84</i>
6.1.4	<i>Petrografia Ótica.....</i>	<i>86</i>
6.1.4.1	<i>AM 183836.....</i>	<i>86</i>
6.1.4.2	<i>AM 183819.....</i>	<i>89</i>
6.1.5	<i>Difração de Raios X.....</i>	<i>92</i>
6.2	<i>Furo FJA 245.....</i>	<i>97</i>
6.2.1	<i>Geomorfologia e Descrição .....</i>	<i>97</i>
6.2.2	<i>Análise Química .....</i>	<i>100</i>
6.2.3	<i>Balanço de Massa .....</i>	<i>102</i>
6.2.4	<i>Petrografia Ótica.....</i>	<i>104</i>
6.2.4.1	<i>AM 201204.....</i>	<i>104</i>
6.2.4.2	<i>AM 201181.....</i>	<i>108</i>
6.2.5	<i>Difração de Raios X.....</i>	<i>111</i>
6.3	<i>Furo FJA 255.....</i>	<i>115</i>
6.3.1	<i>Geomorfologia e Descrição .....</i>	<i>115</i>
6.3.2	<i>Análise Química .....</i>	<i>118</i>
6.3.3	<i>Balanço de Massa .....</i>	<i>121</i>
6.3.4	<i>Petrografia Ótica.....</i>	<i>124</i>
6.3.4.1	<i>AM 201376.....</i>	<i>124</i>
6.3.4.2	<i>AM 201345.....</i>	<i>127</i>
6.3.5	<i>Difração de Raios X.....</i>	<i>129</i>

---

6.4	<i>Furo FJA 337</i> .....	133
6.4.1	Geomorfologia e Descrição .....	133
6.4.2	Análise Química .....	136
6.4.3	Balanço de Massa .....	139
6.4.4	Petrografia Ótica.....	142
6.4.4.1	AM 205187 .....	142
6.4.4.2	AM 205183 .....	144
6.4.4.3	AM 205147 .....	146
6.4.5	Difração de Raios X.....	148
6.5	<i>Furo FJA 373</i> .....	153
6.5.1	Geomorfologia e Descrição .....	153
6.5.2	Análise Química .....	156
6.5.3	Balanço de Massa .....	159
6.5.4	Petrografia Ótica.....	162
6.5.4.1	AM 235248 .....	162
6.5.4.2	AM 235239 .....	165
6.5.4.3	AM 235237 .....	166
6.5.4.4	AM 235231 .....	168
6.5.4.5	AM 235170 .....	169
6.5.5	Difração de Raios X.....	171
6.5.6	Microscopia Eletrônica de Varredura .....	177
6.5.7	Microsonda Eletrônica .....	181
<b>7</b>	<b><i>Discussão e Conclusões.</i></b> .....	<b>182</b>
7.1	<i>Evolução Geomorfológica e Geodinâmica</i> .....	182
7.2	<i>Evolução Mineralógica e Geoquímica</i> .....	186
<b>8</b>	<b><i>Bibliografia</i></b> .....	<b>190</b>
<b>ANEXO I - ANÁLISES QUÍMICAS</b> .....		<b>196</b>
<b>ANEXO II - PETROGRAFIA ÓPTICA</b> .....		<b>200</b>

### **Sobre a Estrutura da Dissertação:**

Esta dissertação de Mestrado está estruturada em forma de uma monografia convencional. Sua organização compreende as seguintes partes principais:

- a) Introdução, localização e histórico, contexto geológico, objetivos e metodologia utilizada.
- b) Corpo principal: Resultados obtidos, discussão e conclusões.
- c) Anexos: compreende documentação pertinente de natureza numérica (tabelas), gráfica (figuras, mapas) e fotográfica que, por sua dimensão e/ou natureza não pôde ser incluída no corpo principal da dissertação.

## 1 Introdução

O depósito de classe mundial de Níquel laterítico e saprolítico do Jacaré (495Mt @ 1,19% Ni) ([www.mining.com](http://www.mining.com)) situa-se na porção extremo oeste do distrito mineiro de Carajás no estado do Pará – Brasil. A área foi identificada na década de setenta como um alvo promissor, apresentando fortes anomalias de níquel, porém, logo foi abandonada. Foi requerida pela Anglo American Brasil Ltda em 2000 e, desde então, vem passando por estágios progressivos de exploração (Carlson *et al.* 2006).

O Depósito do Jacaré consiste numa serra de nome homônimo, composta de rochas máfico-ultramáficas serpentinizadas, tendo 18 Km de comprimento N-S e 2,5 Km de largura E-W aproximadamente.

Os trabalhos de exploração na área identificaram três tipos de minério niquelífero distintos mineralogicamente e quimicamente, sendo denominados de saprolito, laterita ferruginosa e laterita silicosa, todos originados a partir do processo de alteração supergênica do complexo máfico-ultramáfico do Jacaré.

A mineralização é encontrada em toda a área que conforma o corpo do Jacaré, apresentando teores de Ni distribuídos de forma heterogênea no depósito, através dos diversos tipos de minério.

As características que distinguem os dois tipos de minério laterítico do minério saprolítico, igualmente indicam rotas metalúrgicas distintas para ambos os grupos, de tal sorte que o minério saprolítico apresenta características para uma rota pirometalúrgica, enquanto as lateritas silicosa e ferruginosa respeitam uma rota hidrometalúrgica para extração do Ni. Tal distinção influi diretamente na avaliação, cubagem, extração, beneficiamento e produção do minério.

A rota hidrometalúrgica é baseada em processo de lixiviação por ácido sulfúrico e hidróxido de amônia, usado para extrair níquel e cobalto a partir de lateritas com baixo teor de magnésio, representado pelo denominado minério limonítico. A rota pirometalúrgica, por sua vez, é usada para silicatos enriquecidos em magnésio, normalmente representados pela porção saprolítica do perfil de alteração (Elias, 2004).



A real compreensão da geração e evolução do depósito mineral em questão permanece desconhecida, bem como os principais controles na distribuição dos teores de níquel. Compreender estas questões se torna de vital importância no que tange cubagem, lavra, beneficiamento e processamento metalúrgico do minério laterítico. Desta forma, este trabalho apresenta novos avanços científicos no entendimento destas questões e contribui para a definição dos principais processos que controlaram a concentração do níquel neste sistema.

### 1.1 Rochas Ultramáficas

Rochas ultramáficas são definidas como aquelas compostas essencialmente por minerais máficos como olivina, clinopiroxênio, ortopiroxênio, anfibólio, biotita e serpentina (Wyllie, 1967). O termo ultramáfico é igualmente empregado para rochas que possuem índice de coloração ( $M'$ ) acima de 90 (Streckeisen, 1973, 1976, Le Maitre *et al.*, 1989).

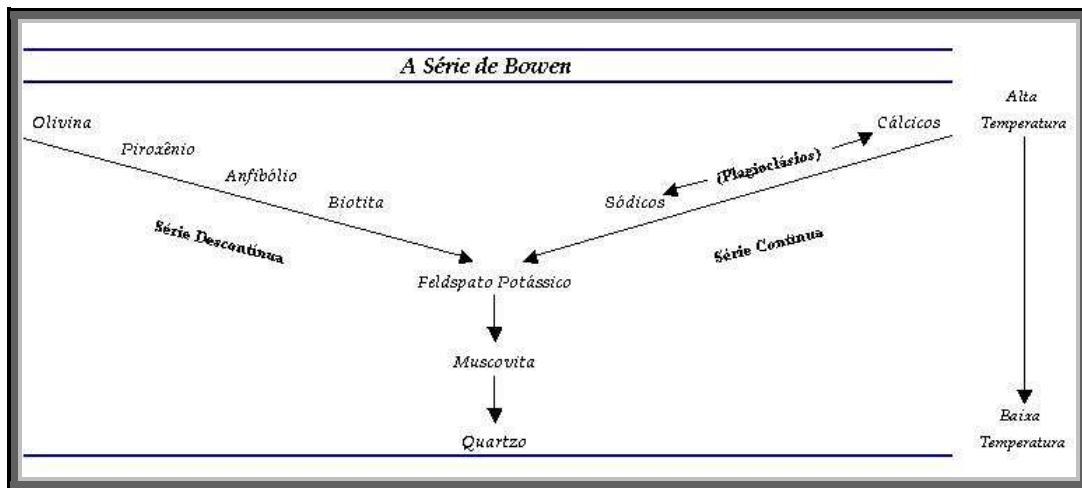
A presença de plagioclásio na assembléia dos minerais máficos garante rochas máficas relacionadas às séries cálcico-alcálicas

O manto da terra é composto predominantemente de rochas ultramáficas. O manto está, com exceção de pequenas regiões anômalas, no estado sólido. As rochas ultramáficas passam por contínuo processo de recristalização em função de convecção em larga escala do manto sub-litosférico como resultado de processos tectônicos na litosfera.

A maioria das rochas ultramáficas encontradas na crosta terrestre e superfície foi implantada tectonicamente durante atividades orogênicas. Estes fragmentos mantélicos na crosta são também conhecidos como modelo Tipo-Alpino, dentre ele, os ofiolitos. Rochas ultramáficas de origem ígnea ocorrem na crosta terrestre, contudo, são raras. A grande maioria das rochas ultramáficas na crosta são formadas por processo de cristalização fracionada junto à câmara magmática, a partir de magmas básicos (gabróico, basáltico) (Bucher, 1946), podendo gerar corpos do Tipo-Acamadado.

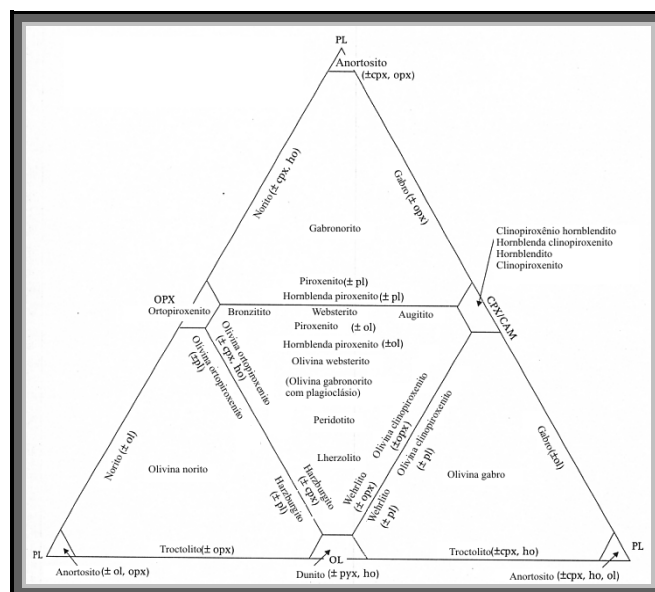
O processo de fracionamento magmático foi descrito, primeiramente, por Bowen em 1915 (Wager, 1968), através de experimentos em que material fundido era

mantido sob diferentes temperaturas durante um longo período de tempo, de tal sorte que pequenos cristais iniciavam sua cristalização. A **Figura 01** abaixo demonstra as séries de cristalização definidas inicialmente por Bowen.



**Figura 01** - Série de cristalização

Genericamente, as rochas ultramáficas são divididas em peridotitos, piroxenitos e hornblenditos os quais, por sua vez, apresentam membros diversos de acordo com a paragénese encontrada (**FIG. 02**).



**Figura 02:** Classificação de rochas máfico-ultramáficas baseada em Streckeisen, 1973 e Le Maitre, 1989 in Hibbard, M.J. 1995. (fonte: [www.unb.com.br/ig](http://www.unb.com.br/ig))

Os peridotitos são rochas ricas em olivina com presença de piroxênios, mas com muito pouco ou nenhum feldspato. Os peridotitos ricos em piroxênio são chamados de wherlito, harzburgito e lherzolito. Peridotitos com mais de 90% de olivina são denominados de dunitos (**FIG. 02**).

Piroxenitos são rochas ultramáficas com alta concentração de piroxênio, podendo contar com muito pouca ou nenhuma olivina. Podem ser classificados como clinopiroxenitos, ortopiroxenitos ou websteritos, no caso de haver contribuição de ambos os piroxênios.

A partir do momento em que cristalizou olivina, formando dunitos, piroxênios, formando peridotitos e consecutivamente piroxenitos, inicia a cristalização de plagioclásio, tornando o magma com caráter mais cálcico. Neste instante, inicia a cristalização dos gabros e noritos, culminando com a cristalização exclusiva de plagioclásio, gerando, assim, os anortositos (**FIG.02**).

Esta série de cristalização conceitual compõe a base de entendimento dos chamados complexos acamadados, e tem sua importância não somente pelo entendimento estratigráfico de evolução de uma câmara magmática, mas, principalmente, pela avaliação de depósitos minerais em determinados horizontes.

## 1.2 Serpentinização

A serpentinização é definida como o processo de hidratação de rochas ultramáficas para formar parcial ou totalmente, rochas serpentinizadas (Moody, 1976).

Os complexos ultramáficos são compostos, em sua grande maioria, por dunitos, harzburgitos e lherzolitos (Coleman, 1971), que, quando serpentinizados, apresentam uma alteração mineralógica em baixas pressões e temperatura segundo a ordem: olivina > ortopiroxênio > clinopiroxênio (Wicks *apud* Mody, 1976), provavelmente refletindo diferentes graus de alteração dos minerais em ambientes de baixas pressões e temperatura.

Os equivalentes hidratados das rochas ultramáficas apresentam a seguinte assembléia: lizardita > crisotilo, brucita e magnetita. Segundo Whittaker e Wicks (1970),

lizardita, crisotilo e paracrisotilo são constituintes polimorfos, diferentemente da antigorita, a qual possui pequenas variações composicionais na fórmula química ideal, resultando em alterações na sua estrutura.

A brucita tem importante papel na petrografia de serpentinitos, visto que ela representa uma baixa temperatura de serpentinização. Outro importante papel petrológico é que a brucita altera facilmente para hidromagnesita, piroaurita e coalingita durante o processo de alteração (Hostetler *et al*, 1966), contudo, ela não aparece em serpentinitos ricos em piroxênio.

Segundo Moody (1976 *op. Cit*) tanto lizardita, quanto crisotilo e antigorita apresentam pequenas variações composicionais constantes, tais como:

1. antigorita apresenta alta SiO<sub>2</sub> e baixos MgO e H<sub>2</sub>O.
2. Crisotilo tem baixo Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
3. Lizardita tem grande quantidade de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e relativo baixo conteúdo de FeO;
4. Lizardita e crisotilo contêm H<sub>2</sub>O em excesso;
5. Antigorita apresenta a maior relação FeO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + FeO + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, enquanto lizardita apresenta a menor.

O processo de serpentinização é compreendido de forma parcial, visto que as assembléias mineralógicas desenvolvidas durante o evento são diretamente proporcionais à pressão e temperatura impostas ao sistema, bem como a quantidade total de água envolvida e atividade tectônica.

O aumento do volume durante a serpentinização deve agir no intuito de facilitar a intrusão do serpentinito ao longo de zonas de fraquezas estruturais. A mudança na composição química implica na abertura do sistema com troca livre entre o fluido e a rocha ultramáfica no processo de serpentinização.

Neste sentido, a ausência de cisalhamento e temperatura constante promove a formação de texturas pseudomórficas de serpentina. As texturas são modificadas a partir de rupturas por processos de cisalhamento, gerando texturas não pseudomórficas e geração de veios, a partir de um aumento de temperatura (Wicks, 1977).

Um possível modelo de serpentinização demonstrado por Wicks, 1977 (*op. Cit.*) é distribuído em processos, como segue sumarizado abaixo:

1. A serpentinização começa na maior temperatura possível e gera texturas pseudomórficas da antigorita. Veios preenchidos por antigorita serão desenvolvidos;
2. A temperatura diminui e gera texturas pseudomórficas de lizardita ou lizardita±brucita. Crisotilo não ocorre normalmente, a não ser preenchendo veios;
3. Como o anterior, mas produzindo texturas foliadas não-pseudomórficas de crisotilo±brucita, com ou sem lizardita, e veios de crisotilo±lizardita±brucita;
4. O aumento da temperatura gera a recristalização de lizardita±brucita, ou a serpentinização de relictos de minerais primários para formar texturas não-pseudomórficas de crisotilo±lizardita±brucita com veios associados de mineralogia similar;
5. A subida contínua de temperatura gera a recristalização das serpentinas da etapa 2 (acima), ou a serpentinização de minerais primários previamente não serpentinizados, gerando texturas pseudomórficas de antigorita+brucita e, ocasionalmente, antigorita.

A serpentinização, por se tratar de um processo de hidratação da rocha, gera uma expansão na mesma, aumentando o volume entre 25% e 45% para uma serpentinização completa (Wicks, 1977 *op. Cit*), o que torna o serpentinito uma rocha extremamente fraturada e facilmente cisalhável.

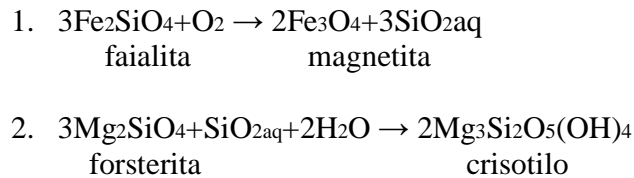
O ferro contido na olivina é redistribuído durante a serpentinização, entrando na estrutura dos minerais de serpentina ou brucita, ou separando fases opacas, tais como magnetita, awaruita, pentlandita, ferrocromita e outros (Moody, 1976).

A geração da magnetita reflete diretamente o aumento da temperatura em baixa fugacidade de oxigênio, visto que em temperaturas mais baixas, o ferro disposto no sistema acaba por entrar na estrutura da brucita e lizardita, não gerando magnetita.

De forma geral, o ambiente gerado durante o processo de serpentinização é de caráter redutor devido, principalmente, à presença de Fe nativo e Ni<sub>3</sub>Fe (awaruita) nas serpentinas formadas pela alteração das rochas ultramáficas, assim como as assembléias Fe-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ou Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Ni<sub>3</sub>Fe, definindo um ambiente deficiente em oxigênio.

A presença de ferro nas rochas ultramáficas gera serpentinas extremamente enriquecidas neste elemento, porém, são incapazes de acomodar todo o ferro presente nas

olivinas e ortopiroxênios (Bucher & Frey, 1994). A reação descrita abaixo contempla a serpentinização de olivinas enriquecidas em Fe (tipicamente olivinas Fo<sub>90</sub>Fa<sub>10</sub>).



A reação 1 representa a oxidação do componente faialítico para magnetita e deixa SiO<sub>2</sub> no sistema, o qual, por sua vez, é consumido na reação 2 para formar serpentina a partir do componente forsterítico. Em função das rochas enriquecidas em olivina mantélica conterem muito mais forsterita do que faialita, todo SiO<sub>2</sub> liberado pela reação 1 será consumido na reação 2. O equilíbrio da reação depende da pressão de oxigênio no fluido (Bucher, 1946, *op. cit.*).

### 1.3 Intemperismo

Saprolitos e lateritas são produtos de alteração intempérica física e química, a partir de qualquer tipo de protólito, uma vez que este tenha sido submetido as condições reinantes na superfície terrestre por longo período de tempo (Dalvi, 2004). A figura 1.3 – 01 demonstra as zonações climáticas do globo terrestre.

Intemperismo é, essencialmente, um processo complexo que compreende a desagregação física e decomposição química e biológica de rochas e minerais, transformando a estrutura complexa de minerais em outras mais simples (Formoso 2006). A mudança na composição e resistência dos minerais das rochas por processos físicos, químicos e biológicos se dá sob influência da atmosfera e precipitação.

Um clima tropical úmido gera a mais favorável condição para este desequilíbrio, a qual é acelerada pelas temperaturas mais elevadas, abundância de chuvas, matéria orgânica e organismos para retrabalhar a terra. Assim, ácidos orgânicos são adicionados aos ácidos carbônicos atmosféricos, além dos ácidos resultantes da oxidação

dos minerais e sulfetos da rocha original. Como resultado da sazonalidade das chuvas, o nível da água subterrânea varia o que gera condições alternadas de oxidação e redução (FIG. 03 e 04).

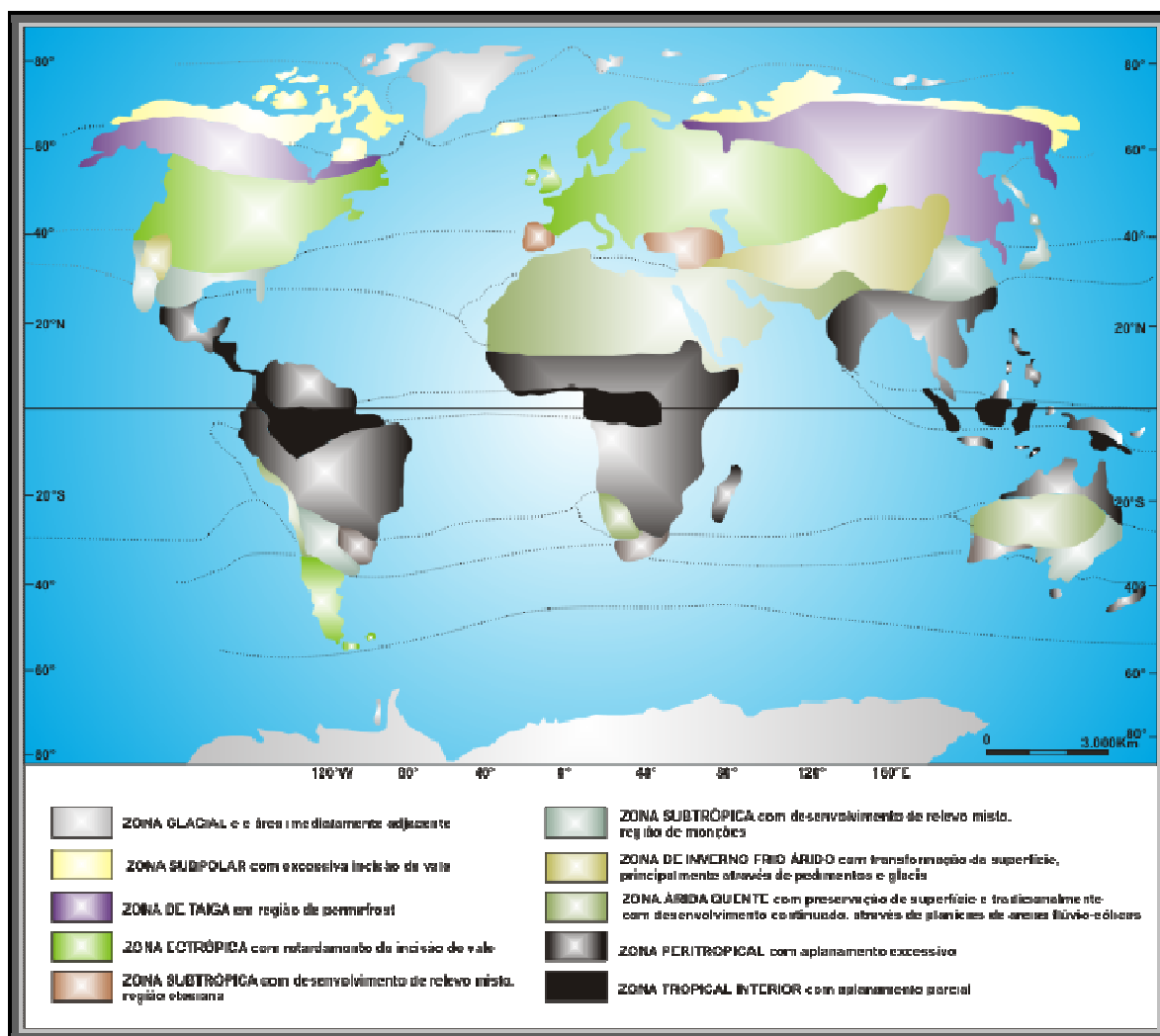
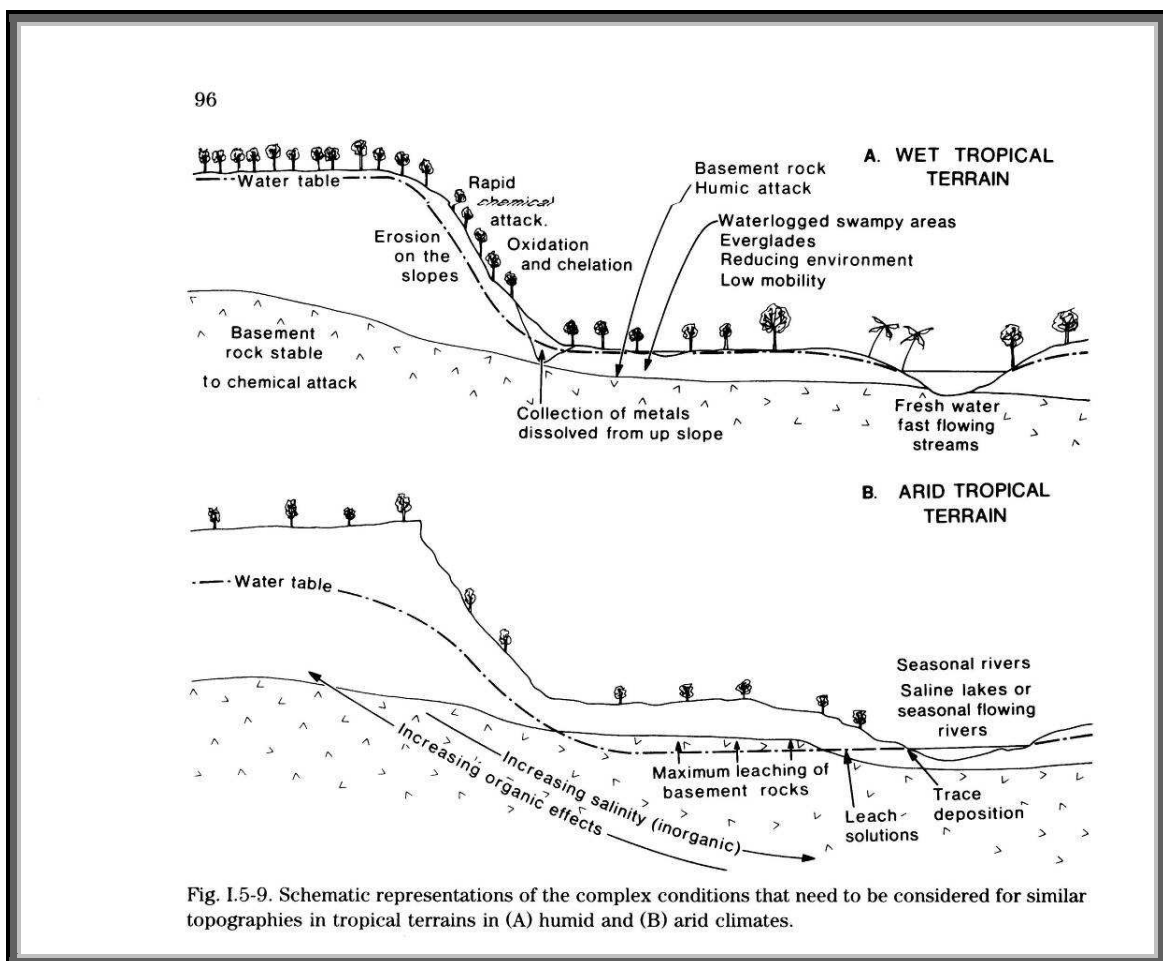


Figura 03 - Distribuição geográfica das zonas morfoclimáticas atuais (modificado de Buedel, 1982) e sua relação com as formações lateríticas antigas (dominantemente cenozóicas) e atuais.

Schellmann, citado por Alleve (1994, p. 13) defende que uma distinção deve ser feita entre um material altamente alterado (lateritas) e um com grau de alteração menor (saprolitos) através de reações químico – mineralógicas, as quais caracterizam esta variação no grau de alteração

### 1. Caolinização de minerais enriquecidos em Al-Si

2. Formação de óxidos de Fe a partir de minerais ricos em Fe
3. Formação de hidróxidos de Al por solução incongruente de minerais caoliníticos
4. Dissolução congruente de minerais caoliníticos
5. Dissolução do quartzo



**Figura 04** - Representação esquemática dos diferentes processos intempéricos em situação topográfica semelhante, porém sob diferentes climas (A) úmido e (B) árido (Modificado de Butt & Zeegers, 1992. .96.).

As reações 1, 2, 3 e 5 causam enriquecimento de ferro e alumínio no resíduo alterado; a reação 4 aumenta o conteúdo de ferro. Assim, as lateritas são compostas, normalmente, por uma mistura de goetita, hematita, hidróxidos de Al, caolinita e quartzo.



Especial atenção deve ser dada as lateritas derivadas de rochas ultramáficas, as quais são, algumas vezes, contaminadas por sílica secundária (quartzo e calcedônia), o que pode aumentar a porcentagem de SiO<sub>2</sub> acima da média normal esperada para lateritas, levando determinadas amostras a serem locadas no campo dos saprolitos. Contudo, estas amostras não são saprolitos, e sim, lateritas contaminadas por sílica secundária (Schellmann *apud* Alleva, 1994, p. 14).

O processo intempérico faz com que os silicatos primários das rochas ultramáficas sejam rapidamente alterados, transformando o material num saprolito grosseiro. A olivina e o ortopiroxênio consistem nos primeiros minerais a serem hidrolisados, liberando sílica no sistema, o qual irá formar sílica gel e gel férrico. A serpentina resiste por mais tempo ao intemperismo, em relação aos demais, contudo, segue processo similar à olivina. Todas estas fases encontram-se na zona saprolítica. Hidróxidos de manganês precipitam na forma de concreções de asbolano nesta mesma zona, podendo conter teores variáveis de Ni na sua estrutura (Trescases, 1975).

Na zona saprolítica encontra-se, ainda, quartzo e silicatos níquelíferos (talco, “garnierita”), principalmente preenchendo planos de fratura. A medida que o perfil de alteração migra em direção ao topo, o gel férrico cristaliza na forma de goetita, além de outros polimorfos de óxidos e hidróxidos de ferro (Trescases, 1975).

#### 1.4 Laterização de rochas ultramáficas

O processo de laterização se dá pelo intemperismo sofrido pelas rochas, principalmente através da sazonalidade climática úmida por determinado período de tempo.

A água apresenta papel decisivo no processo intempérico, não somente por se tratar do agente de lixiviação da mineralogia primária, mas também como fornecedora de íons e elétrons para o sistema, de tal sorte que a mineralogia secundária estará diretamente vinculada ao ambiente.

Assim, o processo de laterização envolve a ruptura da mineralogia primária, levando seus constituintes a serem distribuídos pelo perfil de alteração de acordo com a variação do lençol freático e intensidade de circulação da água meteórica, lixiviando os

elementos mais móveis e, consecutivamente, concentrando residualmente os elementos pouco móveis. Toda a mineralogia secundária (óxidos, hidróxidos, argilominerais e agregados) será gerada em função da nova condição ambiental ao qual o perfil está submetido.

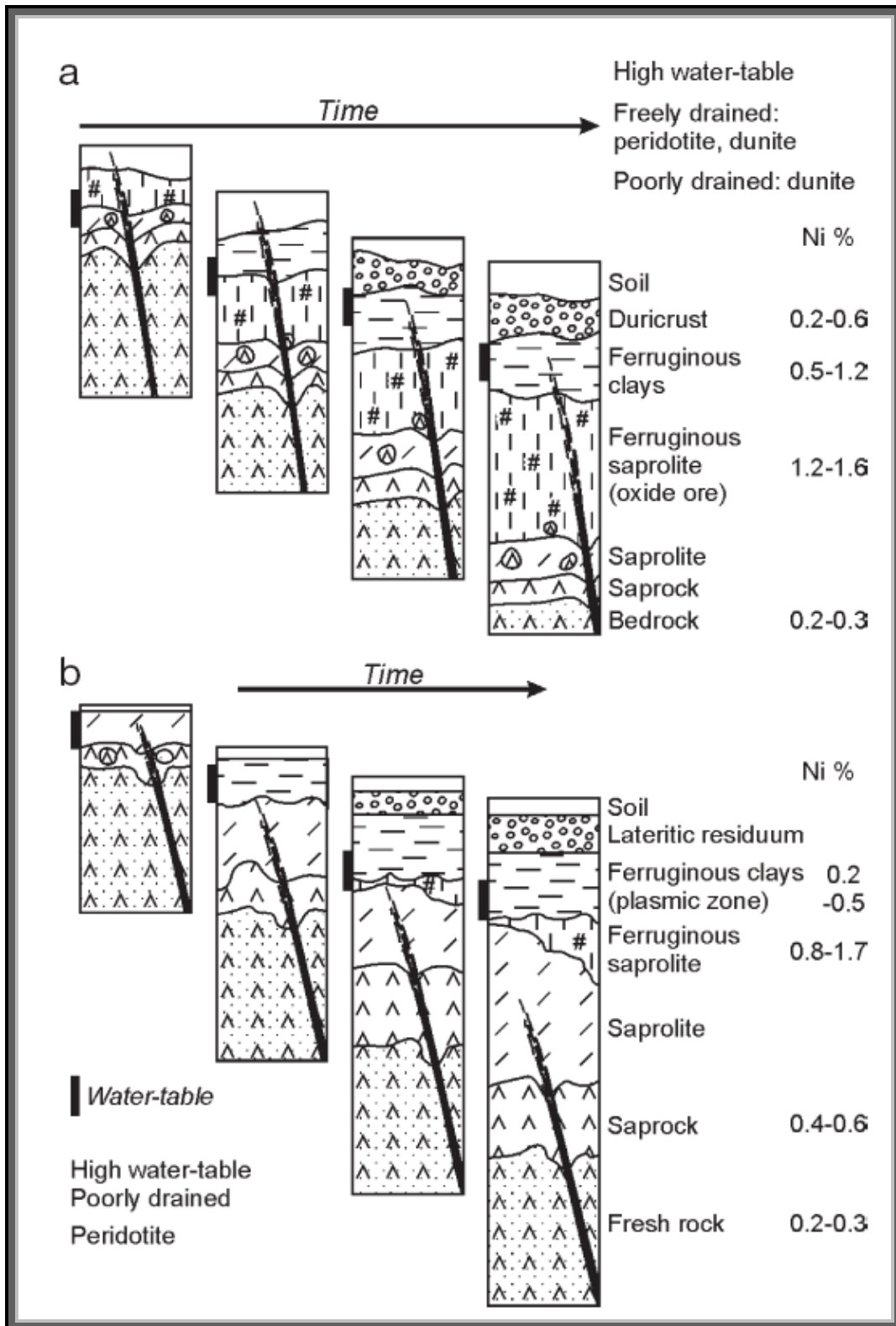
Segundo D'Hoore (1954) a acumulação de elementos como Ni, Fe, Al, Cr, etc se dá através de duas maneiras distintas. A primeira forma de acumulação é o enriquecimento relativo, onde certos elementos predominam no perfil devido à retirada dos demais constituintes químicos (lixiviação). A segunda forma se dá pela adição de elementos químicos derivados de outras porções do regolito, processo este denominado de enriquecimento absoluto. Na natureza, contudo, os citados processos podem ocorrer concomitantemente, de tal sorte que a distinção entre ambos é difícil e, em alguns locais, impossível (Aleva, 1994).

A laterização é definida como um processo gradual, dinâmico e cíclico, onde a base do perfil de alteração será a menos alterada e, à medida que subimos no perfil em direção ao topo, o material vai apresentando características mais marcantes de alterita, até alcançar os avançados estágios de laterização no topo da seqüência (**FIG. 05**).

Os perfis de alteração desenvolvem-se em conseqüência de tipos climáticos com intemperismo químico intenso, onde o processo de argilização e geração de óxidos e hidróxidos se dão de forma constante. Outros fatores são igualmente importantes para a geração de lateritas, tais como geomorfologia, estruturas, regime hídrico, etc.

A alternância nas estações secas e úmidas, sob temperaturas altas, favorece o intemperismo de rochas ultramáficas como dunitos e peridotitos (ricos em olivinas) e a acumulação do níquel (presente na rocha subjacente, estrutura cristalina das olivinas e serpentinas, associado a outros elementos como Mg, Fe e Co) no perfil de alteração. A menor mobilidade do Ni favorece a geração de depósitos lateríticos de níquel.

O processo intempérico é otimizado, proeminentemente, nas rochas fraturadas ou falhadas (devido à maior permeabilidade), formando depressões e pináculo na interface entre a rocha fresca e a rocha intemperizada. Estas depressões constituem “traps” para a precipitação e acumulação de níquel dissolvido, podendo, inclusive neoformar minerais estáveis na nova condição supergênica.



**Figura 05** - Formação direta de depósitos oxidados (a) e silicados (b) em climas úmidos de savana e tropical, com relevo moderado a baixo. Modificado de Freyssinet *et al.* 2005.

A olivina, é bastante instável e facilmente se decompõe sob condições supergênicas, devido à sua estrutura cristalina e o seu alto conteúdo em magnésio e ferro (é o primeiro mineral a se formar na série de cristalização de Bowen). O processo de intemperismo provoca o colapso da estrutura cristalina das olivinas remanescentes e serpentinas associadas, conseqüentemente, liberando todos os elementos químicos que participam de seu retículo cristalino ao sistema.

A partir da integração dos elementos químicos, oriundos da mineralogia primária, no sistema, as condições físico-químicas do meio (especialmente pH e Eh) determinarão a maior ou menor mobilidade dos elementos no perfil de alteração em função das condições de redução-oxidação e, conseqüentemente, promoverão uma redistribuição desses, agora no perfil de laterização que se desenvolve sobre o pacote de rochas ultramáficas.

Parte do ferro, quando na forma  $Fe^{2+}$ , liberado em solução é perdido (incorporando-se ao lençol freático) e a maior parte é precipitado na forma de óxidos e hidróxidos (goethita e hematita) no perfil de laterização formando, normalmente, carapaças ferruginosas .

Em períodos mais úmidos e saturados , ocorre a redução do ferro ( $Fe^3 + e^- \rightarrow Fe^2$ ), que migra para cima, até alcançar o nível aerado. Em períodos de menor umidade, sem saturação, a aeração provoca a oxidação do Ferro:  $Fe^2 - e^- \rightarrow Fe^3$ , que determina sua precipitação como hidróxido de Fe. O mecanismo simplificado acima gera a separação dos constituintes de Fe dos argilominerais, formando níveis heterogêneos de zonas altamente enriquecidas em ferro, de outras empobrecidas no mesmo elemento (Mello, 2007).

Outra espécie química importante liberada para soluções no processo de laterização das rochas ultramáficas e serpentinitos é a sílica oriunda da olivina e serpentina, a qual ocorre geralmente fina e granular, ou como preenchimento de finas fraturas e substituindo a própria serpentina. Estes minerais, como calcedônia e opala, são tipicamente observados nos depósitos de Ni laterítico (*e.g.* Barro Alto) e, normalmente, ocupam setores intermediários do perfil de alteração logo abaixo da crosta laterítica superior.

Nas zonas intermediárias do perfil de alteração é característica a presença de uma zona saprolítica que hospeda as maiores concentrações de níquel em produtos intermediários de alteração.

O saprolito localiza-se logo acima da rocha fresca e imediatamente abaixo das zonas ferruginosas e/ou silicosas. Frequentemente incorpora blocos de serpentinito fresco ou semi-intemperizado da base da mineralização. Da base para o topo, os minerais de serpentina são gradualmente mais intemperizados e apresentam-se com conteúdo de magnésio menos acentuado.

O níquel, que normalmente constitui 0,2% a 0,5% do conteúdo químico dos serpentinitos frescos é liberado durante os processos de intemperismo e, se não há nenhuma *trap* geoquímica, também é lixiviado para fora do sistema e perdido, juntamente com o magnésio.

No horizonte saprolítico do sistema, o níquel pode se concentrar como “garnierita”<sup>1</sup> em fraturas ou mesmo junto à foliação da rocha hidratada.

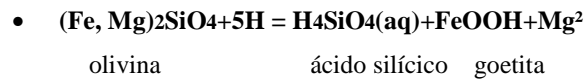
O manganês, lixiviado a partir de olivinas, piroxênios e outros produtos metamórficos precipitam como óxidos de Mn, sendo comum a sua concentração em determinados horizontes. Tipicamente este óxido concentra-se na interface entre unidades do regolito (Llorca, 1993 *apud* Brand *et al*, 1998). Altas condições de Eh prevalecem nestes horizontes, o que faz com que o óxido de Mn precipite conjuntamente com Ni, Co e outros elementos (Butt, 1979). Em certas circunstâncias, a alta concentração de óxido de Mn pode precipitar, formando pequenos, mas importantes depósitos de Mn-Co-Ni, como os de Ora Banda-Siberia no oeste australiano (Elias *et al*. 1981 *apud* Brand *et. al.*, 1998).

A evolução geoquímica de um perfil de alteração niquelífero pode ser descrita simplificadamente da seguinte forma, segundo Freyssinet *et al.*, 2005:

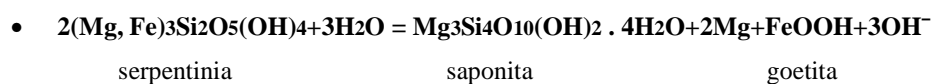
O processo de alteração das rochas ultramáficas (dunitos e peridotitos principalmente) tem início através da hidrólise das olivinas, através da lixiviação do Mg e Si (menos), formando óxidos de Fe e esmectitas, como na equação abaixo.

---

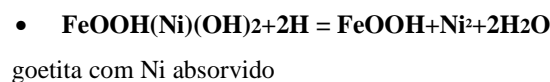
<sup>1</sup> Garnierita: Nome genérico dado a uma mistura de silicatos enriquecidos em Mg e Ni com espaçamento cristalino entre 10Å e 7Å (Brindley, 1978 *apud* Melfi *et al*. 1988).



Uma vez que estes minerais estão alterados, o processo começa a afetar a mineralogia menos susceptível. Piroxênios e serpentinas têm as suas estruturas cristalinas quebradas, formando minerais secundários como esmectitas férricas e óxidos, como exemplificado na equação abaixo.

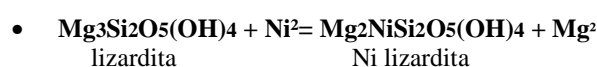


O níquel deve ser oriundo do silicato, mas, devido à sua não elevada mobilidade geoquímica, ele acaba sendo transportado minimamente, de tal sorte que culmina precipitando junto aos espaços originados na estrutura cristalina das goetitas (FeOOH). Através do continuado processo intempérico, as esmectitas devem ser hidrolisadas, gerando uma descontinuidade de magnésio (Oldfield, 2007).



A partir deste momento a fábrica original da rocha apresenta-se praticamente destruída, com mais de 70% do material original alterado (Brand & Butt, 2001). O processo contínuo de alteração dos óxidos de ferro acarreta na dissolução e reprecipitação, lixiviando Ni, o qual reage com outros produtos de alteração, formando “garnieritas” e outros silicatos magnesianos hidratados secundários. (Brand *et al.*, *op.cit* 1998).

Os óxidos de manganês igualmente passam a concentrar na porção inferior da zona oxidada, coprecipitando Ni e Co. O Ni liberado também substitui o Mg na serpentina para formar uma serpentina parcialmente alterada enriquecida em Ni, a qual é a portadora de mineralização em diversos depósitos no mundo (Golightly, 1979a; Pelletier, 1996 in Freyssinet *et al.* 2005).



## 1.5 Perfil Laterítico

O perfil de alteração demonstrado na **figura - 06** e, sucintamente descrito acima, foi proposto por Aleva em 1994 e consiste, num modelo idealizado, não sendo, assim, a real situação em diversos depósitos minerais como se verá adiante com os resultados obtidos nas análises do Depósito do Jacaré.

O perfil de alteração é composto por material autóctono, alóctono ou uma mistura de ambos. A generalização do material que compõe este perfil de alteração é denominada de regolito (Merrill, 1887).

O material alóctono é caracterizado por produtos de alteração, erosão e denudação de áreas topograficamente elevadas, aos quais, após transporte, são depositados pela ação fluvial, coluvial e eólica (Aleva, 1994).

As fácies autóctonas de um regolito são representadas pela alteração *in situ* da rocha mãe, melhor preservadas em paisagens planas, onde o material residual não sofre distúrbios pelo transporte e a fábrica original da rocha mantém determinadas características preservadas sendo, em parte, transformada em lateritas (Aleva *op. Cit.*).

Os resíduos dessas alterações demonstram características organizacionais de zonas, as quais juntas, compõem o denominado perfil laterítico (**FIG. 06**).

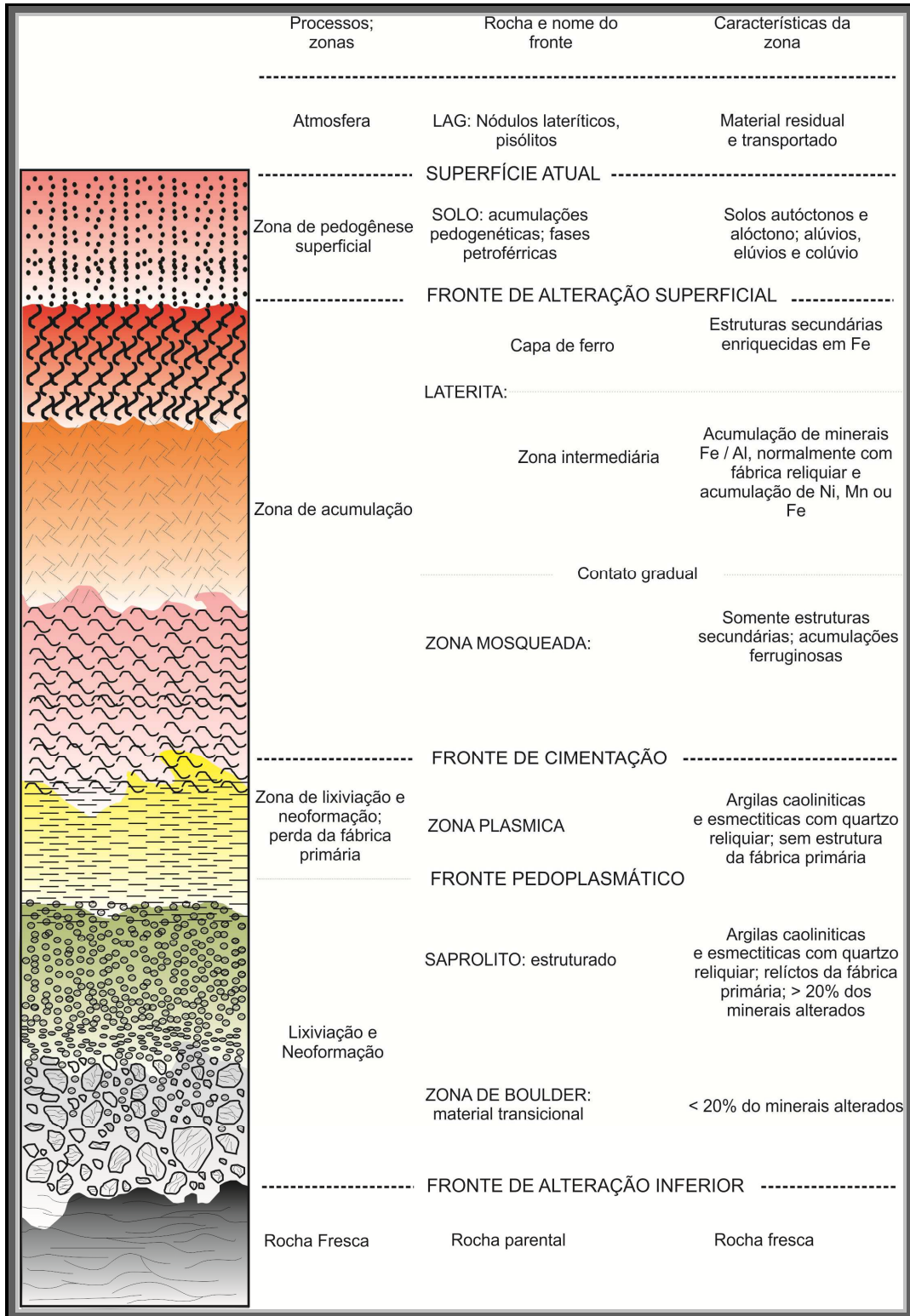


Figura 06 - Processo idealizado de formação de perfil laterítico-saprolítico (Modificado de Allea, 1994).



A base do perfil de alteração, denominada rocha fresca, é caracterizada pela porção menos afetada do intemperismo. Nesta zona, a rocha pode apresentar uma característica física íntegra da rocha-mãe, contudo, a estrutura cristalina original da mesma já está completamente alterada. O serpentinito apresenta somente resquícios da mineralogia primária (e.g. olivinas e piroxênios), sendo o teor de Ni, normalmente, abaixo do valor economicamente viável.

O fronte de alteração inferior inicia a partir da zona de boulder, a qual consiste na fase intermediária entre a rocha-fresca e a zona saprolítica. É caracterizada por estar parcialmente alterada, com menos de 20% da sua mineralogia susceptível a alteração (Aleva, 1994), além de apresentar porções duras e coesivas alternadas com porções alteradas supergenicamente.

O saprolito sobrepõe a rocha fresca e a zona de boulder, com mais de 80% dos seus minerais originais completamente alterados, sendo a maioria transformada em minerais secundários hidratados. A principal característica distinguível desta zona para as demais em direção ao topo do perfil, é a manutenção da fábrica e textura da rocha original. A zona saprolítica consiste na zona de maior enriquecimento em Ni no modelo silicatado.

O fronte pedoplasmático caracteriza-se pela perda total da estrutura primária, sendo seguido pela formação de argilas em direção ao topo. Esta porção do perfil de alteração é típica das lateritas encontradas na Austrália, onde as fácies esmectíticas desenvolvidas no clima árido, geram depósitos de Ni economicamente importantes (e.g. Depósito de Murrin Murrin).

O fronte de cimentação não apresenta estrutura primária preservada, sendo a massa principal formada por argilominerais neoformados com estrutura cristalina própria. Na porção inferior desta zona, Al, Fe, Mn, Si e Ni acumulam na forma de óxidos e hidróxidos, com textura maleável. A porção superior desta zona apresenta textura e estrutura distinta da rocha-fonte, podendo desenvolver couraça ferruginosa devido ao constante processo de oxidação e redução. Este fronte contém a maior parte da acumulação laterítica do perfil. A couraça ferruginosa é de suma importância na formação dos perfis lateríticos, devido a sua função geomorfológica (promove inversões do relevo), bem como serve de barreira geoquímica, no que tange a influência do lençol freático junto ao desenvolvimento do perfil.

O fronte de alteração superficial sobrepõe a carapaça ferruginosa e consiste, na maioria dos casos, na acumulação alóctona de material laterítico. São desenvolvidas lateritas ferruginosas, sendo o teor de Ni, normalmente, inferior aos *cut of* praticados.

Por fim, a superfície atual nos remete aos solos lateríticos desenvolvidos, com forte influência do fator eólico, gerando psólitos ferruginosos sem interesse econômico.

### 1.6 Classificação dos depósitos de Ni laterítico

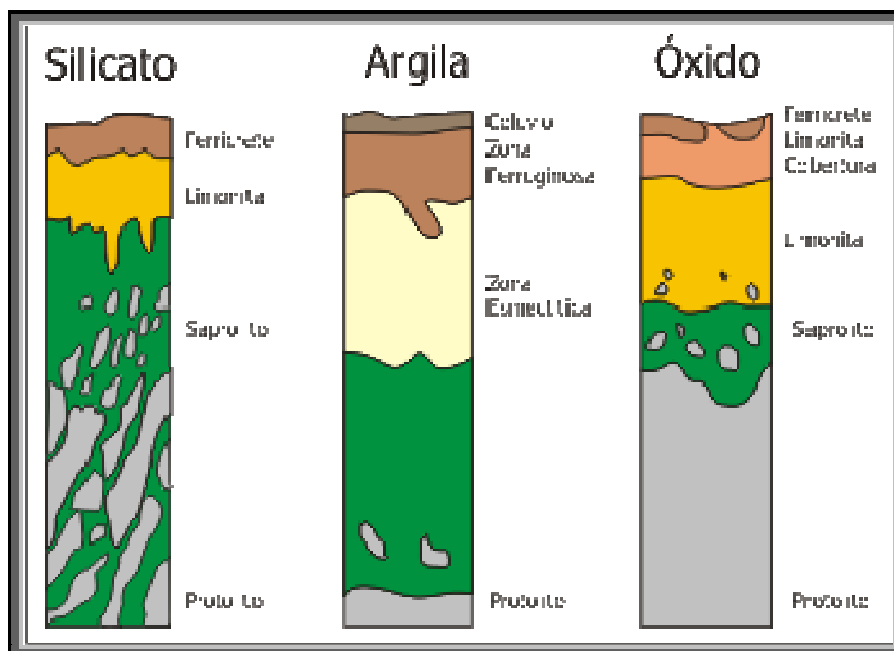
Os depósitos de níquel lateríticos apresentam, por excelência, complexidade na sua formação e evolução, de tal forma que, visando a classificar os depósitos distribuídos pelo mundo, definiu-se 3 categorias distintas com base na mineralogia dominante desenvolvida no perfil (**Tabela 01**) (Elias, 2004):

- Oxidado (limonitas): constituem o grupo de lateritas que compreendem mineralização de Ni associada aos óxidos e hidróxidos de Fe (Fig. 1.6 - 01). Exemplo Moa Bay. Os depósitos tipo oxidados apresentam teor médio de 1,2% Ni e representam 45% dos recursos globais de níquel laterítico
- Argiloso: constituem o grupo de lateritas niquelíferas com característica argilosa, normalmente do grupo das esmectitas (**Fig. 07**). Exemplo Murrin Murrin. Os depósitos tipo argilosos apresentam teor médio de 1.2% Ni e representam 10% dos recursos globais de níquel laterítico
- Silicatado: são as lateritas oriundas de silicatos Mg-Ni hidratados (serpentinhas e seus derivados), normalmente encontradas na porção saprolítica do perfil (**Fig. 07**). Exemplo Nova Caledônia. Os depósitos silicatados tem teor médio entre 1,8% Ni e 2,5% Ni, representando cerca de 45% dos recursos de níquel laterítico globais (Freysinet *et al.*, 2005).

Depósito	Mineral	Variação	Fórmula Ideal	Grupo	Ni (%)
silicatado	Lizardita		$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$	Serpentina	0.15
	Lizardita niquelífera		$(Mg,Ni)_3Si_2O_5(OH)_4$	Serpentina	6.1
	Nepoita	Análogo de Ni da Lizardita	$(Ni,Mg)_3Si_2O_5(OH)_4$	Serpentina	32.8
	clinocrisotilo		$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$	Serpentina	40.5
	Percoraita	Análogo de Ni do Clinocrisotilo	$Ni_3Si_2O_5(OH)_4$	Serpentina	40.6
	Antigorita		$(Mg,Fe)_3Si_2O_5(OH)_4$	Serpentina	0.1
	Antigorita niquelífera		$(Mg,Fe)_3Si_2O_3(OH)_4$	Serpentina	4.9
	Bertierina	Fe <sup>2+</sup> dominante da amesita	$(Fe^2, Fe^3, Mg)_2-3(Si,Al)_2O_5(OH)_4$	Serpentina	2.8
	Brindeleita	Análogo de Ni da Bertierina	$(Ni,Mg,Fe)_2Al((Si,Al)_2O_3(OH)_4$	Serpentina	22.6
	Talco		$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	Talco	0.3
	Willemseita (Kerolita)	Análogo de Ni do Talco	$(Ni,Mg)_3Si_4O_{10}(OH)_2$	Talco	27.1
	Clinocloro		$(Mg,Fe^{2+})_5Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$	Clorita	0.3
	Clorita niquelífera		$(Mg,Fe^2,Ni)_3Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$	Clorita	7.2
	Nimita	Análogo de Ni do Clinocloro	$(Ni,Mg,Al)_6(Si,Al)(OH)_8$	Clorita	16.9
	Sepiolita		$Mg_4Si_6O_{15}(OH)_2 \cdot 6H_2O$	Sepiolita	0.4
	Sepiolita niquelífera		$(Mg,Ni)_4Si_6O_{15}(OH)_2 \cdot 6H_2O$	Sepiolita	2.9
	Falcondoita	Análogo de Ni da Sepiolita	$(Ni,Mg)_4Si_6O_{15}(OH)_2 \cdot 6H_2O$	Sepiolita	24
	Garnierita (7Å)		Fracamente cristalina, variação extrema	Serpentina	15.1
	Garnierita (10Å)		Fracamente cristalina, variação extrema	Talco	19.9
	Garnierita (14Å)		Fracamente cristalina, variação extrema	Clorita	3.3
Garnierita não definida		Fracamente cristalina, variação extrema	Clorita, talco, serpentina	17.6	
Conarita		$Ni_2Si_3O_6(OH)_4$ ; pobremente cristalina	Talco	27.4	
Kerolita niquelífera	Formalmente pimelita, variação da Willemseita	$(Mg,Ni)_3Si_4O_{10}(OH)_2$	Talco	15.7	
Oxidado	Goetita		FeO.OH	Hematita	0
	Hematita		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hematita	1 a 2
	Asbolano		$(Co,Ni)_{1-y}(Mn_4O_2)_2-x(OH)_{2-2y+2x} \cdot nH_2O$	Hematita	~ 15
	Litioforita		$(Al,Li)Mn_4O_2(OH)_2$	Hematita	1 Ni a 6Co
	Heterogenita		CoO.OH	Hematita	4Ni 55Co
Argiloso	Nontronita		$Na_{0.3}Fe_2^+(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$	Esmeclita	~3
	Beidelita		$(Na,Ca_{0.5})_{0.3}Al_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$	Esmeclita	~3
	Montmorillonita		$(Na,Ca)_{0.3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$	Esmeclita	~3
	Saponita		$(Ca/2,Na)_{0.3}(Mg,Fe^2)_3(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$	Esmeclita	~3

Tabela 01 - Mineralogia presente de acordo com o tipo de depósito (Modificado de Freyssinet et al., 2005).

Cabe lembrar que alguns depósitos apresentam características mistas, ou seja, podem apresentar porções oxidadas e silicatadas (ex. Depósito do Jacaré). Esta distinção é de fundamental importância na caracterização do depósito, pois distintas rotas metalúrgicas são necessárias para o processamento destes, o que acarreta igualmente em custos distintos.



**Figura 07** - Perfil esquemático dos tipos de lateritas níquelíferas (modificado de Elias, 2004).

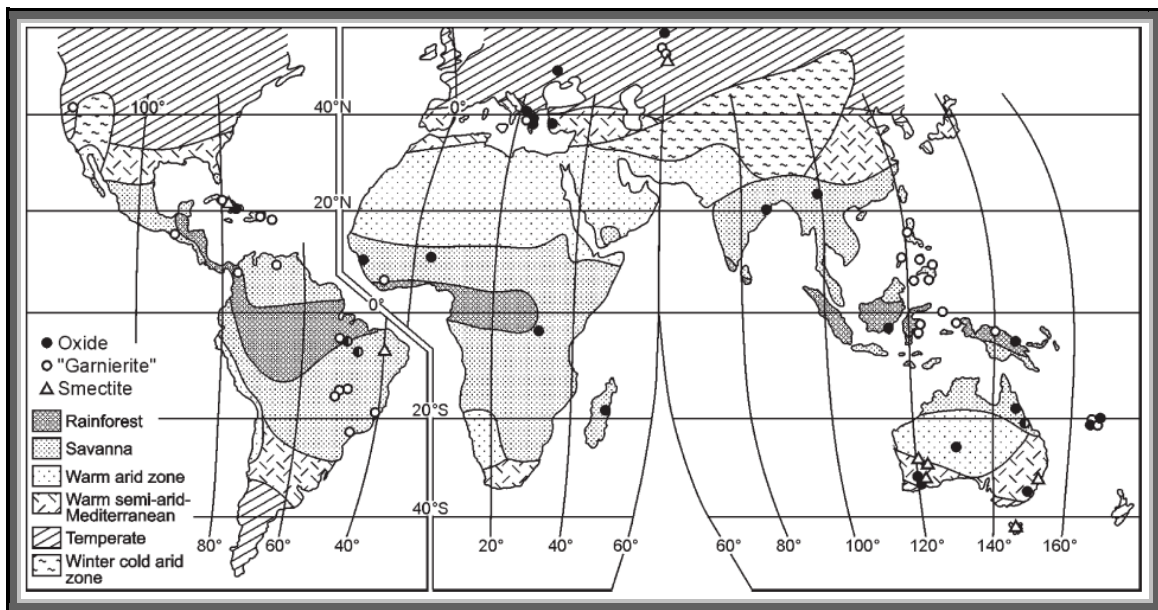
Os perfis lateríticos desenvolvidos apresentam distinções e similaridades na sua apresentação. As características peculiares de cada um será reflexo da influência dos controles na geração e distribuição dos mesmos. Assim, apesar de alguns depósitos estarem sob as mesmas condições de clima, tectônicas, drenagens, etc., os mesmos podem formar-se distintamente. Exemplo pode ser citado entre o depósito de Ni laterítico do Vermelho (oxidado) (Oliveira, *et al.* 1992) e o depósito de Ni laterítico do Jacaré (silicatado e oxidado) no distrito mineiro de Carajás, estado do Pará, Brasil.

Abaixo segue **Tabela 02**, definindo o tipo de depósito gerado, com destaque a algumas características e controles dos mesmos.

Controle	Silicato hidratado de Mg	Silicato argiloso	Oxidado
<b>Clima</b>	Savana úmida - floresta chuvosa	Savana úmida; possivelmente parcialmente formada ou modificada em climas semi-áridos	Savana; modificado em climas semi-áridos
<b>Relevo</b>	Moderado	Moderado a baixo	Moderado a baixo
<b>Drenagem</b>	Livre	Nula	Livre ou nula
<b>Tectonismo</b>	Soerguimento	Inibido por soerguimento	Promovido por soerguimento
<b>Estrutura primária</b>	Promovido pelo aumento do intemperismo e enriquecimento de Ni ao longo de fraturas	Enriquecido em fraturas, possivelmente desenvolvido onde fraturas impedem a drenagem	Promovido pelo aumento do intemperismo e enriquecimento de Ni ao longo de fraturas
<b>Litologia Primária</b>	Peridotitos > Dunitos	Peridotitos >> Dunitos	Dunitos e peridotitos; presente em todos os depósitos

**Tabela 02** - Comparação entre os diversos depósitos de Ni laterítico gerados e as respectivas características de seus controles (Modificado de Freyssinet et al., 2005).

A figura a seguir (**Fig. 08**) demonstra a distribuição dos depósitos de Ni laterítico no mundo e a consecutiva condição morfoclimática a que cada um está sujeito.



**Figura 08** - Distribuição global dos depósitos de Ni laterítico, classificados de acordo com o tipo de depósito, dispostos num mapa morfoclimático no mapa morfoclimático de Budel (1982). Modificado de Freyssinet et al., (2005).

## 1.7 Controles na Mineralização

A geração e desenvolvimento de um depósito de Ni laterítico está estreitamente ligada aos controles atuantes no desenvolvimento do perfil de intemperismo, os quais garantem as características do depósito, bem como volume e teor.

Devido aos processos complexos envolvidos na geração destes depósitos, fatores como clima, geomorfologia, drenagem, tipo de rocha e estruturas, todos influenciando sobre um período de tempo em escala global, regional e local, devem ser levados em conta.

Os controles da mineralização laterítica não atuam sozinhos, mas em conjunto, de tal forma que um ou outro controle pode se sobressair aos demais, legando ao depósito determinada característica mineral.

1. Clima: a maioria dos depósitos lateríticos estão localizados em regiões climáticas sazonais, com intercalação entre período chuvoso e seco (savanas) e em climas tropicais (floresta). Depósitos tipo oxidados estão presentes em todos os tipos de clima, já os tipos silicatados ocorrem em regiões úmidas (clima tropical), enquanto os depósitos argilosos esmectíticos ocorrem em regiões semi-áridas.
2. Geomorfologia, drenagem e soerguimento tectônico: a atividade tectônica influencia o grau de preservação, distribuição e natureza dos depósitos, através da influência da geomorfologia, relevo, além de drenagem e erosão. Papel destacado para o controle na migração dos fluidos no sistema e, consecutivamente, geração de couraças de ferro.
3. Tipo de rocha primária: contempla protólitos com olivina, seja fase ortocumulato, mesocumulato ou adcumulato. A litologia do protólito irá se sobressair às demais, normalmente quando os outros fatores tiverem sua influência reduzida. Exemplo são os depósitos esmectíticos do Oeste Australiano, os quais são associados à ortocumulatos de olivina, enquanto os depósitos tipo oxidado são associados com olivinas mesocumuláticas. A composição do protólito determina a quantidade de íons disponíveis (Schellmann, 1989), enquanto o elevado conteúdo de forsterita em

peridotitos e dunitos permitem uma substituição substancial de Mg por Ni (Freyssinet *et al.*, 2005).

4. Estrutura: os reais controles estruturais envolvidos na geração de depósitos lateríticos são difíceis de avaliar, contudo, sabe-se que grandes zonas de cisalhamento, bem como zonas de fraturas locais, geram barreiras hidromórficas e porosidade secundária, o que garante a migração de íons e geração de minerais secundários enriquecidos em Ni (ex. “garnieritas”).

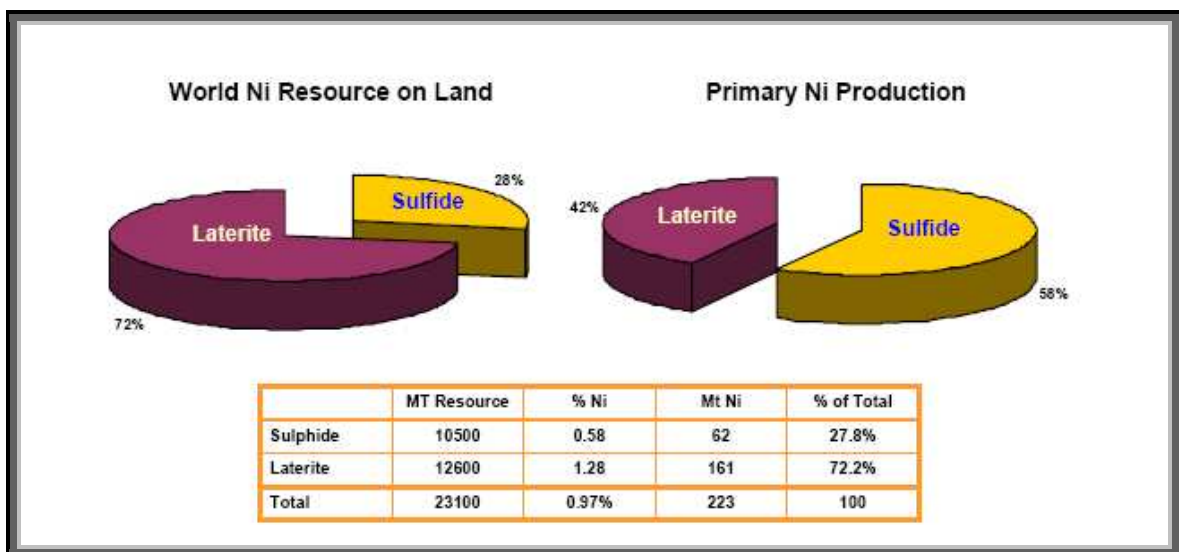
### 1.8 Importância Econômica

A extração e processamento de Ni ao longo da história tiveram seu início com a exploração das minas de Ni laterítico da Nova Caledônia no século XIX. A descoberta do astroblema de Sudbury, no Canadá, no início do século XX voltou os olhos mundiais para a extração de Ni a partir de massas sulfetadas, o que continua até hoje (Dalvi *et al.*, 2004). Apesar da consciência de que aproximadamente 69% das reservas mundiais de Ni encontram-se nas lateritas, apenas 40% da produção mundial é oriunda das mesmas (Gleeson *et al.*, 2003).

A produção e demanda por Ni vêm aumentando consideravelmente desde 1950, pulando de uma produção mundial de 140 kt/ano na década de 50, para uma produção de 1,200 kt/ano em 2003. Em 1950, os recursos de níquel oriundos das lateritas representava menos de 10% do mercado produtivo do metal, atingindo, em 2003, 42% do total (**Fig. 09**) (Dalve *et al.*, 2004 *op. cit.*).

Como pode ser observado na **Figura 09**, os recursos avaliados para Ni laterítico representam 72% do Ni do planeta e, apesar disto, somente 42% do níquel produzido no mundo é originado a partir das lateritas, sendo as fontes sulfetadas as maiores contribuintes para o fornecimento de Ni. As justificativas para este efeito são variadas, contudo, sabe-se que o posicionamento geográfico dos depósitos lateríticos não favorecem a implantação de minas devido à falta de infra-estrutura nestas localidades, bem como o elevado custo para implantação de planta de beneficiamento.

Em contrapartida, o crescimento da demanda por níquel, assim como outros metais, depende de ciclos econômicos inseridos num contexto de crescimento global mais amplo, contudo, a produção geral de Ni vêm crescendo a uma taxa de 4% ao ano, ao longo dos últimos 55 anos, abrindo portas, assim, a uma busca cada vez maior às lateritas niquelíferas, visto o seu potencial dormente.

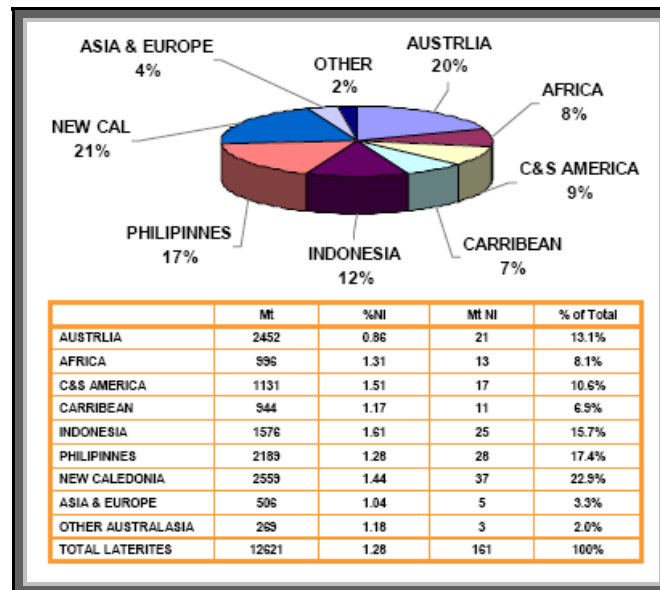


**Figura 09** - Comparação de potenciais de recursos e produção entre depósitos lateríticos e sulfetados (Modificado de INCO).

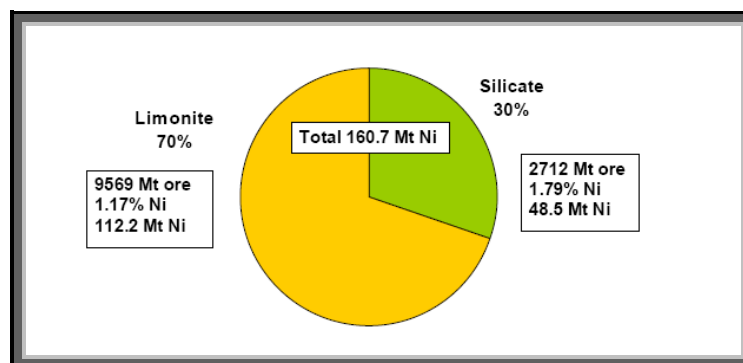
Atualmente, quatro países predominam na concentração e produção de Ni laterítico, sendo elas a Nova Caledônia, Indonésia, Filipinas e Austrália, as quais, juntas, compõem 70% dos recursos do planeta (Elias, 2004). Os teores de Ni e proporções de recursos de depósitos limoníticos variam entre os três, com a Nova Caledônia apresentando os maiores teores tanto nos depósitos tipo limoníticos, quanto nos tipos silicatados (**FIG. 10**).

A **Figura 11** demonstra a relação global entre depósitos limoníticos e silicatados, evidenciando um pleno domínio do modelo limonítico, com 70% dos recursos e reservas mundiais.





**Figura 10** - Distribuição dos recursos de níquel laterítico no mundo (Modificado de INCO).



**Figura 11** - Proporção entre os depósitos limoníticos e silicatados (Modificado de Elias, 2004).

O Brasil, como país sujeito aos climas tropicais e subtropicais, concentra grande potencial provado e em aberto para novos depósitos de níquel laterítico, com grande quantidade de intrusões máfico-ultramáficas identificadas em todo o País (**FIG.12**).

As facilidades de infra-estrutura proporcionadas pelo recente crescimento vertiginoso da economia do país, tende a facilitar o desenvolvimento de depósitos e prospectos, de tal sorte que o Brasil candidata-se a ser um dos maiores produtores de Ni laterítico do mundo, dentro da próxima década.



Global Projects								
<i>Source: International Mining Project News Database</i>								
Name	Location	Commodity	Type	Ownership	Status	Capacity	Process	Prod'n date
<b>AFRICA</b>								
Kabanga	Western Tanzania	Ni		Xstrata Nickel/Barrick Gold	Prefeasibility study			
Munali	South of Lusaka, Zambia	Ni/Cu/Co/PGMs		Allbidon	In Development	8,600 t/y		
Musongati	Central Burundi	Ni/Co	OP	Argosy Minerals				
Selkirk	Botswana	Ni/Cu		LionOre Mining 85%, Gov 15%	Feasibility			
<b>ASIA</b>								
Acoje	Philippines	Cr/Ni	OP/UG	Rusina Mining	Feasibility			
Berong	Philippines	Ni	OP	Toledo Mining Corp, Atlas Consolidated and Investika	In production	1 Mt/y of ore		Full capacity
		Ni	OP	Berong Nickel	In development	1Mt/y of ore		
Dagongshan	Mandalay Province, Myanmar	Ni	OP	China Nonferrous Metal Mining and Construction Group (CNMC)	In development	30,000 t/y ferronickel		
Gay Nickel	Gay Island, Indonesia	Ni	OP	Antam/BHP Billiton	Project study			
Kun-Manie	Amur Province, Far East Russia	Ni/Cu	OP	Amur Minerals	Prefeasibility study			
Mindoro	Island of Mindoro, Philippines	Ni/Co	OP	Crew Minerals	Feasibility	60,000 t/y	HPAL	2011
Palawan	Bataraza, Palawan, Philippines	Ni/limestone	OP	Coral Bay Nickel and Sunitomo Metal Mining	In production	Doubling to 20,000 t/y	HPAL	2009
Pujada	Davao Oriental, Philippines	Ni		BHP Billiton	Last mention on website 2002			
Shevchenko	NW Kazakhstan	Ni	OP	Oriol Resources	In Development	over 20,000 t/y	DC furnace technology	
Taganito	Northeast of Mindanao Island, Philippines	Ni/Co	OP	Sunitomo Metal Mining and Taganito Mining	Feasibility	30,000 t/y	HPAL	2012
Yellow Mountain	Northwest China	Ni/Cu	UG	GobiMin	Feasibility	1.5 Mt/y ore		
Yellow Mountain East / Xiangshan	Northwest China	Ni/Cu	UG	GobiMin	Expanding Production	330,000 t/y ore		2007
<b>AUSTRALASIA</b>								
East Alpha	Kambalda Nickel Operations, Australia	Ni	UG	Consolidated Minerals	In Development			2008
Avebury	Tasmania, Australia	Ni	UG	Allegiance Mining	In Development	8,500 t/y Ni in concentrate	Concentrator	2007
Copernicus	East Kimberley, Western Australia	Ni/Cu/Co	OP/UG	Sally Malay 60% and Thundelarra 40%	Feasibility	Resource contains 10,600 t Ni	Sally Malay concentrator	2008
Diggers South	Forrestania, W/Australia	Ni	UG	Western Areas	Prefeasibility			
New Morning/Daybreak	Forrestania, Western Australia		OP	Western Areas	Prefeasibility			2008
Durkin Deeps	Kambalda ,	Ni	UG	Mincor	Feasibility			2010
Flying Fox	Forrestania, W/Aust	Ni	UG	Western Areas	In Development	1.18 Mt at a 6.8% Ni		2007
Jump-up Dam	Western Australia	Ni/Co	OP	Heron Resources	Prefeasibility study	At least 10,000 t/y	Heap leach	2009
Kalgoorlie	Western Australia	Ni/Co	OP	Heron Resources; CVRD-Inco earning 60%	Prefeasibility study	40,000 t/y	PAL/AAL	Full feasibility study July 2011
Kalpini	Near Kalgoorlie, W/Aust	Ni	OP	Heron Resources	Prefeasibility study			
Ken North	Kambalda area, W/Aust	Ni		Mincor	Feasibility			2010
Koniambo	New Caledonia	Ni	OP	SMS 51%, Xstrata 49%	Feasibility	60,000 t/y	Ferronickel smelter	
Lanfranchi	South of Kambalda, Western Australia	Ni	UG	Sally Malay Mining 75%, Brilliant Mining Corp. 25%	In production	at least 10,000 t/y nickel metal	Concentrator	Ramping up until 2008
MadMahon Deeps	Kambalda area, W/Aust	Ni		Mincor	Feasibility			2010
Mt Thirsty	Near Norseman, Western Australia	Co/Ni	OP	Barra Resources 50%/ Select Minerals 50%	In Development		Leaching	
New Morning/Daybreak	South of Flying Fox	Ni	UG	Western Areas	Scoping study			
Diggers South	Forrestania, W/Aust		OP	Western Areas	Prefeasibility			

Name	Location	Commodity	Type	Ownership	Status	Capacity	Process	Prod'n date
Ramu	Basamuk, Madang Province, PNG	Ni/Co	OP	China Metallurgical Construction and Highlands Pacific	In Development	33,000 t/y		2009
Sally Malay	Western Australia	Ni/Cu/Co	OPUG	Sally Malay Mining	In production	≈10,000 t/y	Concentrator	Ramping up underground
Sherlock Bay	Western Australia	Ni	OP	Australian Resources	Feasibility study	2 Mt/y ore	Heap leach	
Sholl B2	West Pilbara region of Western Australia	Ni/Cu	OP	Fox Resources	Feasibility			
Widgiemooltha	Kambalda Nickel Operations, Australia	Ni	OP	Consolidated Minerals	In Development			2008
Windhara	Western Australia	Ni	OPUG	Niagra Mining Corp	In Development			
Wowo Gap	Eastern Papua, New Guinea	Ni/Co	OP	Resource Mining Corp	Advanced explor	Inferred 120 Mt at 1.2% Ni and 0.1% Co		
<b>EUROPE</b>								
Keivitsa	Finland	Ni/Cu/PGMs	OP	Scandinavian Minerals	Feasibility	4.5 Mt/y ore	Flotation concentrator	
Çaldag	Western Turkey	Ni/Co	OP	European Nickel	In Development	20,400 t/y	Leaching	2008
Talvivaara	Sotkamo, Finland	Ni/Cu/Zn/Co	OP	Talvivaara Mining	In Development	30,000 t/y	Bioheapleaching	
<b>NORTH AMERICA</b>								
Birch Lake, Maturi	USA, Minnesota, Babbitt	Cu/Ni/Co/Au/PGM	UG	Franconia Minerals	Prefeasibility	9,500 t/y Ni		
Bucko	Thompson nickel belt, Manitoba, Canada	Ni/Cu	UG	Crowflight Minerals	In Development	1,000 t/d	Concentrator	2008
Levack	Sudbury, Canada	Ni/Cu/Co	UG	FNX Mining	Restarting	470,000 t/y ore	Concentrator	2008
McWatters	Southeast of Timmins Ontario	Ni	OPUG	Liberty Mines	In Development	1,000 t/d of ore	Concentrator	2007
Minago	Manitoba, Canada	Ni/Cu/Co	OPUG	Nuinsco Resources	Feasibility	8,900 t/y	Concentrator	
Premier Ridge	Sudbury, Canada	Ni/Cu	OP	Victory Nickel	Feasibility			
Raglan South	Nunavik, Québec	Ni/Cu/PGM	OP	Canadian Royalties	Feasibility	3,500 t/d ore	Concentrator	2010
Redstone	Timmins, Canada	Ni	UG	Liberty Mines	Expanding	100,000 t/y ore	Concentrator	2007
Shakespeare	Sudbury, Canada	Ni/Cu	OP	Ursa Major Minerals	In Development	4,500 t/d of ore	Concentrator	2009
<b>SOUTH AMERICA</b>								
Barro Alto	State of Goiás in Brazil	ferronickel	OP	Anglo American	In Development	36,000 t/y		2010
Fenix	Lake Izabal region of eastern Guatemala	ferronickel		Skye Resources	In Development			
Moa	Cuba	Ni/Co	OP	Sherritt/General Nickel	Expanding	4,000 t/y of mixed sulphide	PAL	End 2007
Onça Puma	State of Pará, Brazil	ferronickel	OP	CVRD	In Development	58,000 t/y	Rotary kiln electric furnace	First half 2008
Santa Rita	Bahia state, Brazil	Ni/Cu	OP	Mirabela Nickel	Feasibility study	16,000 t/y	Concentrator	
Vermelho	Carajás region in the state of Pará, Brazil	Ni/Co	OP	CVRD	In Development	46,000 t/y	HPAL	End 2008

Source: International Mining Project News Database

**Tabela 03** - Projetos de Ni no mundo e suas projeções (modificado de International Mining, 2007).

## 1.9 Processo Metalúrgico

Os métodos comerciais utilizados, atualmente, para o processamento de Ni laterítico compreendem duas rotas metalúrgicas principais: o processo pirometalúrgico e o processo hidrometalúrgico sendo, este último, dividido em método Caron e HPAL.

### 1.9.1 Processo Pirometalúrgico

O processo pirometalúrgico se dá em depósitos tipo silicatados, onde o minério saprolítico, normalmente enriquecido em “garnierita”, é processado através do aquecimento do material até atingir temperaturas de derretimento. Este tipo de minério deve conter, obrigatoriamente, baixo teor de Co e Fe, diferentemente do minério tipo limonítico, o qual é processado através da rota hidrometalúrgica.

A rota pirometalúrgica necessita, ainda, de uma relação  $\text{SiO}_2/\text{MgO} < 2.5$ , a fim de não comprometer a estabilidade físico-química do material junto aos fornos. A relação Ni/Co na planta deve ser normalmente, 40, garantindo, assim, a liga Fe-Ni como produto final.

Em processos pirometalúrgicos convencionais o minério é seco, calcinado (algumas vezes reduzido) e derretido em fornos elétricos na presença de carbono através de uma temperatura de  $1600^\circ\text{C}$ , recuperando cerca de 90% de Ni no processo, porém, sem recuperação de Co.

A viabilidade de um projeto pirometalúrgico está diretamente ligada ao custo de energia e possibilidade de distribuição da mesma onde, em alguns casos, a própria mina desenvolve a sua estação hidrelétrica (ex. Sorowako) (Elias, 2004 *op. Cit*).

Alguns exemplos de plantas pirometalúrgicas são: Codemin (Brasil), Doniambo (Nova Caledônia); Falcondo (República Dominicana); Loma de Níquel (Venezuela), Soroako (Indonésia) e Cerro Matoso (Colômbia) ([www.intierramapping.com](http://www.intierramapping.com)).

## 1.9.2 Processo Hidrometalúrgico

### 1.9.2.1 Processo Caron

O processo denominado Caron, é utilizado no processo do minério limonítico. O minério é seco e o Ni é reduzido seletivamente (juntamente com Co e Fe) para níquel metálico a aproximadamente 700°C.

A partir deste momento, o metal é extraído por lixiviação ácida através de solução de amônia, com recuperação de óxido de Ni em torno de 75% e recuperação de óxido de Co em 49% (Molinari, 2009, comunicação pessoal).

O processo Caron encontra-se em desuso atualmente, por apresentar uma etapa pirometalúrgica, envolvendo secagem, calcinação e redução, o que torna a atividade dispendiosa devido ao alto consumo de energia. Além disto, a utilização de diversos reagentes na etapa hidrometalúrgica, aliada à baixa recuperação de Ni e Co, faz com que os valores dos insumos utilizados no processo sejam definidores da sua viabilidade ou não.

Podem-se citar exemplos de rotas hidrometalúrgicas tipo Caron a refinaria Níquel Tocantins (Brasil), Nicaro (Cuba), Nonoc (Filipinas), Punta Gorda (Cuba) e Yabulu (Austrália) ([www.intierramapping.com](http://www.intierramapping.com)).

### 1.9.2.2 Processo HPAL

O processo denominado HPAL (High Pressure Acid Leaching) requer minérios com características limoníticas e argilosas, podendo conter quantidades significativas de esmectitas (nontronita, saponita, montmorilonita).

O processo deve conter baixo MgO, com limite abaixo de 4% (na presença de alto MgO o consumo de ácido é muito alto), além de baixo teor de Al.

A pressão ácida se dá em tanques (processo antigo – tipo Moa Bay - Cuba) ou em autoclaves de titânio (todas as plantas modernas), com temperaturas que variam entre 245 a

270°C. A separação do Ni e Co a partir da solução gerada se dá, normalmente, por extração via solvente.

O produto final consiste em níquel eletrolítico, óxido de níquel ou na forma de briquetes.

São exemplos de refinarias que utilizam o processo HPAL: Ambotovy (Madagascar), Coral Bay (Filipinas), Ernesto Guevara (Cuba) e Murrin Murrin (Austrália) ([www.intierramapping.com](http://www.intierramapping.com)).

## 2 Localização e Histórico

A área em estudo localiza-se cerca de 52 Km em linha reta, a NNE de São Félix do Xingu/PA, no sudeste do Estado do Pará, mais especificamente na Serra de São Félix, na bacia do Rio Fresco, que por sua vez deságua no Rio Xingu (**FIG. 13a,b**).

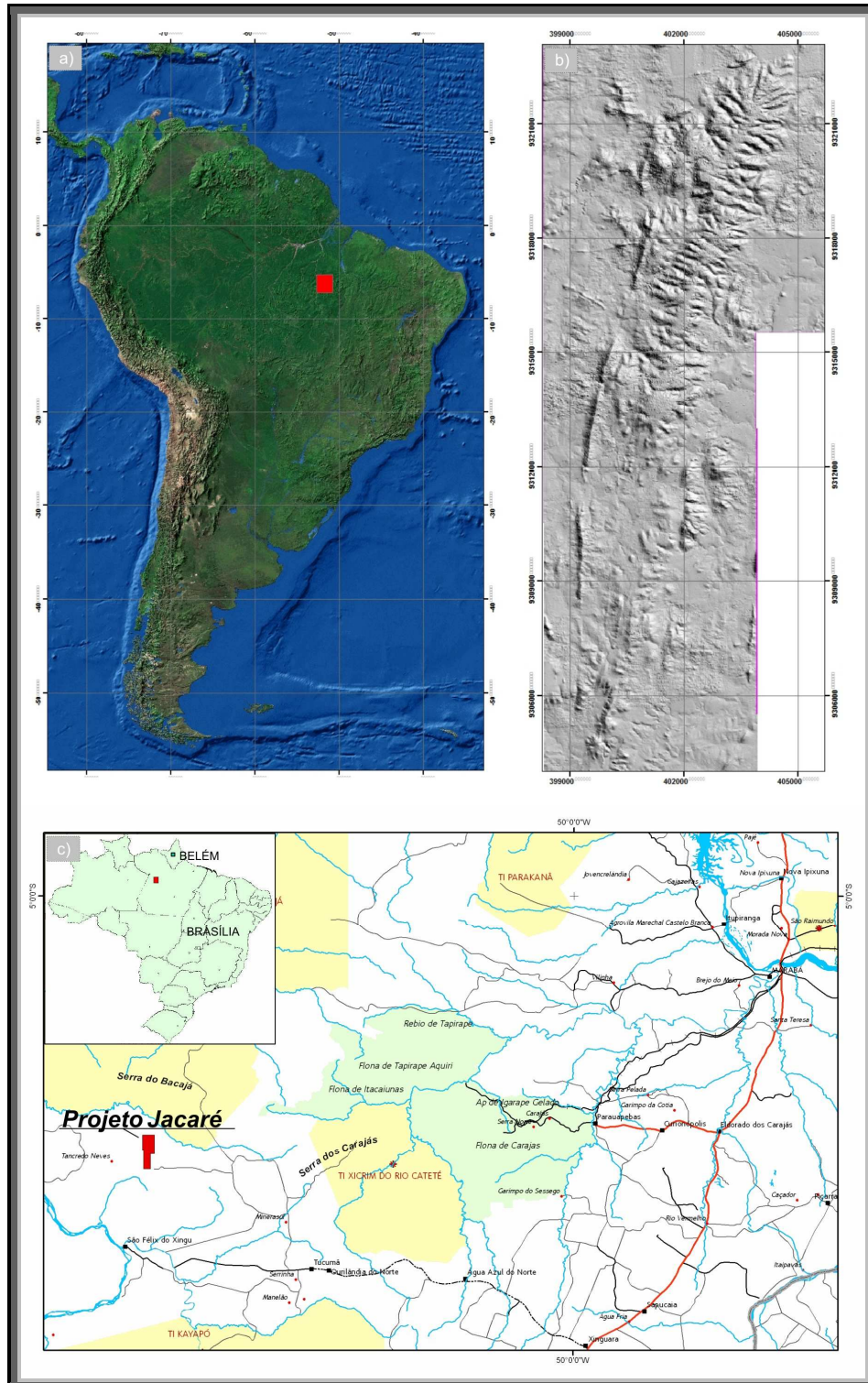
O acesso pode ser feito a partir de São Félix do Xingu/PA, após atravessar de balsa o Rio Fresco, por estrada de terra, percorrendo-a cerca de 50 km na direção NNE. Deste local, percorre-se mais 25 Km na direção leste para chegar na sede do denominado Projeto Jacaré de propriedade da empresa Anglo American Brasil Ltda, pertencente ao grupo Anglo American PLC (**FIG. 13c**).

A Serra do Jacaré vem sendo alvo de pesquisas minerais para Au e , principalmente, Ni ao longo dos últimos 35 anos. A mineração Serras do Sul (INCO – atual Vale-INCO) trabalhou na área de 1974 até 1977 perfazendo trabalhos exploratórios através de análises de sedimento de corrente, solo e poços de pesquisa, alcançando uma cubagem estimada de 54 Mt @ 1,41% Ni, o que não pareceu viável economicamente para a época.

O período compreendido entre 1985 a 1993 a concessão de exploração da área permaneceu com a empresa Companhia Vale do Rio Doce (atual Vale), a qual teve seu relatório final de pesquisa negado pelo DNPM.

No ano de 1994 a Anglo American requereu a área denominada Serra de São Félix (Jacaré) e obteve o respectivo alvará de pesquisa deferido em 2000 quando iniciou suas atividades de pesquisa na região.





**Figura 13** - Mapa de localização do Projeto Jacaré. a) Localização do alvo em relação ao continente sul americano; b) Mapa topográfico em tons de cinza da Serra do Jacaré; c) Posicionamento da área no contexto do Distrito Mineiro de Carajás e infra-estrutura.



A partir de então, houve o reconhecimento preliminar da área e programas preliminares de sondagem, culminando com programas de detalhamentos de sondagem através malhas definidas. Atualmente o projeto conta com mais de 66.000m perfurados, distribuídos em mais de 3.000 furos.

## 3 Contexto Geológico

### 3.1 Geologia Regional de Carajás

Na região sudeste do Estado do Pará são encontrados ambientes geológicos favoráveis a mineralizações em terrenos *granito-greenstone*, seqüências vulcanossedimentares arqueanas, coberturas plataformais proterozóicas e rochas intrusivas máfico-ultramáficas diferenciadas. O esboço geotectônico abrange porções do Terreno *granito-greenstone* do Sul do Pará, do Cinturão de cisalhamento Itacaiúnas e da bacia do médio Tapajós, afetados por corpos intrusivos de idades variadas.

Apesar do avanço no conhecimento geológico da região, ainda existem dúvidas sobre o posicionamento de algumas unidades estratigráficas. Adotou-se como coluna estratigráfica regional aquela elaborada por Macambira, 1996 (**FIG 14**).

O Terreno Granito-Greenstone do Sul do Pará ocorre como uma faixa segundo a direção NW-SE e posicionada na porção sul-sudeste da área em estudo. Essa unidade, formada e tectonicamente estabilizada no Arqueano (Macambira & Lafon, 1995 *apud* CPRM 1997) é constituída por um conjunto de granitóides e rochas supracrustais que esboçam um padrão anastomosado.

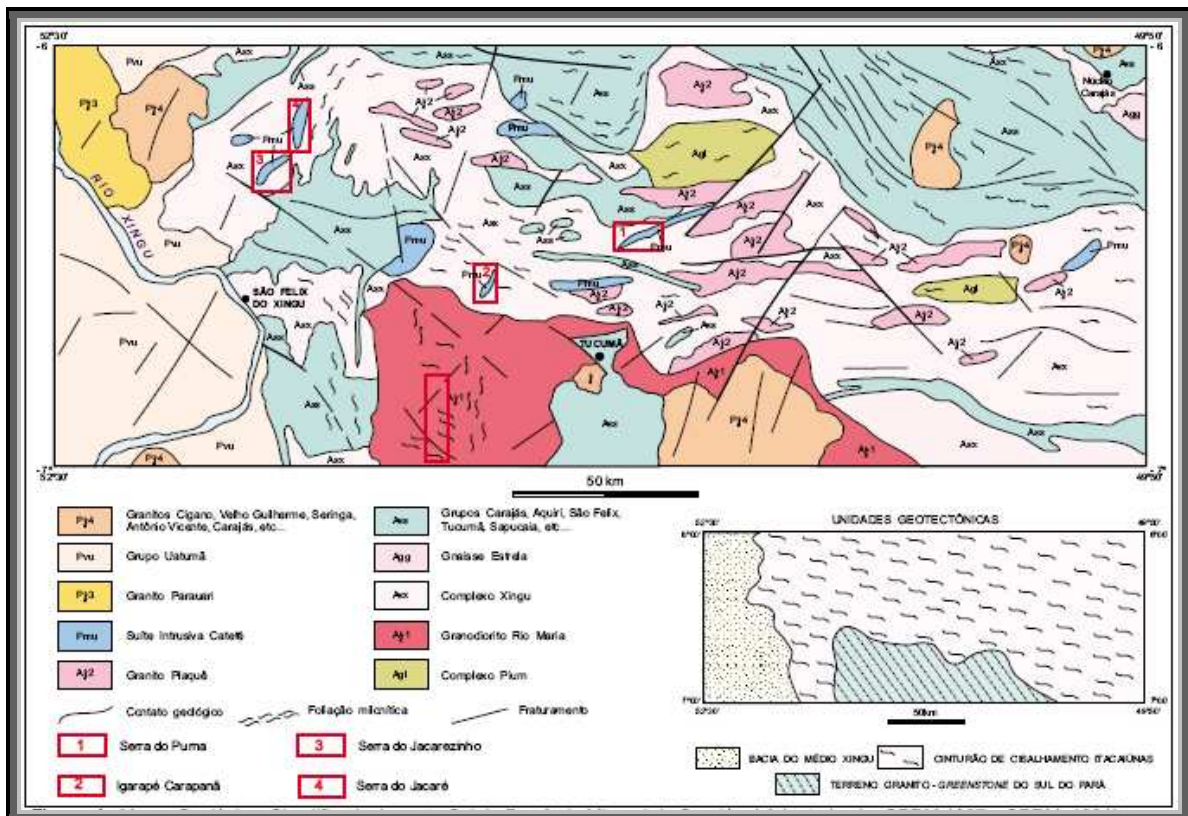
As rochas supracrustais estão representadas por uma seqüência metavulcanossedimentar, denominada de Grupo Tucumã (CPRM, 1991) composta essencialmente de xistos, filitos, quartzitos, *banded iron formation* - BIF e conglomerados. Intrusivos nessa seqüência ocorrem granodioritos, tonalitos e monzogranitos, que compõem a unidade chamada de Granodiorito Rio Maria (Dall' - Agnol et al., 1986).

IDADE		UNIDADE ESTRATIGRÁFICA	CARACTERÍSTICAS
FANEROZÓICO	QUATERNÁRIO	COBERTURA ALUVIONAR	Areias, siltes e argilas com subordinados níveis de cascalho, situados nos vales das drenagens, de grande importância metalogenética para minerais pesados, ouro e cassiterita.
	TERCIÁRIO	COBERTURA LATERÍTICA	Lateritos ferruginosos, localmente níquelíferos ou aluminosos, com perfis em diferentes graus de evolução.
	MESOZÓICO	DIABÁSIO CURURU	Diabásios a augita e/ou uralita. Ocorrem em forma de extensos diques.
PROTEROZÓICO INFERIOR A MÉDIO	SUITE INTRUSIVA VELHO GUILHERME		Granitóides fortemente diferenciados, com predominância de alcali-feldspatos granitos e subordinados tipos evoluídos a greisens. São tipo $A_1$ com características rapakivítica.
	FORMAÇÃO TRIUNFO		Quartzo-arenitos, arenitos arcoseanos e conglomerados, com incipiente estratificação cruzada. Não metamorfisado.
	GRUPO UATUMÁ	FORMAÇÃO IRIRI	Riolitos e tufo riolíticos, com riocacitos, dacitos, tufo riocacíticos e dacitos subordinados, freqüentemente brechados e silicificados por tectonismo rúptil. Sem mineralizações conhecidas.
		FORMAÇÃO SOBREIRO	Andesitos com traquitos e traqui-andesitos e raros clastolavas. Muito fraturadas, epidotizadas e raramente propilitizadas. Ocorrem veios de quartzo mineralizados a galena, calcopirita, blenda, bornita e pirita, mineralização de cobre associado aos níveis pirrotíticos.
	SUITE INTRUSIVA CATETÉ		Gabros noríticos, piroxenitos, peridotitos e serpentinitos, com feições cataclásticas relacionadas a tectônica rúptil. Alguns corpos apresentam capeamento laterítico com enriquecimento em Ni.
	GRANITO PARAUARI		Monzogranitos associados a sienogranitos e granodioritos, isotrópicos, sem deformação dúctil e metamorfismo.
ARQUEANO SUPERIOR	GRANITO PLAQUÊ		Granitos leucocráticos, sódio-potássicos, a duas micas, metamorfisados em fácies anfibolito baixo-médio, com diferentes intensidade na taxa deformacional.
	GRUPO SÃO FÉLIX		Seqüência metavulcanossedimentar, metamorfisada no fácies xisto verde, com predomínio de metavulcânicas ácidas e BIF, e subordinadamente metamáficas, metaultramáficas e micaxístos. Diferentes estágios de deformação. Aluviões auríferos são comuns nas drenagens.
	GRUPO SÃO SEBASTIÃO		Seqüência metavulcanossedimentar, com metapsamitos e metabasitos com formações ferríferas associadas, metamorfisadas no fácies xisto verde. Aluviões auríferos são comum nas drenagens dessa unidade
	GRUPO AQUIRI		Seqüência supracrustal de natureza Vulcanossedimentar, com actinolitaxístos, quartzitos, filitos, BIF, quartzo arenitos, folhelhos, siltitos, metaíolitos e metariocacitos. Metamorfismo do fácies xisto verde a anquimetamorfismo.
	GRUPO SAPUCAIA		Seqüência Vulcanossedimentar, fácies xisto verde, com predomínio de xistos quartzosos e micáceos, subordinadamente BIF, quartzitos, actinolita xistos, talco-antofilita xistos.
	COMPLEXO XINGU		Gnaisses tonalíticos a granodioríticos com variações graníticas e enclaves de ortoanfibolitos. Exibem feições de anatexia com geração de estruturas migmatíticas. Metamorfismo fácies anfibolito.
	GRANODIORITO RIO MARIA		Granodioritos com subordinados tonalitos e monzogranitos submetidos a metamorfismo incipiente, preservando caracteres petrográficos originais.
	GRUPO TUCUMÃ		Seqüência Vulcanossedimentar que constitui as supracrustais do TGG do Sul do Pará, caracterizadas por: actinolita xisto, metaserpentinitos, talco xisto, filitos, biotita xisto, BIF, metarenitos, metarcóseos e conglomerados.
	COMPLEXO PIUM		Rochas granulíticas, kinzigitos, piriclasitos e granoblastitos com retrometamorfismo de fácies anfibolito, alçados a superfície através de zonas de cisalhamento dúctil contracionais de caráter oblíquo.

Figura 14 - Coluna estratigráfica simplificada.

A estruturação interna do Terreno Granito-Greenstone do Sul do Pará é definida por zonas de cisalhamento oblíquas e transcorrentes, cujas relações geométricas esboçam um quadro definido como hemiflores positivas (CPRM, 2001).

A seguir, breve descrição do arranjo estratigráfico da Província Mineral Carajás, seguida pela coluna estratigráfica da área (FIG 15).



**Figura 15** - Mapa geológico simplificado da parte Sul da Província Mineral Carajás (Adaptado de CPRM 2001).

### 3.2 Estruturas e Tectônica Regional

Segundo Macambira (1996), três compartimentos geotectônicos podem ser individualizados no sul do Pará: Terreno Granito Greenstone do sul do Pará, Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas e a Bacia do Médio Xingu. O primeiro, de idade Arqueana, inclui rochas metamorfisadas no fácies xisto verde, orientadas na direção NW-SE, com inflexões locais para E-W e mergulham fortemente para NE, sendo raramente para SW. Zonas de

cisalhamento dúctil em arranjo anastomosado, geralmente limitam os conjuntos litológicos (**FIG 16**).

O Cinturão Itacaiúnas compreende conjuntos rochosos que estão relacionados através de sistemas imbricados de cavalgamentos dúcteis, ou através de extensos sistemas transcorrentes, denominados de Sistema Transcorrente Araraquara, com direção predominante N-S e Sistema Transcorrente Anaporã, com trend E-W (**FIG. 16**).

O Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas ocupa a maior porção da região enfocada e limita ao norte e a oeste o Terreno Granito-Greenstone do Sul do Pará. De acordo com CPRM (1997) é considerado como uma estrutura arqueana, disposta segundo a direção E-W e composta por um domínio imbricado e por dois domínios transcorrentes (N-S e E-W) (**FIG. 16**). O domínio imbricado apresenta-se estruturado na direção E-W e está estratigraficamente constituído, da base para o topo, pelo Complexo Pium (Araújo et al., 1988), Grupo Sapucaia (CPRM, 1991) e Complexo Xingu (CPRM, 1991).

A unidade Pium é composta por kinzigitos, piriclasitos e granoblastitos, dispostos em forma de faixas orientadas segundo a direção geral do Cinturão Itacaiúnas. O Grupo Sapucaia ocorre também como faixas orientadas segundo a direção E-W, litologicamente constituídas por xistos, filitos, quartzitos e *BIF*.

O Complexo Xingu é a unidade de maior extensão no domínio imbricado sendo composto por gnaisses e migmatitos de natureza granítica, granodiorítica e tonalítica, com enclaves anfíbolíticos. A arquitetura interna do domínio imbricado é fornecida por zonas de cisalhamento com caráter de cavalgamento oblíquo, de direção geral WNW-ESE e com fortes mergulhos ( $>70^\circ$ ) para NNE.

O domínio transcorrente E-W está constituído pelos Grupos Grão-Pará (Araújo et al., 1988), Aquiri (Soares et al., 1988) e São Sebastião (CPRM, 1997), que ocupam a porção norte da região em estudo. Essas unidades são compostas por intercalações de rochas metavulcânicas félsicas e máficas, com rochas metassedimentares (quartzitos e *BIF*). Nesses conjuntos rochosos estão presentes zonas de cisalhamento de movimentação cavalgante oblíqua. Este padrão estrutural elíptico, assimétrico, que apresenta internamente uma configuração divergente, com fortes mergulhos em direção ao centro da porção deprimida.

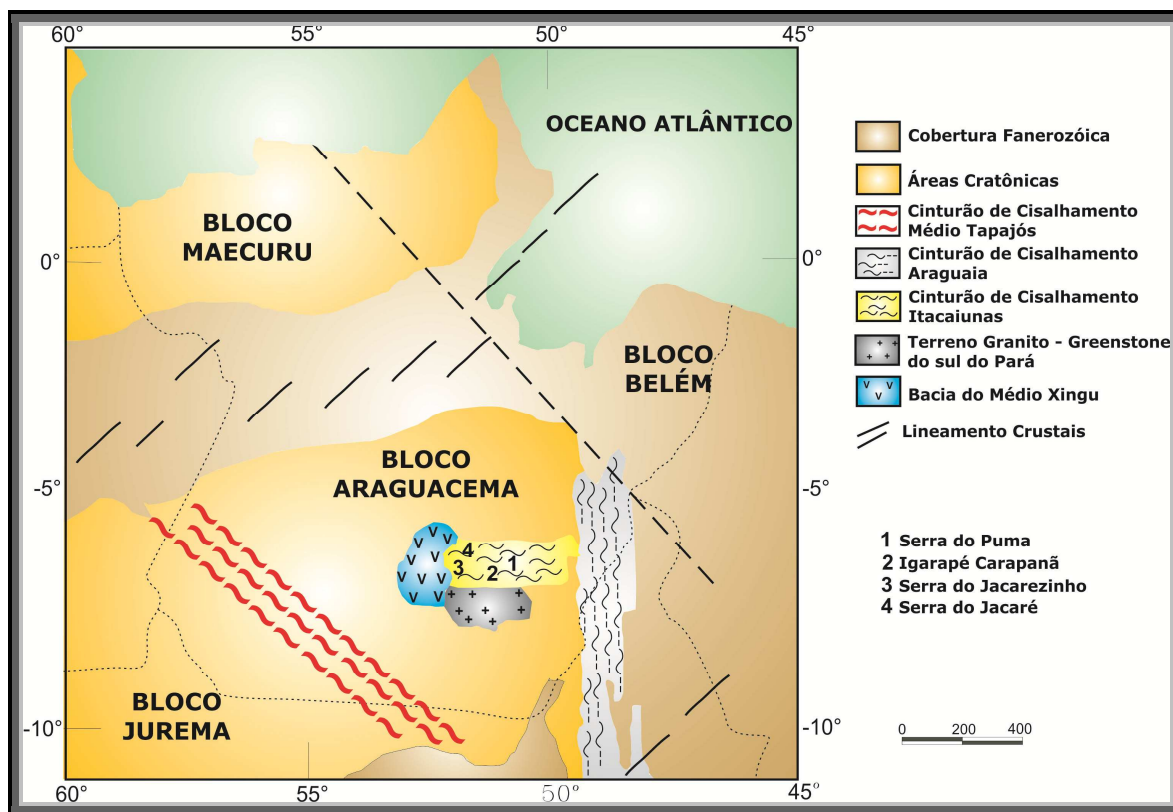
A disposição estrutural das zonas de cisalhamento constitui uma arquitetura que se assemelha a duplex compressivos. O domínio transcorrente N-S dispõe-se em forma de uma faixa na porção centro-oeste da região enfocada. Está constituído pelo Grupo São Félix (CPRM, 1997) litologicamente composto por rochas metassedimentares, metavulcanitos félsicos e máficos, com ultramafitos subordinados.

Sob o ponto de vista estrutural, as zonas de cisalhamento que caracterizam o domínio transcorrente N-S dispõem-se segundo uma estrutura *pull-apart*. Esta é composta por dois embaciamentos, formados por rochas do Grupo São Félix separadas por um alto estrutural do Complexo Xingu.

Nos embaciamentos, as zonas de cisalhamento dispõem-se segundo a direção N-S, e com fortes mergulhos ( $>70^\circ$ ) em direção ao centro das estruturas. Intrusivo nos mencionados domínios estruturais, encontra-se o Granito Plaquê (CPRM, 1997). Ocorre sob a forma de corpos lenticulares, estratóides, orientados segundo os principais *trends* estruturais (NS e E-W) do Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas. Composicionalmente tratam-se de granitos e monzogranitos com texturas miloníticas a protomiloníticas (CPRM, 2001).

A Bacia do Médio Xingu instalou-se no Proterozóico, através de falhas normais que condicionaram a deposição das rochas do Grupo Uatumã em hemi-grabens alongados na direção NW-SE, cortados por falhas transcorrentes NE-SW (**FIG. 16**). A Bacia está situada na porção oeste da região em estudo, ao longo da Bacia do Rio Xingu.

A unidade estratigráfica basal da Bacia do Médio Xingu é o Grupo Uatumã. A sua porção inferior é composta pela Formação Sobreiro (IDESP, 1972 apud CPRM 1997), constituída por andesitos, traquiandesitos e traquitos. Sobrejacente, encontra-se a Formação Iriri (SUDAM, 1972 apud CPRM, 1997), representada por riolitos, riodacitos, dacitos e tufos intercalados. Ainda compondo a Bacia do Médio Xingu, são observadas as rochas da Formação Triunfo (BRASIL. Projeto RADAM, 1974), as quais constituem corpos isolados, assentados discordantemente sobre o Grupo Uatumã e formados por arenitos, arcóseos e leitos conglomeráticos subordinados.



**Figura 16** - Compartimentação geotectônica e estruturas do Sudeste da Amazônia (Adaptado CPRM, 2001).

### 3.3 Geologia Local do Depósito do Jacaré

O Corpo Máfico-Ultramáfico da Serra do Jacaré é parte integrante da Suíte Intrusiva Cateté, considerado de idade Paleoproterozóica Inferior (CPRM, 1997).

O corpo é constituído, basicamente, de serpentinitos nos variados níveis de alteração, estando inserido no contexto geológico de rochas metassedimentares, metavulcânicas ácidas, básicas e ultrabásicas, granitos, gabros e diabásios. Os serpentinitos ocupam a posição basal do empilhamento estratigráfico do conjunto máfico-ultramáfico, e são os litotipos predominantes.

Geralmente apresentam-se intemperizados, com as colorações amareladas, alaranjadas, amarronzadas e acinzentadas. O Complexo do Jacaré constitui uma intrusão acamadada de tamanho médio e orientação geral NS com leve flexão para NE.

Considerando a distribuição das litologias e estruturas, o complexo pode ser

dividido em três áreas geomorfológicas distintas: Sul, Central e Norte (**FIG. 17**).

**a) Área Sul:** A área sul caracteriza-se por um maior arrasamento geomorfológico e não apresenta planos visíveis de silicificação. Esta porção do complexo apresenta-se na forma de platô com tamanho aproximado de 7 x 1 km, sendo a laterita ferruginosa o litotipo predominante, tendo dunitos e peridotitos como litologias minoritárias.

**b) Área Central:** A área central é a mais afetada por falhamento tipo “*strike slip*”, sendo dominada por dunitos e brechas de falha. Em ambos os flancos desta área ocorrem cunhas peridotíticas, normalmente ocupando a porção superior do depósito. Destaca-se a presença de camadas ferruginosas intercaladas com pacotes silicosos nesta porção do depósito.

**c) Área Norte:** A área norte apresenta, além das falhas tipo “*strike slip*”, fraturamento e falhamento NW. É dominado por peridotitos nas zonas mais altas e dunitos nas porções inferiores.

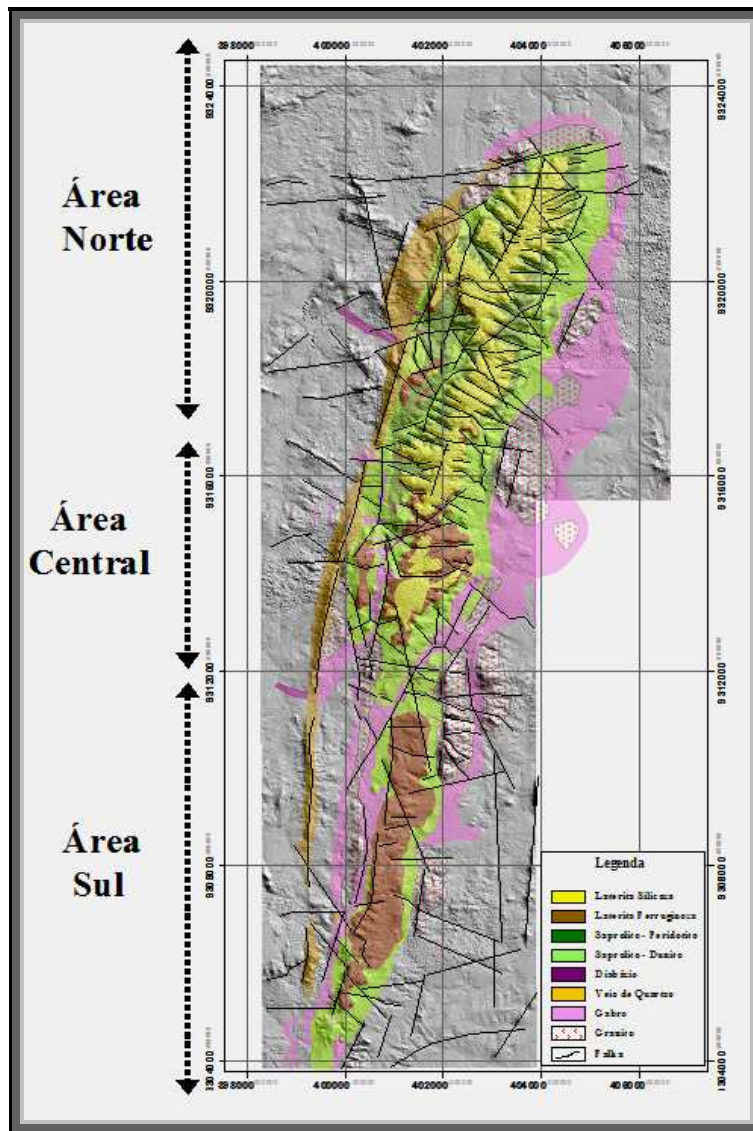
O depósito tem cerca de 18 km de extensão e uma largura variável entre 2 e 4 km, consistindo basicamente, de serpentinitos resultantes de alteração pervasiva de dunitos e peridotitos, com textura *adcumulus* freqüentemente preservada. Nas faixas com textura melhor preservada, é possível observar que a mineralogia primária dos dunitos consistia de olivina + cromita *cúmulus* e com raro ortopiroxênio *intercúmulus* (Anglo American - Relatório Interno). Embora a textura primária esteja bem preservada em alguns afloramentos, a serpentinação é pervasiva e toda mineralogia primária está transformada.

Atualmente a indicação da estratigrafia do alterito do corpo (topo e base) se dá de forma satisfatória em função dos furos de sondagem rotoperussiva existentes, em detrimento de afloramentos não tão abundantes. O grau de alteração, aliado ao forte padrão de fraturamento, consequência do processo de serpentinação, consistem em iguais fatores limitantes na delimitação da continuidade do acamamento primário e consecutiva estratigrafia magmática.

Afloramentos de rochas gabróicas ocorrem associadas ao Complexo Jacaré, sendo caracterizados como diques, em detrimento da possível parte da zona máfica do complexo e, portanto, indicação de uma polaridade no fracionamento do complexo. As



relações de campo mostram que estas rochas intrudem tanto o Complexo Jacaré como os granitóides encaixantes no entorno. A variabilidade textural das rochas de composição gabróicas (grão fino a médio) observada em afloramento, além de estudos petrográficos desenvolvidos, suporta a sua interpretação como.



**Figura 17** - Compartimentação geológica/geomorfológica do Depósito do Jacaré.

Corpos intrusivos de diques de diabásio são verificados em toda a área, normalmente acompanhando *trends* estruturais e/ou falhas.

As rochas da região da Serra do Jacaré foram submetidas, durante o



Cenozóico, a um intenso processo de lateritização regional. Conseqüentemente, desenvolveram-se perfis lateríticos, com a formação de crosta ferruginosa, cujos fragmentos estão presentes na área de pesquisa. Assim, as crostas lateríticas associadas às rochas do Granito Plaquê, exibem colorações variando de amarelo-avermelhado a marrom-avermelhado, porosas, às vezes cavernosas, com textura pseudo-brechóide e localmente oolítica e psolítica. São formadas essencialmente de óxidos e hidróxidos de ferro e secundariamente por compostos de alumínio.

No domínio do Grupo São Félix (metabásicas, metassedimentares, etc) as crostas lateríticas exibem tonalidades marrom-escuro e marrom-avermelhada, granulometria fina, porosas, algumas vezes cavernosas e compostas essencialmente por óxidos e hidróxidos de Fe, Al e Mn.

No domínio dos serpentinitos a laterização se dá de forma acentuada e variada ao longo do depósito, observando-se uma capa laterítica desenvolvida a partir de um serpentinito intensamente oxidado. Ocorre na forma de blocos, com as colorações amareladas, avermelhadas e amarronzadas, poroso, fraturado, com algumas fraturas preenchidas por sílica e/ou impregnadas com compostos secundários de ferro; conserva a estrutura da rocha-mãe e, em lâmina petrográfica, exhibe os minerais serpentínicos transformados em minerais ferruginosos (CPRM, 2001).

Este processo de laterização gerou três tipos distintos de alteritos enriquecidos em níquel. A porção superior, caracterizada por uma carapaça laterítica tipicamente silicosa, é seguida por uma porção intermediária ferruginosa e, finalmente na base, o saprólito derivados de serpentinitos.

### 3.3.1 Geologia Estrutural do Depósito do Jacaré

Sob o ponto de vista tectono-estrutural, o Complexo Máfico-Ultramáfico da Serra do Jacaré situa-se no domínio do Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas, mais especificamente, no Sistema Transcorrente Araraquara (CPRM, 1997).

Apresenta-se, em superfície, sob a forma alongada segundo a direção meridiana e estruturalmente concordante com a direção regional (NS) da transcorrência Araraquara. Na área de pesquisa os principais elementos estruturais são as falhas e fraturas. Essas estão distribuídas em toda a área de trabalhos, atingindo tanto o corpo máfico-ultramáfico, como as rochas encaixantes. Estão dispostas preferencialmente segundo as direções N-S e NW-SE e, geralmente, de mergulho subvertical.

Entre as falhas merece destaque uma extensa zona situada na borda ocidental do corpo, desenvolvida sobre o Granito Plaquê e o Grupo São Félix. Apresenta uma extensão de cerca de 15 km, uma orientação submeridiana e um posicionamento subvertical. Essa zona encontra-se preenchida por quartzo branco-leitoso (**FIG. 18**).

Interpreta-se, também, que os diques do diabásio, os quais seccionam a seqüência serpentínica segundo a direção N/S e E/W, igualmente estejam preenchendo fraturas semelhantes e paralelas às que estão preenchidas por quartzo.

No domínio das rochas encaixantes, há a presença de lineações miloníticas. Essas estão dispostas principalmente segundo a direção N-S e, secundariamente, na direção NW-SE. As feições miloníticas são bem mais conspícuas nas rochas do Grupo São Félix, particularmente na porção sudeste da área de pesquisa. As lineações miloníticas ensaiam dobramentos, algumas vezes visíveis nos afloramentos. Integrando-se essas feições é possível interpretar grandes arqueamentos.

No âmbito do Granito Plaquê as foliações milonítica são menos perceptíveis. São fraturamentos com, algumas vezes, fraturas dispostas de maneira transversal e, em outras, subparalelas, com espaçamento milimétrico a centimétrico, fornecendo à rocha um padrão pseudo-acamadado. Frequentemente as fraturas estão preenchidas por óxidos e hidróxidos de ferro e localmente por calcedônia (CPRM, 1997).

O complexo ultrabásico falhado através de falhas tipo *strike slip* com movimento dextral, apresenta vergência para norte-nordeste, com as unidades litológicas mergulhando 40° a 60° para leste.

Existem quatro grupos principais de sistema de falhamento/fraturamento: **(a)** falhas do tipo *strike slip* com vergência para norte-nordeste, **(b)** conjugados para nordeste a partir das falhas norte-nordeste, **(c)** falhas oeste-noroeste do tipo *strike slip*, apertadas, e **(d)** fraturas associadas aos diversos movimentos tectônicos (**FIG. 18**).

a) Falhas *strike slip N-NE* apresentam movimento dextral e são comuns próximo aos contatos do terreno granito-gnáissico. A vergência destas falhas predomina na direção NE e são observadas em todo o depósito, com melhor distinção nos blocos central e norte, devido ao alto grau de arrasamento da área sul. Porém, é possível observar certo alinhamento das rochas da porção sul, respeitando o mesmo *trend* estrutural das demais áreas (**FIG 18**). Estas falhas mergulham para SE, sugerindo um cavalgamento dos blocos de sul para norte. A silicificação é intensa ao longo dos planos de falha, com sílica sendo produzida durante a dissolução de silicatos insaturados (olivinas). A maior resistência destas zonas silicificadas ao intemperismo e erosão, garantem a formação de cristas que distinguem a topografia das áreas norte e central do complexo (**FIG. 18**).

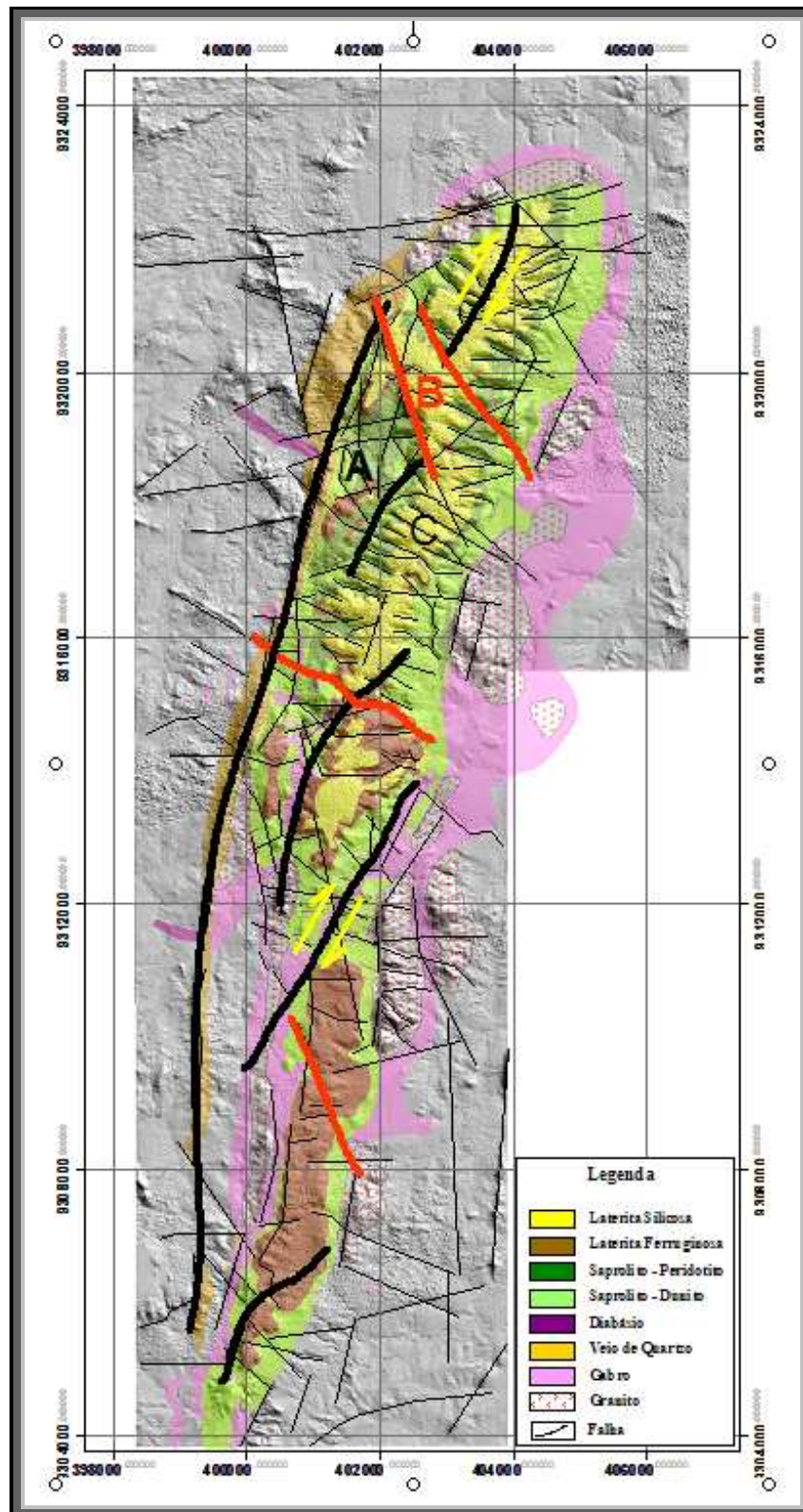


Figura 18 - Grupos principais de falhamento/fraturamento.

b) Zonas de Falha *strike slip*, marcada por rocha brechada, ocorrem no limite da porção central com a porção norte e boa parte da porção norte. Estas falhas apresentam variação no ângulo de mergulho de vertical a subvertical e uma tendência de direção de mergulho para SE (FIG. 19).

c) Falhas e fraturas leste-oeste e leste-noroeste cortam as porções central e norte do depósito. Os planos destas feições são, normalmente, silicificados, o que gera uma condicionante importante na resistência destas rochas ao intemperismo, em comparação às rochas ultrabásicas não silicificadas. Estes planos geram uma série de cristas alinhadas e paralelas, as quais divergem das cristas leste - oeste do sistema anteriormente descrito (FIG. 19).

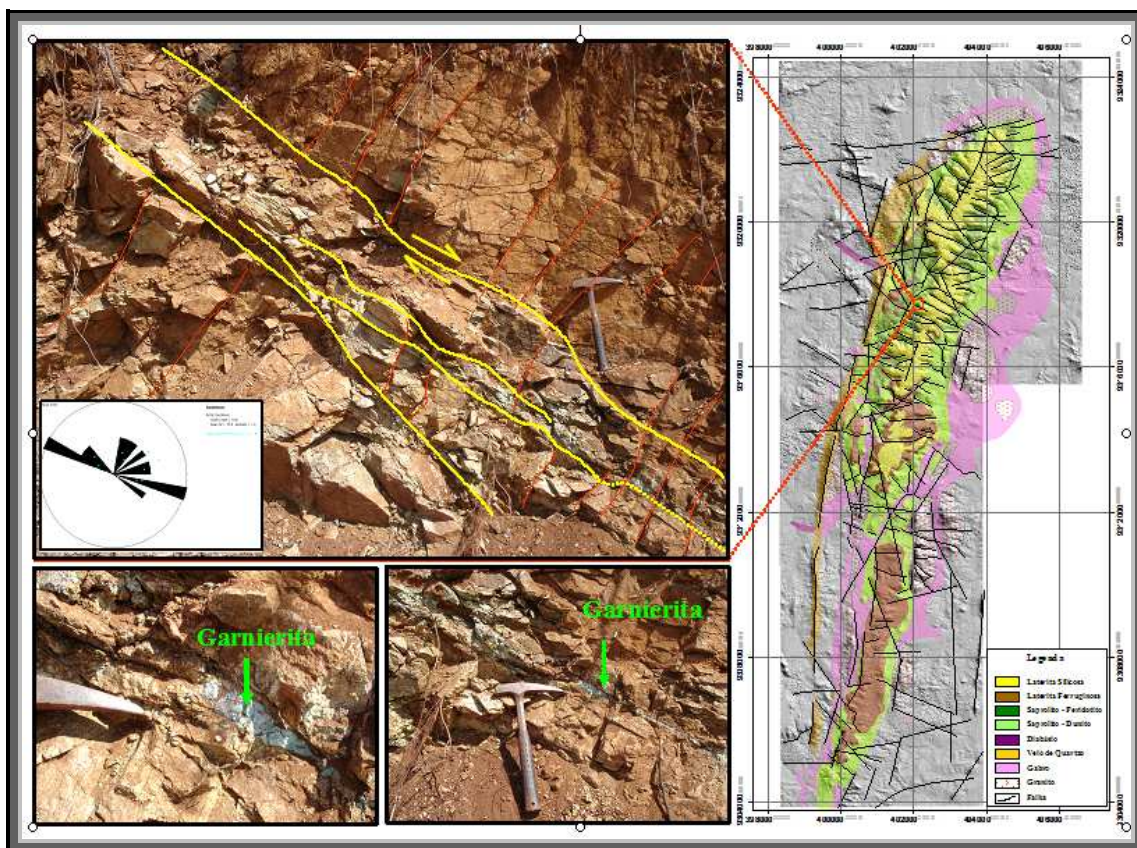


Figura 19 - Espaços gerados durante a evolução tectônico-estrutural da área servem de acomodação para minerais secundários enriquecidos em Ni, tais como “garnieritas” e crisoprásios.

d) O complexo como um todo, apresenta-se fraturado em diversas direções. Estas fraturas, em escala de afloramento, refletem o padrão conjugado dos esforços



estruturais, bem como alívio de pressão quando do resfriamento da rocha ultramáfica. Estas fraturas são de suma importância na mineralização do depósito, visto que são espaços gerados durante a evolução tectônica estrutural da área, e servem de acomodação para minerais secundários enriquecidos em Ni, tais como “garnieritas” e crisoprásius (FIG. 19).

### 3.3.2 Perfil de Alteração do Depósito do Jacaré

Da base para o topo, observa-se uma sucessão de horizontes no perfil de alteração do depósito do Jacaré, denominados: rocha fresca (dunitos e peridotitos serpentinizados), zona de boulder, saprolito, laterita ferruginosa, laterita silicosa (FIG. 20). Descrições mais detalhadas serão demonstradas no decorrer da presente dissertação.

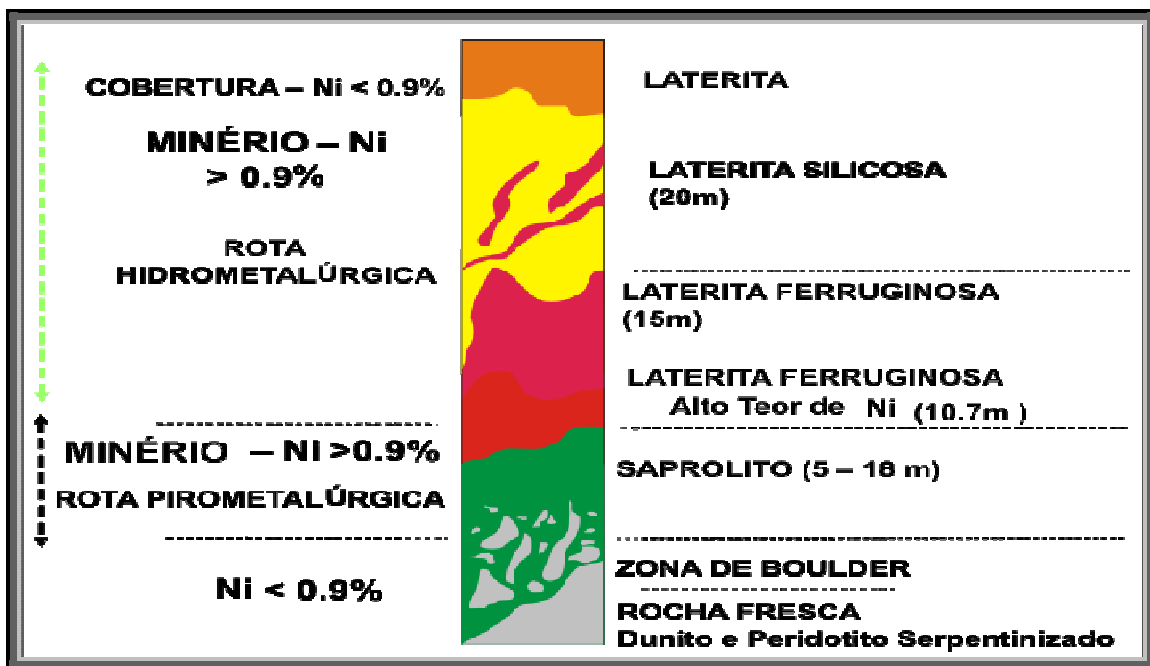


Figura 20 - Perfil laterítico idealizado sobre rochas duníticas e peridotíticas serpentinizadas do Depósito do Jacaré.

Abaixo (Tabela 04) segue um resumo das características químicas dos diversos horizontes que compõem as fácies de alteração da referida jazida:

<b>Tipo de Minério</b>	<b>Ni (%)</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	<b>SiO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>MgO (%)</b>
Laterita	0,4	44,52	17,6	0,6
Laterita Silicosa	0,93	29,3	44,4	2,32
Laterita ferruginosa	1,21	41,4	18,5	8,7
Saprolito	1,37	14,4	36,4	26,9
Zona de Boulder	0,45	6,64	39,9	36,3
Rocha Fresca	0,35	6,20	37,24	37,96

**Tabela 04** - Resumo das características químicas das fácies mineralizadas do depósito.

## 4 Objetivos

Os trabalhos desenvolvidos nesta dissertação de Mestrado tiveram como propósito identificar, mensurar e caracterizar a variabilidade mineralógica e geoquímica das fases de alto teor em níquel (>2%) dos minérios lateríticos e saprolítico do Depósito do Jacaré (PA), possibilitando, assim, compreender a não-homogeneidade do depósito e, principalmente, obter informações necessárias capazes de interagir efetivamente num processo metalúrgico de “*up grade*” e extrativo mais efetivos.

Adicionalmente, compreender a relação destas fases com estruturas, interação fluido-rocha e composição do protólito, culminando com a proposta de um modelo genético evolutivo para a área.

Os resultados irão colaborar na elaboração de um aplicado esquema de classificação para minério laterítico e saprolítico encontrados no Depósito do Jacaré, abrangendo os campos geoquímicos, mineralógicos e metalúrgicos.

A dissertação tem como área de estudo o Projeto Jacaré (Anglo American plc), situado na porção Sudeste do Estado do Pará, inserido no contexto geológico do distrito mineiro de Carajás.

O trabalho contou com material referente a cinco furos de sondagem rotoperfuração por circulação reversa, perfazendo um total de 168 amostras, as quais foram analisadas de forma seletiva e individualmente através de diversas metodologias.



## 5 Metodologia

O depósito do Jacaré apresenta distinta mineralização de Ni, estando ela relacionada à lateritas e saprolitos. As lateritas do depósito apresentam características silicosas (laterita silicosa) e características limoníticas (laterita ferruginosa). O saprolito, por sua vez, apresenta algumas feições originais da rocha fonte (serpentinito).

Neste sentido, devido à complexidade mineralógica e evolutiva do depósito, uma série de técnicas analíticas foram aplicadas para elaboração da dissertação em tela, a fim de alcançar fidedignidade nos resultados obtidos e maior precisão nas repostas desejadas para os objetivos propostos.

O programa de atividades para a caracterização do minério laterítico e saprolítico do depósito do Jacaré contou com metodologias químicas, petrográficas e petrológicas discutidas a seguir, visando determinar as fases minerais que compõe o minério, seu percentual, granulometria, quantificação dos teores químicos e inter-relação destes.

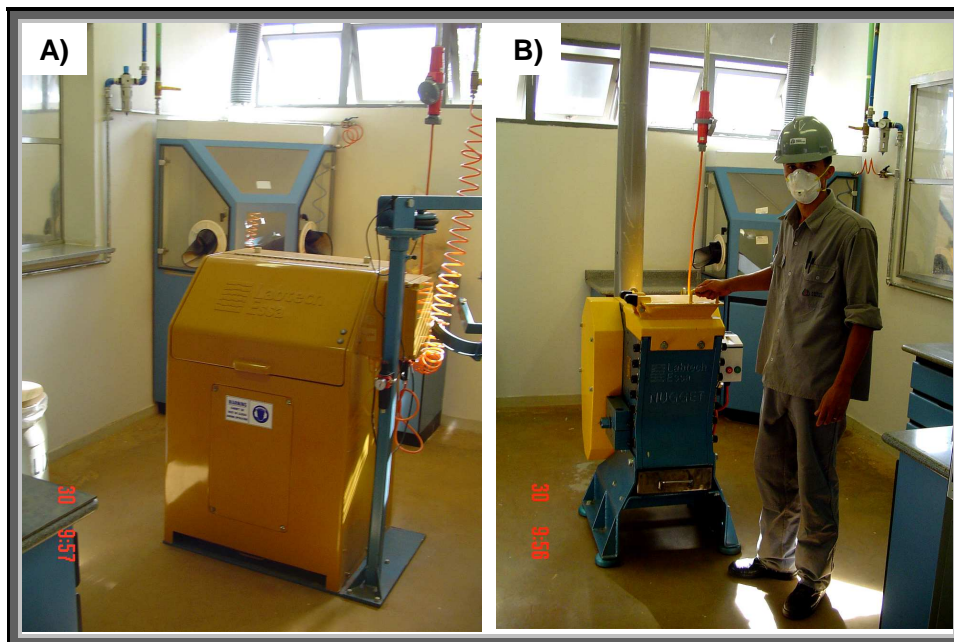
### 5.1 Preparação de Amostras

As amostras coletadas na respectiva área foram preparadas em dois laboratórios: de 2003 a 2006 no setor de preparação do Projeto Barro Alto, localizado no escritório da mina de Barro Alto – GO, de propriedade da Anglo American, e a partir de 2007, no laboratório de preparação da ACME Labs, localizado na cidade de Marabá - PA.

Entre os equipamentos utilizados no processo de preparação de amostras, estão uma balança de precisão, fornos a gás como na **Figura 21**, com capacidade total para 316 amostras, um britador com 2 mm de abertura (**Fig. 22B**), um pulverizador a disco (**Fig. 22A**) e dois quarteadores mecânicos.



**Figura 21** - Fornos a gás para secagem de amostras.



**Figura 22** - Setor de preparação de amostras em Barro Alto. A) Pulverizador; B) Britador.

Os procedimentos de preparação de amostras finas produzidas pela sondagem para envio ao laboratório estão resumidos a seguir:

- Pesagem das amostras;
- Secagem das amostras a 100°C em fornos a gás;
- Pesagem das amostras secas;
- Homogeneização e quarteamento das amostras com quarteadores mecânicos;

- Britagem fração > 2 mm;
- Quarteamento das amostras até produzir duas alíquotas de 50 g cada (<106 microns), das quais uma é encaminhada ao laboratório e outra armazenada em arquivo.

O material excedente preparado, o qual não foi enviado à análise, é estocado até o momento da chegada dos resultados analíticos e sua aprovação no controle de qualidade denominado QAQC para, então, ser descartado.

Visando obter a granulometria mais grosseira possível, as amostras selecionadas para Petrografia e Difractometria de Raios X foram coletadas junto aos rejeitos grosseiros, material este que não foi tratado por quarteamento secundário. Este procedimento garantiu amostras homogeneizadas e com granulometria maior ou igual a 2mm.

## 5.2 Análise Química

Todas as amostras foram analisadas no laboratório Acme, no Canadá, através dos métodos denominados 4A e 7TD, cujos parâmetros técnicos estão descritos abaixo.

O método 4A consiste da fusão de 0,2g de amostra a 1000°C juntamente com 1,5g de LiBO<sub>2</sub> seguidos de digestão de 100 mL a 5 %HNO<sub>3</sub> para análise da solução via ICP-ES dos elementos maiores (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, MnO, TiO<sub>2</sub>, NiO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), reportados em porcentagem (%) e também dos elementos traços (Ba, Nb, Ni, Sc, Sr, In, Zr), reportados em parte por milhão (ppm).

O método 4A inclui Ensaio de Perda ao Fogo (*Lost on Ignition* ou LOI), que é medido através da diferença de pesagem de 1g de amostra antes e após a sua ignição a uma temperatura de 1000°C. Esta diferença de peso, medida em porcentagem, é denominada LOI.

O método 7TD consiste da digestão de 0,5g de amostra em 20 mL de solução ácida (HNO<sub>3</sub>:HClO<sub>5</sub>:HF:H<sub>2</sub>O) a 200°C para formação de solução. Esta solução é

seca e seu resíduo sólido é diluído em 16 mL de solução a 50 % HCl, à aproximadamente 95°C por uma hora. Com o resultado deste procedimento é formada uma solução volumétrica de 100 mL a 5% HCl que é submetida à análise final de Co, Cu e Ni, em porcentagem, via ICP-ES. Análises de "S" e "C" totais em porcentagem (%) também podem ser realizadas através da metodologia LECO.

### 5.3 Petrografia Ótica

Realizou-se a identificação e descrição das fases presentes em Luz Transmitida (espécies transparentes) e Refletida (minerais opacos) incluindo morfologia, texturas, tamanho de grão das partículas das amostras do minério saprolítico. Análise da abundância das fases minerais presentes no minério saprolítico. Inclui a obtenção de imagens digitais de todas as espécies quantificadas e texturas relevantes. Fragmentos das amostras foram submetidos ao um processo de impregnação com resinas para preservarem o seu conteúdo mineralógico e fábrica durante o processo de confecção das lâminas petrográficas.

Devido ao caráter normalmente friável destes materiais e a necessária qualidade para a obtenção dos resultados analíticos posteriores (análises químicas por EDS e WDS e de mapeamento dos elementos por microscopia eletrônica por elétrons retroespalhados – *back scattered electrons*), foram empregadas técnicas especiais utilizando a tecnologia do Laboratório da Spectrum Petrographics, Inc (Vancouver, WA, USA). As lâminas petrográficas foram inicialmente estudadas com um microscópio petrográfico Leica DMLP, equipado com câmara digital Sony Exwave HAD para a aquisição de imagens digitais (**FIG. 23**).

As nomenclaturas das texturas, bem como os parâmetros ópticos adotados na identificação e descrição das espécies serpentínicas seguiram Wicks & Whittaker (1977).



**Figura 23** - Microscópio ótico com câmera CCD conectada ao microcomputador.

#### 5.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

As microanálises químicas quantitativas pontuais, executadas via Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), foram realizadas sobre serpentinas, olivinas, espinélios e minerais de alteração, previamente identificadas em lâmina petrográfica.

A microanálise química dos minerais foi realizada em um microscópio JEOL JSM-5800 no Centro de Microscopia Eletrônica da UFRGS (**FIG. 24**). Este equipamento possui resolução de imagem de ponto de 3,5nm, faixa de magnificação de 18X até 300.000X, estágio de goniômetro excêntrico de cinco eixos, utilizando voltagem de 20kV e corrente de 60nA. O microscópio é equipado com um espectrômetro do tipo dispersão de energia (EDS), o que possibilita análises químicas semi-quantitativas dos elementos entre o B e o U.

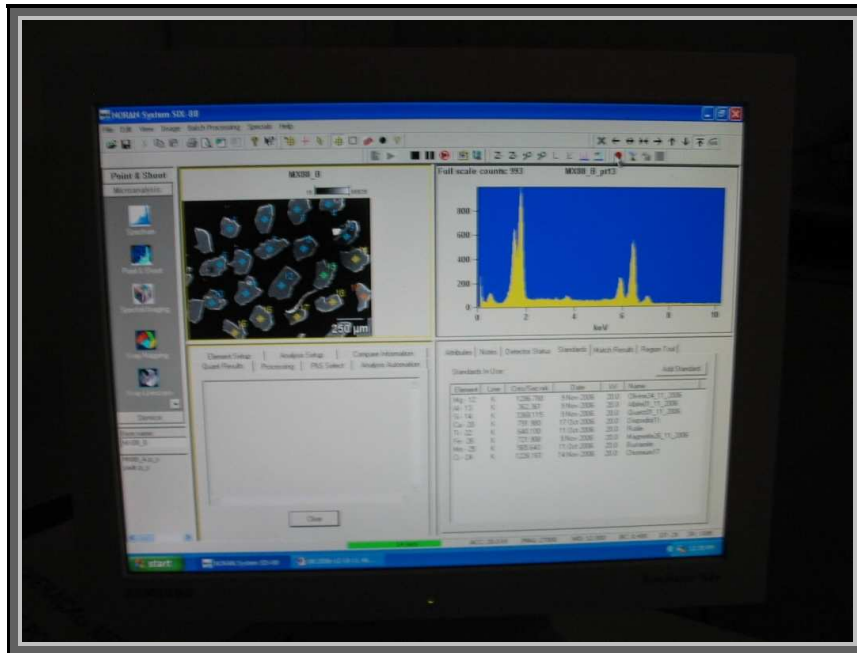
A técnica analítica empregada utiliza-se da medida da fluorescência de raios-X produzida pelos átomos que compõem os minerais, quando excitados por um feixe de elétrons. A intensidade de fluorescência produzida pelos átomos são adquiridas por um

detector sólido de silício [(Si(Li)), 133 eV] e apresentadas na forma de um espectro de dispersão de energia (EDS).

O método de análise desenvolvido para o processamento das amostras do Depósito do Jacaré, leva em consideração a fluorescência de Raios-X e a calibração dos espectros através do uso de padrões de minerais com certificação internacional. O processamento é feito através de equipamento e rotinas computacionais especialmente construídas para este fim. A rotina computacional esta baseada no programa Noran System Six 88® (**Fig. 25**) e na introdução de acessórios especiais ao microscópio eletrônico de varredura, como um medidor de alta precisão da corrente efetiva na amostra, em conjunto com um dispositivo de medida tipo *copo de faraday*. A possibilidade de media da corrente, na ordem de  $10^{-13}$  amper (pico amper ou 10p) foi viabilizada através de um picoamperímetro Keithley® (**FIG. 26**). As condições analíticas empregadas foram: tensão de aceleração 20kV, corrente no filamento de  $60 \times 10^{-10}$  A, tempo de aquisição de 50 segundos.



**Figura 24** - Visão geral do Microscópio Eletrônico de Varredura – JEOL JSM-5800, equipado com um espectrômetro EDS utilizado no projeto.



**Figura 25** - Visualização de uma das janelas do sistema de processamento das contagens obtidas pelo detector EDS, constituído pelo programa Noran System Six 88®.

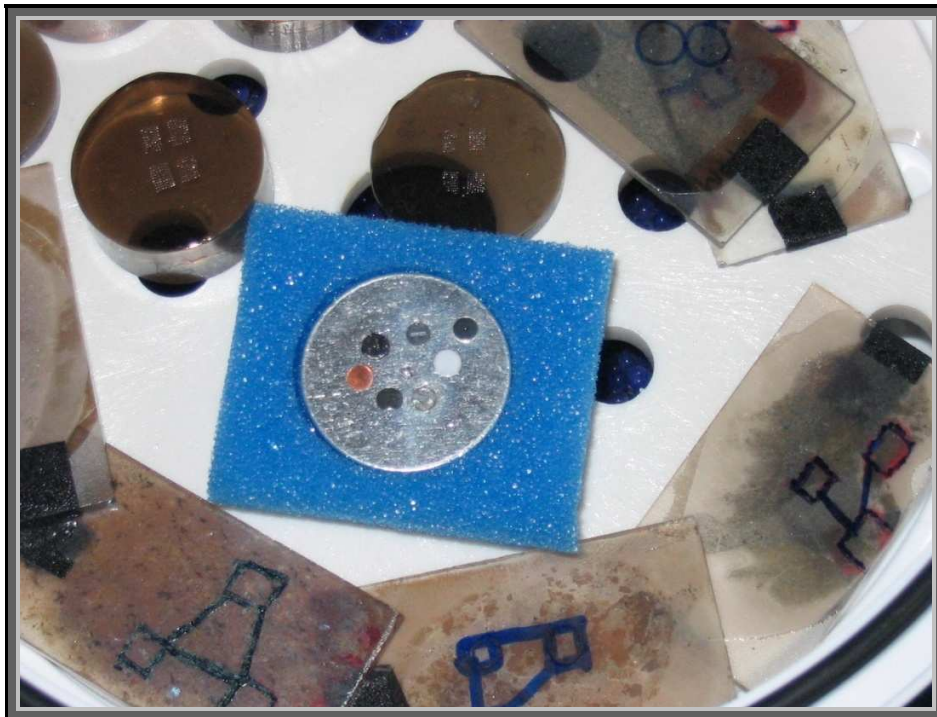


**Figura 26** - Parte frontal do picoamperímetro Keithley®. Este equipamento, acoplado ao microscópio eletrônico de varredura é capaz de medir variações na corrente na ordem de  $10^{-13}$  A ou 10pA.



As análises químicas quantitativas são obtidas a partir da calibração com padrões de minerais (**Fig. 27**) contendo os diferentes elementos químicos esperados na amostra (**Tabela 5.8 - 01**).

A precisão das análises depende dos elementos quantificados, da forma que estes estão ligados na estrutura dos minerais e de uma perfeita avaliação da corrente na amostra durante os procedimentos analíticos.



**Figura 27** – Vista das lâminas petrográficas e do conjunto de padrões de minerais utilizados no processo de análise.



1.	<a href="#">Albite</a>	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	28	<a href="#">Jadeite</a>	NaAlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
2.	<a href="#">Almandine Garnet</a>	Fe <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	29	<a href="#">Kaersutite</a>	Ca <sub>2</sub> Na(MgFe) <sub>4</sub> Ti <sub>2</sub> Si <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>
3.	<a href="#">Anhydrite</a>	CaSO <sub>4</sub>	30	<a href="#">Marcasite</a>	FeS <sub>2</sub>
4.	<a href="#">Apatite</a>	Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> F	31	<a href="#">Molybdenite</a>	MoS <sub>2</sub>
5.	<a href="#">Barite</a>	BaSO <sub>4</sub>	32	<a href="#">Monazite</a>	(Ce,La,Y,Th)PO <sub>4</sub>
6.	<a href="#">Benitoite</a>	BaTiSi <sub>3</sub> O <sub>9</sub>	33	<a href="#">Obsidian</a>	Na,K,Al,Fe silicate glass
7.	<a href="#">Biotite</a>	K(Fe,Mg) <sub>3</sub> AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	34	<a href="#">Olivine</a>	(MgFe) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
8.	<a href="#">Pollucite</a>	CsSi <sub>2</sub> AlO <sub>6</sub>	35	<a href="#">Plagioclase</a>	(Ca,Na)Al(Al,Si)Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>
9.	<a href="#">Thallium Bromide/Iodide</a>	TlBr 42%, TlI 58%	36	<a href="#">Pentlandite</a>	(Fe,Ni) <sub>9</sub> S <sub>8</sub>
10.	<a href="#">Bustamite</a>	(Mn,Ca)SiO <sub>3</sub>	37	<a href="#">Pyrope Garnet</a>	Mg <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>12</sub>
11.	<a href="#">Calcite</a>	CaCO <sub>3</sub>	38	<a href="#">Quartz</a>	SiO <sub>2</sub>
12.	<a href="#">Cassiterite</a>	SnO <sub>2</sub>	39	<a href="#">Rhodonite</a>	MnSiO <sub>3</sub>
13.	<a href="#">Celestite</a>	SrSO <sub>4</sub>	40	<a href="#">Rutile</a>	TiO <sub>2</sub>
14.	<a href="#">Cuprite</a>	Cu <sub>2</sub> O	41	<a href="#">Sanidine</a>	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
15.	<a href="#">Chlorite</a>	Mg <sub>6</sub> AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	42	<a href="#">Sphalerite</a>	ZnS
16.	<a href="#">Chrome Diopside</a>	(Mg,Cr)CaSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	43	<a href="#">Spodumene</a>	LiAlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
17.	<a href="#">Chromium Oxide</a>	FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	44	<a href="#">Stibnite</a>	Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>
18.	<a href="#">Cinnabar</a>	HgS	45	<a href="#">Tugtupite</a>	Na <sub>4</sub> AlBeSi <sub>4</sub> O <sub>12</sub> Cl
19.	<a href="#">Skutterudite</a>	CoAs <sub>3</sub>	46	<a href="#">Willemite</a>	(ZnMn) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
20.	<a href="#">Crocoite</a>	PbCrO <sub>4</sub>	47	<a href="#">Cubic Zirconia</a>	ZrO <sub>2</sub>
21.	<a href="#">Diopside</a>	MgCaSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	48	<a href="#">Gallium Arsenide</a>	GaAs
22.	<a href="#">Dolomite</a>	MgCa(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	49	<a href="#">Boron</a>	BN

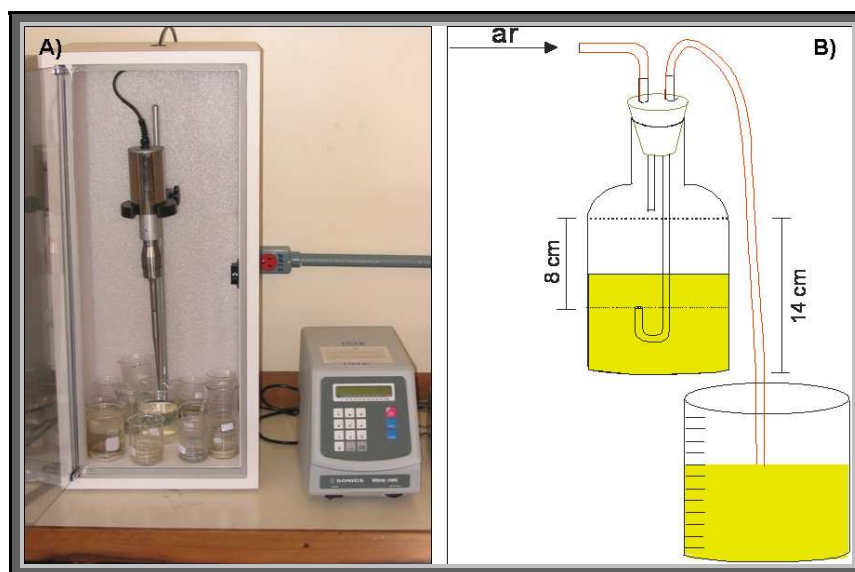
**Tabela 05** - Padrões utilizados para a obtenção das análises químicas quantitativas ao microscópio eletrônico de varredura. Os padrões grifados foram empregados para a análise dos minerais.

### 5.5 Análise por Difratometria de Raios-X: Preparação das amostras e separação das frações

A preparação das amostras para os estudos por difratometria consistiu, inicialmente, na desagregação da amostra com o cuidado de não pulverizar as fases minerais do minério. O objetivo é separar os componentes mais finos, normalmente fases neoformadas no ambiente supergênico, cujo tamanho é nanométrico. Após a desagregação, as amostras são colocadas em agitadores mecânicos por um período de no mínimo 12 horas.

O processo de preparação para as análises difratométricas termina com o emprego de tratamentos com ultra-som de ponteira (**FIG. 28**).

Tendo-se a amostra desagregada, procede-se à separação de frações granulométricas mediante o emprego de técnicas de decantação natural ou forçada através de ultracentrífuga, com o controle do tempo, temperatura e rotação para a aplicação da Lei de Stokes (**FIG. 28**).



**Figura 28 - A)** Desagregador de partículas por ultra-som, modelo Sonics. **B)** Esquema de separação de fração empregado no estudo dos argilominerais pelo processo de decantação normal.

As amostras submetidas à análise por Difração de Raios X tiveram por objetivo alcançar o detalhamento na identificação mineral envolvendo rocha total e frações finas. O procedimento adotado foi:

- 1) Cada amostra foi separada em duas frações de granulometria distintas através de peneira com malha de 2mm.
- 2) Cada subfração foi pulverizada, resultando em DRX total (mineralogia total).
- 3) As frações resultantes (>2 mm e <2mm) foram desagregadas e processadas para separar as frações granulométricas <2 μm e <20μm.
- 4) As frações resultantes (<2 μm e <20μm) foram arranjadas em seções de vidro, com o intuito de proceder a Difração de Raios X em amostras orientadas (especialmente para estudo de argilas).

#### 5.6 Análise por Difratometria de Raios-X

As análises por Difratometria de Raios X (DRX) foram realizadas no Difratomômetro de Raios-X Siemens D5000, goniômetro theta-theta existente no Laboratório de Difratometria de raios-X do CPGq – UFRGS (**FIG. 29**). O intervalo angular analisado foi de de 2° até 80°, sendo também analisados intervalos específicos destes valores, conforme as necessidades. O passo (*step size*) utilizado de 0,01° nas frações <20μm e 0,02° nas frações <2μm, porém, também foram empregados outros valores em difratogramas específicos, conforme a necessidade de maior detalhamento.

Foram utilizadas fendas de 1° (divergente e de antiespalhamento) e de 2 mm no monocromador de grafite. Os dados obtidos nesta técnica serviram para a determinação da estrutura cristalina com identificação das espécies e politipos relevantes e complementação das análises da petrografia ótica e MEV. Discriminação das fases portadoras de níquel (filossilicatos e minerais associados) do minério saprolítico e laterítico.



**Figura 29** - Difratorômetro de Raios-X modelo Siemens D5000, goniômetro  $\Theta$ - $\Theta$ , utilizado nos estudos mineralógicos dos argilominerais do projeto.

### 5.7 Balanço de Massa

O balanço de massa utilizado para avaliar a mobilidade dos elementos químicos ao longo de um perfil de alteração segue, normalmente, dois procedimentos: balanço isovolumétrico e balanço volumétrico (Porto, 1995).

O método isovolumétrico é aplicado onde a rocha alterada em questão preserva o volume original bem como texturas e estruturas, com substituição pseudomórfica de minerais por argilas, óxidos e hidróxidos (Nahon, 1986).

Neste sistema o enriquecimento absoluto ou depleção de um elemento no material alterado ( $w$ ), em relação ao material parental ( $p$ ), ou o fator de enriquecimento ( $E$ ), é proporcional à densidade ( $\rho$ ) mudando de acordo com a seguinte fórmula, onde  $C$  é a concentração do elemento:

$$E = C_w \rho_w / C_p \rho_p - 1$$

Na observação da inexistência de evidências de transformações isovolumétricas, como as porções superiores dos perfis de alteração, onde a laterização se

desenvolveu de forma proeminente, o balanço de massa é realizado através da utilização de certos elementos (i), em função de sua menor mobilidade química. Neste caso, o volume não é levado em conta, consecutivamente, o fator densidade não é equacionado. O fator de enriquecimento de mobilidade química é, então, dado por:

$$E = C_w C_{pi} / C_p C_{wi} - 1$$

Assim, a determinação dos elementos químicos menos móveis dentro do perfil de alteração evidencia-se como primordial para a acuracidade do cálculo e determinação do consecutivo fator de enriquecimento ou depleção.

Visando realizar o cálculo de balanço de massa através dos dados litogeoquímicos, um elemento conservativo deve ser identificado junto ao espectro dos elementos analisados para uso como denominador das relações. Usando a avaliação dos possíveis elementos conservativos, foram pré selecionados  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $P_2O_5$ , Zr, Nb e Y, principalmente devido à baixa probabilidade destes terem sido transferidos durante os processos de fracionamento, metamorfismo ou intemperismo, relacionado ao seu comportamento incompatível e baixa solubilidade em meio fluido.

Os testes revelaram que o Cr se destacou como o principal elemento a ser utilizado nos cálculos de balanço de massa, principalmente devido a não existência de problemas analíticos (problemas de detecção) e, adicionalmente, apesar de uma grande proporção de amostras exibirem alta concentração de Cr quando analisados os bancos de dados integrados (rocha alterada e rocha fresca), isto é interpretado em função do processo de perda de massa, o qual enriquece residualmente o material em  $Cr_2O_3$  durante o intemperismo. Conseqüentemente, Cr parece ser o elemento mais conservado.

## 6 Resultados

Os resultados descritos na presente dissertação referem-se 168 amostras oriundas de cinco furos realizados através de sonda rotopercussiva por circulação reversa,

as quais foram analisadas de forma seletiva e individualmente, através de técnicas descritas no Capítulo 5.

As amostras foram selecionadas em função da sua posição estratigráfica no perfil de alteração, normalmente representado limites dos horizontes de alto teor (>1,8%) de Ni, o que garantiu ao trabalho uma leitura dinâmica e realística das causas e conseqüências destas variações.

## 6.1 Furo FJA 146

### 6.1.1 Geomorfologia e Descrição

O Furo FJA 146 (401230.788E; 9312422.635N) encontra-se na porção central do corpo do Jacaré, nas imediações de um grande falhamento geológico com movimento dextral do tipo “*strike slip*” (**FIG. 30**).

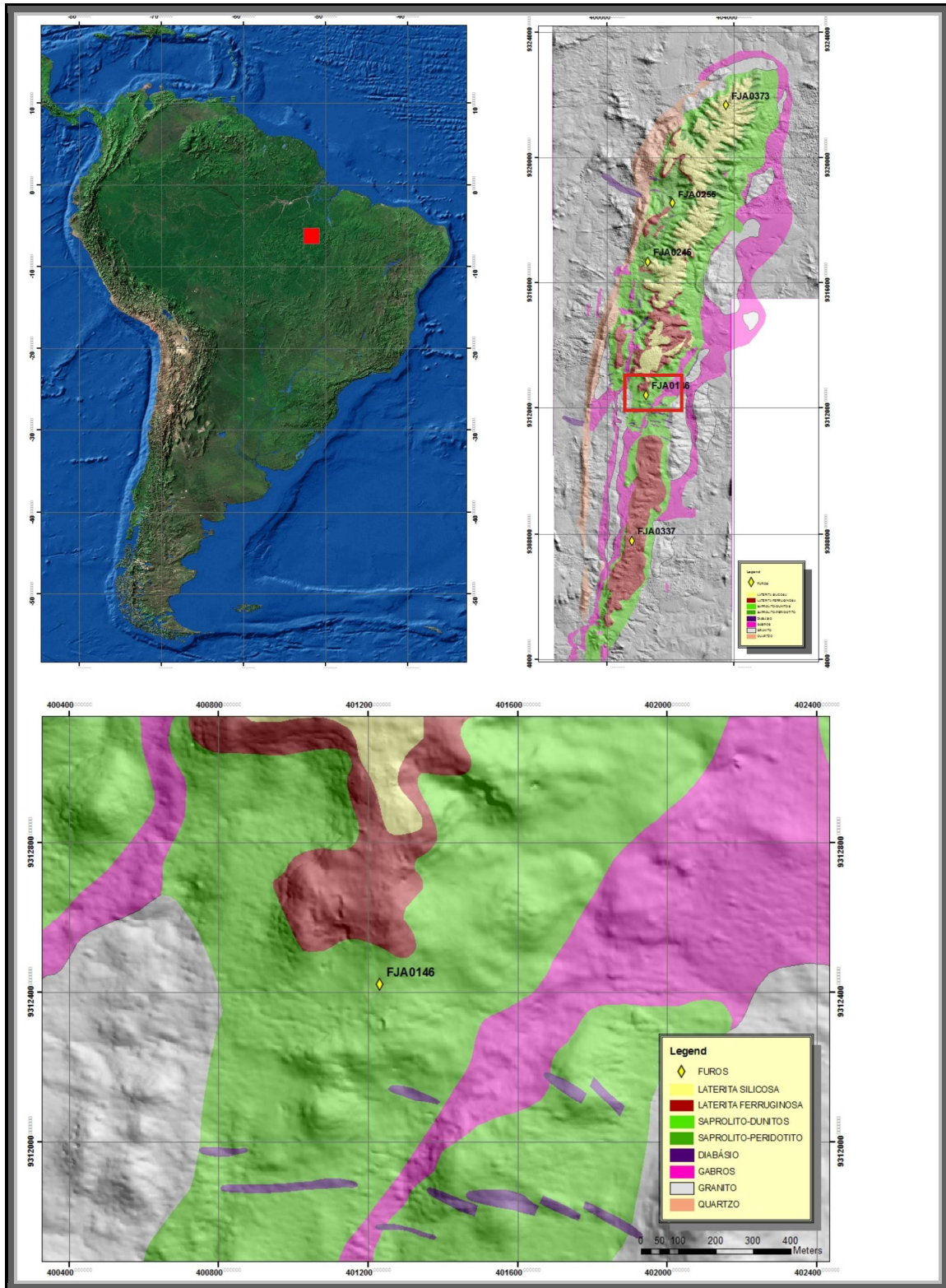
Caracteriza-se por uma zona topograficamente intermediária, em encosta, com relevo proeminente e relícto, além de perfil saprolítico bem desenvolvido ao longo de 12 metros, dos 15m totais que compõe o furo. Não há cobertura silicosa ou ferruginosa no perfil estudado.

O perfil, da base para o topo conta com 3m de rocha fresca (15m aos 12m), 2m de Zona Cloritizada<sup>2</sup> (12m aos 10m), 9m de Zona Saprolítica (10m ao 1m) e 1m de Laterita Ferruginosa (1m a 0m) (**FIG. 31**).

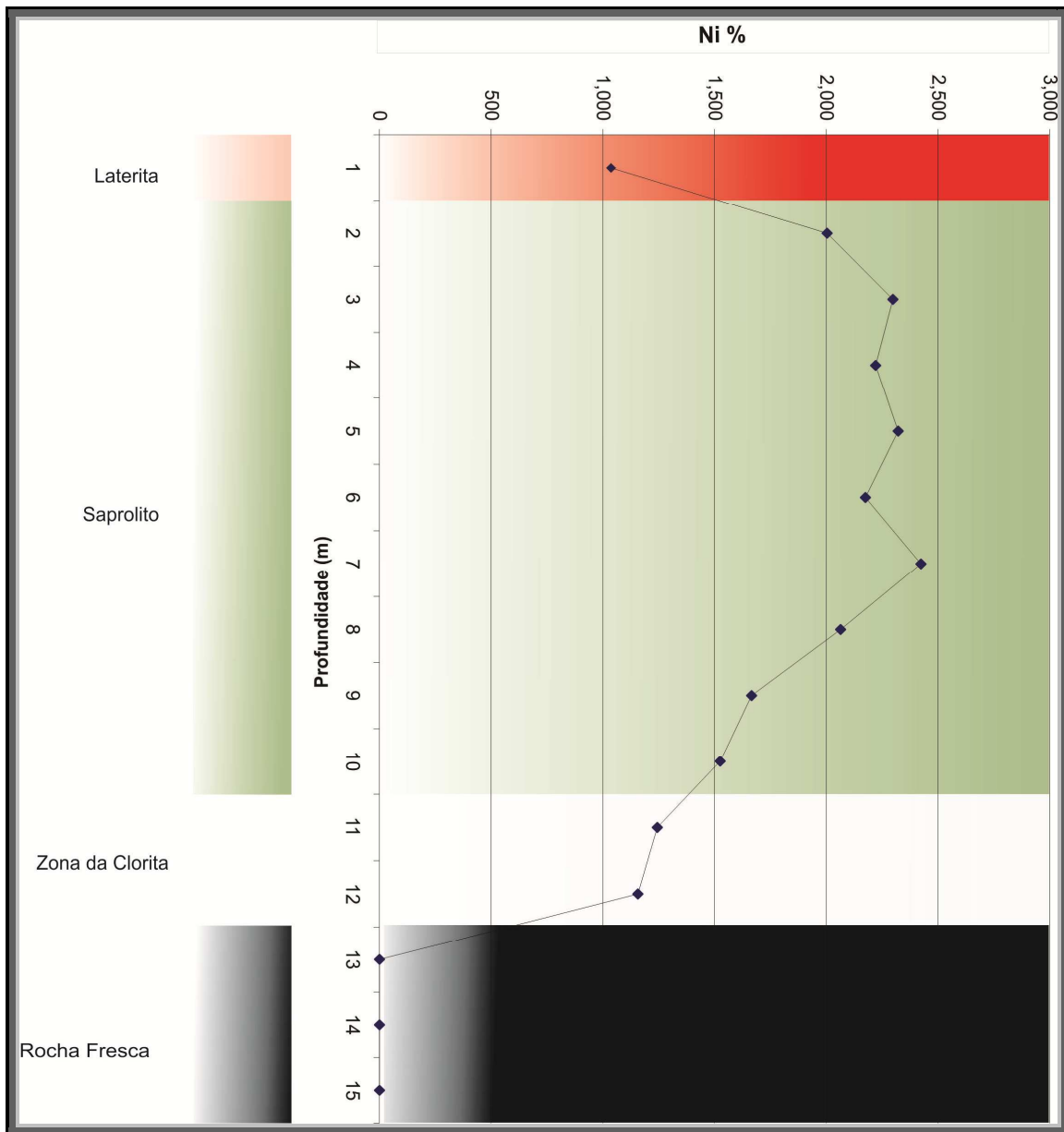
Os teores mais elevados em Ni encontram-se entre os metros 2 e 7, onde superam a marca dos 2%.

---

<sup>2</sup> Definiu-se por “Zona Cloritizada” aquele horizonte em que o material apresenta granulometria muito fina (tipo talco), quimicamente distinguível pelo elevado teor de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e mineralogicamente composta de clorita essencialmente.



**Figura 30** - Mapa das unidades de alteração associadas ao Complexo Ultramáfico do Jacaré e de localização do Furo FJA 146 (15m).



**Figura 31** - Variação em porcentagem da concentração de Ni ao longo do perfil de alteração do furo FJA 146

### 6.1.2 Análises Químicas

No **ANEXO I – Análises Químicas** encontra-se todos os resultados que abrangem a composição química das amostras representativas do furo FJA-146. Na **figura**



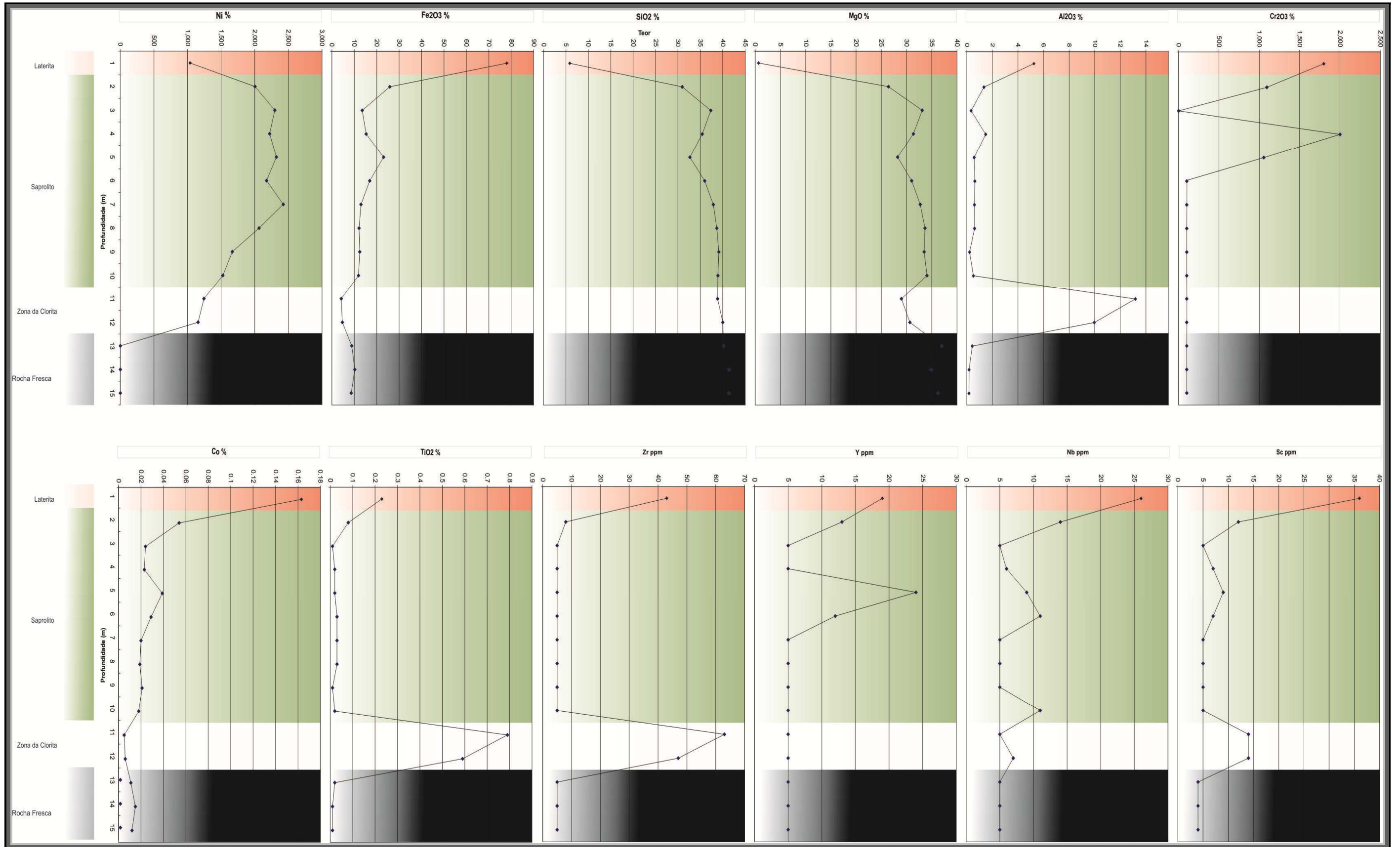
35, os valores foram arranjados na forma de gráficos que mostram a variação da concentração de alguns elementos maiores e menores ao longo da seqüência de alteração.

Nota-se um aumento no teor de Ni da base para o topo, atingindo economicidade no depósito (*cut of* 0,9%) a partir do metro 12 e seguindo numa crescente até o metro 7, onde encontra seu pico (2,42 % Ni) mantendo-se em concentrações acima de 2% até a parte superior do perfil de alteração quando diminui acentuadamente nos últimos dois metros.

O alto teor em Ni (>2% Ni) observado entre a profundidade de 2 e 7 metros do furo tornam esta uma zona com o mais alto grau de interesse para a mineração. Nesta zona, a variação da concentração em Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mostrou um comportamento diferenciado ao observado com o Ni, pois enquanto o Ni avança para valores acima de 2%, o ferro assume um discreto aumento, somente atingindo importância a partir dos dois metros finais, ocasião em que a concentração de Ni diminui acentuadamente. O Co acompanha o mesmo movimento do Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ao longo da zona de maior interesse (Ni >2%) do perfil, enquanto o Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mostra forte anomalia positiva quando comparado aos demais horizontes do perfil. Dentre os elementos traços, o Zr manteve-se estável, porém Y, Nb e Sc acompanharam a variância positiva. Em contrapartida, SiO<sub>2</sub> e MgO tiveram quedas discretas de seus teores nesta faixa mineralizada de alto teor.

Entre os metros 12 e 10 uma anomalia de alumínio pôde ser identificada, atingindo mais de 12% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, a qual foi acompanhada por anomalia igualmente positiva de Ni, TiO<sub>2</sub>, Zr, Nb e Sc. Os elementos Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, MgO e Co, por sua vez, apresentaram discreta anomalia negativa. Esta zona foi descrita como zona da clorita, a qual teve evidência em petrografia óptica e DRX.

O topo do perfil, metro 0 a 1, apresenta características típicas de laterita, com um forte decréscimo na concentração de SiO<sub>2</sub> e MgO. Observa-se uma relativa retenção dos demais elementos analisados, com exceção do Ni que apresenta claramente um decréscimo, seguindo o comportamento de elementos móveis como o magnésio. A concentração do Ni diminui para valores menores que a metade (<1%) aos verificados no nível de saprolito (~2%).



**Figura 32** - Variação da composição química do Furo FJA 146 em função da profundidade (m) e dos diferentes níveis de minério estabelecidos para o perfil.

### 6.1.3 Balanço de Massa

A identificação da mobilidade dos elementos químicos em dado perfil de alteração pode ser definida através do cálculo de balanço de massa, o qual fornece informações quanto ao enriquecimento ou empobrecimento absoluto ou relativo de determinado horizonte.

Esta análise é de fundamental importância, pois define áreas em que o enriquecimento em Ni pode ter sido causado por material coluvionar, e assim abrindo perspectiva para mineralização similar na área em apreço, ou causado por alteração “*in situ*”, o que restringe a área mineralizada à ocorrência de rocha-mãe similar.

Ao se observar os gráficos de Balanço de Massa gerados para o furo FJA 146 (**Figura 33**), nota-se uma homogeneidade na acumulação dos elementos a partir do metro 10 e seguindo numa crescente até o metro 4, onde encontra seu pico ( $E = 35$  para Ni) iniciando, então, uma diminuição dos valores até o topo do perfil.

Na zona de maior interesse do perfil, aquela compreendida entre o metro 7 e 2, devido ao alto teor de Ni ( $>2\%$  Ni), a variação dos elementos atingiu os níveis mais altos, não demonstrando depleção de qualquer elemento analisado.

Entre os metros 12 e 10, onde uma anomalia de  $Al_2O_3$  foi identificada, atingindo mais de  $12\%$   $Al_2O_3$ , houve acumulação discreta de Ni e Sc, tendo  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$  e Zr os valores cumulativos mais expressivos.

O topo do perfil, metro 0 a 1, apresenta características tipicamente de enriquecimento relativo, através da concentração em todos os elementos (Ni,  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$ , Co,  $TiO_2$ , Zr, Y, Nb e Sc), a exceção dos mais móveis ( $SiO_2$  e MgO).

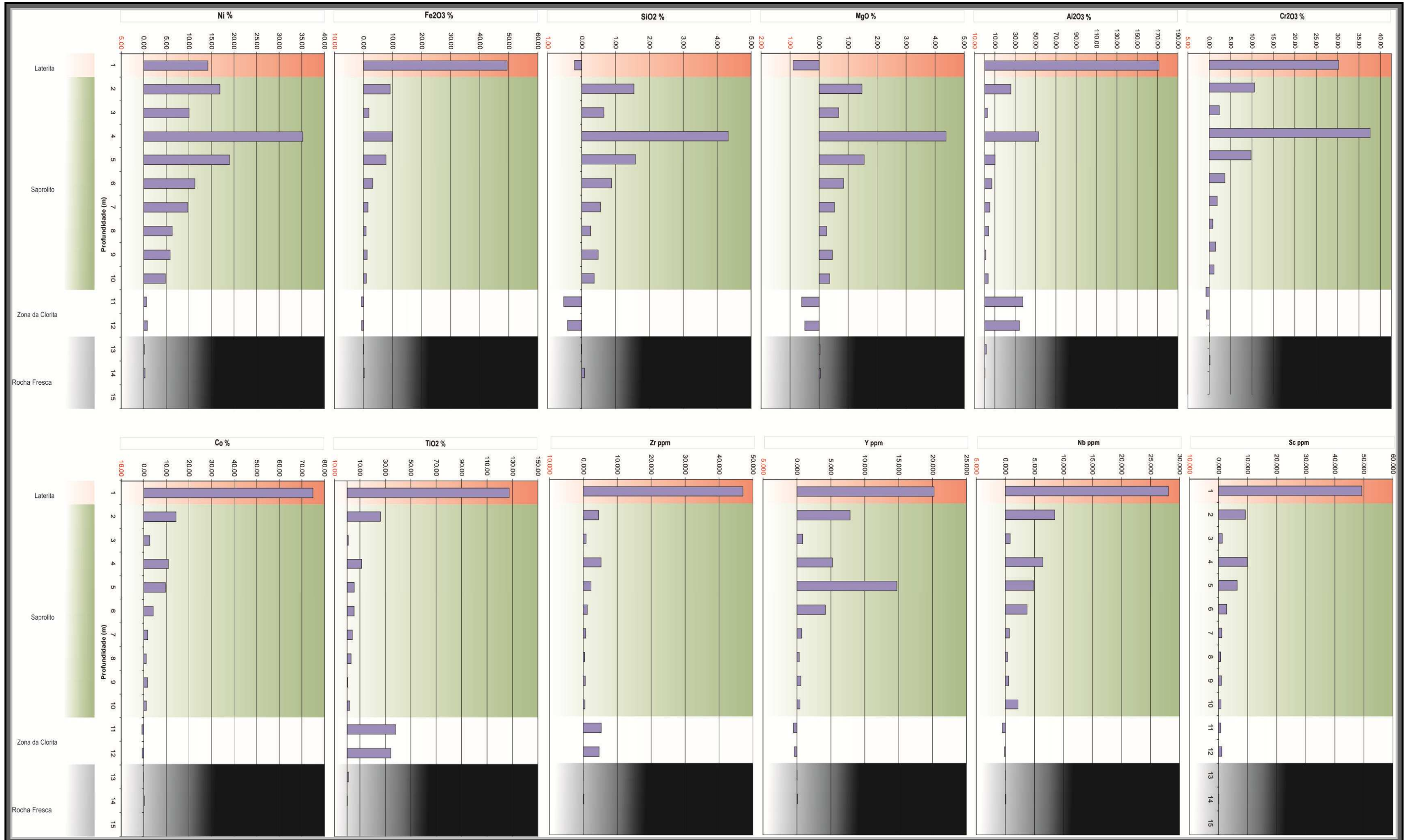


Figura 33 - Gráficos de Balanço de Massa do Furo FJA 146.

#### 6.1.4 Petrografia Ótica

O furo FJA 146 teve duas amostras analisadas via petrografia ótica, sendo compostas basicamente por serpentina nas suas variadas formas, bem como clorita, agregados minerais de Fe-Si (goetita, hematita e quartzo), além da constante presença de cromita, cromo-espinélio, magnetita e quartzo.

As amostras estudadas são identificadas pela seguinte numeração: AM 183836 – referente ao metro 15 (base do perfil) e AM 183819 – referente ao metro 2 (topo do perfil).

##### 6.1.4.1 AM 183836

A seção delgada revelou a seguinte abundância mineralógica, em ordem decrescente: serpentina (texturas *mesh*, *interlocking*, *interpenetrating* e veios), agregados de minerais Fe (goetita e hematita), além de clorita, cromita, magnetita e traços de quartzo (**ANEXO II – Petrografia Ótica**).

O grupo das serpentinas constitui a maioria mineralógica identificada na amostra (84,63%), ocorrendo tanto na matriz (26,13%), quanto em veios asbestiformes ou não, totalizando 58,5%.

As serpentinas da matriz variam entre isotrópicas e com textura *mesh* (lizardita) e *interlocking*, sendo as serpentinas dos veios os tipos dominantes, tendo a variedade crisotilo como referência (**FIG. 34**).

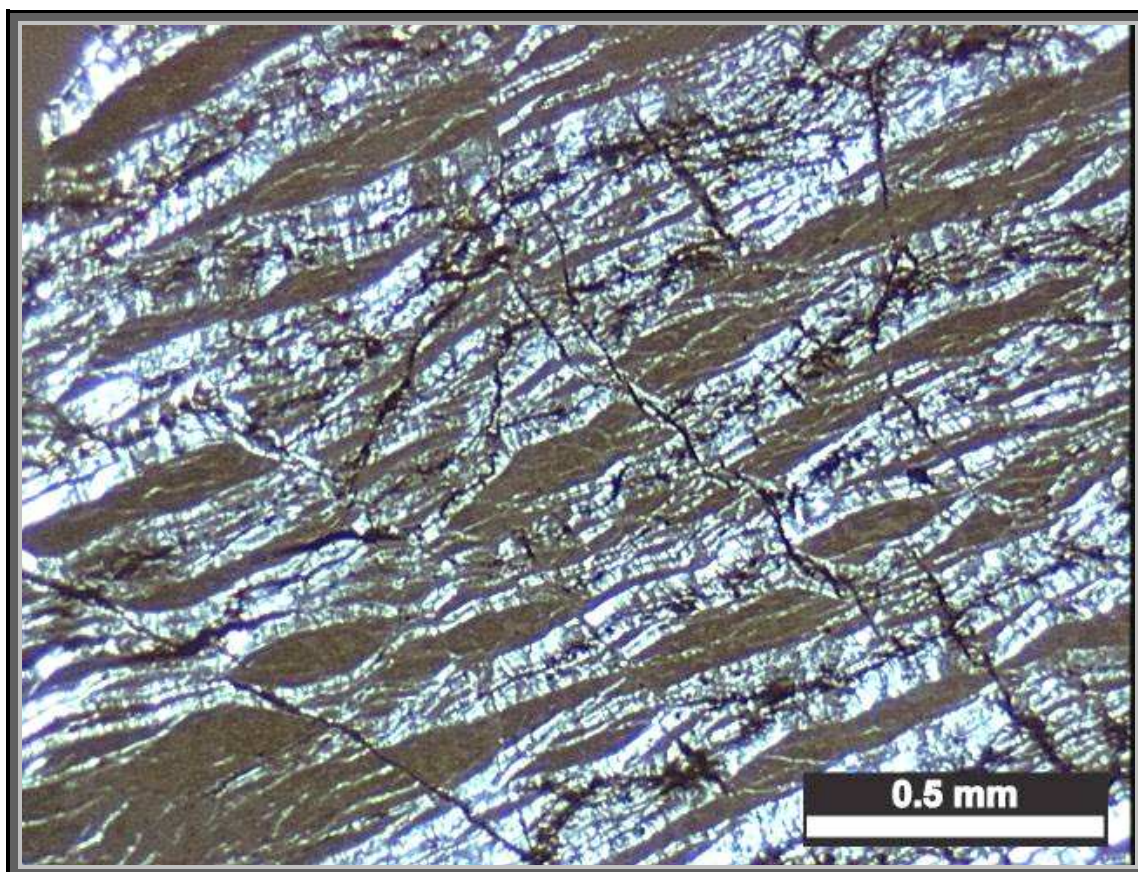
A maioria das serpentinas venulares tem diâmetro variado entre 0.1mm e 0.3mm e, não raramente, apresentam minerais opacos inclusos, acompanhando a venulação (**FIG. 35 a e b**).

São identificadas fraturas cortando perpendicularmente os veios com serpentina, deslocando as fibras.

Os agregados minerais de Fe e Si ocorrem espalhados ao longo da seção delgada na forma de goetita (8,13%), hematita (5,13%) (**Fig. 35 d**) e quartzo (**Fig. 35 f**), normalmente ocupando a posição de borda de minerais como cromita, magnetita e



serpentina. Frequentemente os agregados são oriundos do processo de oxidação da magnetita e cromita (Fe) e alteração da serpentina (Si).



**Figura 34** – AM 183836 - Fotomicrografia de fragmentos de saprolito mostrando serpentina em veios asbestiformes (dominantes) e não asbestiformes. Serpentininas em texturas *mesh* e *interlocking* também ocorrem, mas são minoritárias. A serpentina dos veios é predominantemente do tipo crisotilo. (LP 50X). LP: Polarizadores Cruzados.

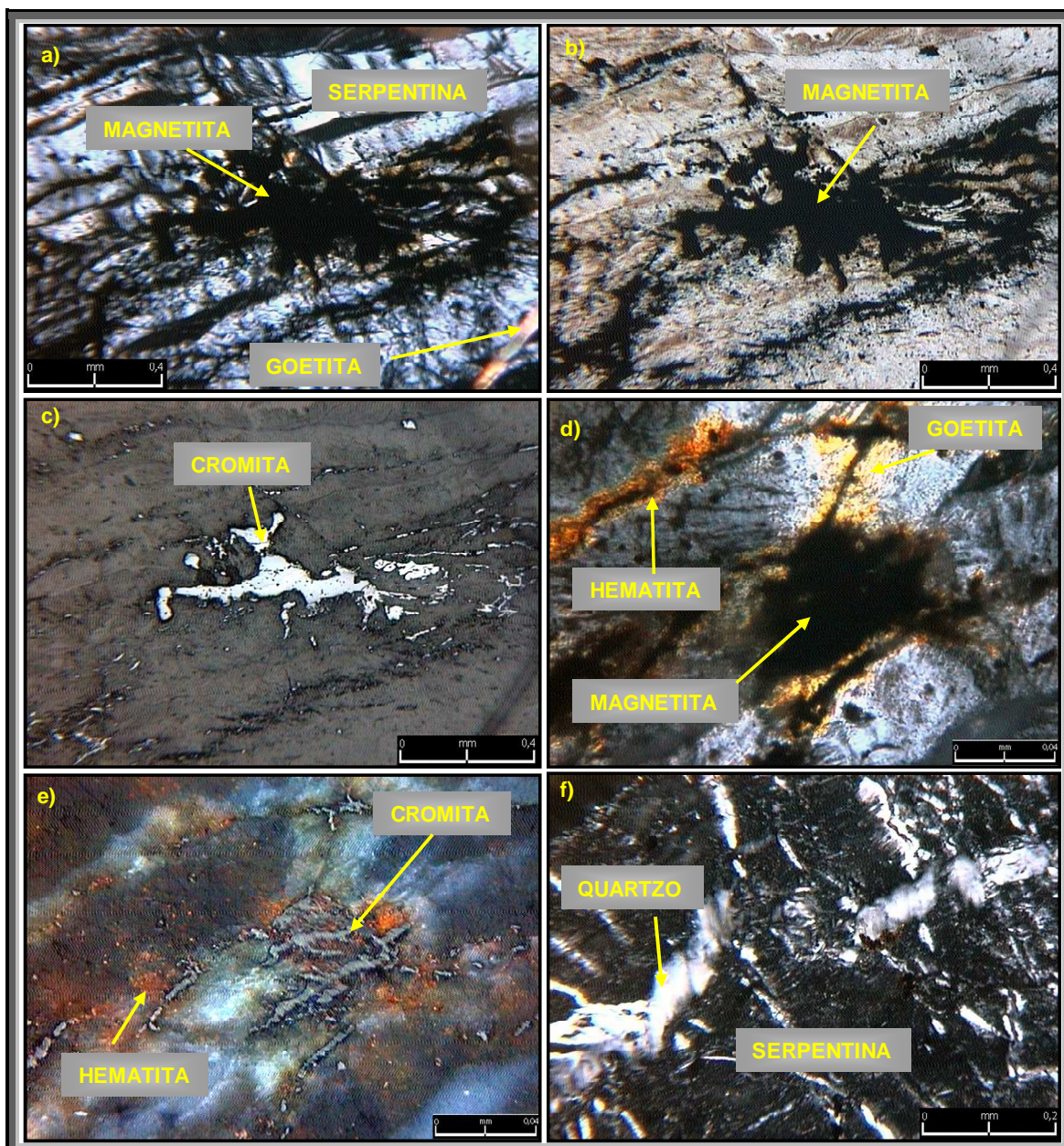
Possuem cor laranja-amarelada a avermelhada, quando agregados de Fe (**Fig. 35 d**), e cor cinza com extinção ondulante, quando agregados silicosos (**FIG. 35 f**).

Os grãos de cromita apresentam-se de forma irregular (**Fig. 35 c**), normalmente acompanhando a serpentinização, apresentando comprimento entre 0.01 - 0.50 mm. Não raro evidencia-se processo de hematização das cromitas (**FIG. 35 e**).

Cristais de magnetita ocorrem ao longo de toda a seção, normalmente acompanhando a serpentinização, alocando-se junto às vênulas de serpentina e arredores (**Fig. 35 a, b, d**). São feições anédricas com diâmetro entre 0.01 e 0.50 mm. Também é



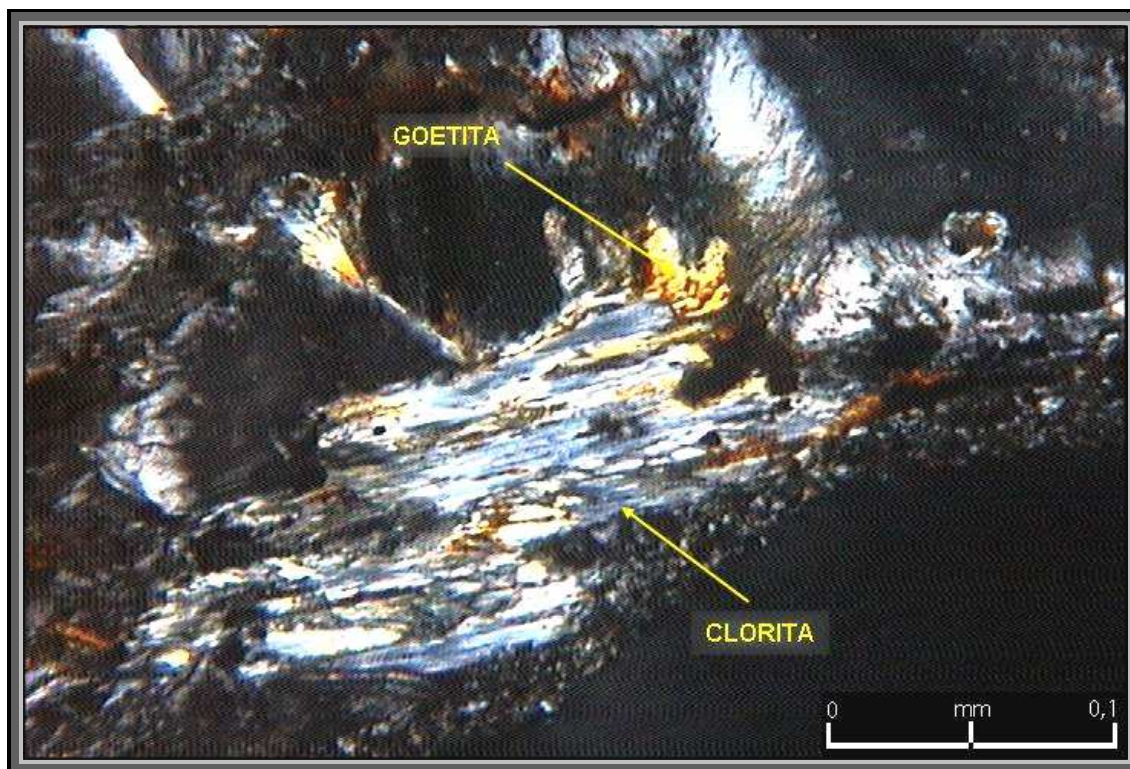
possível observar o seu crescimento de magnetita no entorno da cromita, na forma de anéis gerados durante a serpentinização.



**Figura 35** - Mosaico de fotomicrografias referentes à amostra 183836. a) Serpentinito com veios asbestiformes e textura *mesh* parcialmente transformada em *interpenetrating* (LP – 50X); b) Idem anterior (LN – 50X); c) Cromita com forma irregular parcialmente hematitizada (LR – 5X); d) Detalhe da alteração de magnetita para goetita e hematita (LP – 50X); e) Idem anterior com detalhe à cromita e alteração para hematita (LR – 50X); f) Vênula de serpentina substituída por quartzo (LP – 10X). LN: Luz Natural; LP: Polarizadores Cruzados; LR: Luz Refletida.



A clorita (1,38%) encontra-se nos limites dos grãos de serpentina, disposta de forma lamelar e fibrosa. Apresenta ótima clivagem, parte em função do processo de serpentinização a qual foi submetida. Comumente verifica-se goetita associada a esta clorita (**FIG. 36**).



**Figura 36** – AM 183836 - Clorita serpentinizada com processo de alteração para goetita.

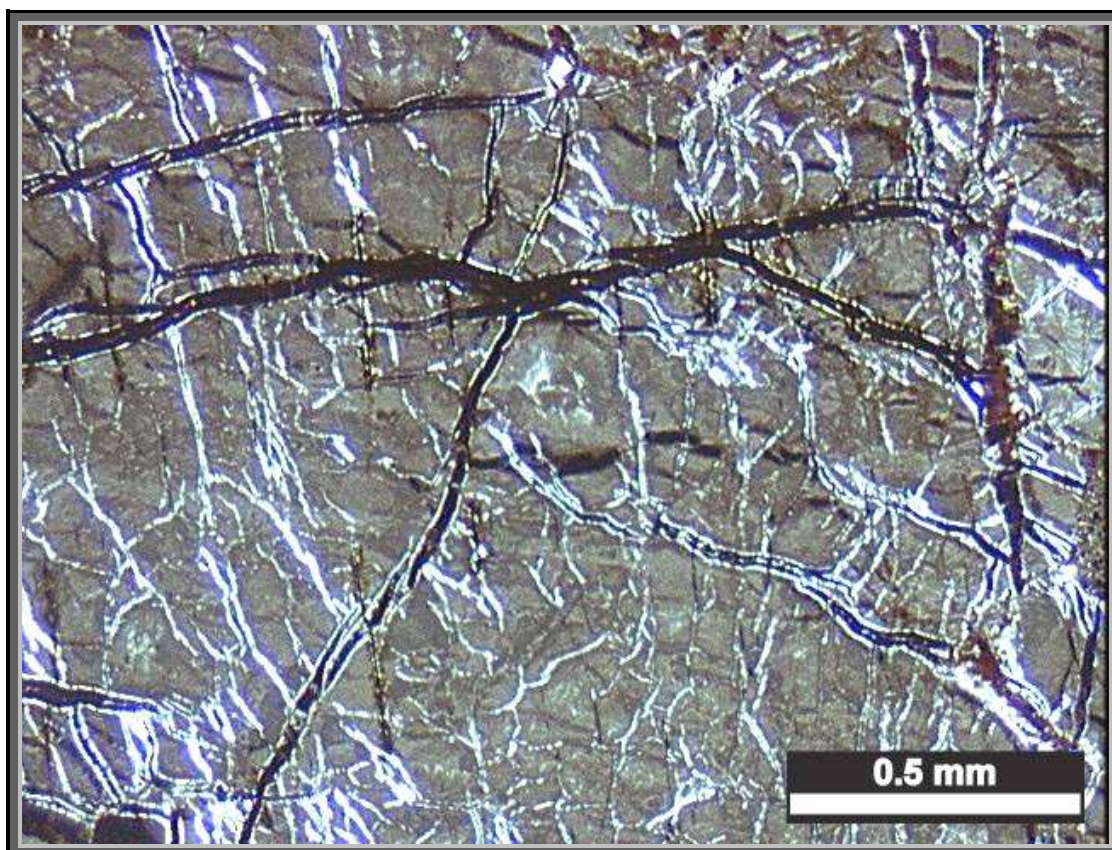
#### 6.1.4.2 AM 183819

A seção delgada revelou a seguinte abundância mineralógica, em ordem decrescente: serpentina (texturas *interpenetrating*, veios, *interlocking*, *hourglass* e *mesh*), agregados de minerais Fe (goetita e hematita), além de clorita, cromita e magnetita. (**ANEXO II - TAB 02**).

O grupo das serpentinas constitui a maioria mineralógica identificada na amostra (54%), ocorrendo tanto na matriz (31,38%), quanto em veios asbestiformes ou não, totalizando 22,63%.



As serpentinas da matriz variam entre isotrópicas e com textura *interpenetrating*, *interlocking*, *hourglass* e *mesh* (lizardita), sendo as serpentinas asbestiformes dos veios representada por crisotilo. (FIG. 37).

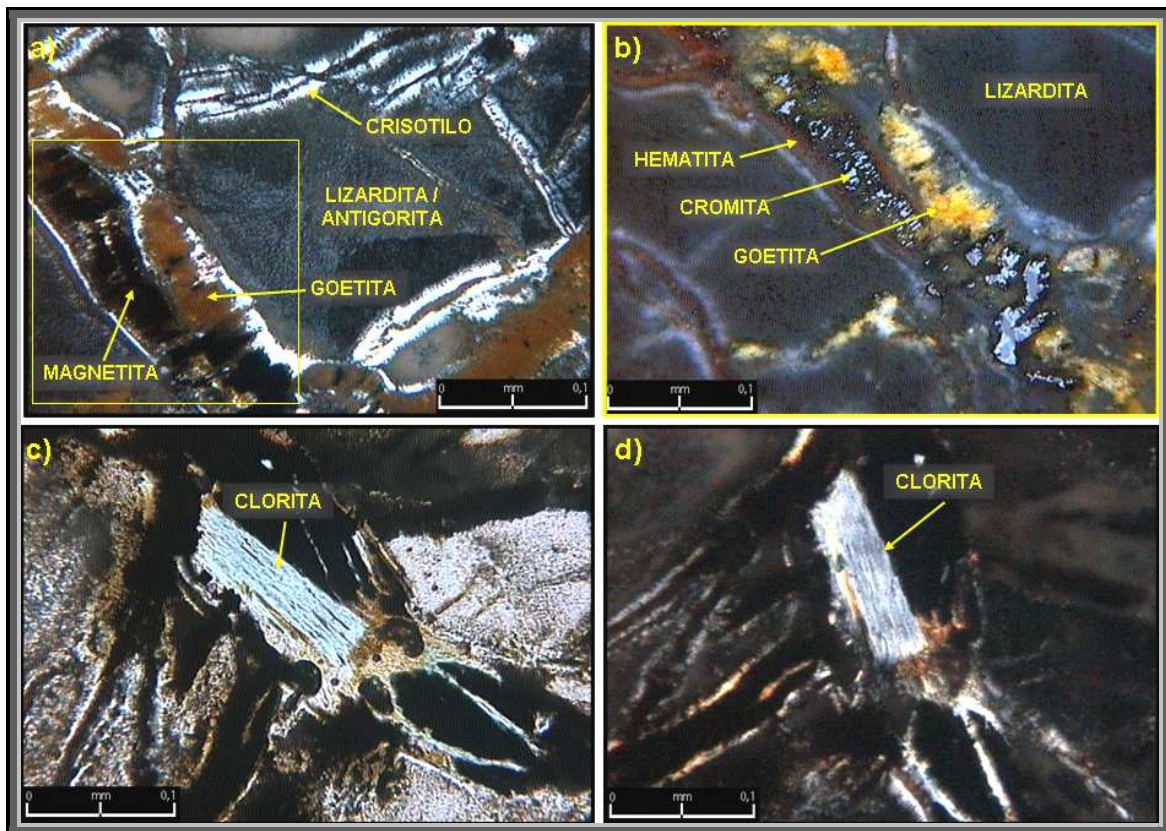


**Figura 37** – Fotomicrografia de fragmentos de saprolito mostrando serpentina na textura *interpenetrating* com grãos lamelares (matriz) e serpentina em veios asbestiformes e não asbestiforme. A serpentina dos veios é predominantemente do tipo crisotilo (LP 50X).

A maioria das serpentinas venulares tem diâmetro variado entre 0.05mm e 0.1mm e, não raramente, apresentam minerais opacos inclusos, acompanhando a venulação, tais como magnetita, goetita e hematita (FIG. 38 a e b).

A clorita encontra-se nos limites dos grãos de serpentina, disposta de forma tabular e fibrosa. Apresenta ótima clivagem, parte em função do processo de serpentinização a qual foi submetida. (FIG. 38 c e d).

Os agregados minerais de Fe ocorrem espalhados ao longo da seção delgada na forma de goetita e hematita, normalmente ocupando a posição de borda de minerais como cromita, magnetita e serpentina (FIG. 39 a e b).



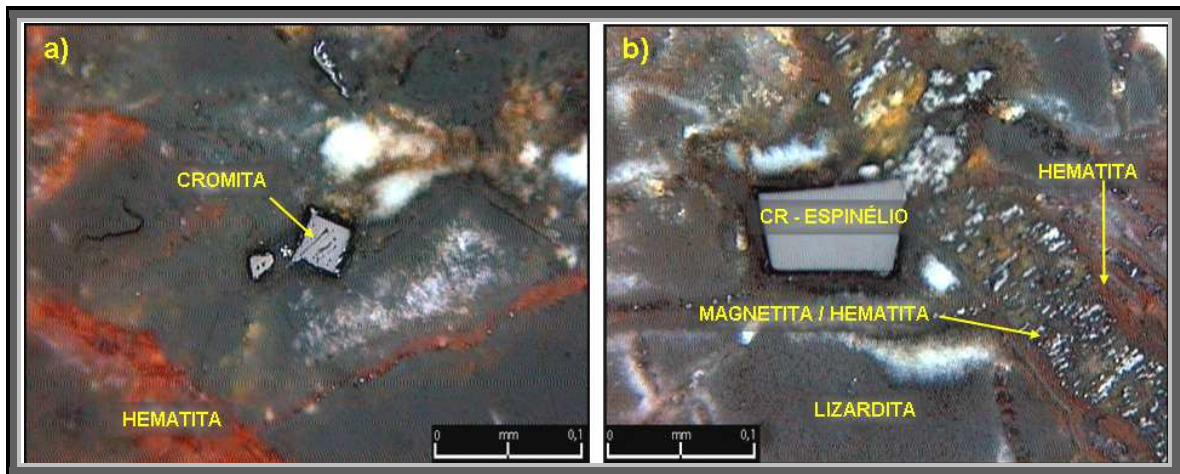
**Figura 38** – Mosaico de fotomicrografias referentes à amostra 183819. a) Serpentinó com textura *hourglass* (lizardita) parcialmente alterada para textura *interpenetrating* (LP – 20X); b) Detalhe de veio de “a” com hematizada e goetita (LR – 20); c) Clorita serpentinizada (LN – 20X); d) Ídem anterior. LN: Luz Natural; LP: Polarizadores Cruzados; LR: Luz Refletida.

Verifica-se, assim como nas demais amostras de base dos furos descritos na dissertação, magnetita intersticial aos veios asbestiformes, as quais podem contar com cromita associada. Normalmente estes agregados são oriundos do processo de oxidação da magnetita e cromita, apresentando cor laranja-amarelada a avermelhada, quando agregados de Fe (hematita e goetita) (**FIG. 39 a e b**).

Os grãos de cromita e Cr- espinélio apresentam-se em forma de cubos euédricos a subédricos (**Fig. 39a e b**), com comprimento entre 0.02 - 0.2 mm. Não raro evidencia-se processo de hematização das cromitas (**FIG. 39a e b**).

Cristais de magnetita ocorrem ao longo de toda a seção, normalmente acompanhando a serpentinização, alocando-se junto às vênulas de serpentina e arredores (**Fig. 39a e b**). Ocorrem como grãos alongados, anédricos com comprimento maior alinhado perpendicularmente a parede dos veios, com diâmetro entre 0.01 e 0.50 mm.





**Figura 39** – Fotomicrografias referentes à amostra 183819. a) Grãos discretos de cromita euédrica e hematita depositada em veios (LR – 20X); b) Cristal discreto de cromo-espínélio e veio cortando a matriz de serpentinito, constituído por crisotilo e magnetita com posterior alteração para goetita e hematita (LR –20). LR: Luz Refletida.

### 6.1.5 Difração de Raios X

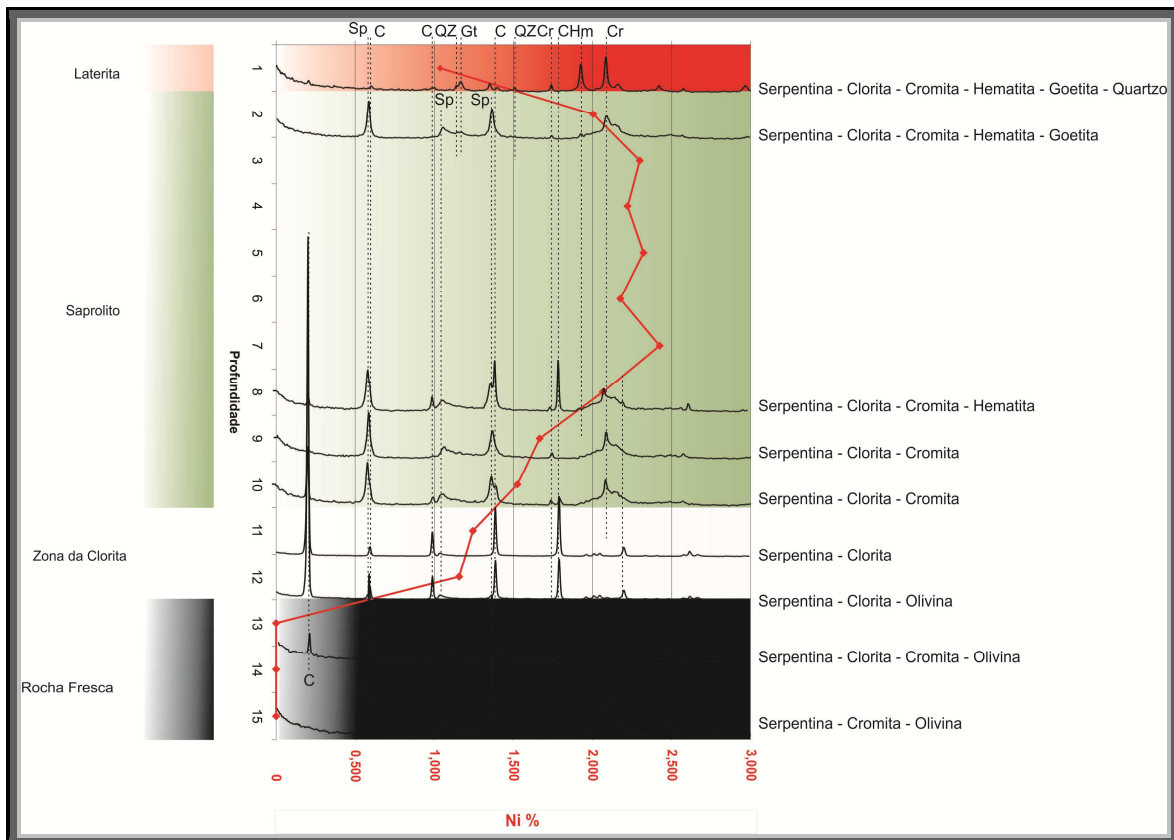
Foram analisadas nove amostras por Difração de Raios X (DRX) referentes ao furo FJA 146, com o objetivo de obter um detalhamento na identificação mineral envolvendo rocha total e frações finas. As amostras referem-se ao primeiro metro da base (15m), porção saprolítica (13m, 12m, 11m 10m, 9m, 8m e 2m) e topo da seção (1m) (**FIG.40**)

O perfil apresenta uma mineralogia predominantemente serpentinitica na sua base, contando ainda com relictos de olivina e cromita. Nota-se a ausência de clorita na rocha fresca.

À medida que se ascende no perfil em direção ao topo, encontra-se a denominada “Zona da Clorita” (12m a 10m), onde há uma clara e evidente presença de clorita e serpentina, porém, em contrapartida, cromita e olivina desaparecem.

Na zona saprolítica de alto teor, compreendida pelas amostras existentes no intervalo 7m a 2m, identificou-se a serpentina, clorita, cromita, goetita (amostra 183819) e hematita.

A amostra 183818, a qual representa o horizonte extremo de topo, indicou a presença de serpentina e clorita menos cristalinas, traços de quartzo, além de cromita, hematita e goetita.

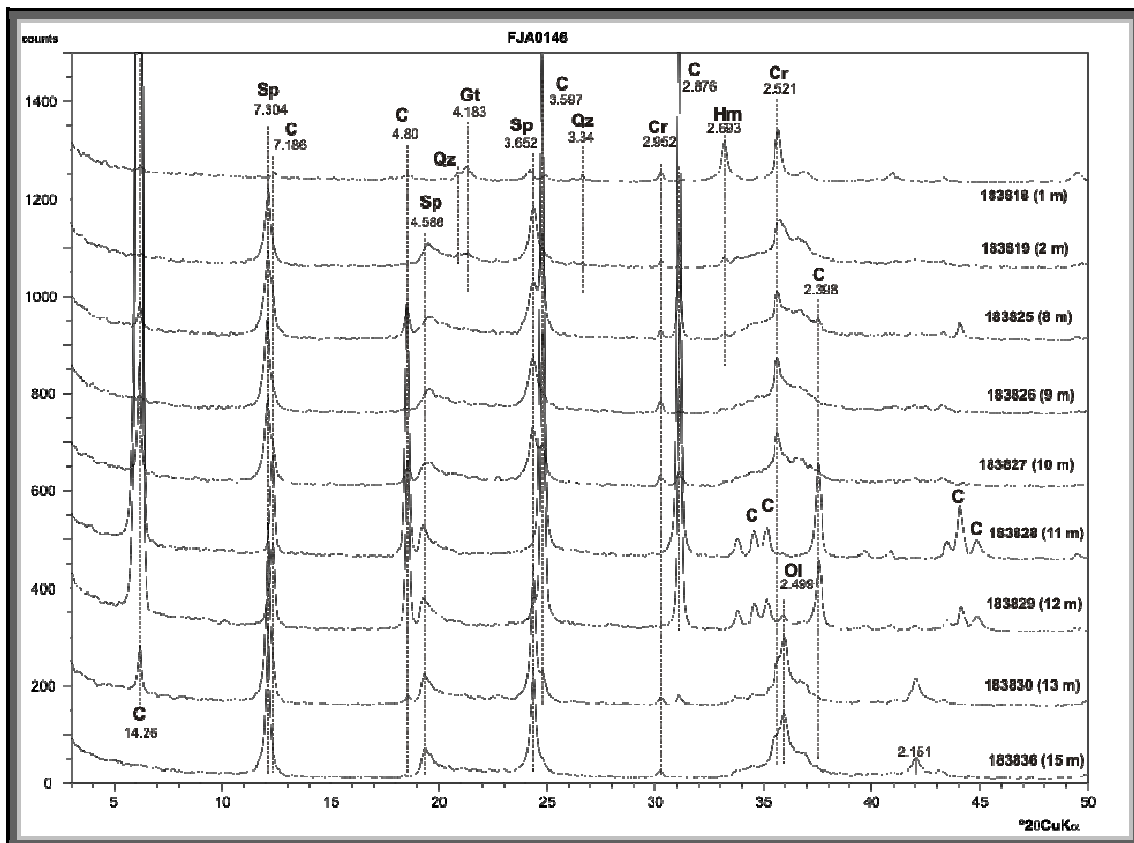


**Figura 40** - Superposição dos Difratomogramas em relação ao perfil geológico e consecutiva variação da concentração de Ni do furo de sonda FJA 146. Legenda: Sp – serpentina; Cr – cromita; Ol – olivina; Hm – hematita; C – clorita; Qz – quartzo.

Ao se analisar o empilhamento de difratogramas representando alguns horizontes do furo de sonda FJA146 (**Fig. 41**) observa-se a presença de olivina nas três amostras mais basais (metros 15, 13 e 12), entre 37° e 38° (pico 2.499). Apesar de não ter sido identificada através de petrografia óptica, provavelmente por apresentar feições de serpentina em detrimento das características de olivina, a interpretação do difratograma mostra que ainda existe indícios da presença de olivina na porção basal do perfil de alteração.

Interessante notar a total ausência de clorita ou em concentrações abaixo da sensibilidade da difração (metro 15), e forte incremento nos metros 12, 11 e 10, retornando

a uma queda na quantidade da clorita a partir do metro 9. Este pico da clorita esta refletido geoquimicamente através da forte anomalia de  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$  e Zr (**Fig 32**), bem como a acumulação identificada na análise de balanço de massa (**FIG. 33**).



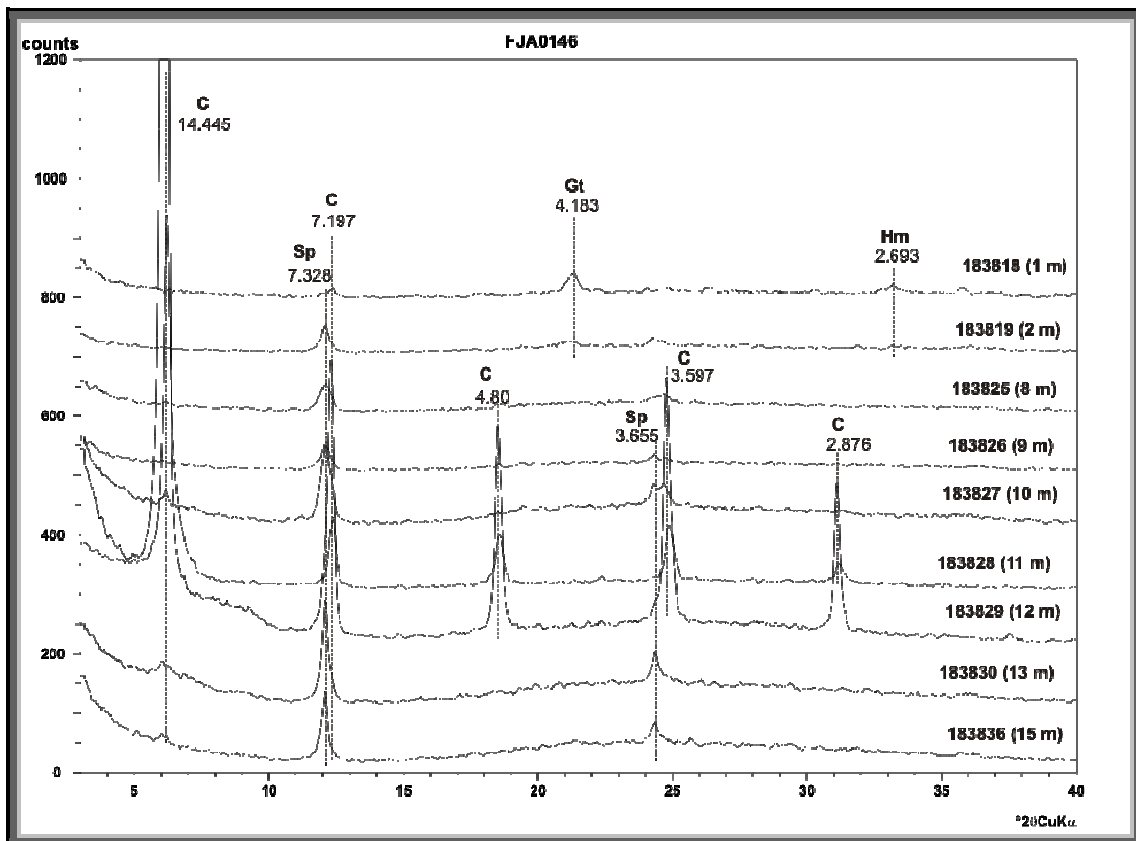
**Figura 41** - Superposição de Difratomogramas (fração < 20µm), ordenados segundo a profundidade, do furo de sonda FJA 146. Legenda: Sp – serpentina; C – clorita; Ht – Hidrotalcita; Cr – magnetita/cromita/Cr-espínélio; Ol – olivina; Hm – hematita; Qz – quartzo; Gt - goetita.

Contudo, a alta concentração do Ni se dá a partir do desaparecimento da clorita e início da cristalização de hematita e goetita, uma vez que os valores modais de serpentina e cromita mantêm-se contínuos a partir das zonas de mais alto teor (**FIG. 43**).

A análise da fração fina (<2µm) indica a presença de serpentina em todo o perfil, demonstrando a uniformidade deste mineral independente do tamanho da partícula (**FIG. 42**). Destaca-se, também, a clorita muito bem desenvolvida na “Zona da Clorita” e, a exemplo da fração grosseira, desaparecendo nas zonas de mais alto teor (metro 8 a 2).

A fração fina também mostra a presença de goetita e hematita na porção de topo, o que faz destes minerais ocorrências uniformes independentes do tamanho.

As análises tanto das frações  $<20\mu\text{m}$  quanto  $<2\mu\text{m}$  revelou a inexistência de picos na região compreendida entre  $2^\circ$  e  $6^\circ 2\theta$ , o que indica a não ocorrência ou extrema baixa concentração de argilominerais do grupo das esmectitas.

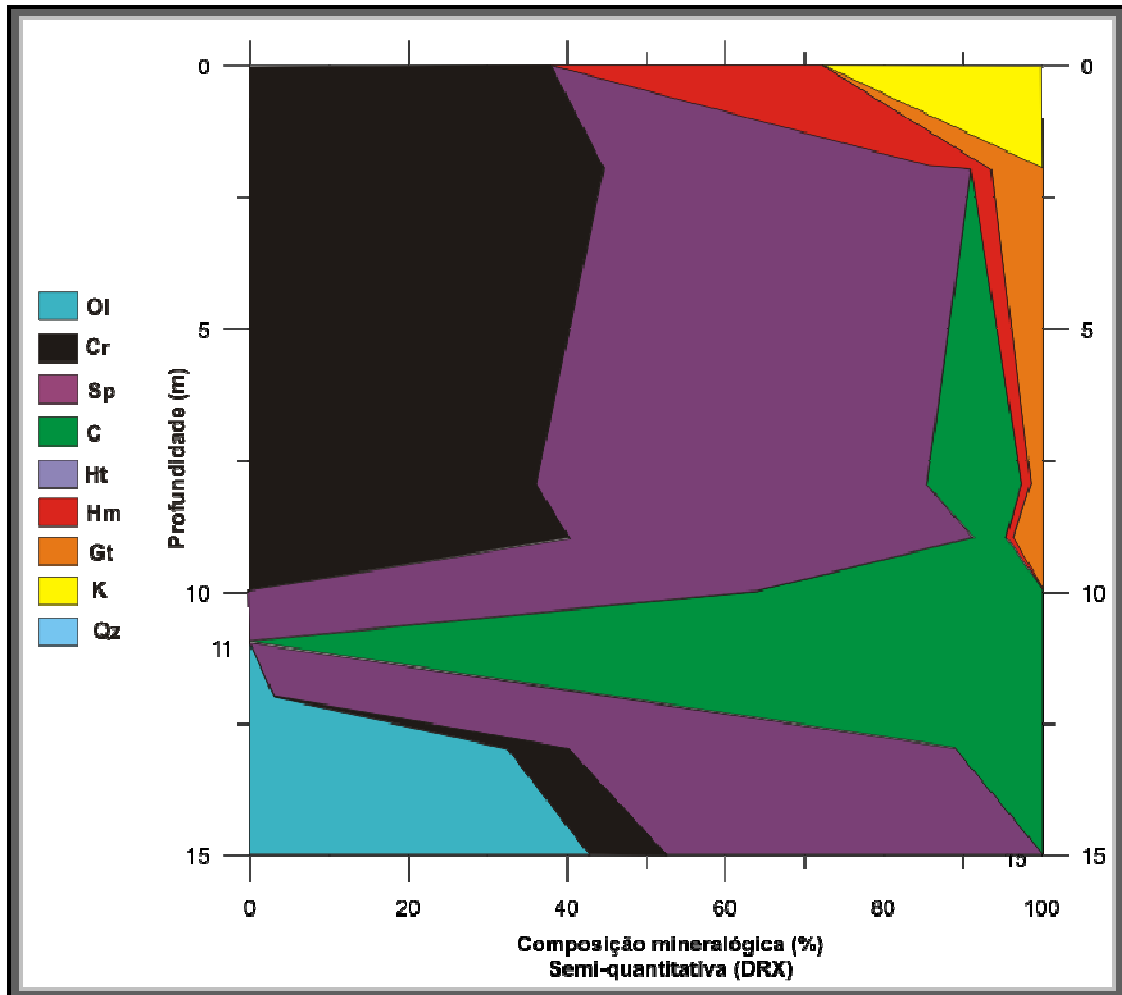


**Figura 42** - Superposição de Difratogramas (fração  $<2\mu\text{m}$ ), ordenados segundo a profundidade, do furo de sonda FJA 146. Legenda: Sp – serpentina; C – clorita; Hm – hematita; Gt - goetita.

As análises por DRX permitem, além da identificação mineralógica, a estimativa de suas proporções nos campos estudados, através do cálculo semi-quantitativo do espaçamento cristalino das fases, de tal sorte que a figura abaixo representa estas variações ao longo do furo de sonda FJA 146 (**FIG. 43**).

Nota-se a evidente diferença desta modal quando comparada à petrografia óptica (**ANEXO II - petrografia Óptica**), devido ao baixo grau de cristalinidade de algumas fases e/ou concentrações abaixo do limite de sensibilidade da técnica, tais como goetitas, não observadas em alguns horizontes quando utilizada a técnica de DRX, porém bem caracterizada na petrografia óptica. Em contra partida, fases como olivina são

marcadas na DRX (pico 2.499), porém não evidenciada na petrografia, devido à substituição desta por serpentina e/ou problemas de amostragem.



**Figura 43** - Distribuição mineralógica estimada a partir da análise modal semi-quantitativa por meio de DRX (cálculo a partir da integração das áreas e do nível de contagem dos picos identificados dos minerais) do furo de sonda FJA 146. Legenda - Ol: olivina; Cr: magnetita/cromita/cromo-espinélio; Sp: serpentina; C: clorita; Ht: hidrotalcita; Hm: hematita; Gt: goetita; K: kaolinita; Qz: quartzo.

## 6.2 Furo FJA 245

### 6.2.1 Geomorfologia e Descrição

O Furo FJA 245 (401290.204E e 9316681.294N) encontra-se na borda Oeste do corpo do Jacaré, nas imediações da faixa central (**FIG. 44**).

Caracteriza-se por uma zona topograficamente elevada, próximo ao topo silexítico, em encosta, com relevo proeminente. O perfil saprolítico é bem desenvolvido ao longo de 17 metros, dos 20m totais que compõe o furo. Não há cobertura silicosa ou ferruginosa no perfil estudado.

O perfil, da base para o topo conta com 3m de rocha fresca (20m aos 17m) e 17m de Zona Saprolítica (17m ao 0m) (**FIG. 45**).

Os teores mais elevados em Ni encontram-se entre os metros 10 e 5, quando chegam a atingir a marca dos 2,5%. Uma pequena descontinuidade pôde ser observada no metro 8.



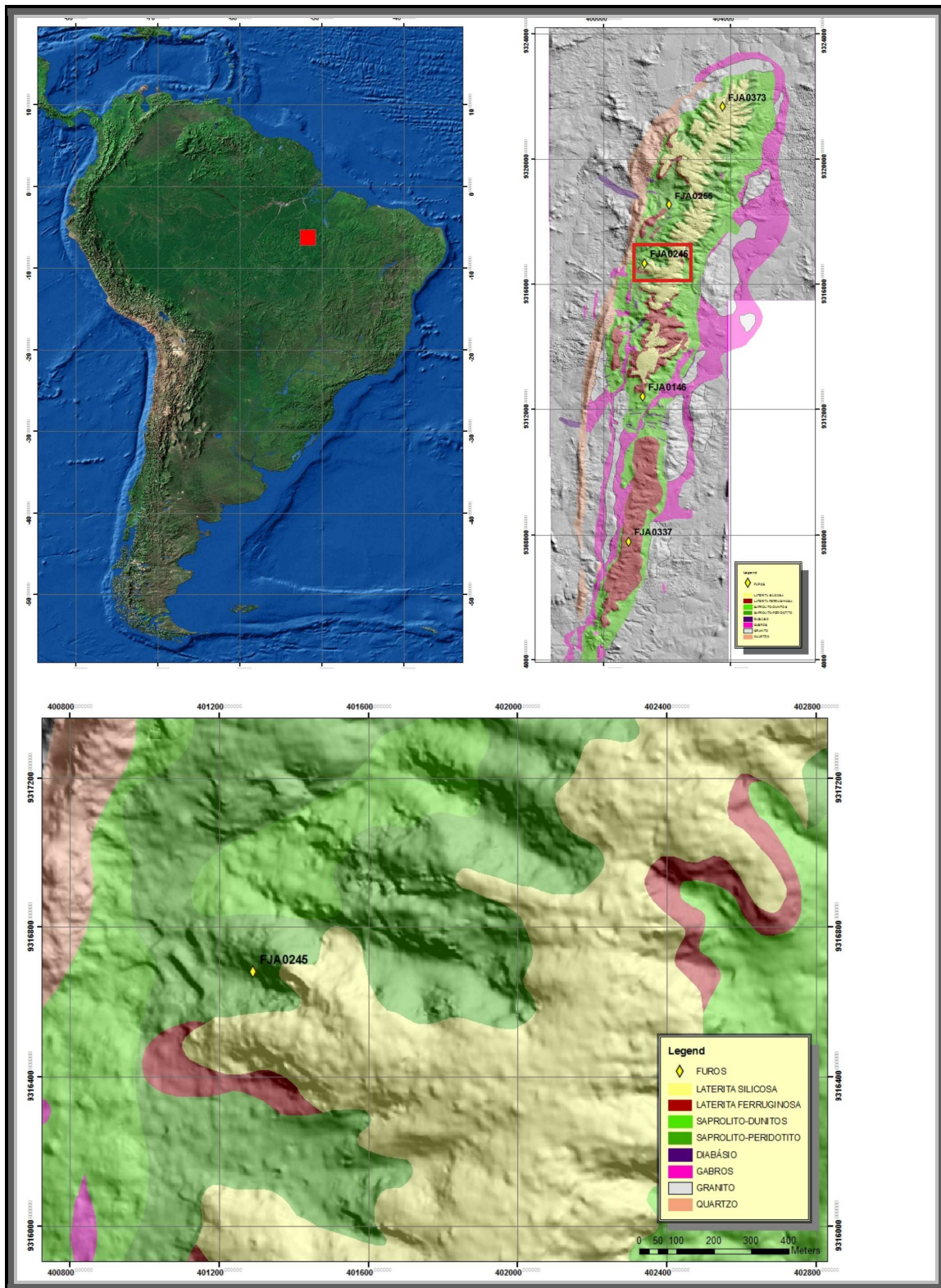
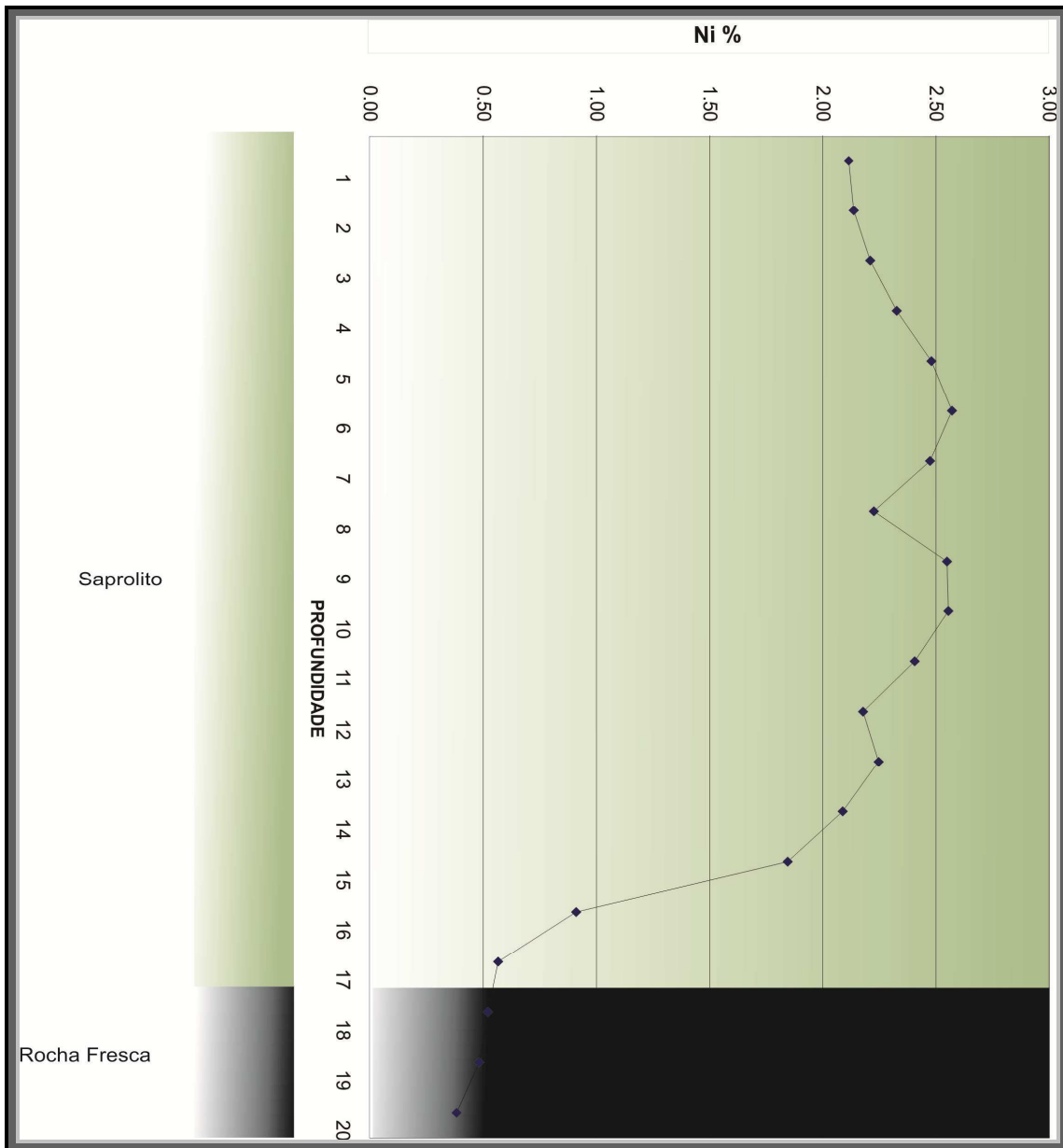


Figura 44 - Mapa de Localização do Furo FJA 245.



**Figura 45** - Perfil de alteração do furo FJA 245 e sua consecutiva variação em Ni.

### 6.2.2 Análise Química

O perfil geoquímico dos elementos maiores e alguns menores, ao longo da seqüência de alteração representada no furo FJA 245, pode ser observado na **Figura 46** e seus dados absolutos acompanhados no **ANEXO I – Análises Químicas**.

Nota-se um aumento no teor de Ni da base para o topo, atingindo economicidade no depósito (Ni >0.9%) a partir do metro 16 e seguindo numa crescente até o metro 10, onde encontra seu pico (2,56 % Ni), permanecendo com teores acima de 2% Ni até o topo da seqüência.

Na zona de maior interesse do perfil, aquela compreendida entre o metro 11 e 5, devido ao alto teor de Ni (média de 2,5% Ni), a variação dos diversos elementos mostrou-se discreta, com uma leve anomalia positiva de Ni no metro 6, a qual é acompanhada por variações igualmente positivas de SiO<sub>2</sub> e MgO, enquanto negativamente variam Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Co e TiO<sub>2</sub> entre os elementos maiores, enquanto dentre os elementos traços o Y e o Sc acompanham o *trend* negativo.

Chama atenção os elevados teores de SiO<sub>2</sub> e MgO no intervalo de maior mineralização de Ni, quando comparados com a rocha fresca, o que evidencia uma baixa migração destes elementos durante a laterização.

Entre os metros 14 e 8, acompanhando a curva crescente dos teores de Ni, ocorrem picos positivos de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (54,81%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Co, TiO<sub>2</sub> entre os elementos maiores, enquanto que o Y e o Sc representam as anomalias positivas dos elementos traços.

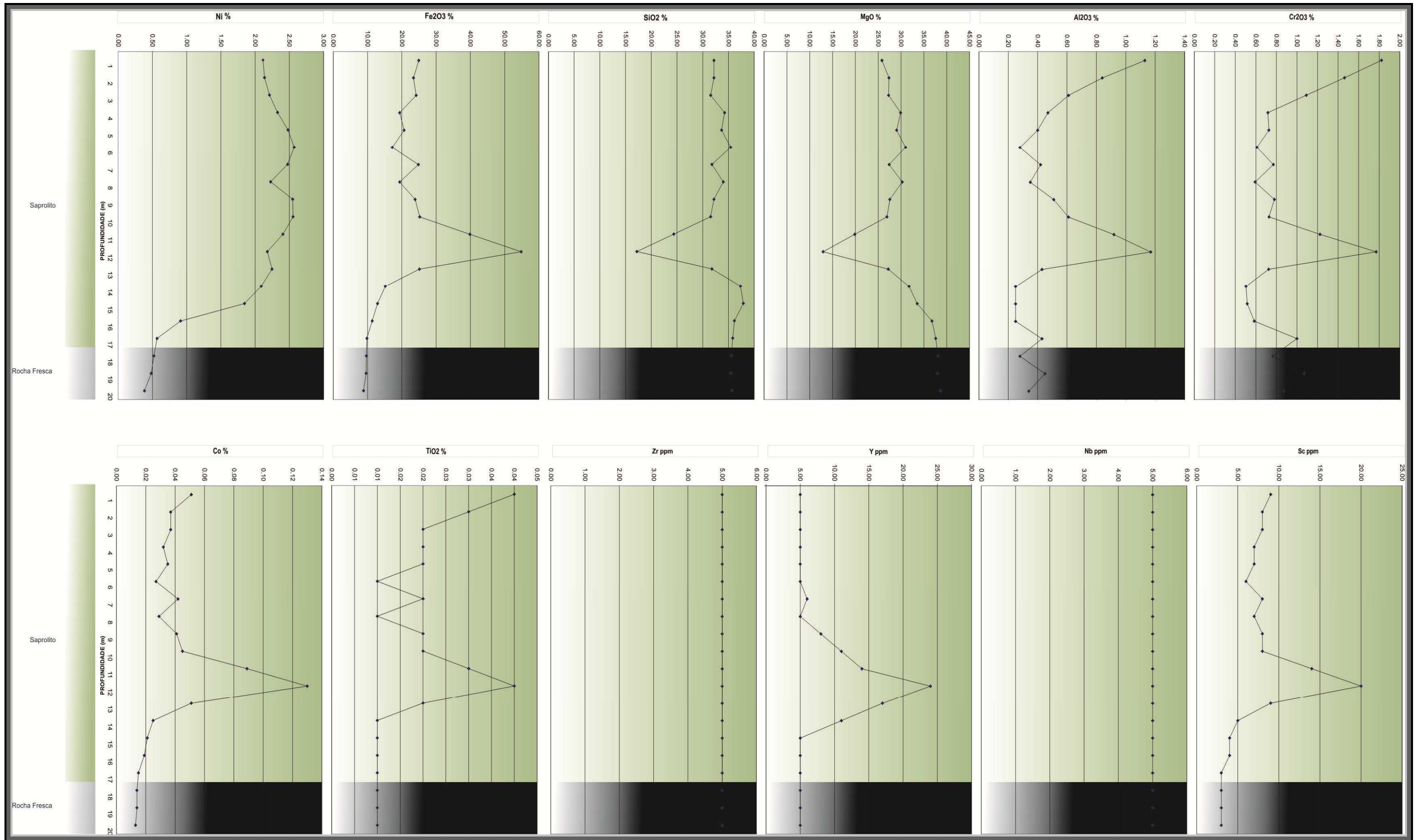


Figura 46 - Gráficos de variação geoquímica do furo FJA 245.

### 6.2.3 Balanço de Massa

Ao se observar os gráficos de Balanço de Massa gerados para o furo FJA 245 (**Figura 47**) notam-se três porções distintas no perfil de alteração com acumulação ou depleção de determinados elementos.

A zona de base (metro 20 a 17) apresenta nenhuma ou pouca variação nos seus elementos, com depleção de todos os elementos, a exceção de Ni, no metro 18.

A partir do metro 17 até o metro 3 há uma segunda zona demarcada pelo balanço de massa, onde há uma clara concentração de Ni, acompanhado da depleção de SiO<sub>2</sub> e MgO de forma contínua.

Nota-se que há um grande enriquecimento de todos os elementos no metro 12, a exceção de SiO<sub>2</sub> e MgO, os quais apresentam variação negativa neste horizonte.

O pico identificado nos gráficos de variação química também se refletiu nos gráficos de Balanço de Massa. A análise detalhada permitiu verificar a depleção de todos os elementos químicos, a exceção de Ni, no horizonte imediatamente abaixo do maior pico (16m a 13m).

Na porção acima do maior pico (11m a 3m) houve acumulação de Ni, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Co, TiO<sub>2</sub> e Sc, ao passo que houve depleção em SiO<sub>2</sub>, MgO, Zr, Y e Nb.

Na divisa da porção superior do perfil de alteração, entre o metro 3 e 0, e a zona mediana superior, há uma nítida distinção entre a acumulação e/ou depleção dos elementos, o que possibilita definir uma zona de acumulação absoluta no topo da seqüência, principalmente pela acumulação positiva de MgO no topo do perfil, totalmente contrária ao padrão estabelecido ao longo do perfil.

Os dados químicos do furo FJA 245, interpretados isoladamente, não permitem identificar a existência de uma zona de acumulação absoluta, contudo, através da análise de balanço de massa, é evidente tal situação.



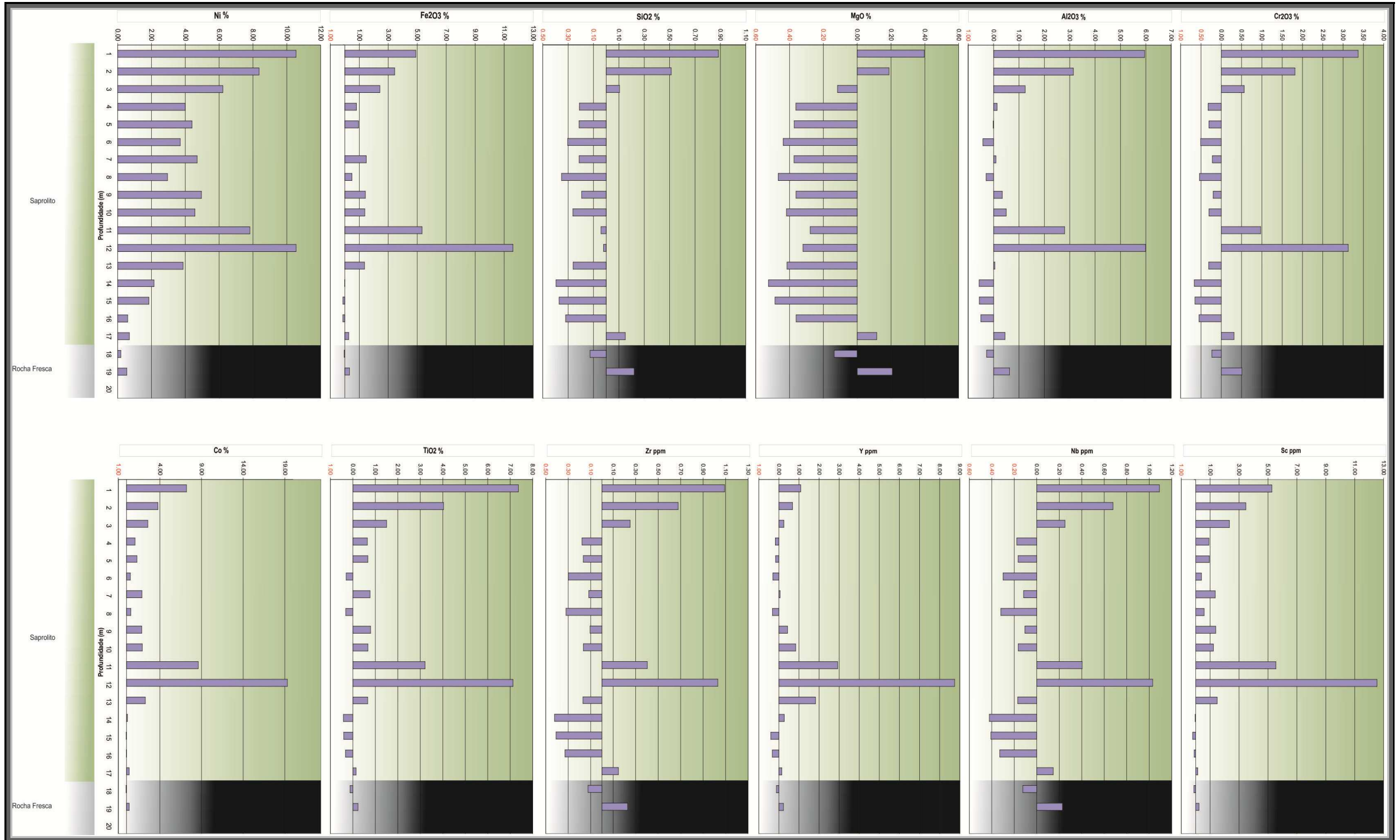


Figura 47- Gráficos de Balanço de Massa do Furo FJA 245.

#### 6.2.4 Petrografia Ótica

O furo FJA 245 teve duas amostras analisadas via petrografia ótica, sendo distintas na sua composição mineralógica. As amostras estudadas são identificadas pela seguinte numeração: AM 201204 – referente ao metro 20 (base do furo) e AM 201181 – referente ao metro 1 (topo do furo).

A amostra AM 201204 tem composição essencialmente serpentínica, contando com fases menores de hematita, goetita, magnetita, cromita, Cr-espinélio e clorita.

A amostra AM 201181, por sua vez, apresenta dominância de matriz de hidróxido de Fe, acompanhada por variedades serpentínicas, além de minerais em menor quantidade, tais quais cromita, magnetita, hematita e goetita, contando com mineralogia traço de clorita e calcedônia.

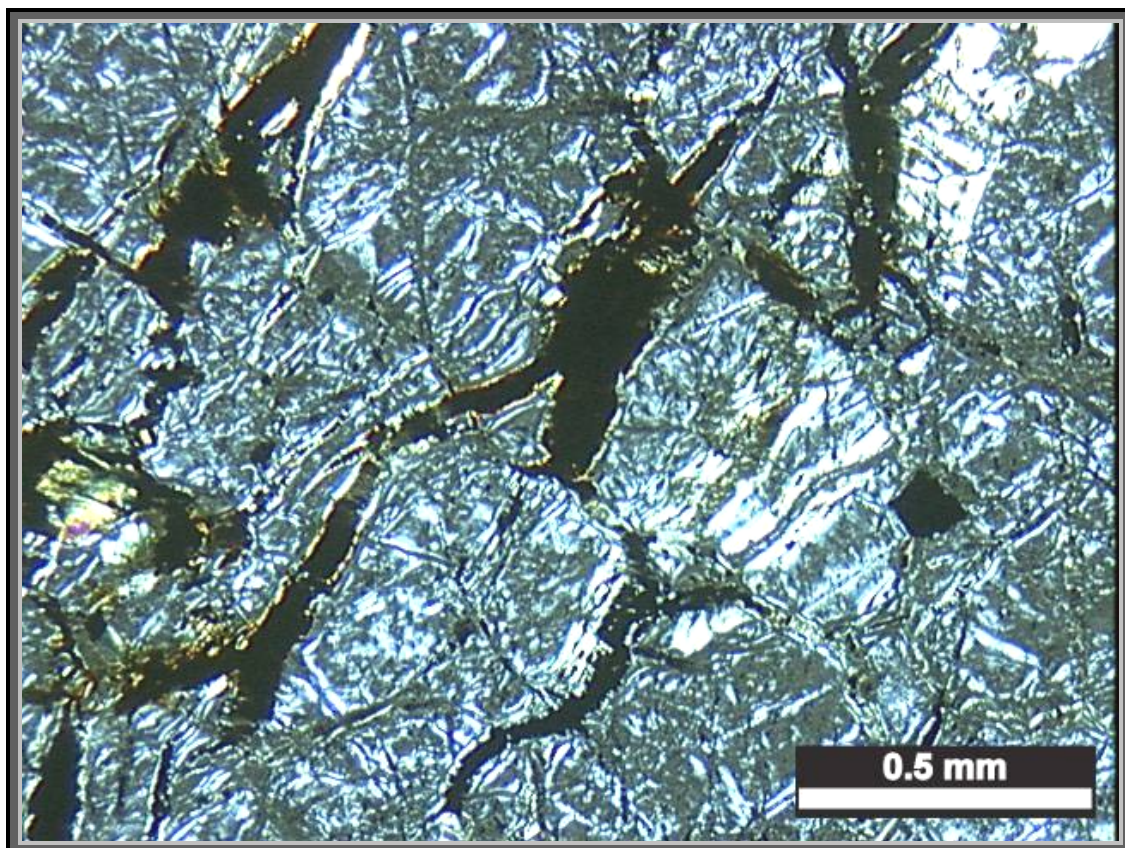
##### 6.2.4.1 AM 201204

A amostra AM 201204 representa a base do furo de sonda FJA 245 e constitui o horizonte menos alterado do perfil. A seção delgada revelou a seguinte abundância mineralógica, em ordem decrescente: serpentina (texturas *interlocking*, veios asbestiformes, *hourglass* e em quantidade traço, textura *mesh* isotrópica), cromita, agregados de minerais de Fe (goetita e hematita), além de clorita e magnetita. (**ANEXO II – Petrografia Ótica**).

O grupo das serpentinas constitui a maioria mineralógica identificada na amostra (87,75%), ocorrendo principalmente através da textura *interlocking* (62,88%), quanto na forma de veios asbestiformes e não asbestiformes (15,88%), contando, ainda, com matriz de textura *hourglass* (8,5%).

A imagem a seguir (**Fig. 48**) mostra serpentina na textura *interlocking* com grãos granulares produzidos pela recristalização de serpentina de textura *mesh*. A serpentina que ocorre como textura *mesh* é predominantemente do tipo lizardita enquanto que aquela encontrada na textura *interlocking* é principalmente antigorita.

Tal situação remete a possível sucessão de eventos de serpentinização, onde a substituição de lizardita por antigorita demonstra elevação de temperatura do fluido.

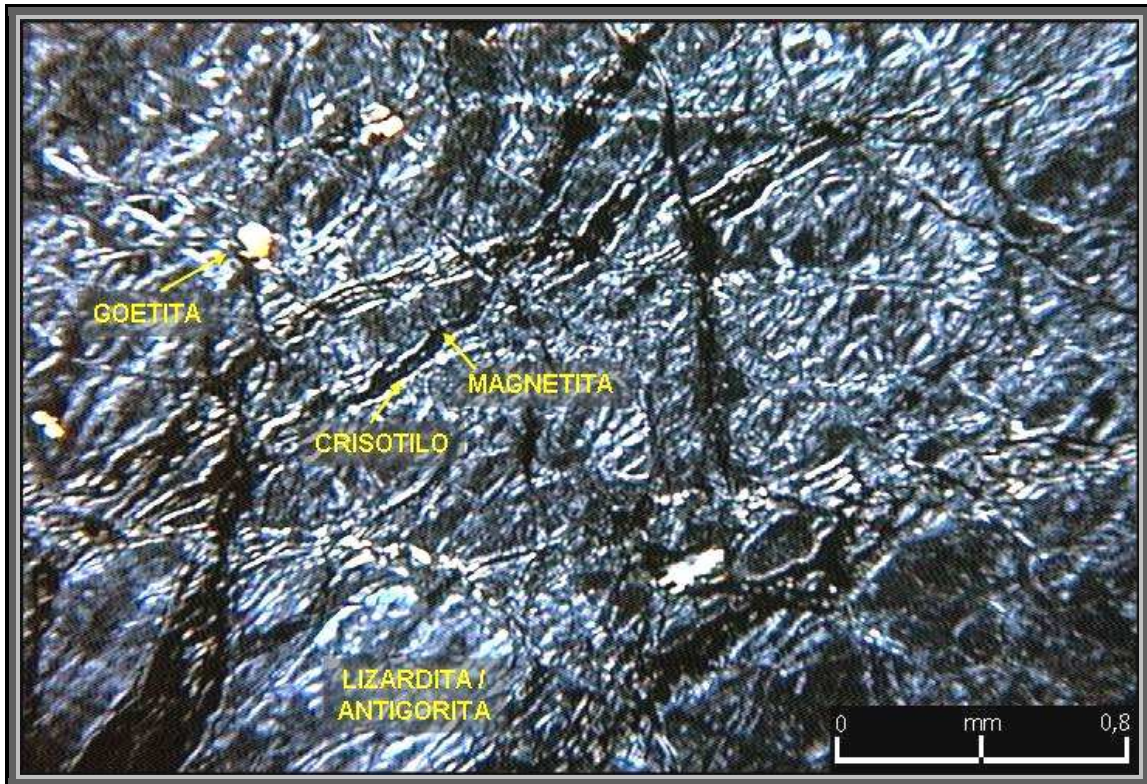


**Figura 48** - AM 201204: Fotomicrografia de fragmentos de saprolito mostrando serpentina na textura *interlocking* com grãos granulares produzidos pela recristalização de serpentina de textura *mesh* ( LP 50x). LP: Polarizadores Cruzados.

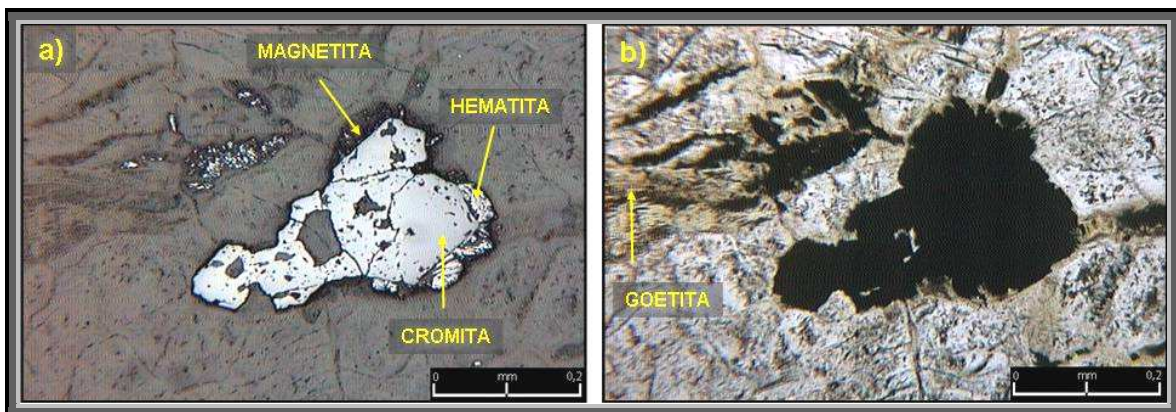
A maioria das serpentinas venulares são compostas por crisotilo e têm diâmetro médio de 0.1mm, contando com inclusão de magnetita na sua porção mediana e associação supergênica de goetita (**FIG. 49**).

Os grãos de cromita representam 3,63% da modal mineralógica e apresentam-se de forma euédrica a subédrica, com comprimento entre 0.05 - 0.50 mm. Não raro evidencia-se processo de hematização das cromitas com desenvolvimento de lamelas de goetita nas bordas. Os grãos de cromita têm sinais de serpentinização, o que favoreceu a geração de magnetita nas suas bordas, as quais, por sua vez, transformam-se em hematita por alteração supergênica (**FIG. 50a, b**).





**Figura 49** - Fotomicrografia referente à amostra 201204. Matriz lizardítica/antigorítica com venulação de crisotilo parcialmente preenchido por magnetita e associação de goetita. (LP –25x). LP: Polarizadores Cruzados.



**Figura 50** - Fotomicrografias referentes à amostra 201204. a) Cromita hematizada (LR – 100x). b) Idem anterior com destaque à geração de goetita (LP – 10x). LP: Polarizadores Cruzados.

A clorita representa 2,25% da modal mineralógica e encontra-se nos limites dos grãos de serpentina, disposta de forma tabular e fibrosa, petrograficamente destacada pela alta birrefringência. Na seção delgada fica evidente a relação deste mineral com o

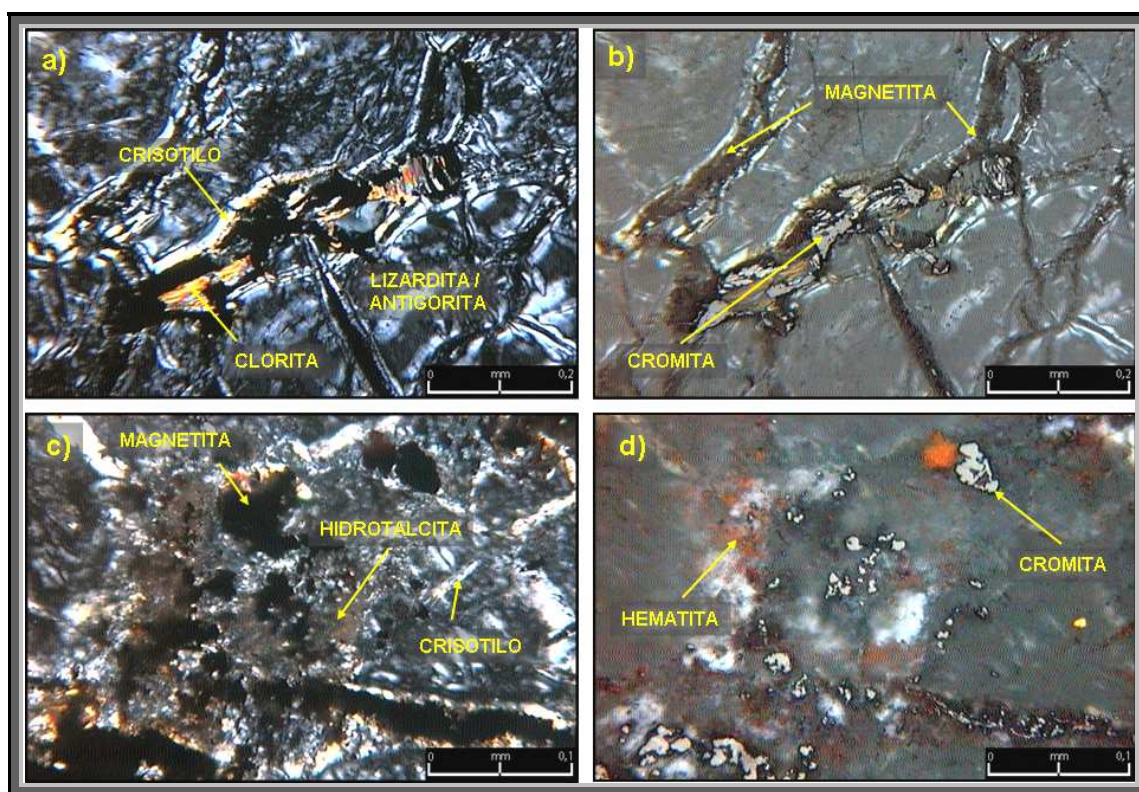


crisotilo (**Fig. 51a**), onde este último substitui pseudomorficamente a clorita durante a serpentinização, preservando a sua excelente clivagem.

Os agregados minerais oxidados de Fe ocorrem espalhados ao longo da seção delgada na forma de goetita (0,75%) e hematita (2,25%), normalmente ocupando a posição de borda de minerais como cromita, magnetita e serpentina (**FIG 51a, b, c, d**). Estes são caracterizados por agregados granulares, a maioria das vezes anédricos, de cor amarela avermelhada a marrom, e comprimento variando entre 0,05mm e 0,7mm.

Através das técnicas de Difractometria por Raios-X, evidenciou-se a presença de carbonato do grupo das hidrotalcitas, ao qual foi identificado em seção delgada na forma de “manchas” marrom avermelhadas (**Fig.51c**), sem significância modal.

Cristais de magnetita ocorrem normalmente acompanhando as venulações resultantes da serpentinização, representando 1,63% da mineralogia (**FIG. 51b, c**).



**Figura 51** - Mosaico de fotomicrografias da seção delgada referente à amostra AM 201204, representante da base do furo de sonda FJA 245. a) Associação serpentínica lizardita/antigorita e crisotilo com clorita (LP – 100x). b) Idem anterior com destaque para cromita e magnetita associadas à serpentina (LR – 100x). c) Carbonato do grupo hidrotalcita (LP – 200x). d) Idem anterior com destaque ao desenvolvimento de hematita e cromita associada (LR – 200x). LP: Polarizadores Cruzados; LR: Luz Refletida.

### 6.1.4.2 AM 201181

A amostra AM 201181 representa o topo do furo de sonda FJA 245, e diferencia-se da amostra AM 201204 por apresentar mineralização em Ni de alto teor (>2%). A seção delgada apresenta a seguinte abundância mineralógica, em ordem decrescente: matriz de hidróxido de Fe (55,75%), serpentina (35,13%) (textura *interlocking*, veios asbestiformes, textura *mesh* e *hourglass*), cromita (4,5%), goetita (1,5%), magnetita (1,5%), hematita (0,75%), além de traços de clorita (0,63%) e calcedônia (0,25%) (**ANEXO II – Petrografia Óptica**).

A maioria mineralógica modal contabilizada na amostra AM 201181 refere-se à associação de óxidos e hidróxidos de Fe presentes na matriz (55,75%) (**FIG. 52**).

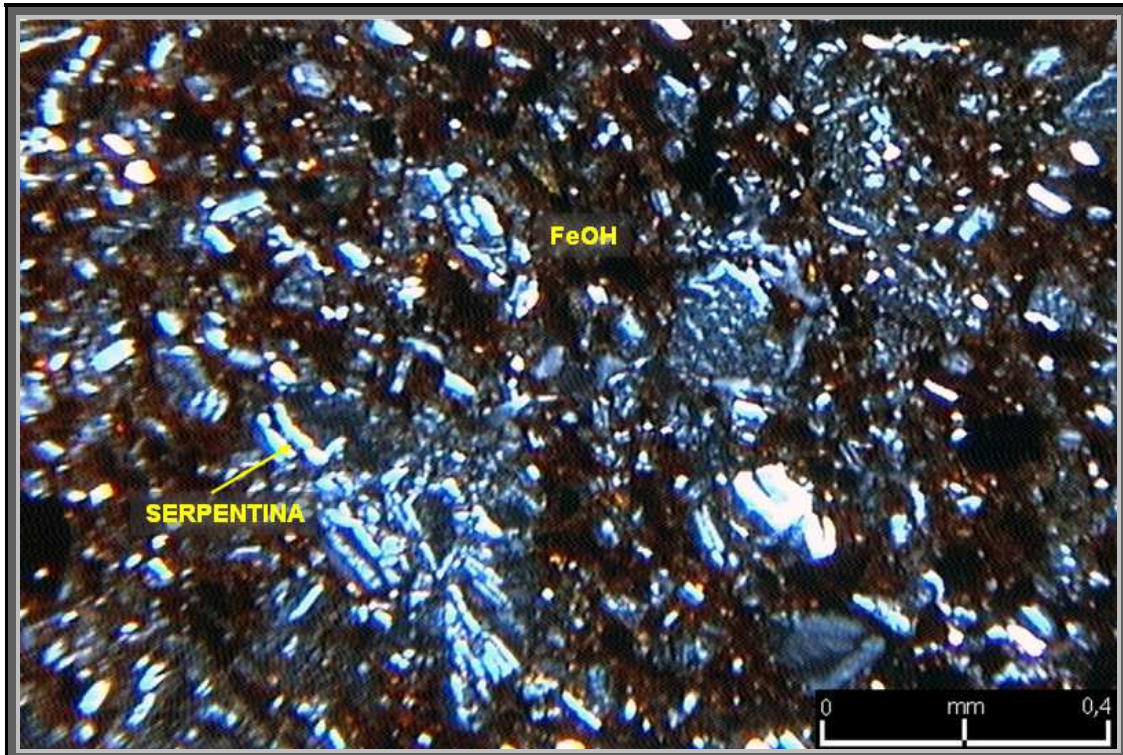
O grupo das serpentinhas constitui o segundo maior constituinte mineralógico identificado na amostra (35,13%), ocorrendo principalmente através da textura *interlocking* (28,88%), quanto na forma de veios asbestiformes e não asbestiformes (4,38%), contando, ainda, com textura *mesh* (1,63%) e traços de textura *hourglass* (0,25%).

A figura a seguir (**Fig. 53a**) demonstra a relação existente entre o processo de oxidação da pretérita matriz serpentínica, alterando para goetita e hematita. Verifica-se que o processo toma início junto aos veios asbestiformes, por vezes preservando magnetita, e corrói os cristais de lizardita das bordas para o centro.

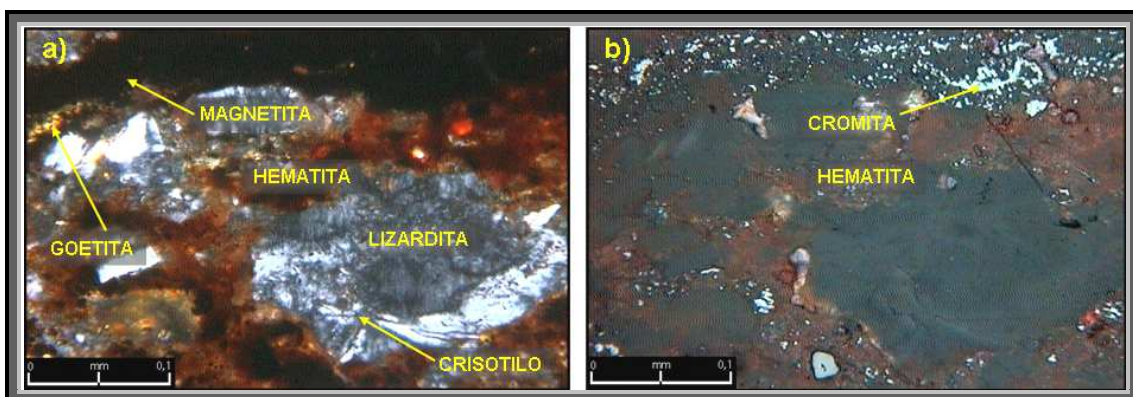
Quando observada em Luz Refletida (**Fig. 53b**), percebe-se a distribuição da cromita que, assim como a magnetita, encontra-se nas antigas vênulas de serpentina. Devido ao processo de serpentização, há uma clara “quebra” e corrosão dos cristais de cromita, os quais acabam por alcançar comprimento máximo de 0,025mm, com maior preservação dos grãos de Cr-espinélio (**Fig. 54**).

A clorita representa 0,63% da modal mineralógica e encontra-se, assim como na amostra da base do furo, entre os limites dos grãos de serpentina (**FIG 55a**). Além da baixa quantidade, a clorita presente neste horizonte tem baixa cristalinidade, haja vista a sua ausência quando observados os dados de DRX (**FIG 56**). Petrograficamente ela tem menor birrefringência que aquela clorita da base do furo e disposta na forma de fibras. Evidencia-se a clara quebra da estrutura cristalina da clorita devido ao processo intempérico ao qual ela está submetida.



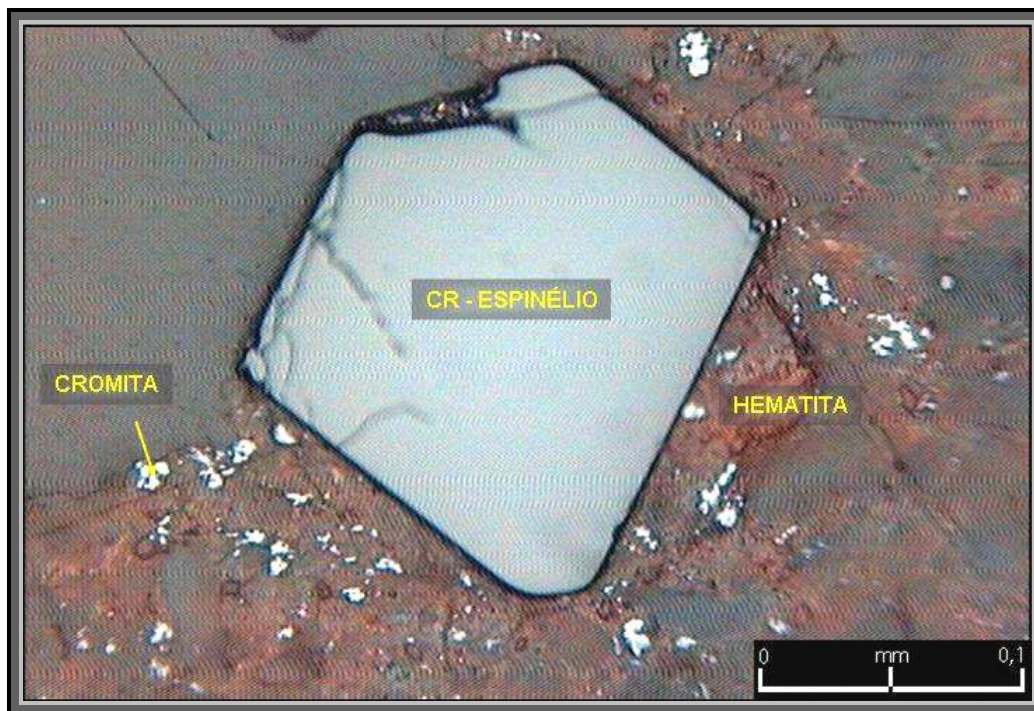


**Figura 52** - Fotomicrografia da amostra AM 201181, demonstrando a relação entre a matriz oxidada e os relíctos serpentíníficos alterados supergeneticamente. (LP – 50x). LP: Polarizadores Cruzados.



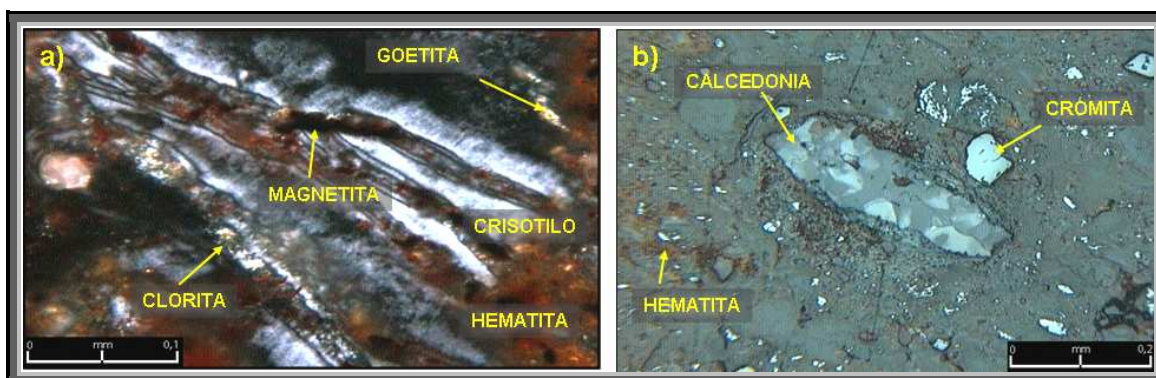
**Figura 53** - Fotomicrografia da amostra AM 201181. a) Agregado de cristais de lizardita cortado por pequena vênula de crisotilo, envolvido por hematita (manchas vermelhas) e franjas de goetita (amarelo). (LP – 200x). b) Idem anterior com destaque ao processo de hematitização, bem como “quebra” da cromita. (LR – 200x). LP: Polarizadores Cruzados; LR: Luz Refletida.





**Figura 54** - AM 201181 - Cristal de Cr-espínélio em meio à massa hematítica. (LR – 200x). LR: Luz Refletida.

Agregados de cristais de calcedônia imersos numa matriz oxidada, com presença de cristais de cromita parcialmente quebrados e preservados, são identificados na amostra (**FIG 55b**).



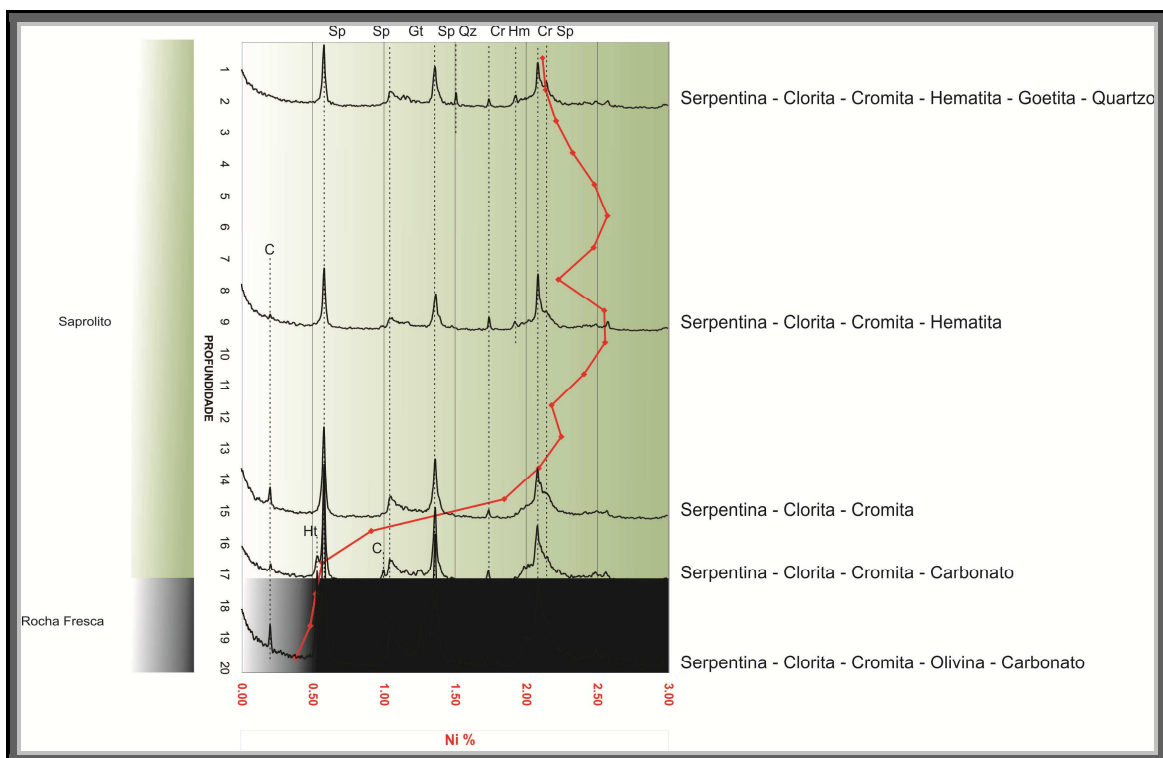
**Figura 55** - Fotomicrografias referente à amostra AM 201181. a) Relação mineralógica entre os veios de crisotilo, e o desenvolvimento de clorita, magnetita, goetita e hematita. (LP- 200x) b) Agregado de cristais de calcedônia imerso em meio à matriz oxidada. Percebem-se cristais de cromita parcialmente quebrados preservados. (LR – 100x). LP: Polarizadores Cruzados. LR: Luz Refletida.

### 6.2.5 Difração de Raios X

Foram analisadas 6 amostras por Difração de Raios X (DRX) referentes ao furo FJA 245, com o objetivo de obter um detalhamento na identificação mineral envolvendo fração total (20µm) e frações finas (2µm). As amostras referem-se ao primeiro metro da base (20m), porção saprolítica (17m, 16m, 15m e 9m) e topo da seção (1m) (FIG.56)

O perfil apresenta uma mineralogia predominantemente serpentínica na sua base, contando ainda com relictos de olivina e cromita, além de carbonatos do grupo da hidrotalcita. Não foram identificados minerais do grupo da clorita.

À medida que se ascende no perfil em direção ao topo, encontra-se a zona de alto teor em Ni (11m a 5m), a qual se caracteriza pela presença de serpentina, clorita, cromita e hematita.



**Figura 56** - Superposição de Difrátogramas (fração < 20µm), segundo a profundidade, em relação ao perfil geológico e consecutiva variação de Ni do furo de sonda FJA 245. Legenda: Sp – serpentina; C – clorita; Ht – carbonato; Cr – magnetita\cromita\Cr-Espinélio; Ol – olivina; Hm – hematita; Qz – quartzo; Gt - goetita.

Por fim, no topo da seqüência (1m), fazem parte da paragênese mineral a serpentina, cromita, hematita, goetita e quartzo.

A fração >20µm destaca a presença de olivina (pico 2.499) na base do furo (metro 20), o que não foi evidenciado na petrografia óptica. Provavelmente este mineral sofreu serpentinização parcial, o que garante ao mesmo um aspecto óptico serpentínico, apesar de manter estrutura cristalina da olivina parcialmente preservada (FIG. 57).

As amostras referentes aos metros 20 e 17 apresentaram um componente mineralógico diferenciado, tanto a 11° (pico 7.805) quanto a 23° (pico 3,894), devido a sua característica carbonática, pertencendo este ao grupo das hidrotalcitas (FIG. 57).

A clorita, por sua vez, aparece relativamente cristalizada ao longo de todo perfil, a exceção da amostra referente ao metro 1, a qual a clorita desaparece. Interessante observar a relação inversamente proporcional entre a diminuição da cristalinidade da clorita (pico 14.398), com o gradual enriquecimento em Ni (FIG. 56).

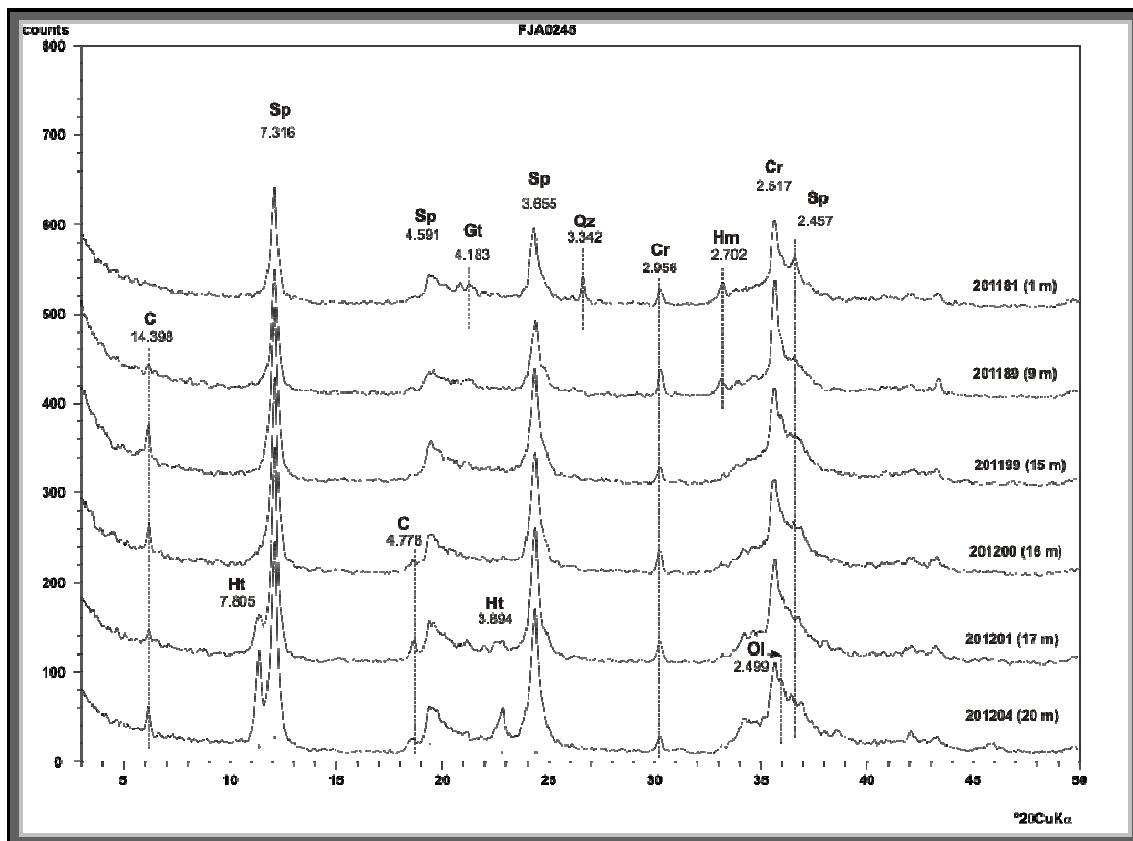


Figura 57 - Superposição de Difractogramas (fração < 20µm), segundo a profundidade, do furo de sonda FJA 245. Legenda: Sp – serpentina; C – clorita; Ht – hidrotalcita; Cr – magnetita\cromita\Cr-espinélio; Ol – olivina; Hm – hematita; Qz – quartzo; Gt - goetita.

Em contrapartida, os picos dos valores de Ni ocorrem quando a cristalinidade de minerais de Fe, em especial hematita (pico 2,702) e goetita (pico 4,183), melhora.

Ao analisar a fração <math><2\mu\text{m}</math>, percebe-se a serpentina e hidrotalcita como as únicas formas cristalinas presentes. Assim como a fração <math><20\mu\text{m}</math>, minerais do grupo das hidrotalcitas estão presentes na base do furo, enquanto as serpentinas distribuem-se ao longo de toda a seção de forma uniforme, independente da fração analisada (**FIG. 58**).

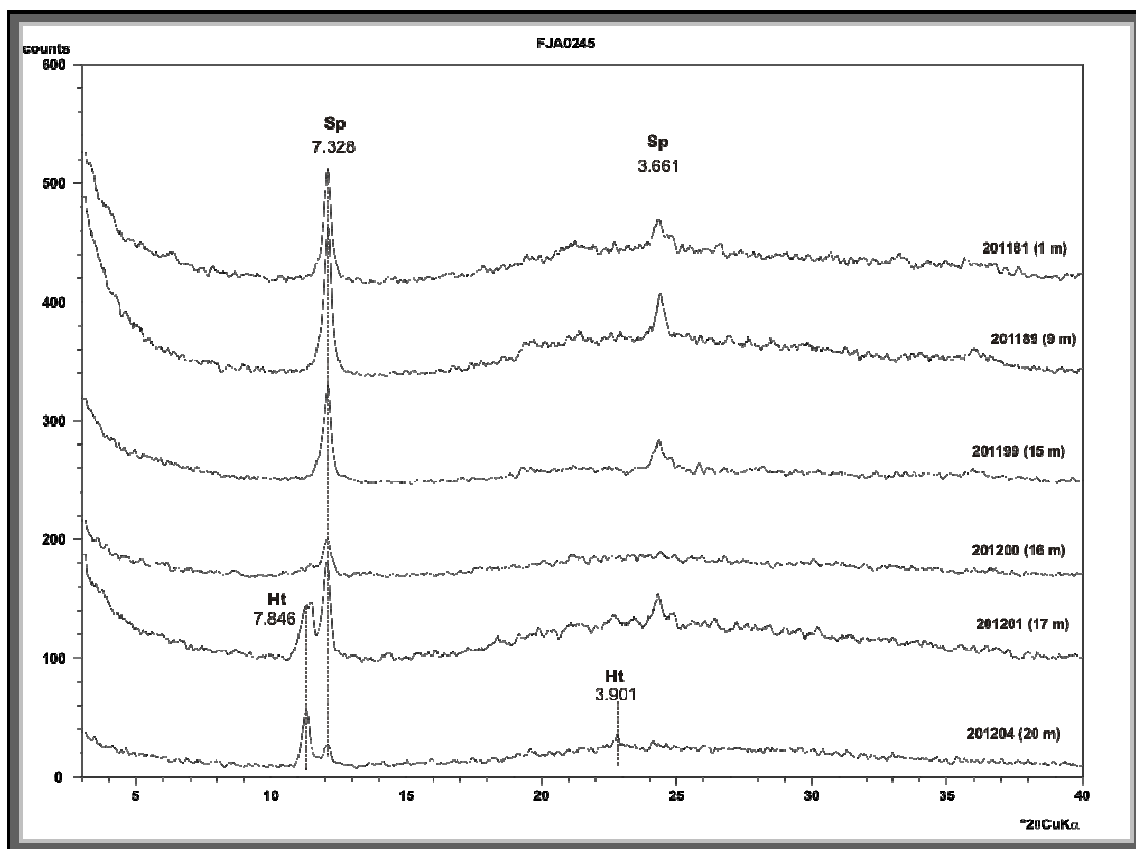


Figura 58 - Superposição de Difractogramas (fração <math><2\mu\text{m}</math>), segundo a profundidade, do furo de sonda FJA 245. Legenda: Sp – serpentina.

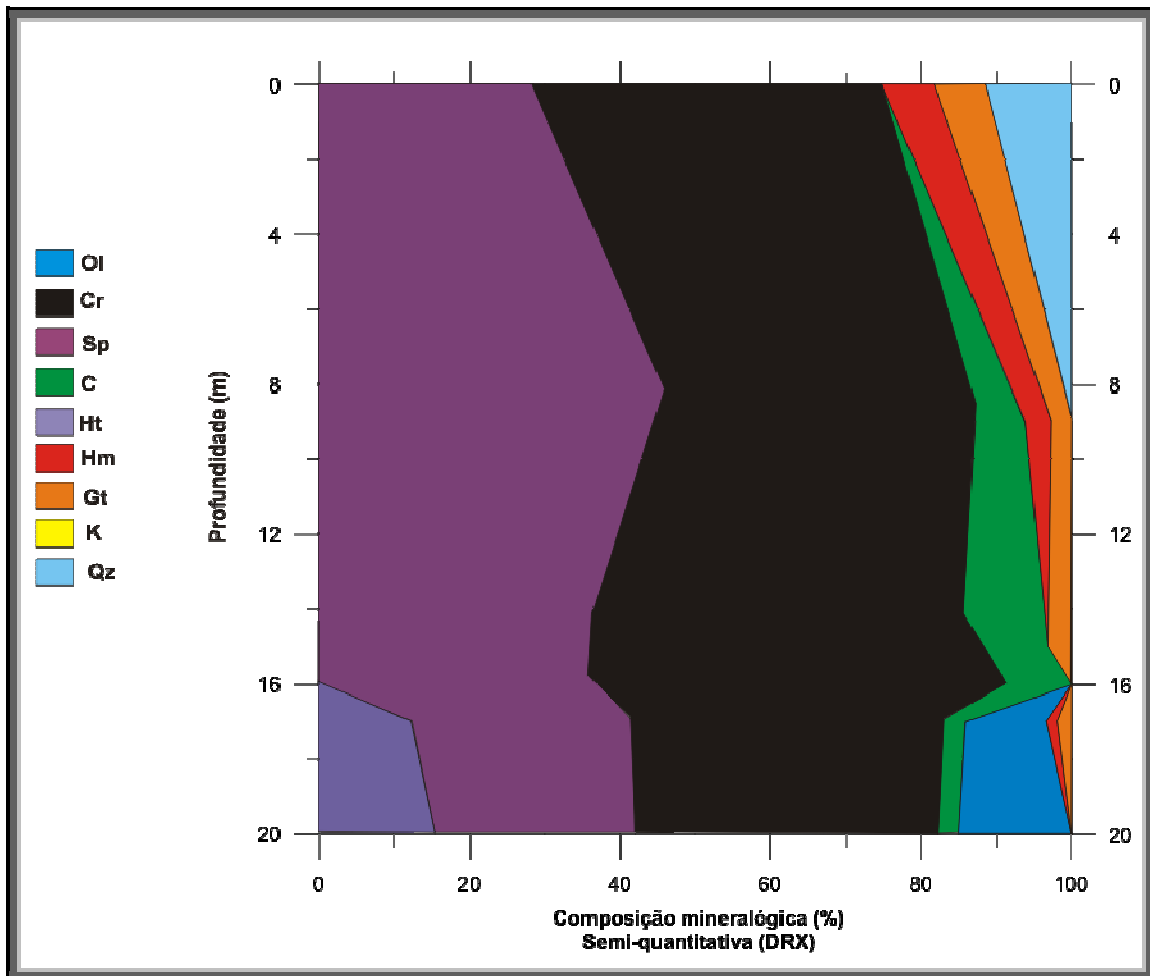
As análises tanto das frações <math><20\mu\text{m}</math> quanto <math><2\mu\text{m}</math> revelaram a inexistência de picos na região compreendida entre

As análises por DRX permitem, além da identificação mineralógica, a estimativa de suas proporções nos campos estudados, através do cálculo semi-quantitativo



do espaçamento cristalino das fases, de tal sorte que a figura abaixo representa estas variações ao longo do furo de sonda FJA 245 (FIG. 59).

A modal mineralógica via DRX revela que serpentina e cromita são fases estáveis, uniformes e presentes em todo o perfil de alteração, contudo, verifica-se que a partir do início da melhor cristalização de goetitas e hematitas, o perfil alcança os melhores teores de Ni.



**Figura 59** - Distribuição mineralógica estimada a partir da análise modal semi-quantitativa por meio de DRX (cálculo a partir da integração das áreas e do nível de contagem dos picos identificados dos minerais) do furo de sonda FJA 245. Legenda - Ol: olivina; Cr: magnetita/cromita/cromo-espinélio; Sp: serpentina; C: clorita; Ht: hidrotalcita; Hm: hematita; Gt: goetita; K: kaolinita; Qz: quartzo.

### 6.3 Furo FJA 255

#### 6.3.1 Geomorfologia e Descrição

O Furo FJA 255 (9318536.333N e 402064.160E) encontra-se na porção W - NW do corpo do Jacaré (**FIG. 60**).

O furo de sonda FJA 255 está posicionado em meia encosta na borda W - NW do depósito. O local onde se encontra o furo apresenta-se geomorfologicamente em ambiente de dissecação erosiva, onde a carapaça laterítica silicosa, a qual ocupa a porção superior da topografia do depósito, não está desenvolvida.

O perfil saprolítico é bem desenvolvido e homogêneo ao longo de 24m, dos 28m totais que compõem o furo

O perfil, da base para o topo conta com 4m de rocha fresca (28m aos 24m) e 24m de Zona Saprolítica (24m ao 0m) (**FIG. 61**).

Foram identificados dois momentos de ápice dos valores de Ni, sendo o primeiro pico no metro 22, apresentando, então, baixa nos teores de Ni até o metro 12, onde uma retomada anômala positiva ( $Ni > 2\%$ ) é alcançada, mantendo-se assim até o topo do perfil saprolítico.

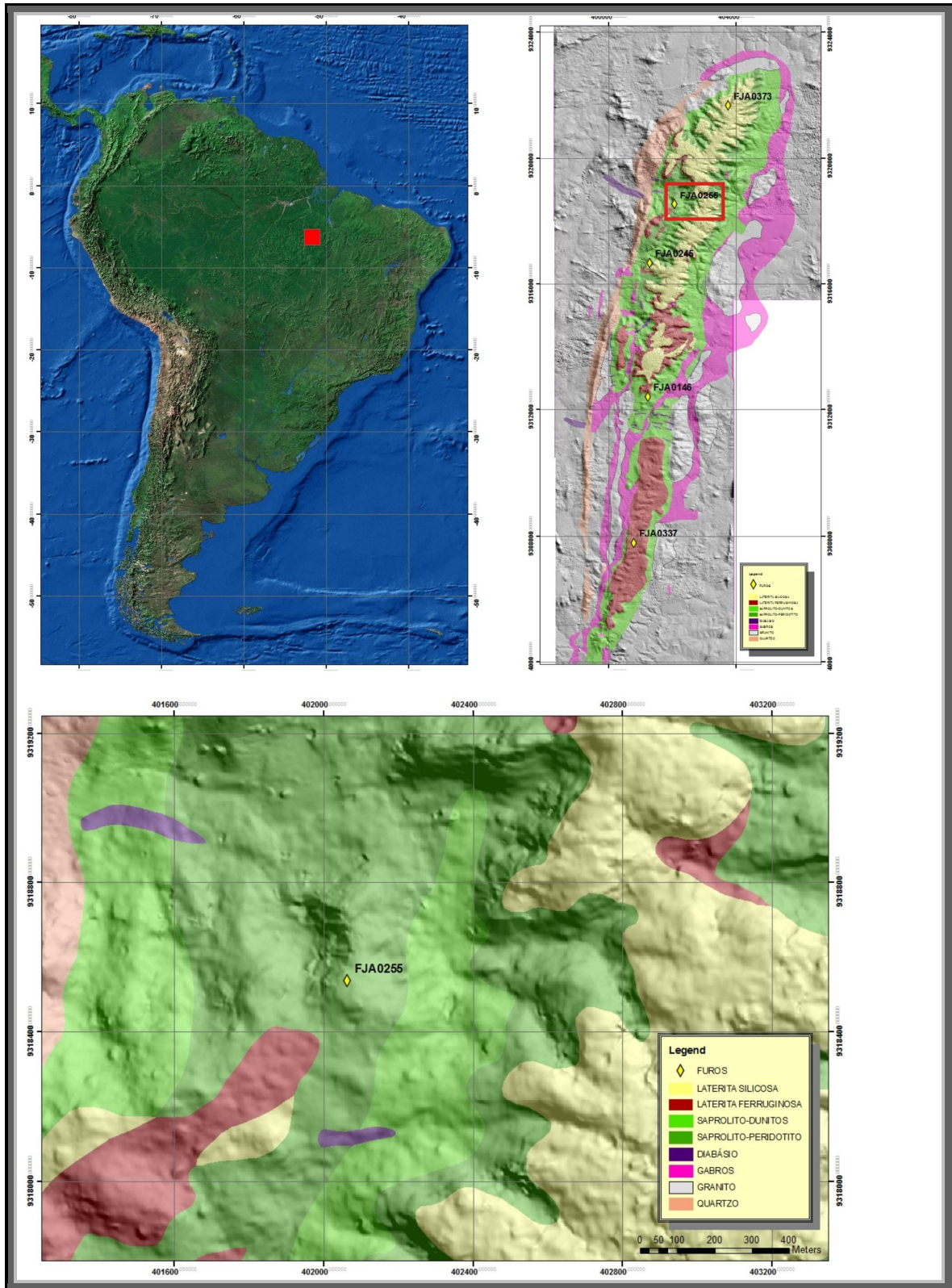


Figura 60 - Mapa de Localização do Furo FJA 255.

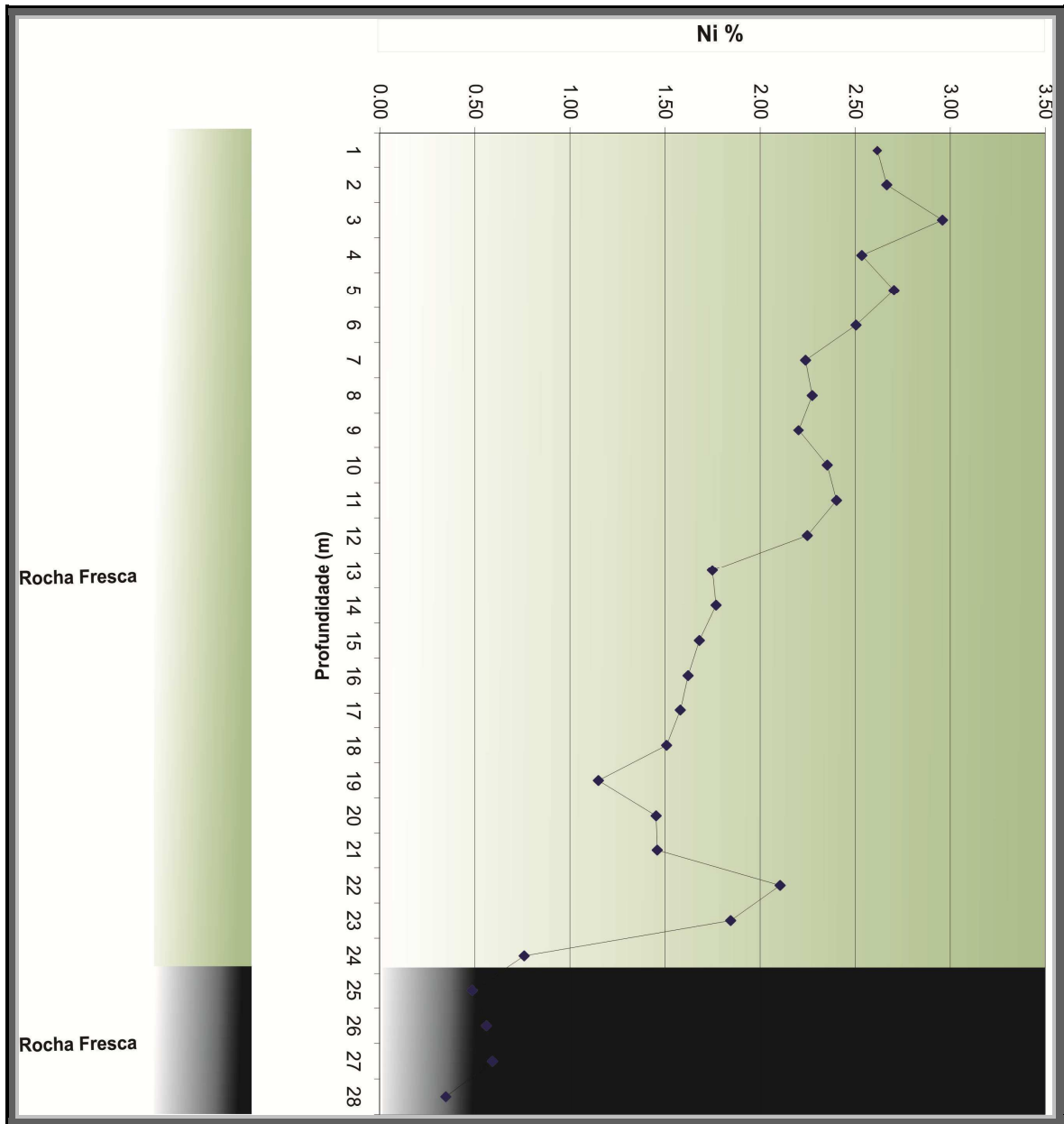


Figura 61 - Perfil de alteração do furo FJA 255 e sua consecutiva variação em Ni.

### 6.3.2 Análise Química

O perfil geoquímico dos elementos maiores e alguns menores, ao longo da seqüência de alteração representada no furo FJA 255 pode ser observado na **Figura 62**, e seus dados absolutos acompanhados no **ANEXO I – Análises Químicas**.

Verificam-se quatro pulsos distintos nos valores de Ni ao longo do furo FJA 255, após o horizonte compreendidos entre os metros 28 (base do furo) até o metro 24, onde o Ni encontra-se na forma silicática da serpentina, apresentando teores não econômicos (<0.9%). Entre 23m e 22m os primeiros picos nos teores de Ni são observáveis, seguido por uma diminuição nos valores entre 21m e 13m. A partir do metro 12 até o metro 7 há uma retomada dos altos valores de Ni (média de 2,24%), culminando com a 4ª etapa de acumulação supergênica de Ni, entre 6m e 0m.

O primeiro pulso positivo de Ni após a rocha fresca (entre 23m e 22m) ocorre acompanhado de igual anomalia positiva de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Co, Y, Nb e Sc. Em contrapartida, os elementos MgO e Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> apresentam tendência negativa neste horizonte. Este fato deve estar correlacionado a um maior grau de fraturamento nesta região e, consecutivamente uma maior permeabilidade, o que faz com que o potencial de redução nesta porção seja aumentado e, assim, permita a maior fixação do Ni nos hidróxidos.

O horizonte de alteração compreendido entre os metros 21 a 13 se caracteriza por uma diminuição dos teores de níquel (média de 1,55%). Esta queda é acompanhada por igual decréscimo nos teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Co e aumento dos teores de MgO e Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Nota-se a inversão das anomalias quando comparado ao *layer* anterior, o que denota uma retomada a uma fácies claramente dunítica, porém de alteração supergênica mais discreta, corroborado pelos tímidos valores de Ni nesta porção.

A porção do horizonte de alteração entre 13m e 7m de profundidade demonstra evidente aumento nas concentrações de Ni (média de 2,21%), acompanhado por leve aumento nos valores de SiO<sub>2</sub> e Nb. Os demais elementos analisados; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Co, Nb e Sc obtiveram leves variações negativas, enquanto, TiO<sub>2</sub>, Zr e Y, não apresentaram variação nesta faixa.

O horizonte mineralizado supra descrito identifica um perfil de alteração jovem, pouco maduro, onde os teores de Ni não se encontram fixados a nenhum halóide ou

óxido/hidróxido, o que é sugerido pelo baixo valor absoluto de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (12,74%), alto valor de  $\text{MgO}$  (32,15%) e alto valor de  $\text{SiO}_2$ . Quando comparado à base do perfil de alteração nota-se a pouca variabilidade destes elementos, o que igualmente remete a teores de Ni ligados às próprias serpentinas alteradas supergenicamente *in situ*.

Por fim, a parcela do horizonte mineralizado de maior valor para níquel (2,66%), entre 6m e 0m, mostra que as variações geoquímicas seguem padrão muito semelhante ao horizonte anteriormente descrito, a exceção de Co que acumula distintivamente positivo e  $\text{TiO}_2$ , o qual apresenta variação negativa.

O material oriundo do primeiro metro perfurado (0m a 1m) tem variações distintas devido à grande concentração relativa de diversos elementos, o que gera certo distúrbio na interpretação do perfil como um todo. Porém, facilmente explicado na análise de balanço de massa para o furo FJA 255.

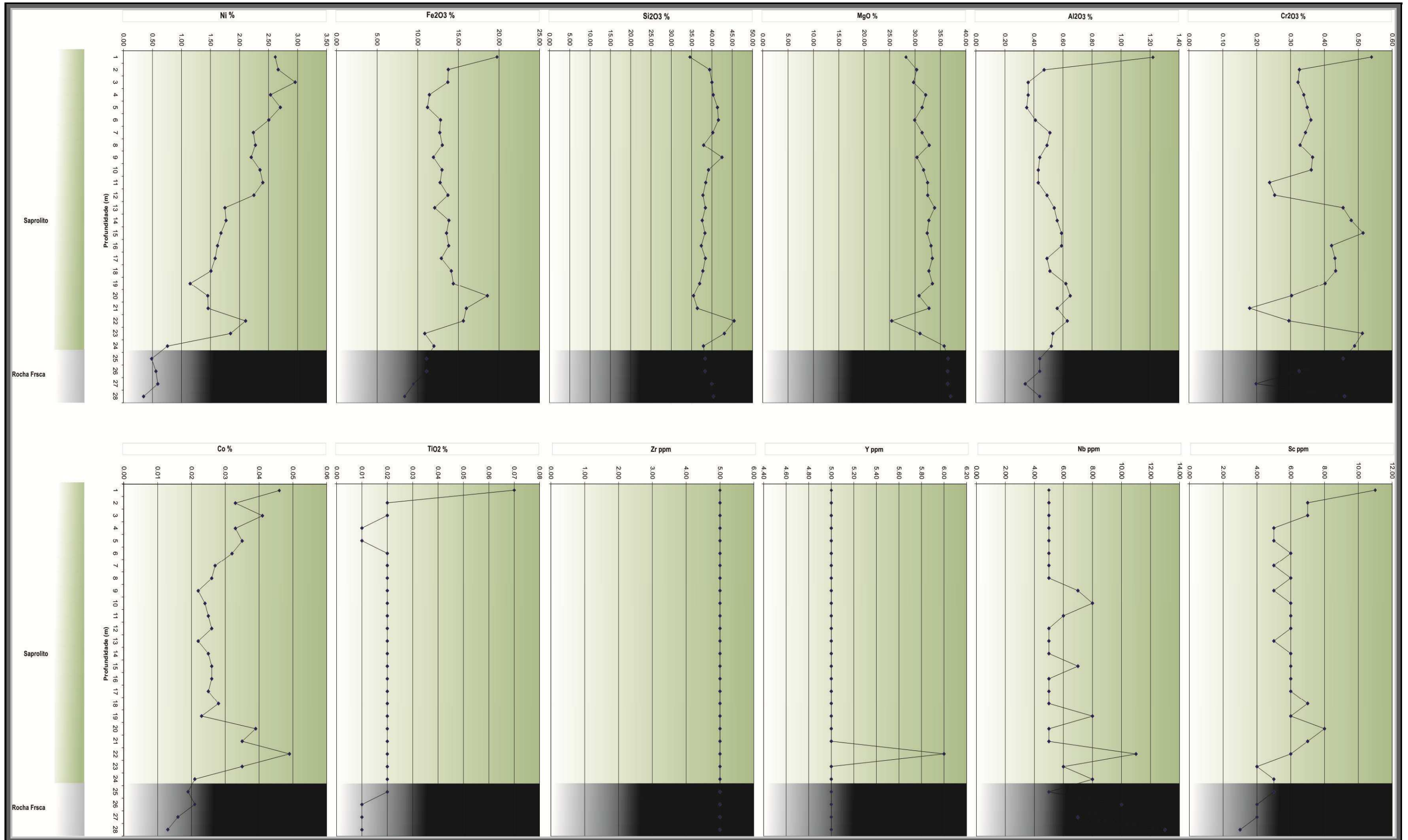


Figura 62 - Gráficos de variação geoquímica do Furo FJA 255.



### 6.3.3 Balanço de Massa

A análise de balanço de massa referente ao furo FJA 255 identifica notoriamente três porções de acumulação e/ou depleção, as quais corroboram espacialmente com os mesmos distintos horizontes identificados na análise de variação química descrita anteriormente, a exceção do penúltimo horizonte químico, o qual não encontra alterações de balanço de massa significativas.

Assim, o primeiro pulso positivo de Ni após a rocha fresca (entre 23m e 22m) encontra singular variação de balanço de massa entre os elementos, de tal sorte que há acumulação de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , Co e Sc, depleção de MgO e inversão entre acumulação e depleção dentro do mesmo horizonte de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , Zr e Y (**FIG. 63**).

O esquema geoquímico apresentado para este horizonte remete a uma interferência do lençol freático sazonal determinante, onde a associação  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e Co se dá por processo de oxidação e redução, vinculando ligações de Ni por incorporação ou adsorção. Acompanhando, a depleção evidente do MgO respalda um ambiente lixiviador, onde estes elementos mais móveis são carregados para o sistema.

A inversão entre acumulação e depleção dentro deste mesmo horizonte determina, fielmente, a fácies de influência do lençol freático, além de permitir interpretar a imaturidade do mesmo, visto que esta zona encontra-se delimitada na ordem de 1 a 2 metros.

O horizonte de alteração compreendido entre os metros 21 a 13, caracterizado por uma diminuição dos teores de níquel (média de 1,55%), apresenta acumulação de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Co, Ti e Sc e depleção em  $\text{SiO}_2$ , MgO, Zr, Y e Nb.

Esta situação reflete o distanciamento continuado da zona de atuação do lençol freático em direção ao topo do perfil, de tal sorte que os elementos mais móveis como MgO e  $\text{SiO}_2$  vão sendo lixiviados, culminando, inclusive, com a acumulação relativa de elementos menos móveis como  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  no topo deste horizonte.

O  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , por sua vez, devido ao ambiente mais aerado em direção ao topo deste horizonte, tende a passar da forma  $\text{Fe}^{2+}$  (móvel), para a forma  $\text{Fe}^{3+}$  (menos móvel), concentrando-o nesta zona.

O níquel, assim, concentra de forma diminuta, quando comparado as zonas sobrepostas e sotopostas, devido ao baixo grau de intemperismo existente no horizonte, onde a “quebra” da estrutura cristalina da serpentina não ocorre de forma completa, mantendo, assim, o Ni sob a forma silicática e com menor teor no sistema.

Por fim, a zona de maior acumulação de Ni no perfil denominado FJA 255 encontra-se na porção superior do alterito, e, em termos de balanço de massa, compreende os metros 12 a 0 (**FIG. 63**).

A alta concentração de Ni nesta zona é acompanhada por concentração relativa de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (discreta em comparação ao horizonte anterior), Co e  $\text{TiO}_2$  e depleção de  $\text{SiO}_2$ , MgO,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , Zr e Y. Os elementos Nb e Sc não apresentaram variação.

Assim, os teores de níquel apresentam comportamento geoquímico normal para a zona superior de um perfil de alteração, com lixiviação bastante acentuada de elementos mais móveis nesta condição de Eh e pH, e concentração de elementos menos móveis submetidos às mesmas condições. Exceção deve ser citada aqui, ao elemento  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , o qual se esperava uma concentração relativa nesta zona, e a mesma não é evidenciada pelos dados estudados.

A alta taxa de lixiviação do  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  pode remeter a um ambiente altamente alterado, o que não pode ser concluído nesta situação, uma vez que os valores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  apresentam variação muito discreta quando avaliados pelo balanço de massa, e muito baixos absolutamente, quando avaliados pela variação geoquímica.

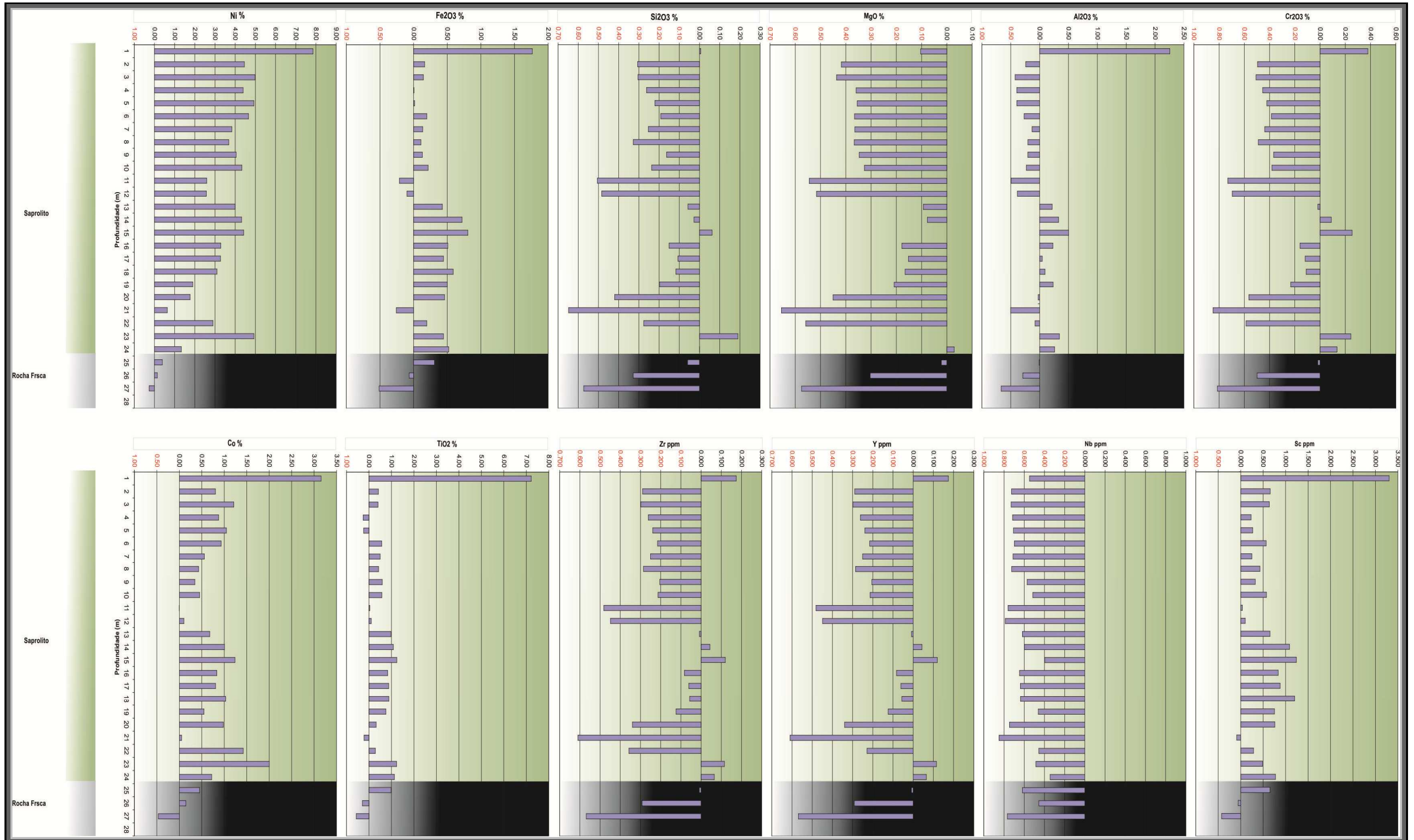


Figura 63 - Gráficos de Balanço de Massa do Furo FJA 255.

### 6.3.4 Petrografia Ótica

O furo FJA 255 teve duas amostras analisadas via petrografia ótica, sendo distintas na sua composição mineralógica. As amostras estudadas são identificadas pela seguinte numeração: AM 201376 – referente ao metro 28 (base do furo) e AM 201345 – referente ao metro 1 (topo do furo).

A amostra AM 201376 tem composição essencialmente serpentínica, contando com fases menores de goetita, cromita, talco, Cr-espínélio, clorita, magnetita, hematita e calcedônia.

A amostra AM 201345, apresenta igualmente uma predominância de minerais do grupo da serpentina com destaque para textura tipo *interpenetrating*. A modal mineralógica segue em ordem decrescente em óxidos/hidróxidos de ferro não diferenciados, goetita, magnetita, cromita, hematita, quartzo, Cr-espínélio e, em menor quantidade talco.

#### 6.3.4.1 AM 201376

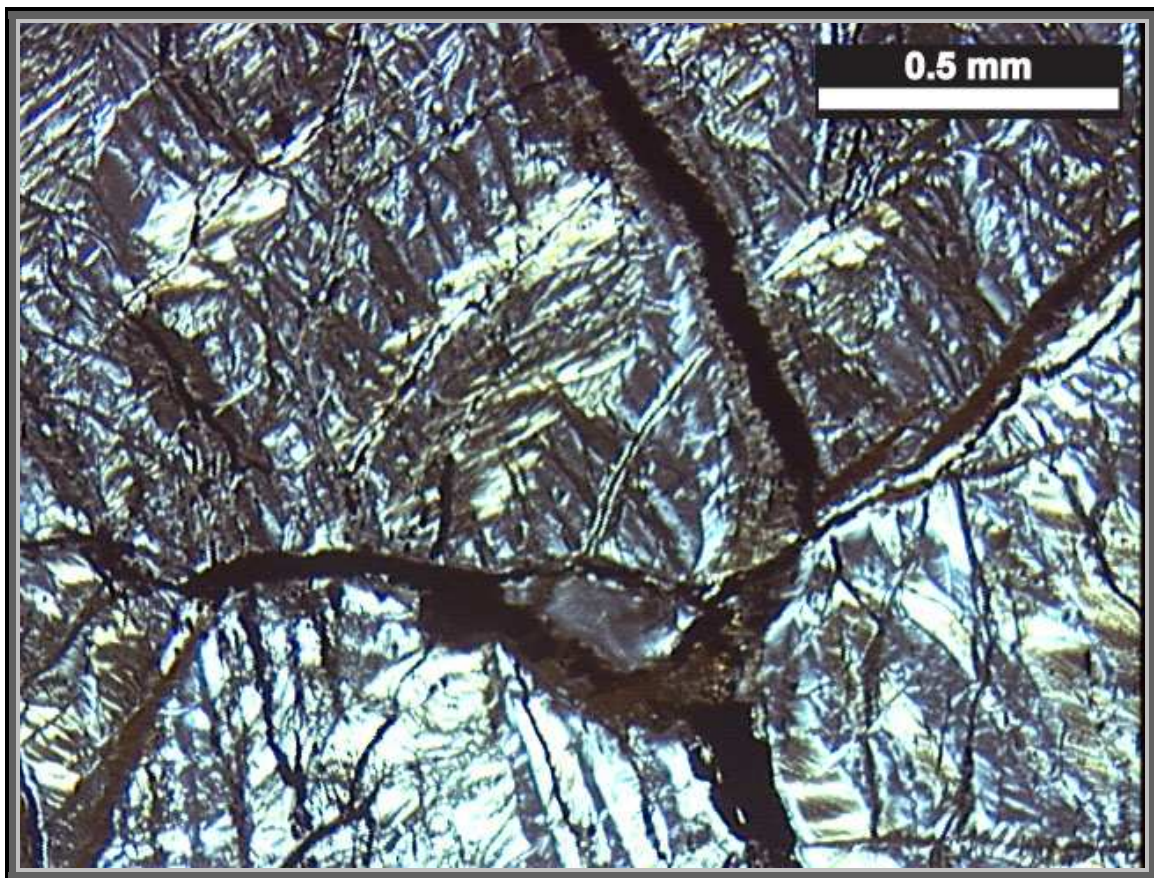
A amostra AM 201376 representa a base do furo de sonda FJA 255 e constitui o horizonte menos alterado do perfil. A seção delgada revelou a seguinte abundância mineralógica, em ordem decrescente: serpentina (texturas *interpenetrating*, veios asbestiformes e não asbestiformes, *interlocking* e *hourglass*) goetita, cromita, talco, Cr espínélio, clorita, magnetita, hematita e calcedônia. (ANEXO II – Petrografia Ótica).

O grupo das serpentinas constitui a maioria mineralógica identificada na amostra (84,50%), ocorrendo principalmente através da textura *interpenetrating* (56,30%), quanto na forma de veios asbestiformes e não asbestiformes (19,38%), *interlocking* (8,13%) e, em quantidade discreta, textura *hourglass* na matriz (0,63%).

A fotomicrografia a seguir (**Fig. 64**) mostra serpentina na textura *interpenetrating* com grãos lamelares produzidos pela recristalização de serpentina de textura *mesh* e *hourglass*. A serpentina que ocorre como textura *mesh* é predominantemente do

tipo lizardita enquanto que aquela encontrada na textura *interpenetrating* é principalmente antigorita.

A coexistência de lizardita e antigorita indica processos de serpentinização distintos, devido a mais alta temperatura que se faz necessária para a cristalização da antigorita. Assim, ao menos dois eventos de circulação de fluidos em diferentes temperaturas ocorreram.



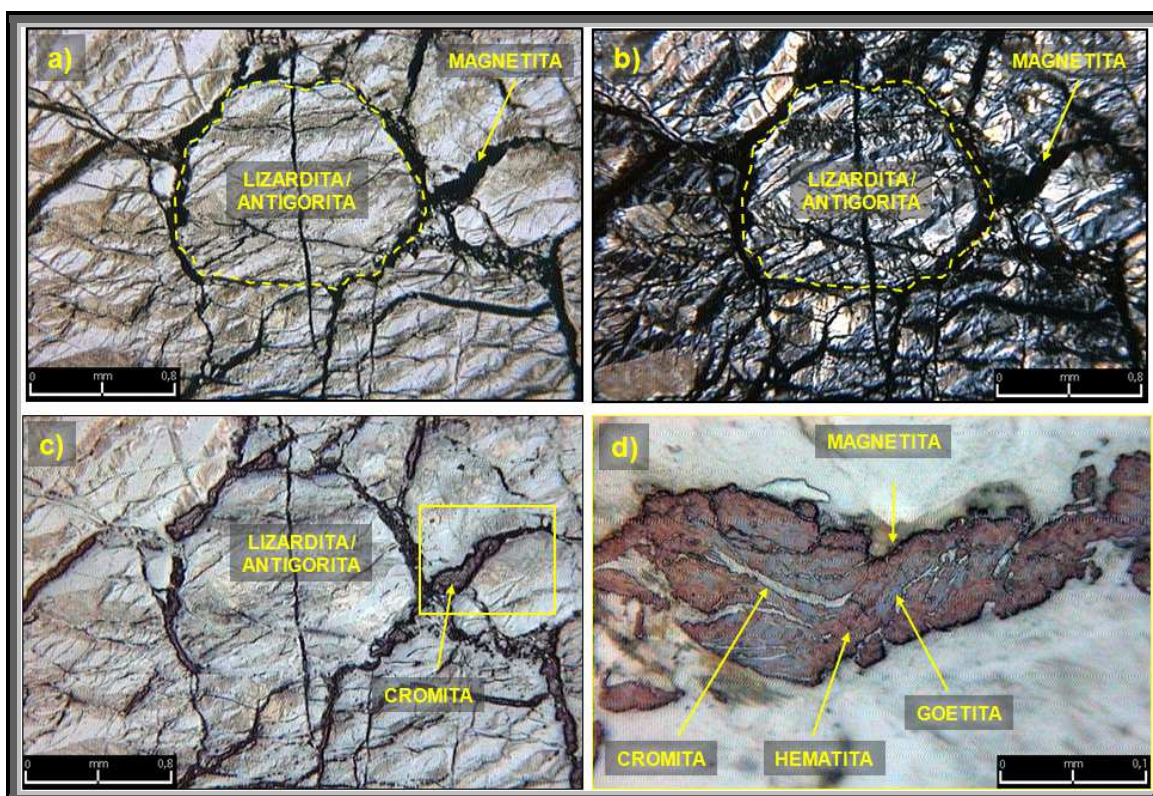
**Figura 64** - Fotomicrografia de fragmentos de saprolito da base do furo FJA 255 ( LP 50x.) mostrando o controle original dos grãos de olivina marcados pela concentração de opacos (magnetita principalmente). LP: Polarizadores Cruzados.

A maioria das serpentinas venulares ocorre em veios tipo asbestiformes, onde o crisotilo é o principal constituinte e têm diâmetro médio de 0.15mm, contando com inclusão de magnetita e goetita, além de hematitização (**FIG. 65d**).



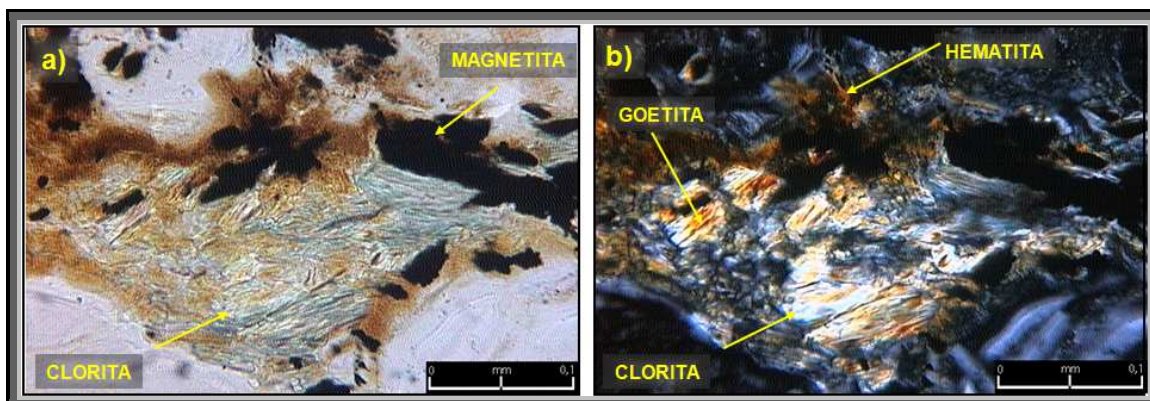
Detalhe destacável para a amostra em questão é a presença de olivina (confirmada por DRX) parcialmente serpentinizada, gerando lizardita e antigorita. (**FIG. 65 a,b**).

Os cristais de cromita representam 3,75% da modal mineralógica e encontram-se associados com hematita (0,25%), magnetita (0,50%) e goetita (7,76%), sendo a presença de hematita um provável processo de hidratação da goetita (**FIG. 65 c,d**).



**Figura 65** - Mosaico de fotomicrografias da seção delgada referente à amostra AM 201376, representante da base do furo de sonda FJA 255. a) Associação serpentínica lizardita/antigorita onde a magnetita marca o contorno dos grãos originais de olivina com hábito granular (LN – 25x). b) Idem anterior com destaque para textura *interpenetrating* (LP – 25x). c) Cromita preenchendo venulação de magnetita hematitizada (LR – 25x). d) Detalhe para "c", onde a cromita se mostra parcialmente alterada para goetita e esta alterada para hematita através de processo de hidratação (LR – 200x). LN: Luz Natural; LP: Polarizadores Cruzados; LR: Luz Refletida.

A clorita representa 0,75% da modal mineralógica e encontra-se disposta junto aos cristais de lizardita de forma fibrosa (**fig. 66a**), petrograficamente destacada pela alta birrefringência (**FIG. 66b**). Observa-se associação com goetita e hematita



**Figura 66** - Mosaico de fotomicrografias da seção delgada referente à amostra AM 201376, representante da base do furo de sonda FJA 255. a) Clorita serpentizada com presença de magnetita e manchas de oxidação (LN – 200x). b) Idem anterior com destaque à presença de goetita e hematita (LP – 200x). LN: Luz Natural; LP: Polarizadores Cruzados.

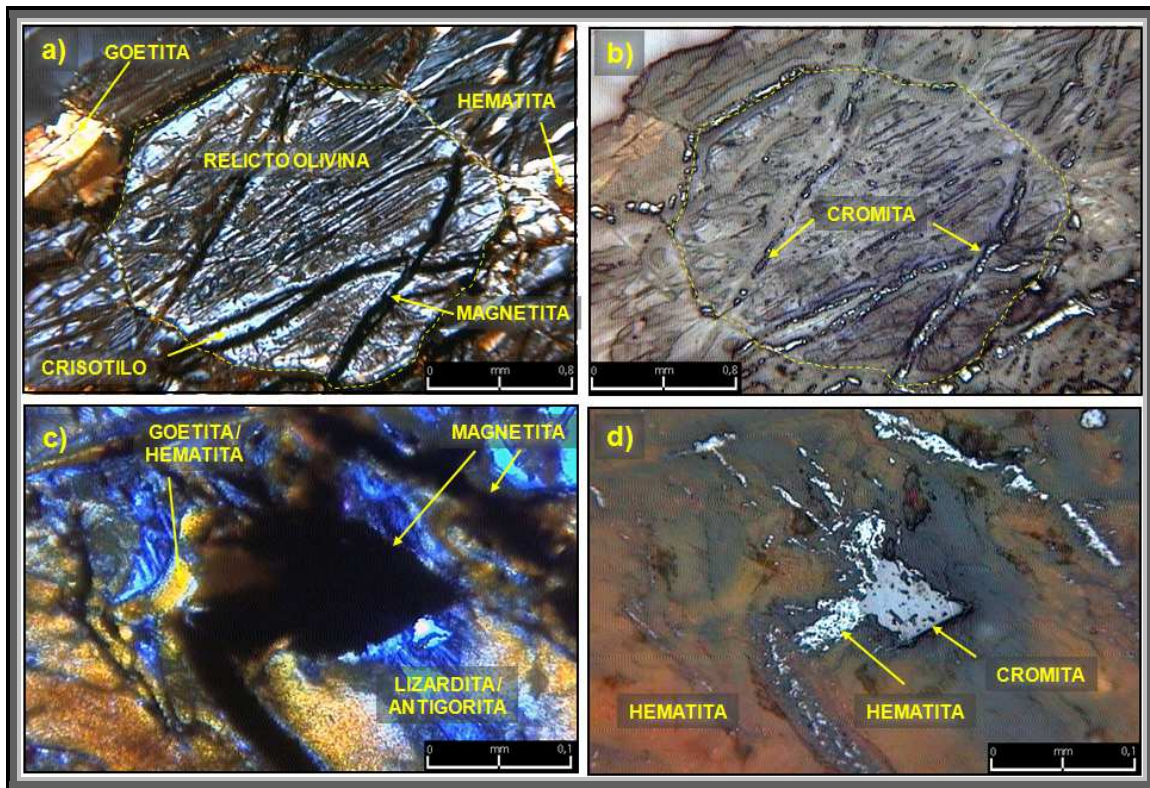
#### 6.3.4.2 AM 201345

A amostra AM 201345 representa o topo do furo de sonda FJA 255 e está posicionada na área de maior concentração de Ni (> 2,5% Ni). A análise modal permite identificar a seguinte ordem mineralógica em ordem decrescente: matriz serpentínica e veios contemplando 58,5% do total, óxidos / hidróxidos de ferro indiferenciados (17,63%), goetita (12,75%), magnetita (3%), cromita (2,38%), hematita (2%), quartzo (2%), Cr-espinélio (1,63%) e talco (0,13%) (**ANEXO II – Petrografia Óptica – TAB 03**).

A petrografia óptica revelou que os minerais do grupo das serpentinas constituem a fase predominante na amostra em apreço, com destaque para texturas do tipo *interpenetrating* (46%), principalmente em lizarditas e antigoritas. Os veios serpentínicos são todos asbestiformes (10,38%), com menor quantidade de texturas *interlocking* (1,5%), *hourglass* (0,5%) e textura *mesh* (0,13). A **Figura 67a** mostra o "esqueleto" de olivina preservado, com sua substituição total por serpentina, o que pode ser corroborado pelos dados de DRX. Neste caso, verifica-se venulação asbestiforme parcialmente preenchida por magnetita e goetita levemente hematitizada.

A presença de cromita (2,38%) acompanhando a venulação é proeminente, como pode ser observado na **FIG 67b**.





**Figura 67** - Mosaico de fotomicrografias da seção delgada referente à amostra AM 201345, representante do topo do furo de sonda FJA 255. a) Pseudomorfose de olivina onde os grãos primários encontram-se totalmente alterados para serpentina, mantendo parcialmente a forma original (LP – 25x). b) Idem anterior destacando cromitas e magnetitas acompanhando a venulação (LR – 25x). c) Cristal de lizardita seccionada por venulação asbestiforme (LP – 200x). d) Idem anterior com destaque para cromita hematitizada (LR – 200x). LP: Polarizadores Cruzados; LR: Luz Refletida.

O segundo maior constituinte da modal mineralógica caracteriza-se por uma massa de óxido/hidróxido indiferenciada, onde provavelmente ocorre a associação de magnetita, goetita e hematita pouco cristalina (**Figura 67c**), como pode ser identificado na DRX. Cristais de cromita são observáveis em meio à massa de óxidos/hidróxidos, onde o processo de hematitização se faz presente (**Figura.67d**),

### 6.3.5 Difração de Raios X

Foram analisadas sete amostras por Difração de Raios X (DRX) referentes ao furo FJA 255, com o objetivo de obter um detalhamento na identificação mineral envolvendo fração <20 $\mu$ m) e <2 $\mu$ m. As amostras referem-se ao primeiro metro da base (28m e 24m), porção saprolítica (23m, 13m, 12m e 6m) e topo da seção (1m) (**FIG.68**)

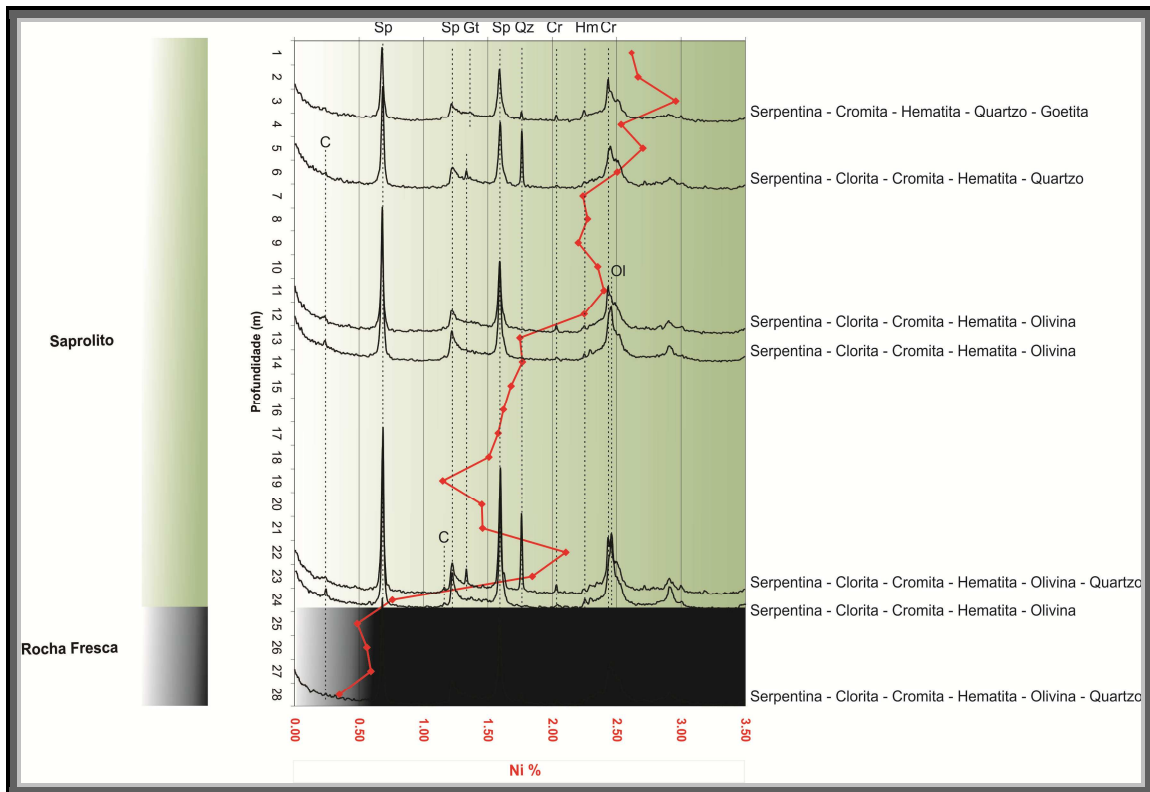
O perfil apresenta uma mineralogia predominantemente serpentinítica na sua base, contando ainda com relictos de olivina e cromita, além de quartzo e hematita, o que já indica um processo de alteração em desenvolvimento.

A partir do metro 23 até o metro 12, há claro enriquecimento supergênico em Ni, o que é diretamente proporcional a diminuição da preservação da estrutura da olivina. Nota-se que a cristalinidade dos óxidos e hidróxidos tais como goetita e hematita é muito baixa, o que não vincula o alto teor de Ni nesta zona a estes minerais. Tal como foi identificado por petrografia, a mineralização neste caso parece estar associada diretamente aos minerais serpentiníticos.

Em direção ao topo do perfil, encontramos os teores mais elevados de Ni (> 2,5%) com praticamente a mesma mineralogia da porção inferior, ou seja, serpentina, hematita, goetita, cromita e quartzo, a exceção da olivina, a qual é completamente transformada para serpentina nesta zona (**FIG.68**).

A fração <20 $\mu$ m destaca a presença de olivina (pico 2.494 em 36°) com estrutura cristalina preservada desde a base do furo até o metro 12. Associado as olivinas pode-se observar a presença dos minerais do grupo das serpentininas bem cristalizados (**FIG. 69**).

A hematita aparece cristalizada ao longo de todo o furo analisado, desde sua base até o topo, como pode ser observado por volta dos 33° com o pico 2.699, o que não acontece com a goetita, a qual só aparece no topo da seção (pico 4.183) (**FIG. 69**).

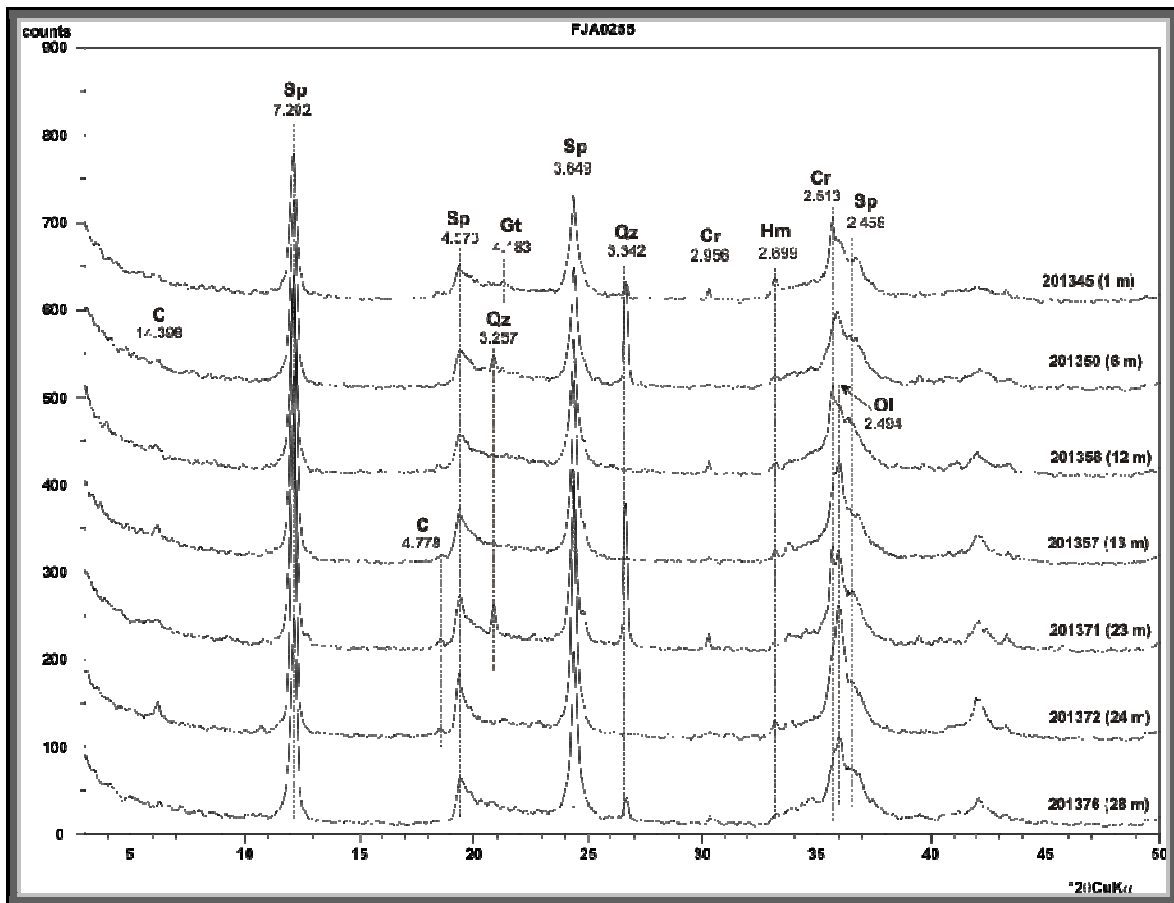


**Figura 68** - Superposição de Difratomogramas (fração < 20µm), segundo a profundidade, em relação ao perfil geológico e consecutiva variação química de Ni do furo de sonda FJA 255. Legenda: Sp – serpentina; C - clorita; Cr – cromita; Ol – olivina; Hm – hematita; Qz – quartzo; Gt - goetita.

Ao analisar a petrografia óptica descrita na seção anterior, observa-se que o mineral goetita aparece na base do furo, porém, o mesmo não é identificado na DRX. Isto se deve ao estado cristalino pouco desenvolvido das goetitas na posição de base dos furos, ocasionado pelo imaturo estado de alteração que este horizonte se encontra ou pela hidratação acentuada das goetitas, o que leva a sua alteração para hematita, uma vez que o citado mineral é identificado em todo o perfil.

As cloritas são observáveis em praticamente todo o perfil, a exceção do topo, onde desaparecem ou tem a sua quantidade reduzida abaixo do nível de detecção do equipamento (pico 14.398 e 4.778) (**FIG. 69**).

Ao analisar a fração <2µm percebe-se a serpentina como a única forma cristalina presente, de tal sorte que se pode concluir uma distribuição uniforme deste mineral, independente da fração analisada (**FIG. 70**). A análise desta fração permitiu identificar um membro do grupo das serpentinas chamado amesita, com pico em 6.939.

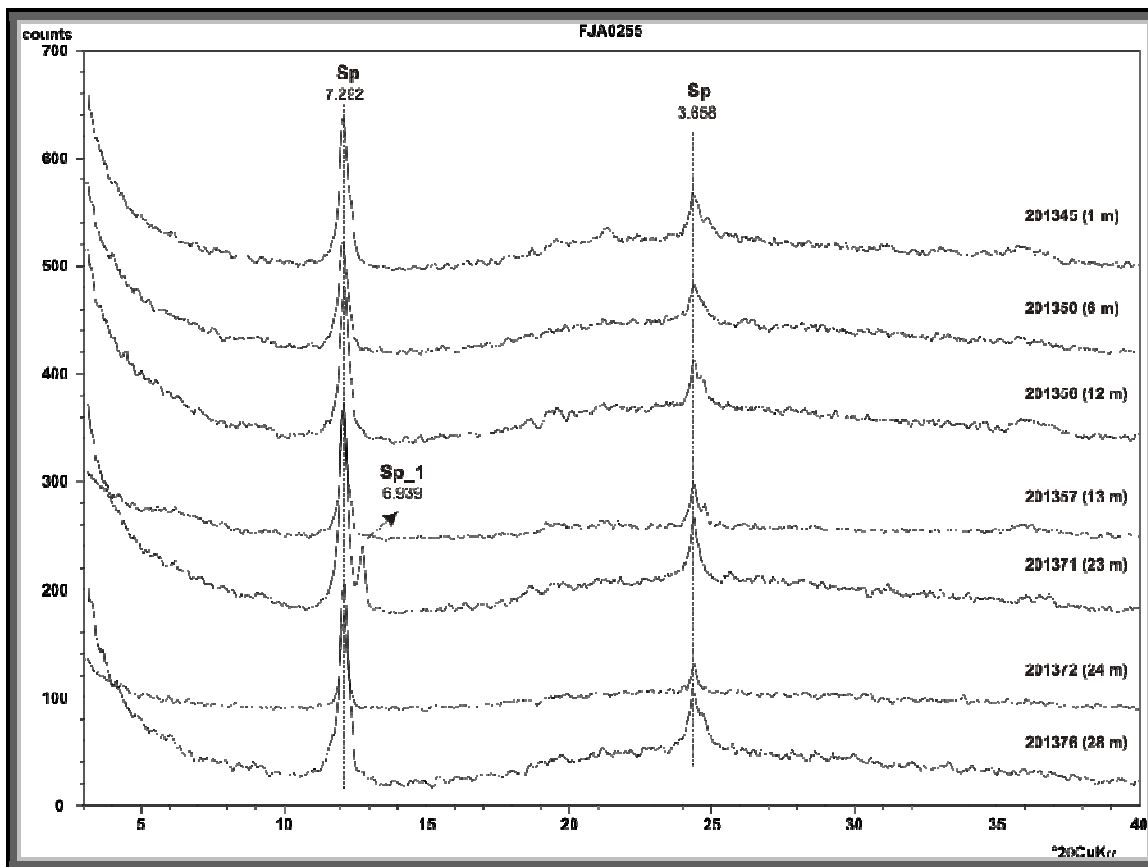


**Figura 69** - Superposição de Difratomogramas (fração <math>< 20\mu\text{m}</math>), segundo a profundidade, do furo de sonda FJA 255. Legenda: Sp – serpentina; C – clorita; Cr – magnetita/cromita/Cr-espinélio; Ol – olivina; Hm – hematita; Qz – quartzo; Gt - goetita.

As análises tanto das frações <math>< 20\mu\text{m}</math> quanto <math>< 2\mu\text{m}</math> revelou a inexistência de picos na região compreendida entre

As análises por DRX permitem, além da identificação mineralógica, a estimativa de suas proporções nos campos estudados, através do cálculo semi-quantitativo do espaçamento cristalino das fases, de tal sorte que a figura abaixo representa estas variações ao longo do furo de sonda FJA 255 (**FIG. 71**).

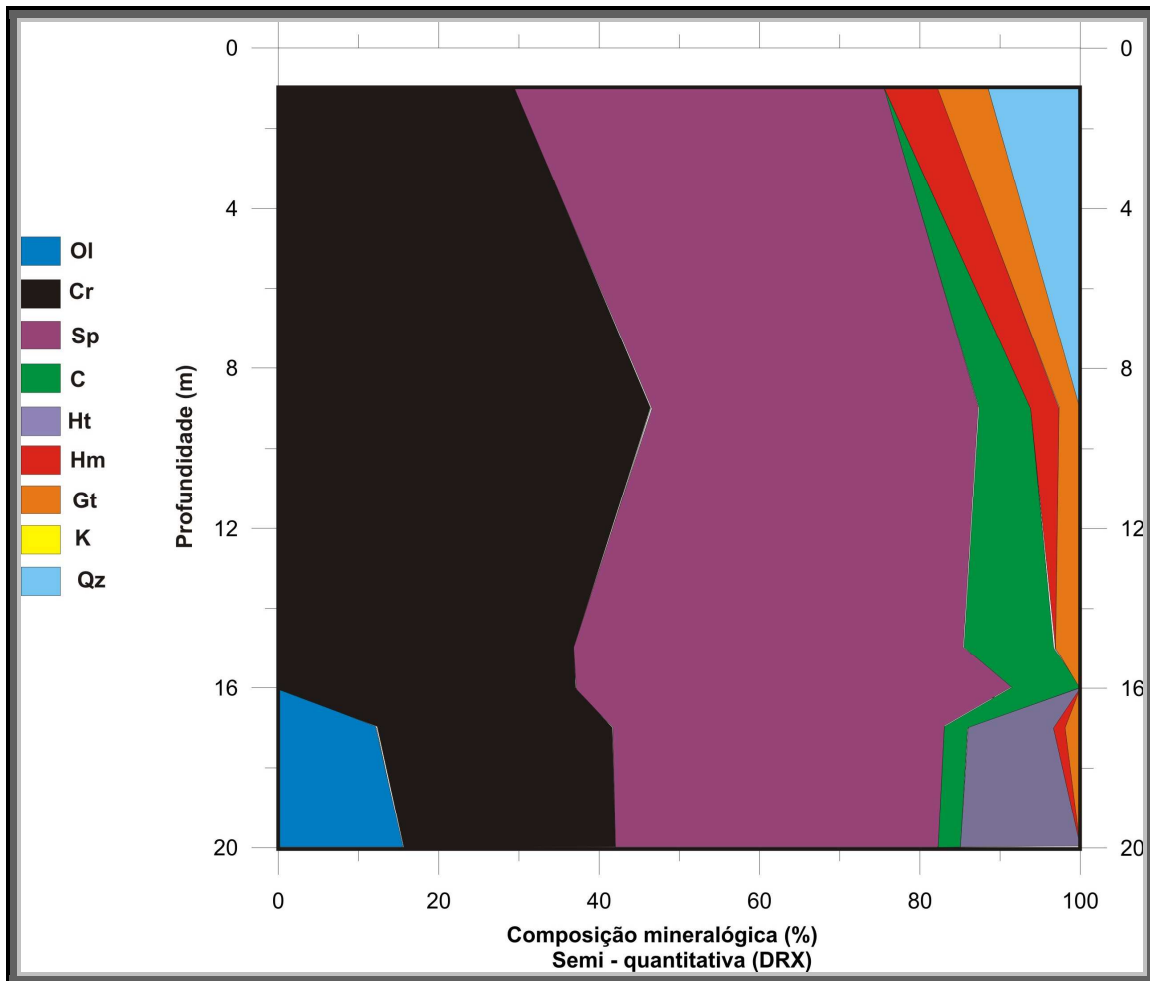
A modal mineralógica via DRX revela que a olivina representa apenas um pequeno percentual da modal até aproximadamente 16m quando, então, a cromita passa a ter um destaque maior.



**Figura 70** - Superposição de Difrátogramas (fração  $< 2\mu\text{m}$ ), segundo a profundidade, do furo de sonda FJA 255. Legenda: Sp – serpentina; SP\_1 - amesita

A clorita vai diminuindo sua participação de forma inversamente proporcional aos representantes oxidados, goetita e hematita. À medida que a cristalização dos termos oxidados se dá de forma mais evidente, os teores de Ni vão aumentando. Contudo, nota-se que a serpentina se mantém estável em praticamente todo o perfil.

Desta forma, realmente parece haver uma associação direta entre a serpentina e os altos teores de Ni ao longo do perfil, o que é catalisado pela presença mais destacada de goetita e hematita na porção superior da seção, aonde nos últimos metros chega a atingir o valor de 3% Ni.



**Figura 71** - Distribuição mineralógica estimada a partir da análise modal semi-quantitativa por meio de DRX (cálculo a partir da integração das áreas e do nível de contagem dos picos identificados dos minerais) do furo de sonda FJA 255. Legenda - Ol: olivina; Cr: magnetita/cromita/cromo-espinélio; Sp: serpentina; C: clorita; Ht: hidrotalcita; Hm: hematita; Gt: goetita; K: kaolinita; Qz: quartzo.

## 6.4 Furo FJA 337

### 6.4.1 Geomorfologia e Descrição

O Furo FJA 337 encontra-se na porção Sul do corpo do Jacaré, nas imediações da faixa central



O furo FJA 337 (400789.000E e 9307791.000N) posiciona-se na porção sul do depósito do jacaré, numa área arrasada, topograficamente inferior a dos demais furos descritos no corpo da presente dissertação (**FIG. 72**). Geologicamente distingue-se por ser basicamente um perfil laterítico ferruginoso entre os metros 33 e 17, sendo envelopado por pequeno horizonte saprolítico na sua base (35m e 32m) e laterita não mineralizado no seu topo (17m e 0m). Entre 37 e 35 metros de profundidade foi encontrada rocha fresca (**FIG. 73**).

Os teores mais elevados de Ni são encontrados no limite entre o horizonte saprolítico e ferruginoso do furo, entre os metros 34 e 32. À medida que ascendem no perfil, os teores de Ni diminuem continuamente, porém, apresentando ainda valores altos (>2%) entre os metros 33 e 30 já dentro do contexto ferruginoso (74,95% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - teor médio).

O perfil laterítico ferruginoso encerra aos 17 metros, quando então os valores de Ni ficam abaixo do *cut of* econômico (0,9% Ni). A partir daí, o perfil puramente laterítico se forma.

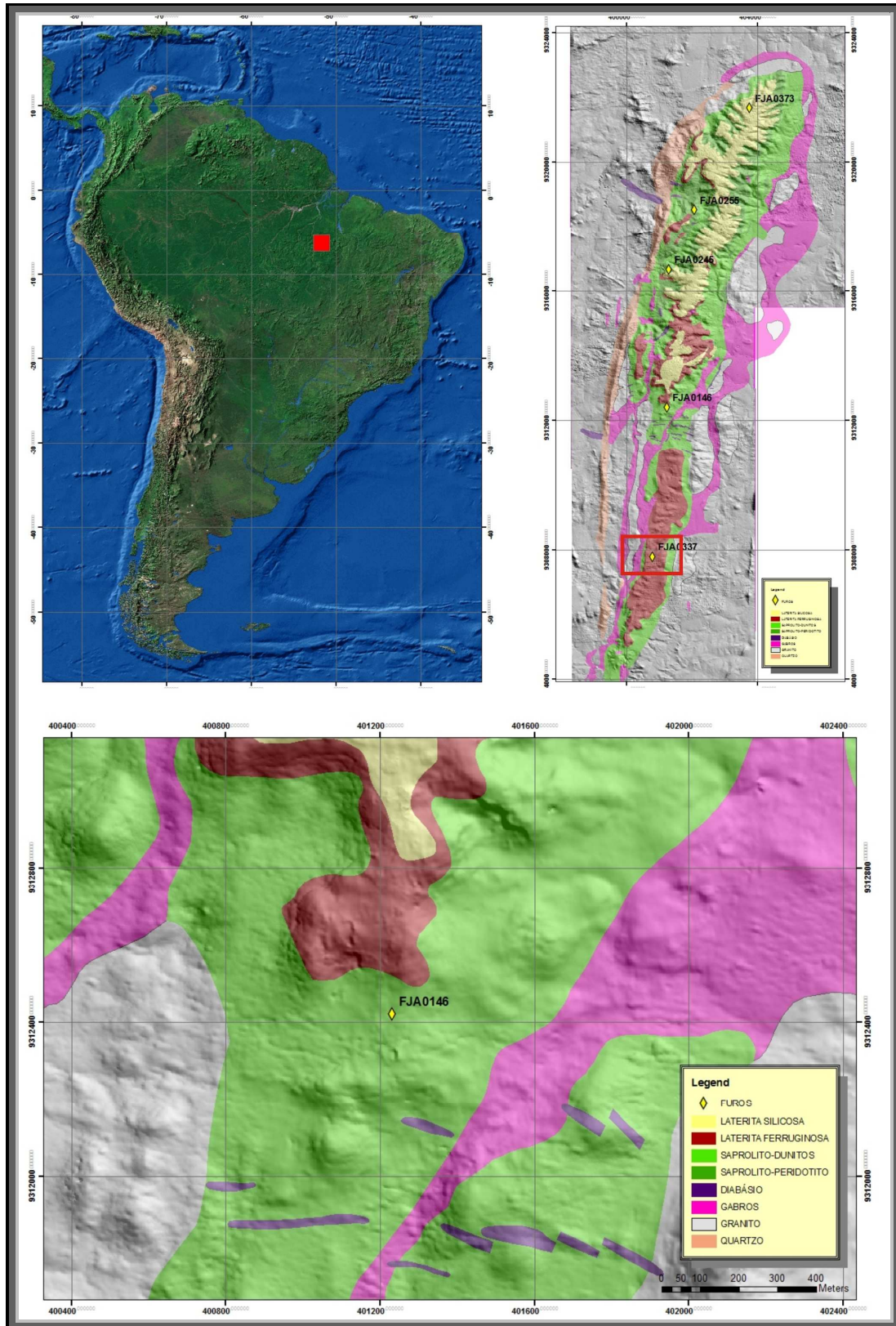
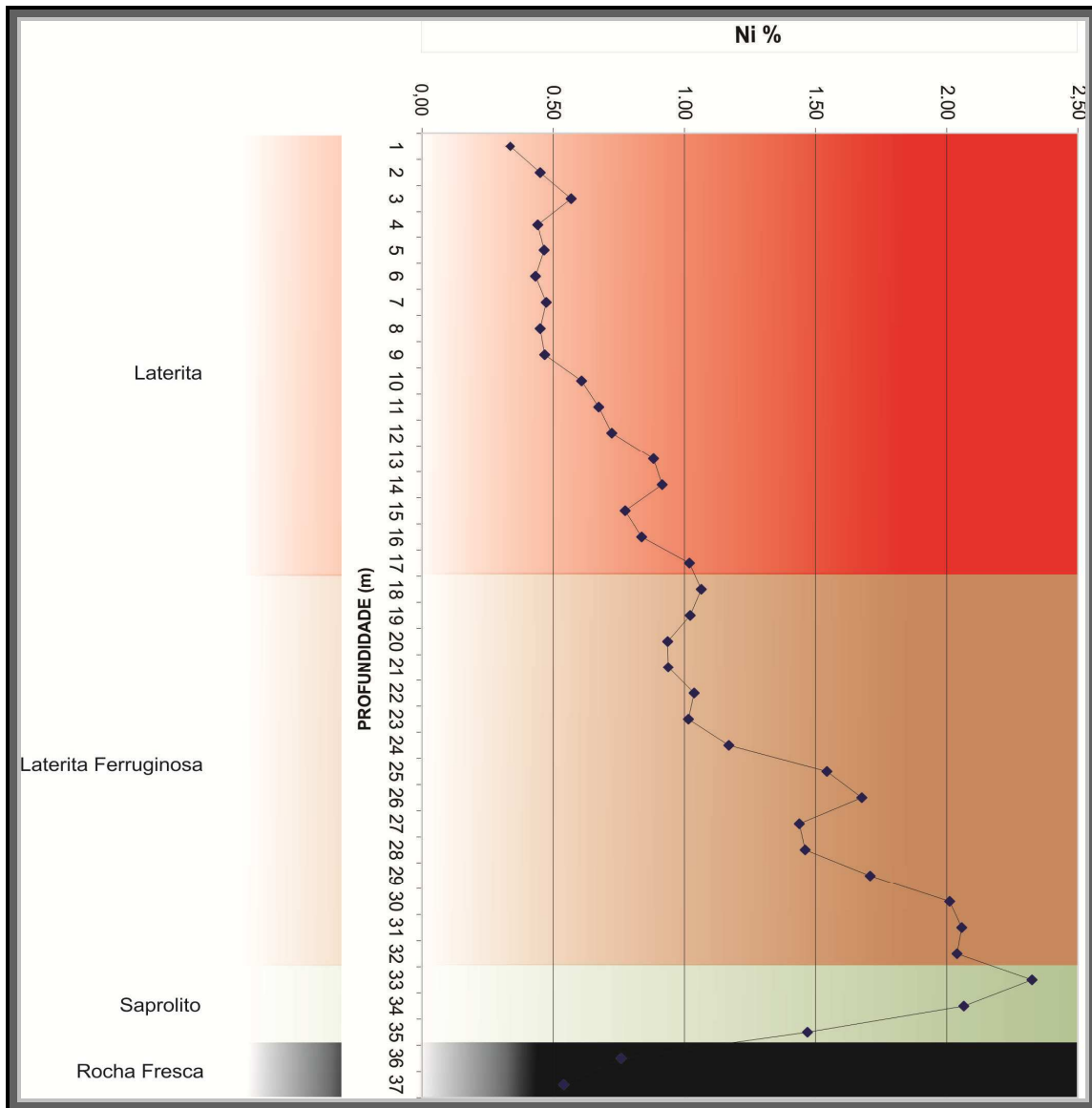


Figura 72: Mapa de Localização do Furo FJA 337.



**Figura 73** - Perfil de alteração do furo FJA 337 e sua consecutiva variação em Ni.

#### 6.4.2 Análise Química

O perfil geoquímico dos elementos maiores e alguns menores, ao longo da seqüência de alteração representada no furo FJA 337, pode ser observado na **Figura 74** e seus dados absolutos acompanhados no **ANEXO I – Análises Químicas**.

A partir da base do furo FJA 337 (metro 37) até o metro 30, há o maior enriquecimento em Ni do perfil, atingindo 2,33% do metal. Notadamente o perfil avança da

rocha fresca, metros 37 e 36, passa pela zona saprolítica, metros 35 e 34, e entra na zona ferruginosa, metros 33 a 30.

As relações químicas nesta porção do perfil têm como característica o aumento do  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , Y e Sc, além de discreto pico positivo de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Co e  $\text{TiO}_2$ . Por outro lado, os valores de MgO e  $\text{SiO}_2$  diminuem drasticamente, refletindo a clara destruição dos minerais do grupo das serpentinas e geração dos óxidos / hidróxidos (**FIG 74**).

No contexto do horizonte laterítico ferruginoso, há um contínuo declínio nos valores de Ni em direção ao topo, decaindo de 2% até 1% entre os metros 32 e 17 respectivamente. De forma geral nessa zona os teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  se mantêm estavelmente altos, com pequenas variações positivas e negativas. O  $\text{SiO}_2$ , em contrapartida, mantêm-se estavelmente baixo. O MgO encontra-se extremamente baixo e permanece neste patamar até o topo da seqüência, a partir da zona laterítica ferruginosa (**FIG 74**).

O  $\text{Al}_2\text{O}_3$  apresenta gradacional aumento em direção ao topo, assim como Sc e Co. O  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  mostra queda na concentração ao longo do perfil ferruginoso, vindo a acumular de forma relativa somente na zona laterítica sobreposta. O  $\text{TiO}_2$ , Zr e Nb apresentam concentrações baixas e estáveis ao longo de toda zona laterítica ferruginosa (**FIG. 74**).

Ao analisarmos os gráficos de variação geoquímica **Figura 74** observa-se um pequeno pico positivo de Ni (1,68%) no metro 26, quando a queda nos valores desse elemento vinha ocorrendo de forma gradual. Neste momento, ocorrem paralelamente picos positivos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Co, Y e Sc, além de discreto aumento no  $\text{SiO}_2$ . Em contrapartida,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  alcança seu menor valor no contexto da zona laterítica ferruginosa e laterítica.

A partir do metro 17 até o topo do perfil o Ni perde seu valor econômico (concentração abaixo do *cut of* 0,9%), havendo uma discreta e contínua perda de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . A exceção do MgO e Co (os quais se mantêm próximo de zero), todos os outros elementos tem seus valores acentuados nesta zona

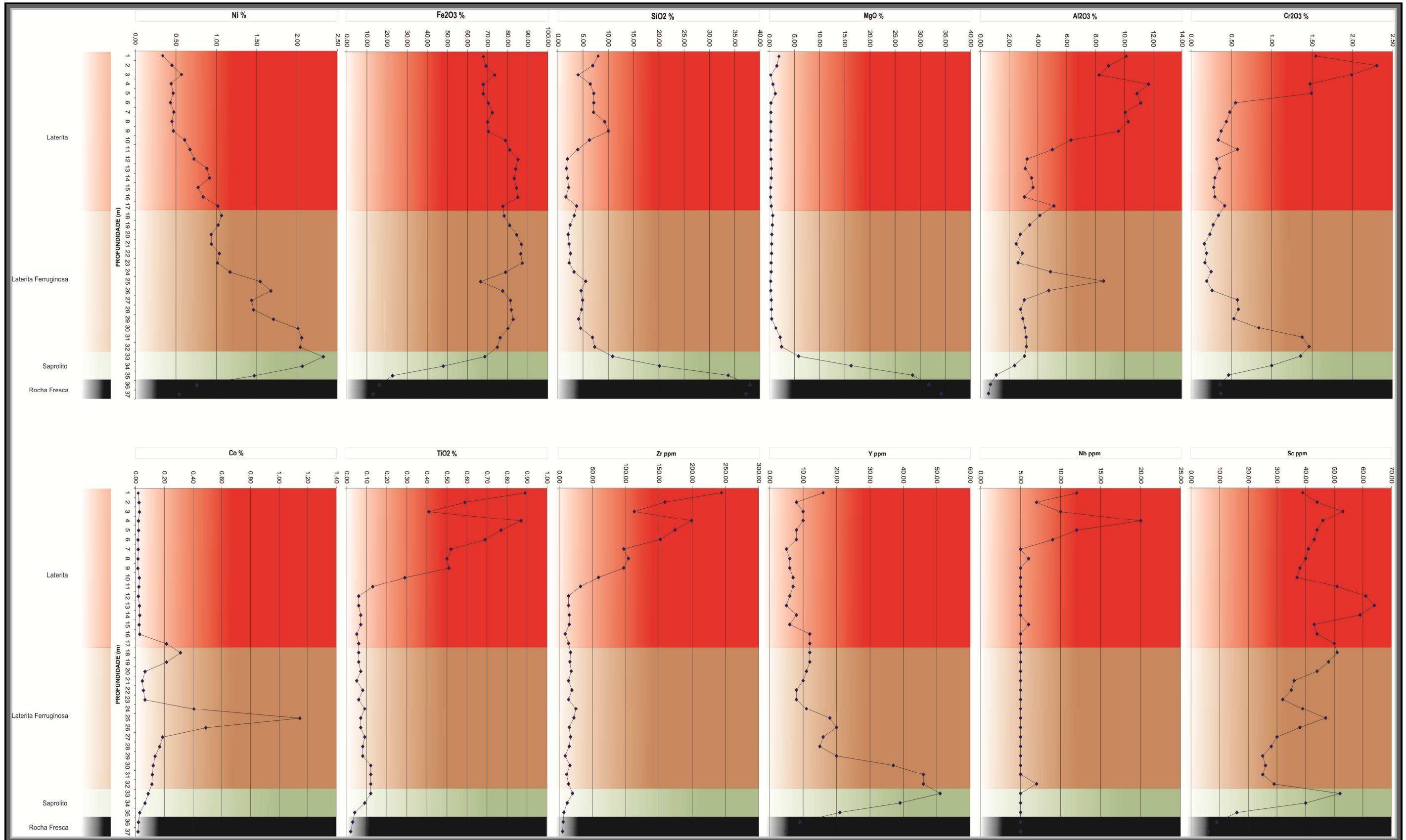


Figura 74- Gráficos de variação geoquímica do Furo FJA 337.

### 6.4.3 Balanço de Massa

Ao se observar os gráficos de Balanço de Massa gerados para o furo FJA 237 (**Figura 75**) verificam-se duas situações destacadas no perfil de alteração com acumulação ou depleção de determinados elementos.

O horizonte de maior concentração de Ni (34m a 30m) demonstra a acumulação relativa dos elementos Ni, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Co, TiO<sub>2</sub>, Zr, Y (ultrapassando fator E de 35), Nb e Sc.

A exceção é feita pelo SiO<sub>2</sub> e MgO, os quais invertem abruptamente a situação acumulativa para depletada, o que demonstra, aliado a avaliação química e petrográfica, a desestruturação dos minerais do grupo da serpentina (originais portadores de Ni silicatado), os quais perdem seus principais constituintes para o meio (MgO e SiO<sub>2</sub>) e, com isso, liberam níquel no sistema para futuras ligações com outros constituintes.

Ao adentrar na zona laterítica ferruginosa, nota-se diminuição constante e progressiva na concentração relativa de Ni, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y, Nb e Sc até por volta do metro 22 quando, então, a acumulação relativa destes passa a vigorar novamente até o topo da seção, já no âmbito laterítico sem valor econômico (Ni < 0,9%).

Os óxidos de Si e Mg mantêm-se depletados em todo o perfil de alteração, desde a base da zona laterítica ferruginosa até o topo da zona laterítica.

Ao longo da zona laterítica ferruginosa, os demais elementos Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> e Zr mantiveram-se estáveis, sem perdas ou ganhos significativos de massa (fator E).

O Co, por sua vez, apresenta picos de acumulação muito altos dentro do perfil, numa variação do fator E de até 35 pontos.

A zona laterítica estéril (Ni < 0,9%) destacado em vermelho no perfil (**Figura 75**), apresenta acumulação relativa de todos os constituintes químicos analisados, a exceção de MgO e SiO<sub>2</sub>, os quais se mantêm depletados.

De forma geral, o balanço de massa do furo FJA 337 reflete fielmente um ambiente redutor até por volta de 22 metros de profundidade onde, então, a atividade do lençol freático sobre os minerais reduz (limite máximo de atuação do lençol freático), acarretando numa maior inserção de oxigênio no sistema. A partir deste momento, a oxidação a baixo pH se torna proeminente, com baixa capacidade de ligação do Ni com o



---

$\text{Fe}^{3+}$ , levando a uma leve acumulação relativa de Ni também na porção superior (0 a 5m), porém não suficiente para padrões econômicos ( $\text{Ni} < 0,5\%$ ) nesta porção.

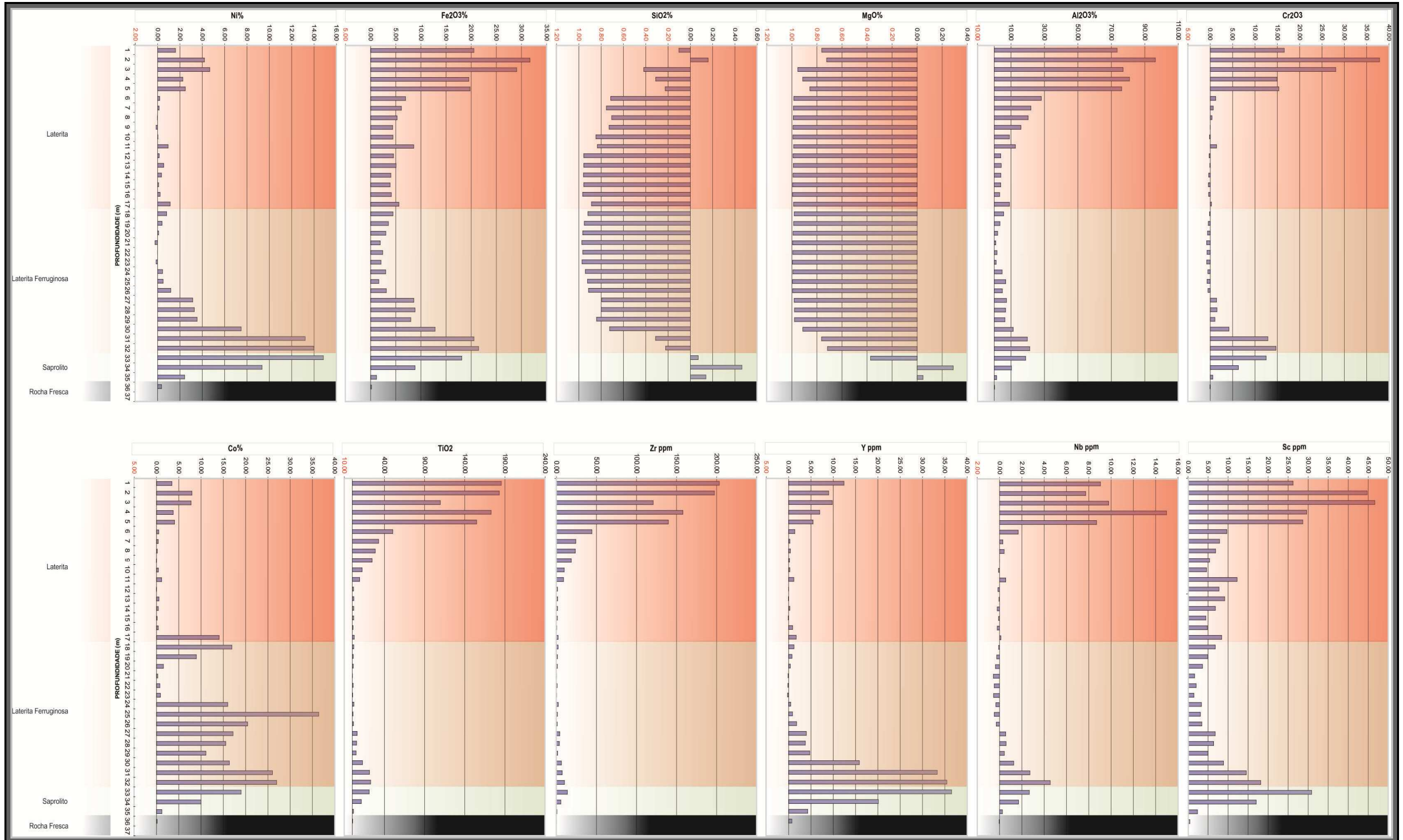


Figura 75 - Gráficos de Balanço de Massa do Furo FJA 337.

#### 6.4.4 Petrografia Ótica

O furo FJA 337 teve três amostras analisadas via petrografia ótica, sendo distintas na sua composição mineralógica. As amostras estudadas são identificadas pela seguinte numeração: AM 205187 – referente ao metro 37 (base do furo), AM 205183 – referente à zona de mais alto teor em Ni (metro 33) e AM 205147 (topo do furo).

A amostra AM 201187 demonstra um grau de alteração avançado onde 52,25% da modal mineralógica é constituída por óxidos/hidróxidos de Fe indiferenciados (matriz escura), seguida por minerais do grupo das serpentinas (30,75%) e menores quantidades de goetita, cromita, magnetita e clorita.

A amostra AM 205183, por sua vez, apresenta dominância de matriz de óxido/hidróxido de Fe, seguida por clorita, magnetita, cromita, goetita e menores evidências de serpentina.

No topo da seção, a amostra AM 205147 representa o típico perfil laterítico em clima tropical, onde a matriz de óxidos/hidróxidos contempla majoritariamente a modal mineralógica, seguida por hematita, goetita, quartzo, gibsitita, cromita e, em menor quantidade, magnetita e Cr-espinélio.

##### 6.4.4.1 AM 205187

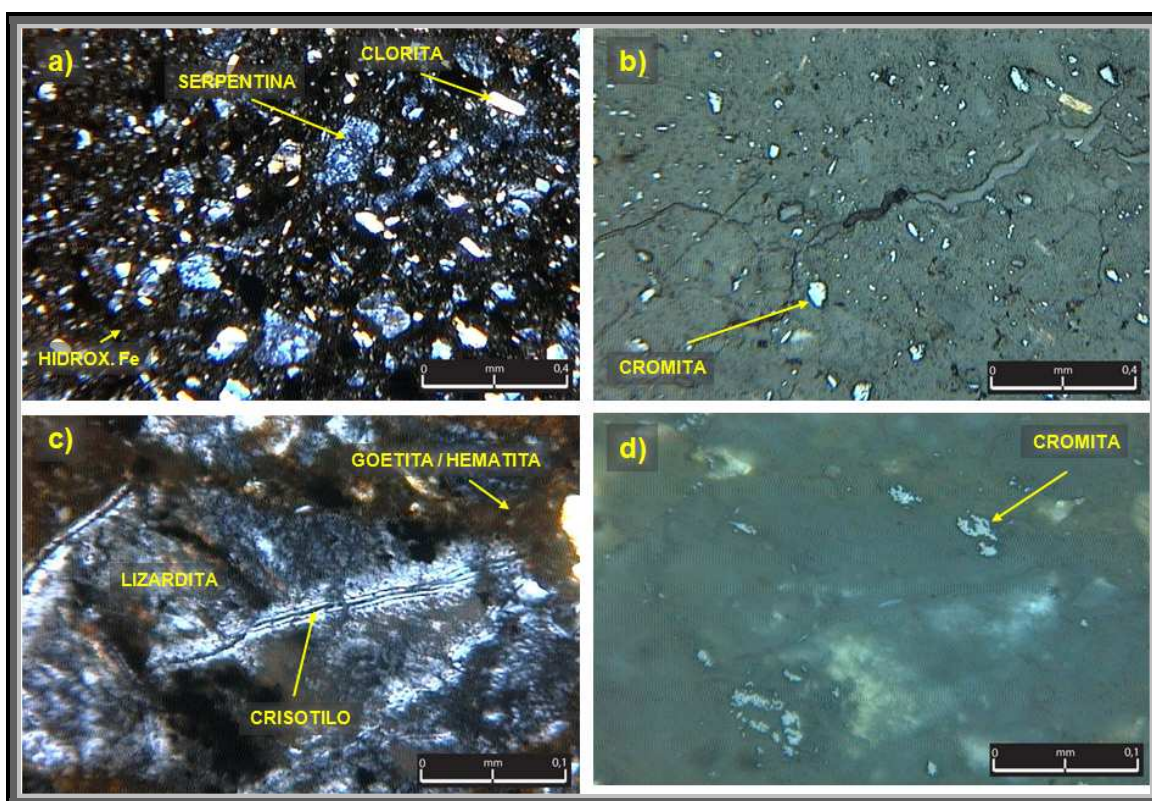
A amostra AM 205187 representa a base do furo de sonda FJA 337 (37m) e constitui o horizonte menos alterado do perfil. A petrografia ótica distinguiu a seguinte abundância mineralógica, em ordem decrescente: óxidos/hidróxidos de Fe (matriz escura) representando 52,25%, seguida por serpentinas (30,75%) com textura *interpenetrating*, *interlocking* e veios asbestiformes, além de goetita (9,75%), cromita (3,25%), magnetita (2,75%) e talco (1,25%) (**ANEXO II – Petrografia Ótica**).

O principal constituinte mineralógico da amostra AM 205187 é representado por uma matriz lítica composta basicamente por óxidos/hidróxidos de Fe. (**Fig. 76a**), além

de serpentina (30,75%) com textura *interpenetrating* (21,63%), *interlocking* (5,13%) e veios asbestiformes (4%).

Os cristais de serpentina são do tipo lizardita, enquanto que os veios asbestiformes são formados por crisotilo (**FIG. 76c**).

O restante da mineralogia identificada por petrografia óptica contempla goetita (9,75%), cromita (3,25%), magnetita (2,75%) e clorita (1,25%) (**FIG. 76a,b,c,d**).



**Figura 76-** Mosaico de fotomicrografias da seção delgada referente à amostra AM 2015187, representante da base do furo de sonda FJA 337. a) Matriz lítica oxidada com relictos de serpentina e cristais de clorita (LP – 50x). b) Idem anterior com destaque para pequenos cristais de cromita (LR – 50x). c) Relictos de serpentina com textura *mesh* e *interpenetrating* preservada. Venulação de crisotilo com magnetita e goetita associada (LP – 200x). d) Idem anterior com detalhe para cromita (LR – 200x). LP: Polarizadores Cruzados; LR: Luz Refletida.

Apesar do alto grau de intemperismo evidenciado na amostra em apreço, cristais de olivina cristalograficamente preservados são encontrados na amostra, o que somente foi possível ser identificado devido à utilização de DRX, uma vez que os métodos convencionais de petrografia não sugeriram tal mineral.

A matriz lítica com fragmentos pouco arredondados de minerais do grupo da serpentina imersos em meio a uma massa oxidada pode, em certa estância, nos remeter a um ambiente confinado com material oriundo de transporte por água no processo de alteração, com acumulação absoluta de sílica, a exemplo do que foi citado por J. Trescasses (1975) na porção sul da Nova Caledônia.

No entanto, as análises químicas, bem como o estudo de balanço de massa demonstram de forma clara, se tratar de processo de alteração "*in situ*", onde tal configuração da matriz e seus demais constituintes respeitam um processo intempérico definido, com acumulação e depleção dos constituintes ocorrendo dentro do próprio perfil de alteração, sem contribuição externa significativa ao processo.

#### 6.4.4.2 AM 205183

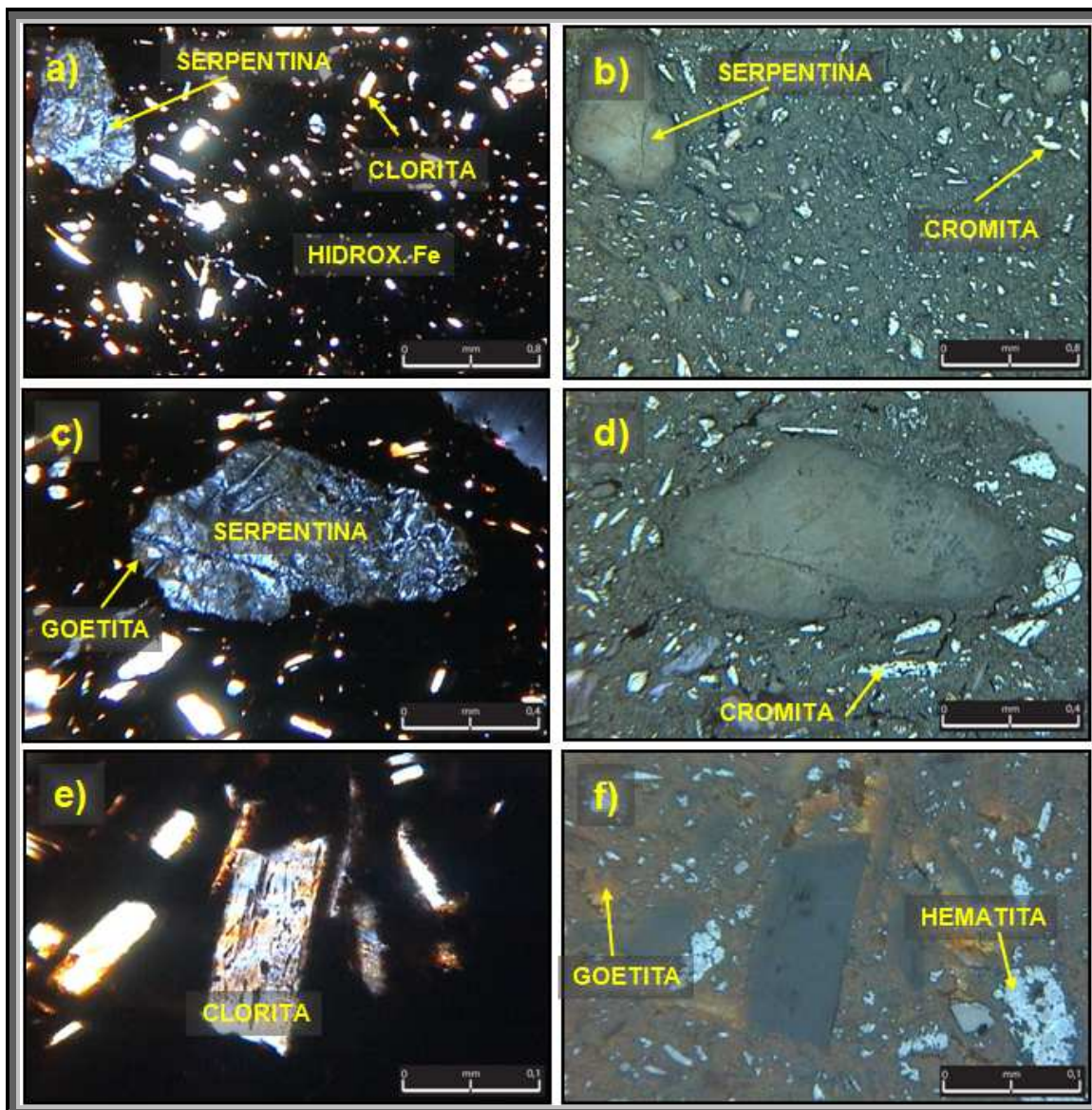
A amostra AM 205183 representa a zona de mais alto teor em Ni no furo FJA 337, a qual está posicionada a uma profundidade de 33m. A seção delgada revela a seguinte abundância mineralógica em ordem decrescente: óxidos/hidróxidos de Fe indiscriminados (54,5%), clorita (27,38%), magnetita (11,38%), cromita (6,13%), goetita (0,38%) e serpentina (0,25%) (**ANEXO II – Petrografia Óptica**).

A matriz é representada primordialmente por uma massa oxidada com pequenos cristais tabulares e anisotrópicos de clorita, além da presença de alguns fragmentos de serpentina (**FIG. 77a,b,e**).

Os fragmentos de serpentina são do tipo lizardita, o qual apresenta textura horglass. Nota-se, ainda, que os relictos de serpentina estão parcialmente alterados para goetita e hematita, além de cromita levemente hematizada (**FIG. 77c,d**).

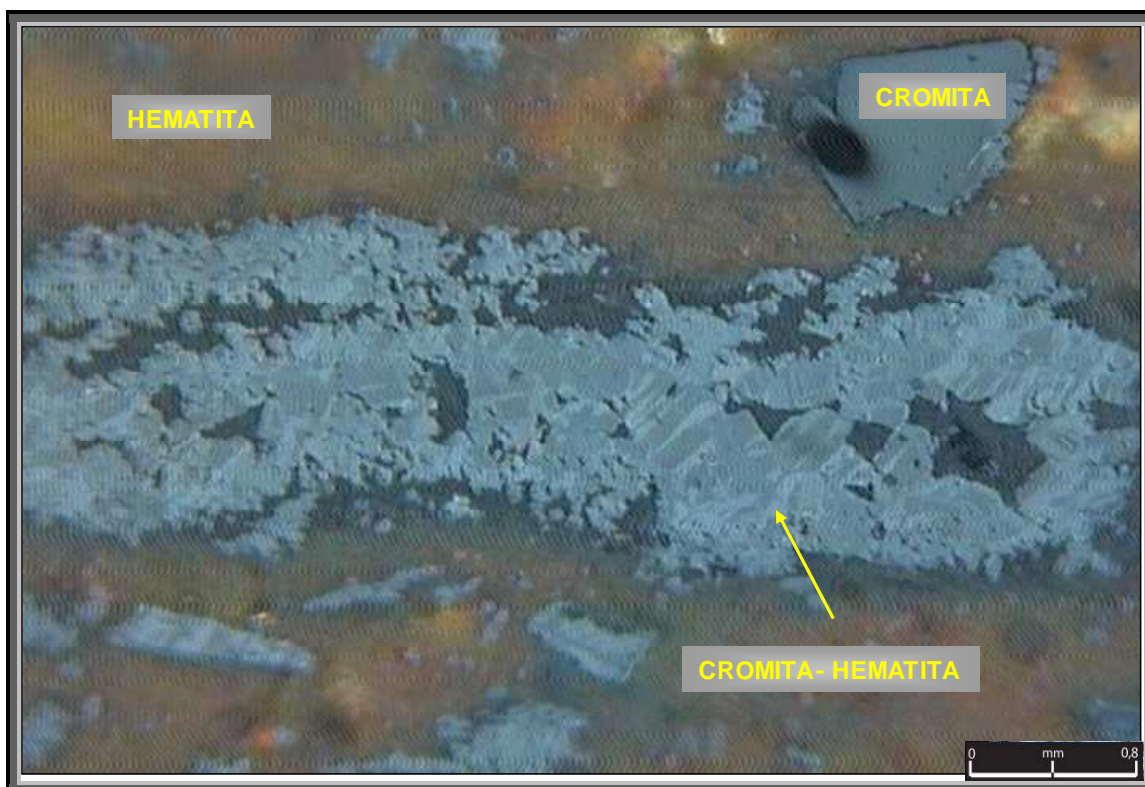
Ao observar a associação de alteração junto aos cristais de clorita via luz refletida (**Fig. 77f**), notam-se "manchas" de goetita, além de cromita parcialmente hematizada, o que pode ser visto com maior detalhe na figura a seguir (**FIG. 78**).





**Figura 77** - Fotomicrografias referente à amostra AM 205183. a) Matriz oxidada com cristais tabulares de clorita e relictos de serpentina (LP- 25x). b) Idem anterior com destaque aos microcristais de cromita (LR – 25x). c) Relicto de serpentina parcialmente transformada em goetita e hematita (LP – 50x). d) Idem anterior com destaque a cristais remanescentes de cromita (LR – 50x). e) Cristais tabulares de clorita (LP – 200x). f) Idem anterior com destaque a cromita hematitizada e "manchas de goetita" (LR – 200x). LP: Polarizadores Cruzados. LR: Luz Refletida.



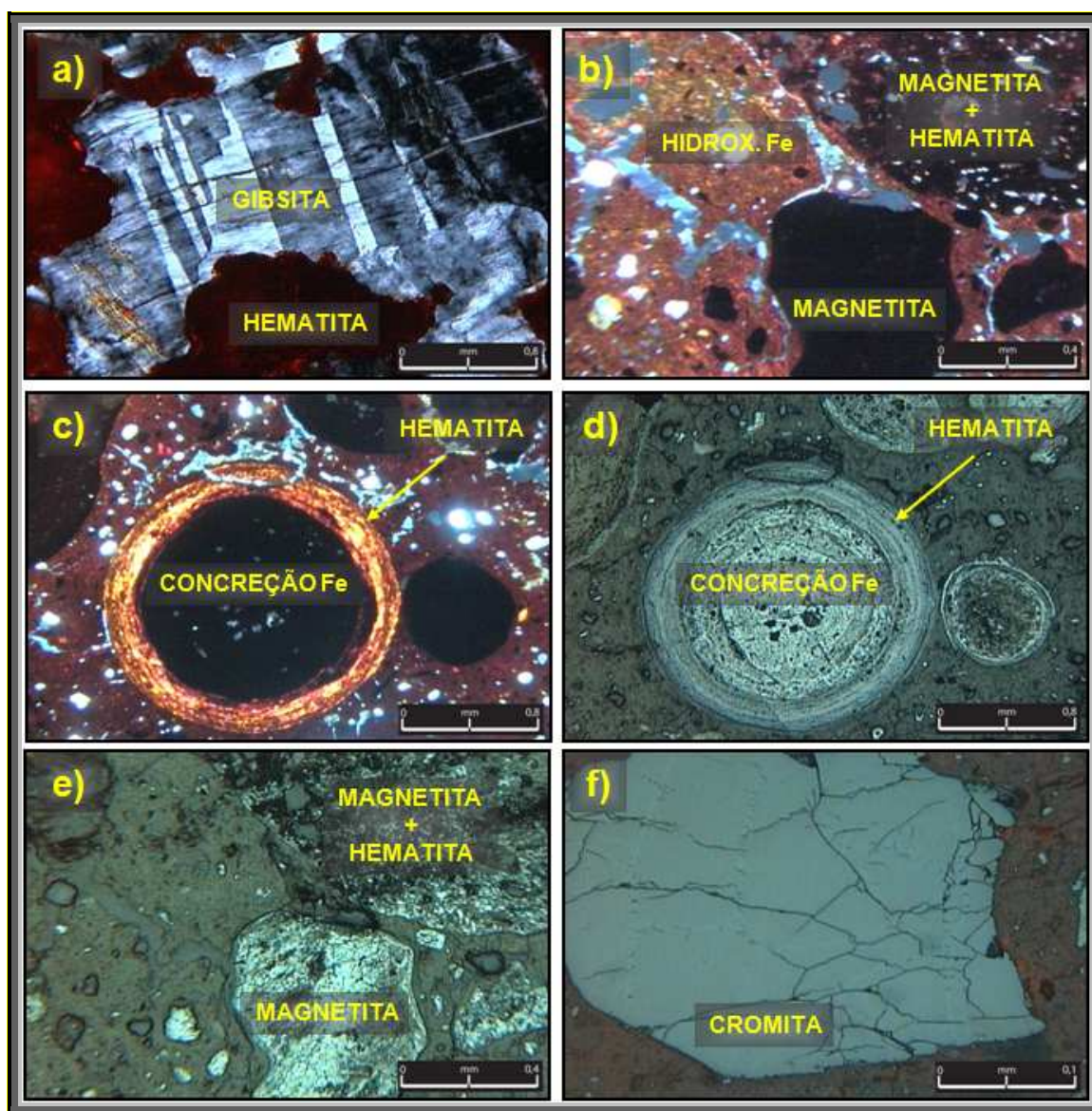


**Figura 78** - Fotomicrografia referente à amostra AM 205183 demonstrando cristais subédricos de cromita, parcialmente alterada para goetita e hematita (LR – 50x).

#### 6.4.4.3 AM 205147

A amostra AM 205147 identifica a mineralogia encontrado no primeiro metro perfurado do furo FJA 337 (1m) e representa a porção mais alterada do perfil. Como já identificado na amostra anterior (AM 205183), a matriz composta de óxidos/hidróxidos de Fe indiferenciados predomina neste horizonte, aqui representando 56,38% do total mineralógico. O processo de alteração contínuo e ativo nesta região fez com que todos os cristais de serpentina fossem alterados, restando somente uma concentração de hematita (24,13%), goetita (7,63%), quartzo (5,38%), gibsita (4,38%), cromita (1,5%) e, em menor quantidade, magnetita (0,38%) e Cr-espinélio (0,25%) (**ANEXO II – Petrografia Óptica**).

Inserido na matriz oxidada encontram-se concreções ferruginosas com bordas hematíticas (**Figura 79c,d**) podendo alcançar mais de 1mm.



**Figura 79** - Mosaico de fotomicrografias da seção delgada referente à amostra AM 205147, representando o topo do furo de sonda FJA 337. a) Gibsita com macla polissintética e borda alterada para goetita e hematita (LP 50x). b) Matriz oxidada (LP – 50x). c) Pisólito hematítico concêntrico (LP – 25x). d) Idem anterior com detalhe para borda hematítica (LR – 25x). e) Nuvem de hematita e magnetita (LR 50x). f) Grão de cromita resistato (LR 200x). LP: Polarizadores Cruzados; LR: Luz Refletida.

Cristais de gibsita são observáveis na seção delgada, possivelmente representando alteração do argilomineral caolinita identificado em DRX. Os cristais de gibsita apresentam textura tipo macla polissintética com franjas de goetita e alteração para hematita. Algumas manchas vermelhas identificadas na borda dos grãos são cromitas

totalmente hematizadas (**FIG.79a**). A presença de caolinita ao longo da seção, culminando com a cristalização de gibsita na porção superior nos remete a um ambiente mais silicoso e aluminoso, provavelmente refletindo a laterização de rochas do grupo dos peridotitos feldspáticos, ou mesmo porções mais gabróicas, de qualquer forma, termos mais diferenciados dentro do processo de cristalização magmática.

A presença de hematita, magnetita e goetita se fazem presente em praticamente toda a seção delgada (**FIG.79b,e**). Cristais de cromita são identificados em meio à matriz oxidada, podendo alcançar 0,5mm (**FIG.79f**).

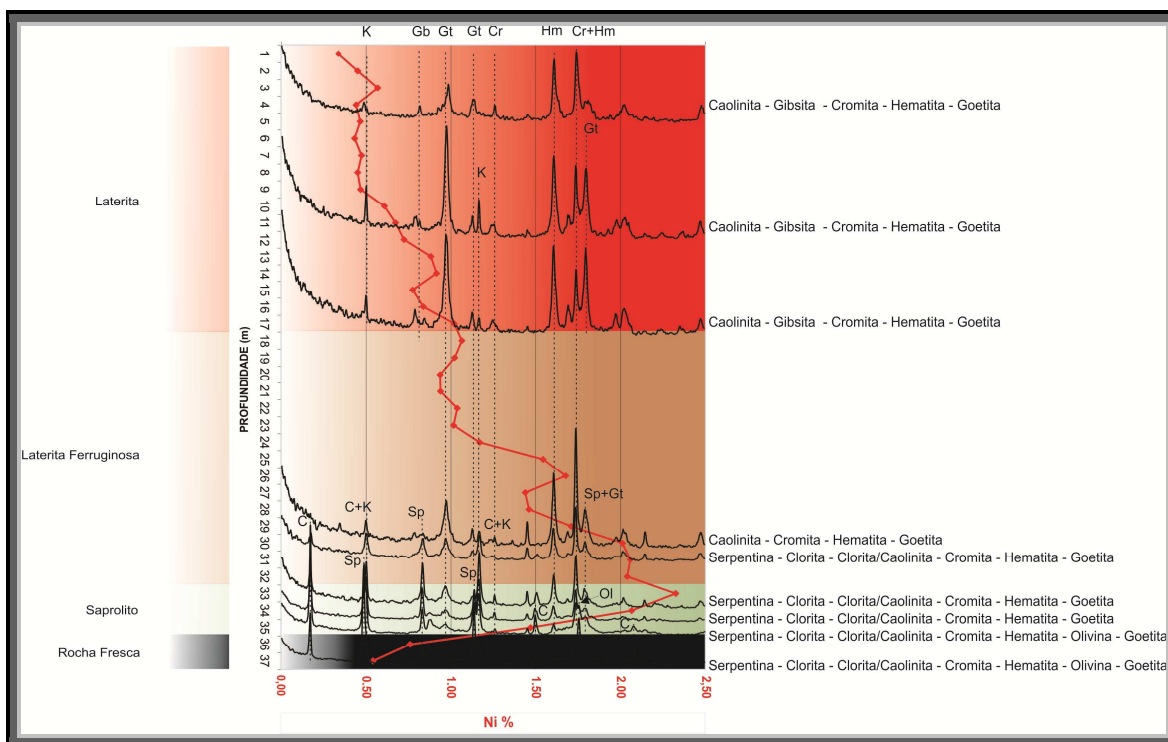
#### 6.4.5 Difração de Raios X

Foram analisadas 9 amostras por Difração de Raios X (DRX) referentes ao furo FJA 337, com o objetivo de obter um detalhamento na identificação mineral envolvendo fração <20 $\mu$ m e frações <2 $\mu$ m. As amostras referem-se ao primeiro metro da base (37m), porção saprolítica (35m e 34m), zona laterítica ferruginosa (33m, 30m, 29m e 17m) e zona laterítica (11m e 1m) (**FIG. 80**).

A análise revela que a base do furo, no contexto de rocha fresca, já identifica mineral de alteração como goetitas e hematitas, aliados as serpentinas, olivinas parcialmente preservadas, cromita e clorita, além de caolinita.

A zona de mais alto teor em Ni (>2%) no furo encontra-se entre os metros 34 e 30, onde mineralogicamente as olivinas observadas nas porções mais basais já foram praticamente alteradas na sua totalidade. Associado a isto, clorita, caolinita, goetita, hematita e cromita são identificados. O Ni parece ter seu alto teor vinculado às goetitas, o qual se associa de forma adsorvida, possivelmente fixado com ferro na forma Fe<sup>3+</sup>.

A clorita aparece em todo o espectro angular medido, desde os 6° até os 45°, com picos que variam desde 14.259 até 2.147. O mineral se mostra bem cristalizado nesta faixa, com algumas sobreposições ao pico da caolinita (pico 7.170 e pico 3.582) (**FIG. 81**).



**Figura 80** - Superposição de Difratomogramas (fração <math>< 20\mu\text{m}</math>), segundo a profundidade, em relação ao perfil geológico e consecutiva variação de Ni do furo de sonda FJA 337. Legenda: Sp – serpentina; C – clorita; K - caolinita; O - olivina; Gb - gibsitita; Cr – magnetita\cromita\Cr-espínélio; Hm – hematita; Gt - goetita.

A hematita é identificada no pico 2.699 e no pico 2.524, onde há sobreposição de picos com a cromita. A goetita, por sua vez, aparece no pico 4.183 e 2.451, este já com sobreposição com a serpentina (**FIG. 81**).

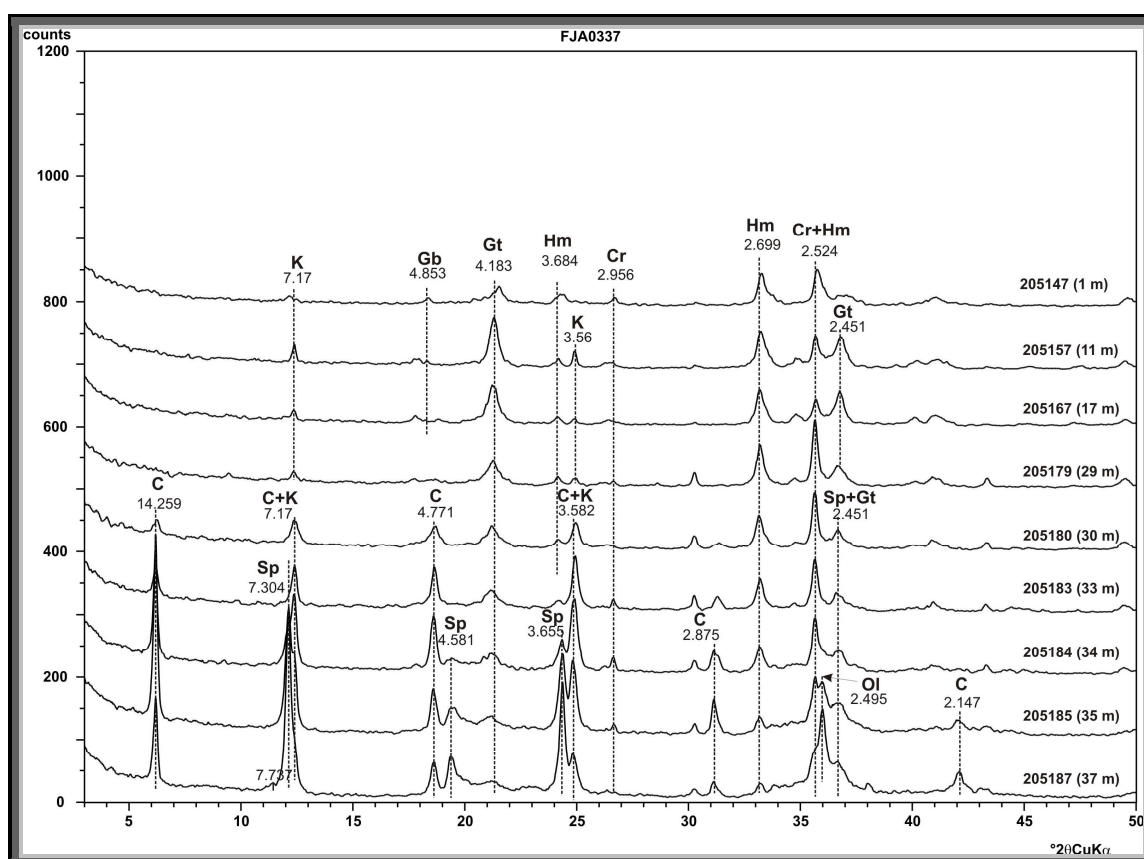
O espaço compreendido entre os metros 29 e 17 se refere ainda a zona laterítica ferruginosa, porém com teores cada vez menores de Ni à medida que ascende no perfil. A análise por DRX percebeu que os picos de cristalização dos óxidos se mostraram melhor definidos, já minerais do grupo da serpentina desaparecem na sua totalidade.

O último horizonte do furo, entre 16m e 1m, é identificada a paragênese mineral com caolinita (picos 7,17 e 3,56), gibsitita mal cristalizada (pico 4,859), goetita, hematita e cromita (**FIG. 81**). A substituição parcial da caolinita dá origem aos cristais de gibsitita, os quais foram identificados em petrografia óptica e tem respaldo geoquímico, uma vez que a acumulação de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  se dá de forma proeminente nesta região.

Apesar da fixação do Ni com o  $\text{Fe}^{3+}$  em goetitas ser notória, a capacidade de acomodação do Ni neste mineral é limitada devido aos espaçamentos cristalinos, sendo



diminuída a medida que a condição de drenagem aumenta, o que gera uma dificuldade de ser imobilizado em ambientes oxidantes e neutros a ácidos como o encontrado em perfis lateríticos superiores.



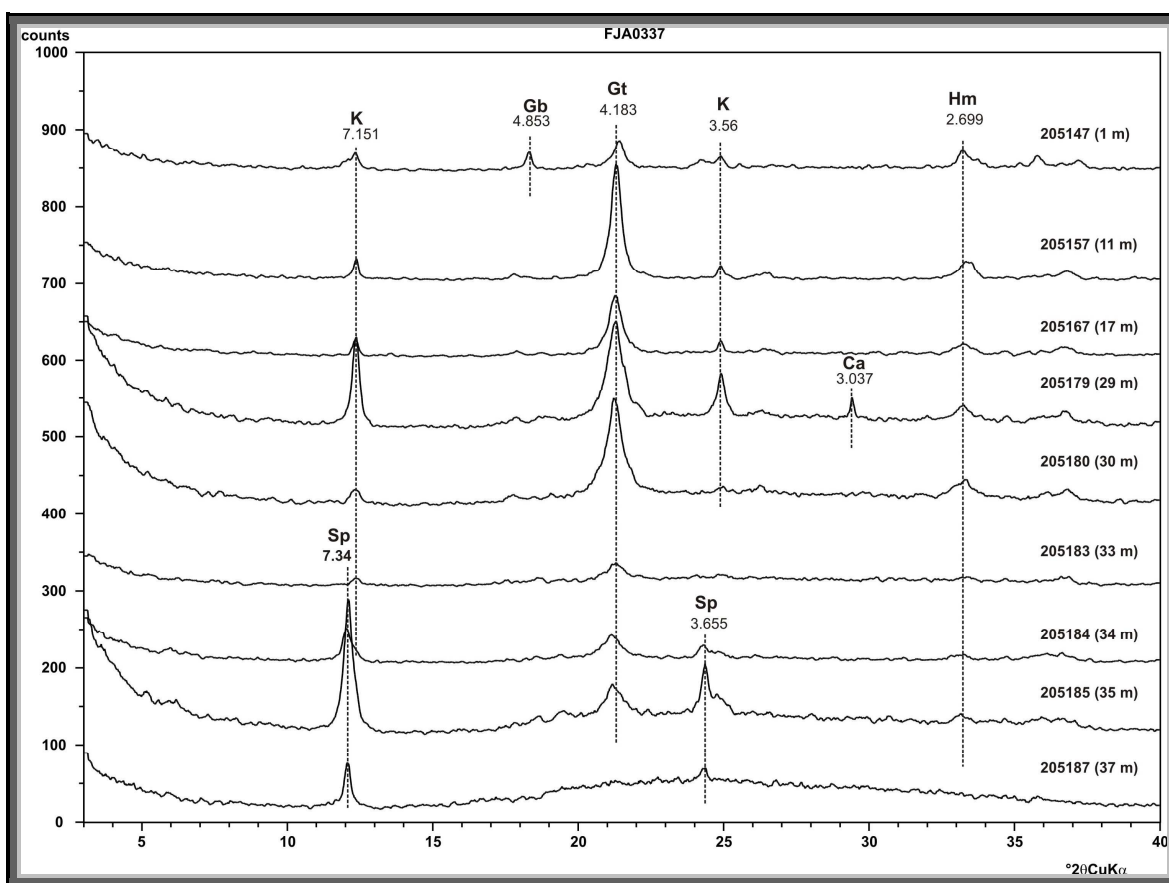
**Figura 81** - Superposição de Difractogramas (fração <math>< 20\mu\text{m}</math>), segundo a profundidade, do furo de sonda FJA 337. Legenda: Sp – serpentina; C – clorita; K - caolinita; Gb - gibsita; Cr – magnetita\cromita\Cr-espinélio; Ol – olivina; Hm – hematita; Gt - goetita.

Ao analisar a fração <math>< 2\mu\text{m}</math> notam-se algumas diferenças em relação à fração > 20 $\mu\text{m}$ . A base do furo (37m) é composta exclusivamente por serpentina, a qual se apresenta nos picos 7,340 e 3,655 (**FIG. 82**).

A zona de mineralização de mais alto teor em Ni (> 2%) entre os metros 34 e 30 apresenta caolinita (picos 7,151 e 3,56), serpentina (picos 7,34 e 3,655), goetita (pico 4,183) e hematita (pico 2,699) (**FIG. 82**).

Ao adentrar na zona laterítica ferruginosa com Ni <2% e >0,9%, caolinita, goetita e hematita são observáveis. A calcita (pico 3,037) surge como novo mineral, somente presente na fração < 2 $\mu$ m (**FIG. 82**).

Por fim, o topo da seqüência, com teores de Ni < 0,9%, compreendido entre os metros 16 e 1, é composto por caolinita, gibsitita (pico 4,853), goetita e hematita (**FIG. 82**).



**Figura 82:** Superposição de Difrátogramas (fração < 2 $\mu$ m), segundo a profundidade, do furo de sonda FJA 337. Legenda: Sp – serpentina; K - caolinita; Gb - gibsitita; Gt - goetita; Ca - calcita e Hm - hematita.

As análises tanto das frações <20 $\mu$ m quanto <2 $\mu$ m revelou a inexistência de picos na região compreendida entre 2 $^\circ$  e 6 $^\circ$  2 $\theta$ , o que indica a não ocorrência ou extrema baixa concentração de argilominerais do grupo das esmectitas.

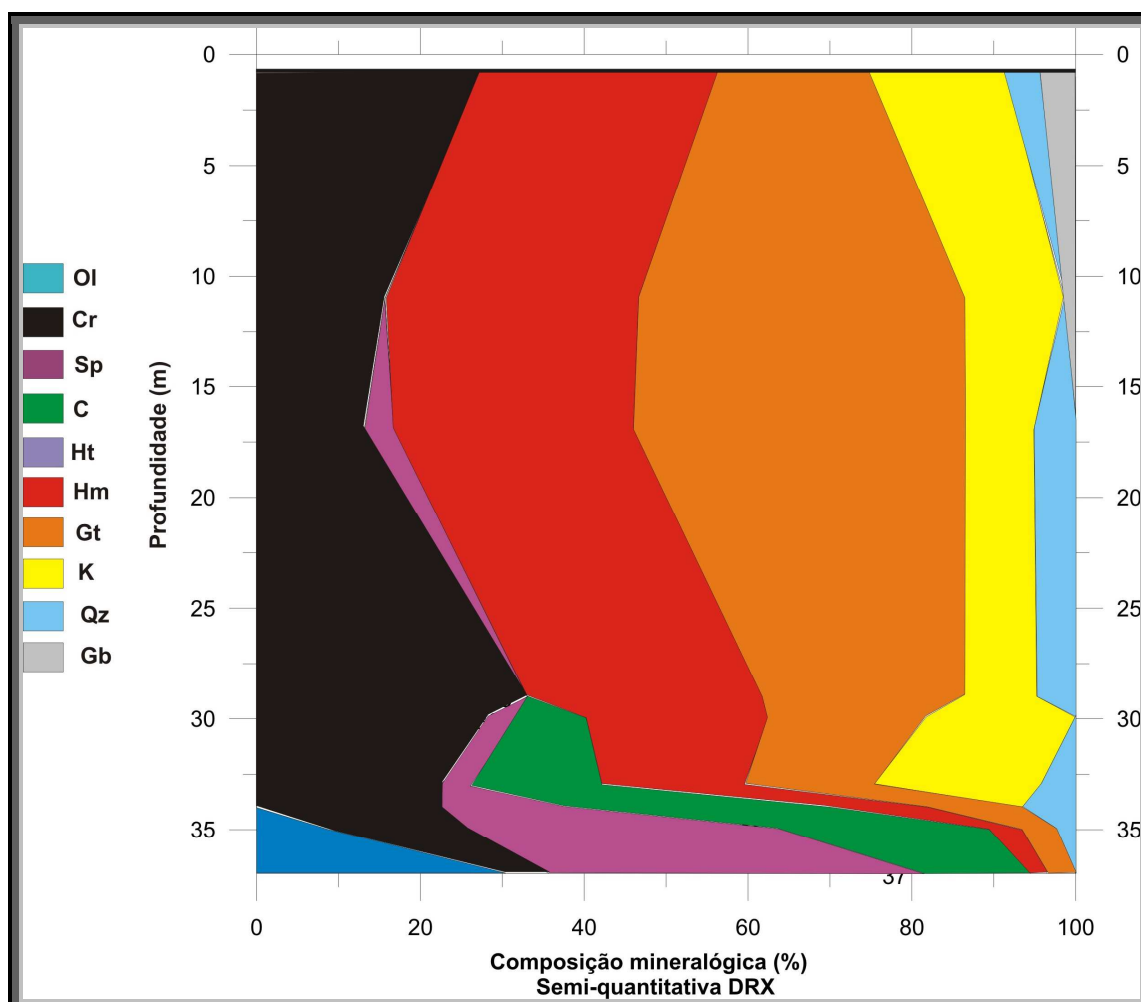
Ao efetuarmos um ensaio sobre a modal mineralógica utilizando os dados de DRX, o qual se dá através do cálculo semi-quantitativo do espaçamento cristalino das fases



minerais (**Figura 83**) nota-se semelhança muito grande com a petrografia óptica especialmente se considerarmos toda a citada matriz oxidada como pertencente ao grupo das goetitas e hematitas.

Assim, percebe-se aqui que a zona que concentra Ni em mais de 2% (34m a 30m) tem uma relação direta com os minerais do grupo das goetitas e hematitas, estando possivelmente associado de forma absorvida na sua grande maioria.

A serpentina é a fase em desestruturação neste horizonte, deixando o Ni que preteritamente estava associado à sua estrutura, livre no sistema para se ligar aos demais elementos químicos.



**Figura 83** - Distribuição mineralógica estimada a partir da análise modal semi-quantitativa por meio de DRX (cálculo a partir da integração das áreas e do nível de contagem dos picos identificados dos minerais) do furo de sonda FJA 337. Legenda - Ol: olivina; Cr: magnetita/cromita/cromo-espinélio; Sp: serpentina; C: clorita; Hm: hematita; Gt: goetita; K: caolinita; Qz: quartzo; Gb: gibbsita.

Cromita, clorita, caolinita e quartzo contemplam demais minerais identificados no perfil, os quais não apresentam papel preponderante na fixação do Ni.

À medida que ascende no perfil até o topo, os minerais oxidados passam a compor a grande maioria da mineralogia, sendo responsáveis pela fixação do Ni nos horizontes de forma inversamente proporcional a diminuição do pH no ambiente. Assim, quando o alterito atinge sua posição mais superior (metro1) a condição de aeração é tal que a oxidação não permite mais a fixação do  $\text{Ni}^{2+}$  com o  $\text{Fe}^{3+}$ , o que o deixa móvel novamente no sistema e acaba lixiviado para áreas adjacentes.

## 6.5 Furo FJA 373

### 6.5.1 Geomorfologia e Descrição

O Furo FJA 373 (403743.463E; 9321680.439N) está posicionado na porção norte do corpo do Jacaré e tem por característica a intersecção de todas as tipologias mineralizadas (laterita silicosa, laterita ferruginosa e saprolito).

Topograficamente ele inicia no topo da serra próximo a borda NNW, onde uma espessa cobertura de laterita silicosa é encontrada em franco processo de dissecação (**FIG. 84**).

Abaixo da laterita silicosa encontra-se um pacote de laterita ferruginosa, a qual sobrepõe um pacote de saprolito de alto teor e, por fim, a rocha fresca é alcançada.

O perfil, da base para o topo conta com 1m de rocha fresca (68m a 67m), 10m de saprolito (67m aos 57m), 7m de laterita ferruginosa (57m ao 50m) e, por fim, um pacote de 50m de laterita silicosa, o qual apresenta intercalações de zonas cloritizadas não mineralizadas. (**FIG. 84**).

Os teores mais elevados de Ni (>2%) encontram-se entre os metros 66 e 56, no contexto da zona saprolítica, a exceção do metro 56, o qual é representado por laterita ferruginosa. Dentro deste pacote de alto teor, existe uma zona de 6m, onde os teores de Ni superam os 3%, sendo os maiores teores absolutos deste elemento no presente trabalho (**FIG. 85**).

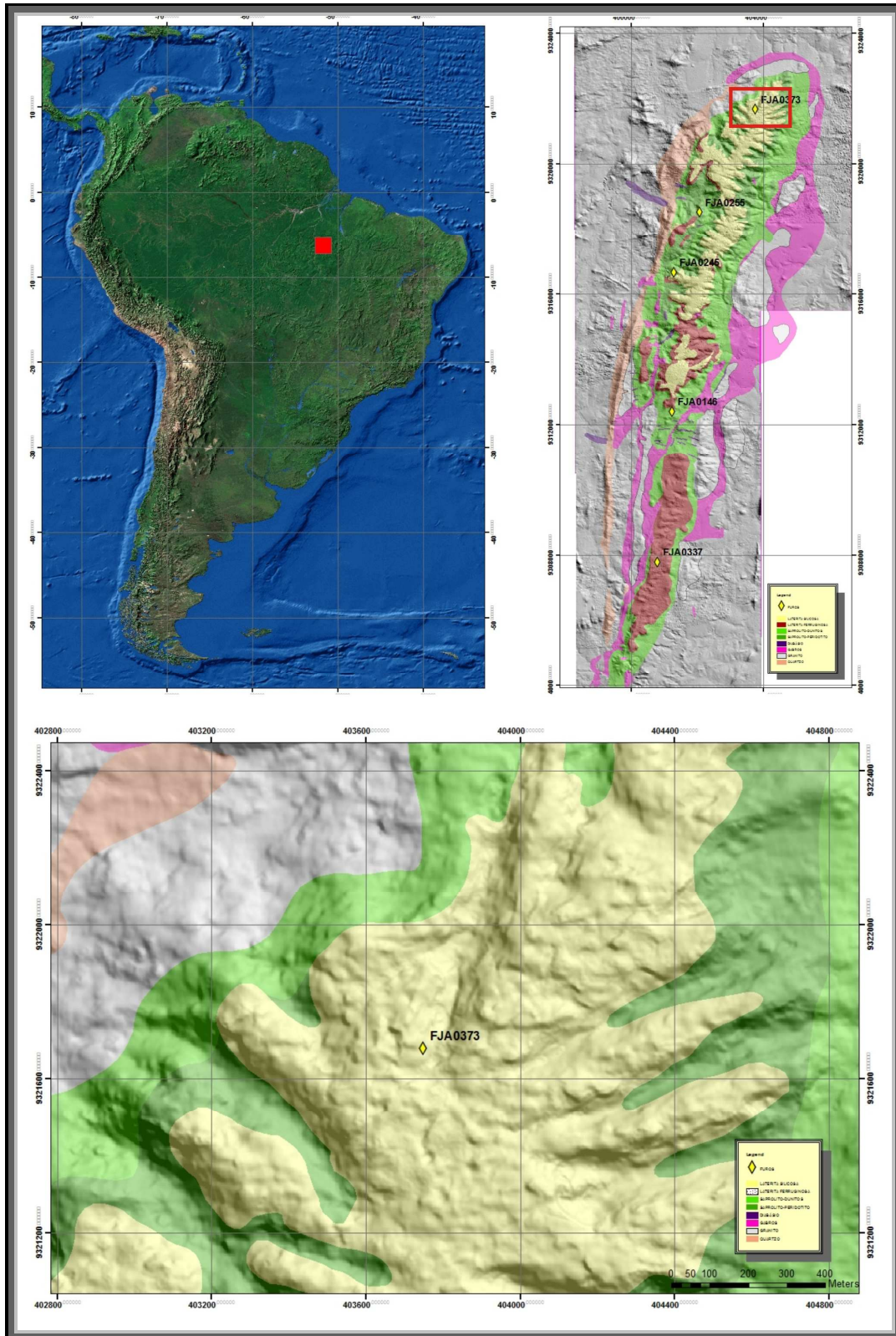
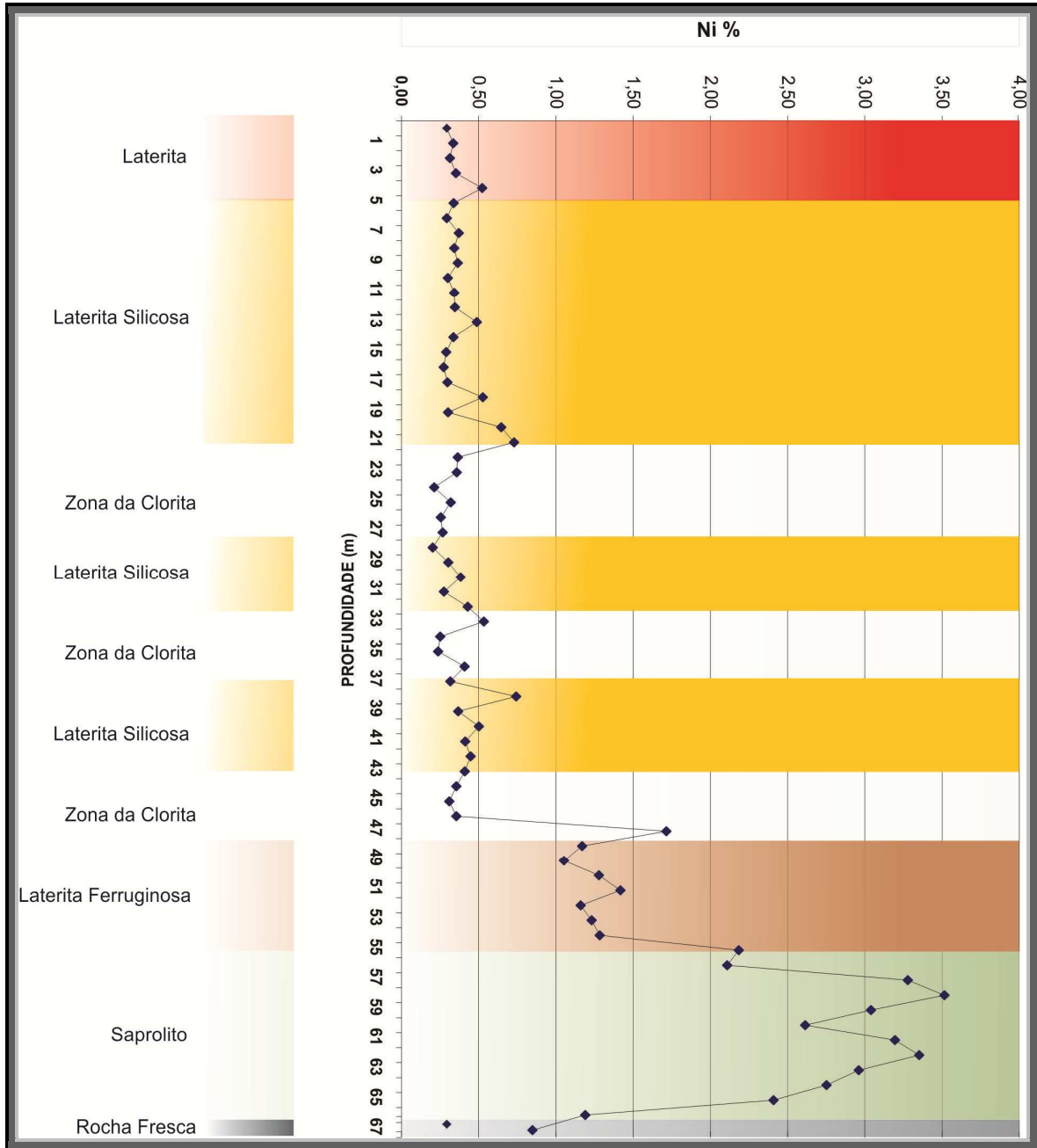


Figura 84 - Mapa de localização do furo FJA 373.



**Figura 85** - Variação em porcentagem da concentração de Ni ao longo do perfil de alteração do furo FJA 373.

### 6.5.2 Análise Química

No **ANEXO I – Análises Químicas** encontra-se todos os resultados que abrangem a composição química das amostras representativas do furo FJA-373. Quando comparados os arranjos geoquímicos e variação dos elementos ao longo do furo de sondagem, percebe-se que a maior concentração de Ni se dá na zona saprolítica, onde durante 10m o alto teor supera os 2%, chegando a atingir 3,53% no metro 59 (**FIG. 86**).

A zona saprolítica do furo de sonda concentra a maior parte do Ni no furo, contudo, não concentra a totalidade dos teores econômicos, uma vez que valores acima de 0,9% de Ni são observáveis na zona laterítica ferruginosa sobreposta.

Ainda no horizonte saprolítico, o  $Fe_2O_3$  apresenta aumento de 20% para 30%, alcançando quase 45% no contato com a zona ferruginosa. O  $SiO_2$  mantém-se estável entre 20% e 30% na faixa saprolítica. O  $MgO$  apresenta constante redução desde a rocha fresca até atingir a zona laterítica ferruginosa, onde diminui de 33% para 9% (base e topo da zona saprolítica respectivamente). O  $Al_2O_3$  mantém-se constantemente baixo, atingindo máximas de 2%, neste horizonte, situação semelhante aos elementos  $TiO_2$  e Y. Os elementos  $Cr_2O_3$  e Co demonstram leve anomalia positiva na faixa, enquanto Zr, Nb e Sc mostram leves picos dentro do intervalo (**FIG. 86**).

Neste sentido, fica clara a alta concentração de Ni nos serpentinitos e diminuição do elemento à medida que ascende no horizonte, inversamente proporcional a concentração de  $Fe_2O_3$ . Contudo, mesmo diminuindo a concentração de Ni na ascensão dentro do perfil, este se mantém econômico (>0,9%) até o metro 48, o que demonstra o poder de absorção/adsorção de Ni nos óxidos/hidróxidos, como pode ser bem caracterizado através das técnicas de petrografia óptica e DRX.

Na faixa laterítica ferruginosa o Ni mostra constante queda, saindo de 2,18% na intersecção com a zona saprolítica até 1,17% na intersecção com a zona da clorita. Neste intervalo espacial, o  $Fe_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$ , Co,  $Al_2O_3$ , Zr, Y, Nb e Sc tem variação positiva, enquanto  $SiO_2$  e  $MgO$  demonstram franca queda e  $TiO_2$  mantém-se praticamente imóvel quando comparados aos ao nível saprolítico (**FIG. 86**).

A partir do metro 48 inicia uma intercalação entre a zona da clorita e a zona laterítica silicosa, a qual se estende até os 22m de profundidade.

A zona da clorita apresenta duas características distintivas ao longo do FJA 373, sendo elas os baixos teores de Ni (<0,9%) e altos teores de  $Al_2O_3$ , os quais podem chegar próximo a 30%. Acompanhando as altas concentrações destacam-se o  $TiO_2$ , Zr, Y, Nb e Sc, enquanto  $Fe_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Cr_2O_3$  e Co demonstram leve declínio e os valores de MgO apresentam valores próximo a zero (**FIG. 86**).

A porção da laterita silicosa que compõe a intercalação litológica em destaque é marcada por baixos valores de Ni (<0,9%) e altíssimos percentuais de  $SiO_2$ , os quais ultrapassam 80% em determinados locais.

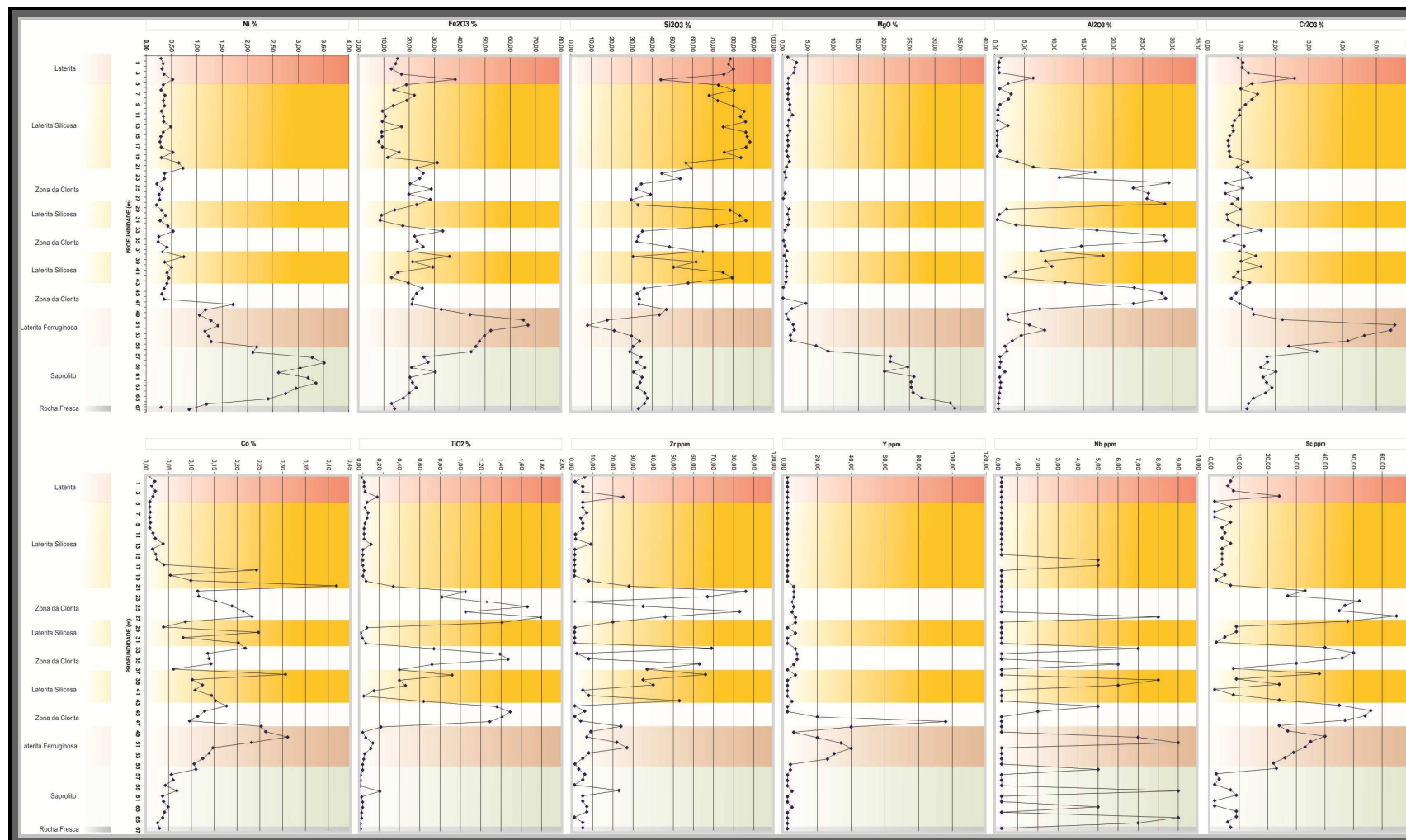
A zona laterítica silicosa parece ter comportamento exatamente oposto ao da zona da clorita quanto à variabilidade química dos elementos, sendo exceção o Nb, o qual tem suas variações independente do horizonte em que se encontra.

A intercalação entre zona laterítica silicosa e zona da clorita tem seu fim a partir dos 21m de profundidade, onde o perfil assume exclusivo caráter silicoso. Neste ponto até os 5 metros de profundidade todos os elementos apresentam baixa concentração, a exceção do  $SiO_2$ , o qual chega próximo ao patamar de 90%. O Ni, por sua vez mantêm-se em níveis não econômicos (<0,9%), tendo média geral de 0,37% Ni. O  $Fe_2O_3$  tem variações entre 10% e 20%, o que praticamente completa o fechamento químico para o horizonte (**FIG. 86**).

Assim, a zona laterítica silicosa caracteriza-se por franco predomínio de  $SiO_2$  e  $Fe_2O_3$ .

Por fim, os últimos 5 metros do perfil de alteração é composta de laterita altamente enriquecida em  $SiO_2$ , porém, com concentração de  $Fe_2O_3$  próximo a 40%, o que reflete a mobilidade da sílica em condições extremas de oxidação e, em direção contrária, a fixação do ferro na forma de  $Fe^{3+}$ .





**Figura 86** - Variação da composição química do Furo FJA 373 em função da profundidade (m) e dos diferentes níveis de minério estabelecidos para o perfil.

### 6.5.3 Balanço de Massa

Devido à grande variabilidade geoquímica e mineralógica do furo FJA 373, aliado ao incrível teor de minério de Ni em determinadas porções do horizonte, o estudo de balanço de massa compõem parte importante da avaliação, pois permite identificar a mobilidade dos elementos ao longo de todo o perfil.

Assim, verifica-se que o Ni tem acumulação relativa desde a base da zona saprolítica até o topo da zona laterítica ferruginosa quando, então, passa por processo de depleção, mantendo-se assim até o topo da seqüência (**FIG. 87**).

Na zona saprolítica, além da acumulação relativa de Ni, há a concentração de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , Co,  $\text{TiO}_2$ , Zr, Nb e Sc. O Y mantém-se praticamente imóvel, enquanto MgO demonstrou inversão dentro do mesmo horizonte (**FIG. 87**).

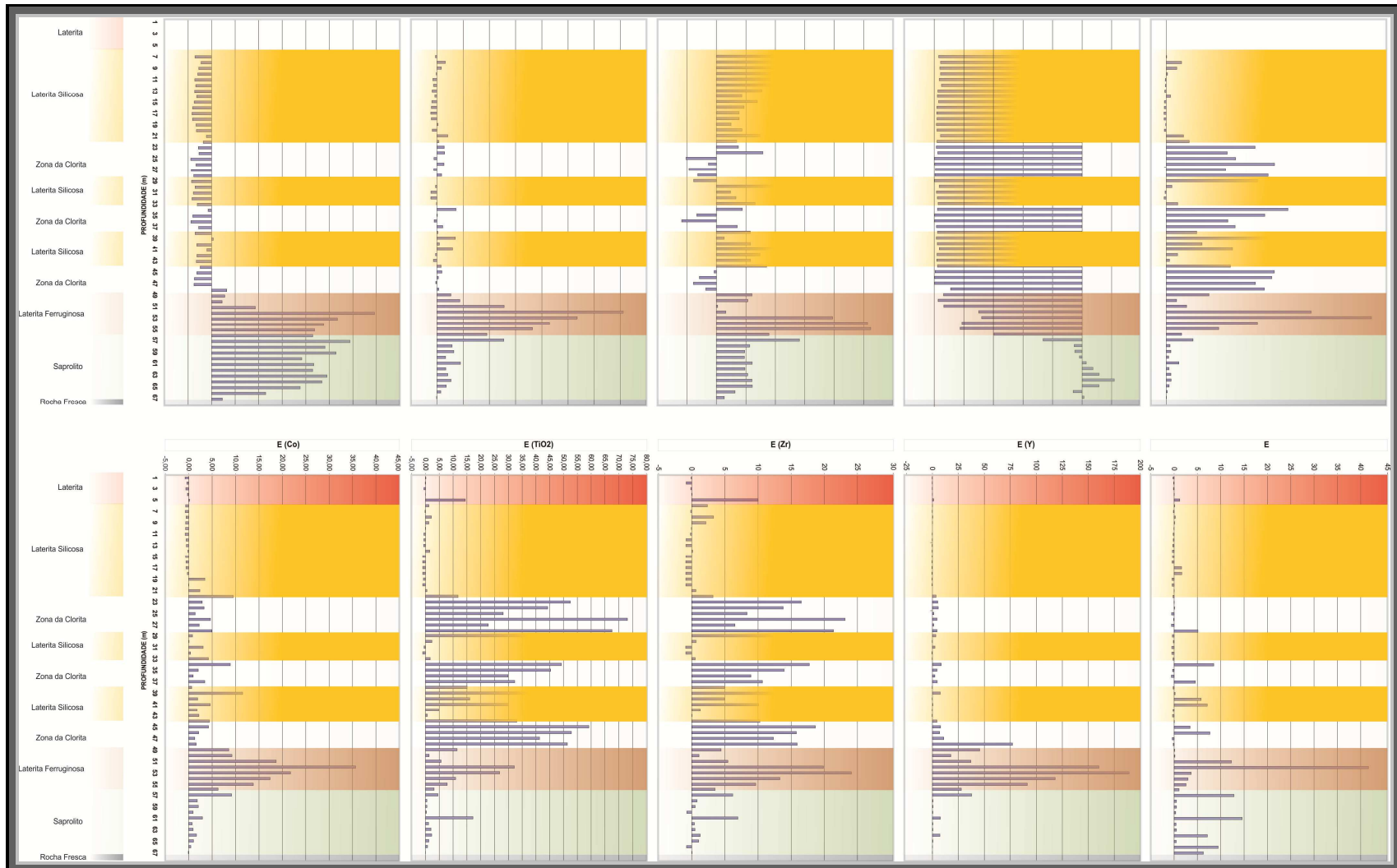
A leve acumulação que ocorreu com MgO dentro do horizonte saprolítico (uma vez que se espera a contínua depleção do elemento) tem sua explicação no desenvolvimento de carbonatos anidros do grupo da calcita, tal como magnesita. A coexistência de mineral tipo magnesita com aqueles carbonatos hidratados tipo hidrotalcita, identificado via DRX, se dá em condições de oxidação e redução, o que é esperado para este local do perfil.

Ao adentrar na zona laterítica ferruginosa há a acumulação de todos os elementos, a exceção do MgO, o qual é lixiviado para fora dos sistema devido a sua grande mobilidade geoquímica. (**FIG. 87**).

A zona da clorita é bem marcada pela depleção em Ni,  $\text{SiO}_2$ , MgO e  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  e acumulação de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Co,  $\text{TiO}_2$ , Zr, Y, Nb e Sc (**FIG. 87**). A acumulação destes elementos corrobora a hipótese de acamamento litológico através de litotipos mais diferenciados dentro de um complexo máfico-ultramáfico tipo peridotitos e piroxenitos feldspáticos até termos gabróicos e gabro noríticos.

A zona laterítica silicosa, quando intercalada com a zona da clorita, tem depleção em Ni, MgO e  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , tendo acumulação nos demais elementos. Porém, quando a zona silicosa mantém-se como exclusivo litotipo (metro 22 a 6), o Ni continua depletado,

bem como todos os demais elementos avaliados neste estudo. Neste momento, a sílica tem ampla predominância como elemento acumulado.



**Figura 87** - Gráficos de Balanço de Massa do Furo FJA 373.

Por fim, a carapaça laterítica apresenta acumulação praticamente exclusiva em SiO<sub>2</sub>, podendo ter tido aporte externos, devido a um pico de acumulação no quinto metro em praticamente todos os elementos, com típica característica de enriquecimento absoluto (**FIG 87**).

#### 6.5.4 Petrografia Ótica

A petrografia ótica envolvendo o furo FJA 373 envolveu a descrição de cinco seções delgadas representativas do perfil de alteração. As seções foram selecionadas em função dos teores de Ni, caracterização química do horizonte ao qual o material para determinada lâmina foi extraído e disposição ao longo do perfil de alteração.

As amostras foram selecionadas da seguinte maneira: AM 235248 (67m), AM 235239 (58m), AM 235237 (56m), AM 235231 (50m) e AM235170 (1m)

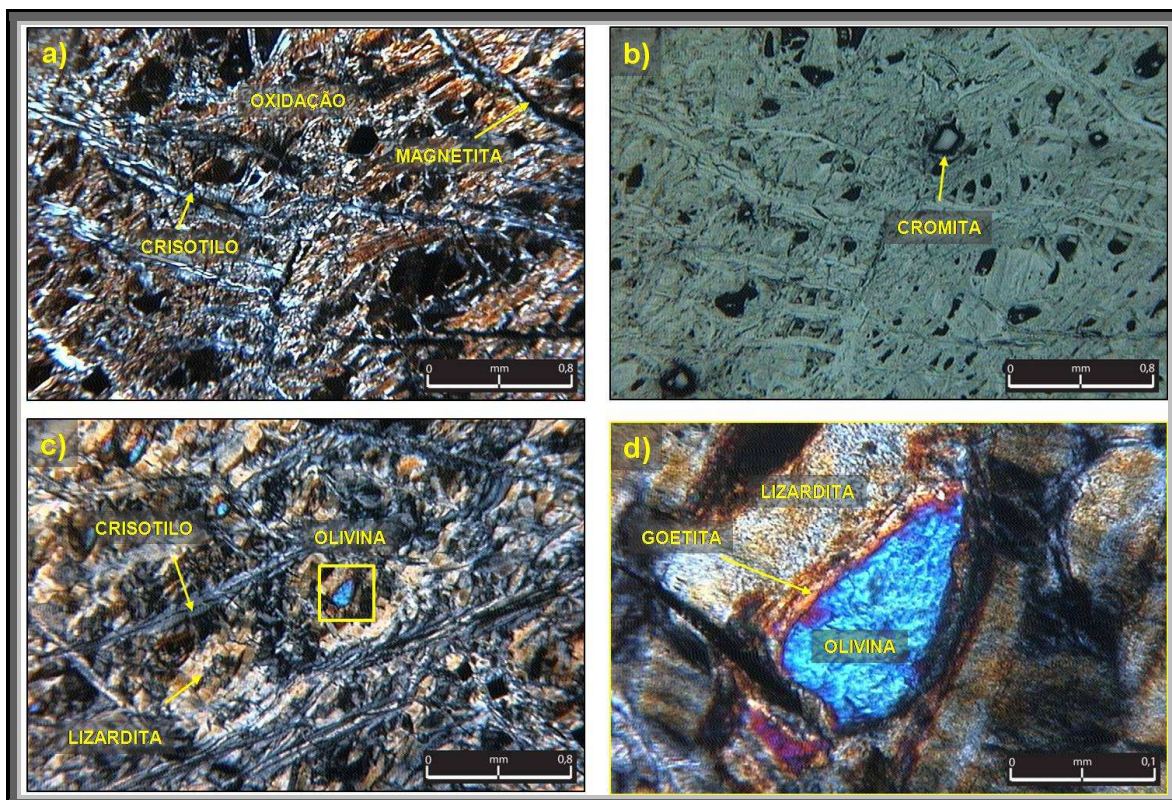
##### 6.5.4.1 AM 235248

A amostra representa a porção basal do furo de sonda FJA 373, mas já dentro do horizonte saprolítico. A seção delgada tem a seguinte abundância mineralógica em ordem decrescente: matriz de hidróxido de Fe, serpentina (textura *interpenetrating*, *interlocking* e *mesh*), hematita, cromita, magnetita, quartzo, calcedônia e Cr-espinélio. A tabela contendo as contagens modais da presente amostra está em **ANEXO II – Petrografia Ótica**).

Apesar de a amostra estar representando a porção menos alterada do perfil, esta já se encontra em adiantado estado de alteração, uma vez que 77% da modal mineralógica é composta de uma matriz oxidada, seguida por serpentina (6,5%). Ao analisarmos os dados químicos descritos anteriormente, verifica-se que os teores de MgO encontram-se ainda altos neste horizonte (33%), o que nos levaria a imaginar numa amostra composta predominantemente por serpentina, fato este que não ocorre.



Ao observarmos a **Figura 88a** nota-se a massa de serpentina presente, contudo, altamente oxidada e em processo de alteração avançado. Nesta imagem, é possível verificar a geração de textura tipo "boxwork" ou favo de mel, quando da alteração dos minerais do grupo da serpentina.



**Figura 88** - Fotomicrografias referentes a amostra AM 235248. a) Serpentina com textura *mesh* dominante, parcialmente alterada (oxidada) com venulações e geração de textura *boxwork*. (LP 2.5x). b) Idem anterior com destaque aos cristais de cromita (LR 25x). c) Serpentina com textura *interpenetrating* e cristais de olivina parcialmente preservados na textura *mesh* (LP 25x). d) Detalhe de relicto de olivina e textura *mesh* em meio a massa de serpentina e borda de alteração de goetita (LP 200x) LP: Polarizadores Cruzados. LR: Luz Refletida.

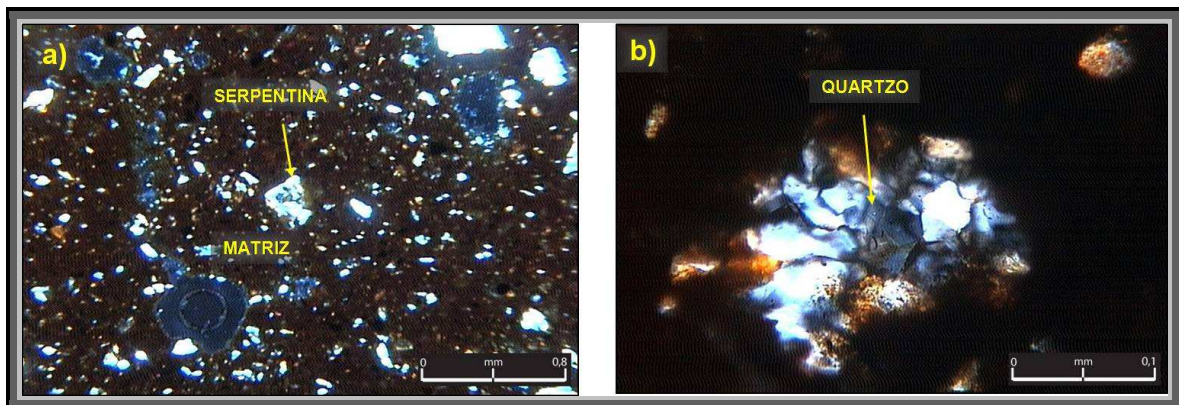
A maioria das serpentinas venulares tem diâmetro variado entre 0.1mm e 0.5mm e, não raramente, apresentam minerais opacos inclusos acompanhando a venulação, como pode ser observado na **Figura 88b**, onde se verifica a ocorrência de cromita, a qual contempla 2,33% do total mineralógico.

Ao observar a luz polarizada no microscópio óptico foram identificados alguns cristais remanescentes de olivina (**Figura 88c,d**) em meio a massa serpentinítica com textura *mesh* reliquiar. Os cristais apresentam, em média, 0,1mm de comprimento e

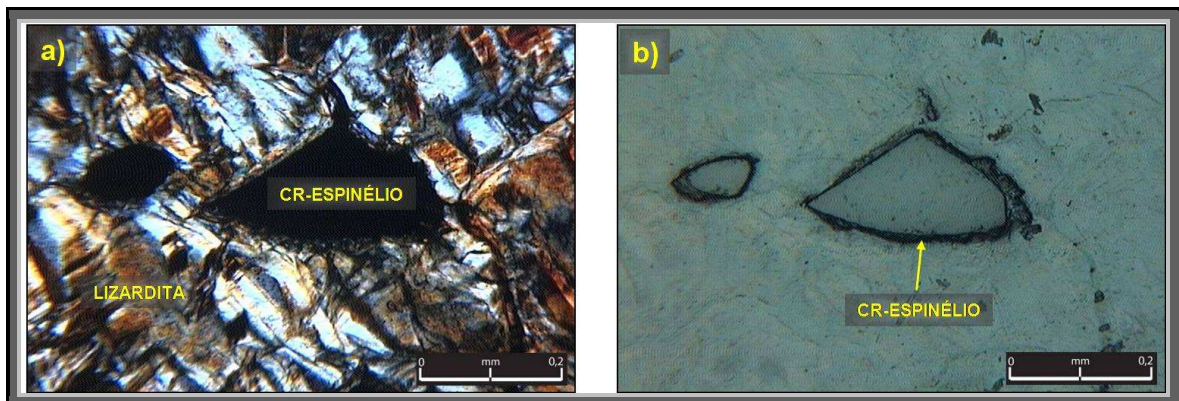


têm coroa de alteração, onde minerais como goetita (7,33%) e hematita (2,67%) estão em franco desenvolvimento.

A matriz de óxido/hidróxido de ferro, que conforma a grande massa encontrada na base do furo (77%), possui cristais de serpentina imersos, bem como quartzo secundário (FIG. 89a,b).



**Figura 89** - Fotomicrografias referentes à amostra 235248. a) Cristais fragmentados de serpentina imersos numa matriz de óxido/hidróxido de ferro (LP 25x). b) Detalhe de cristal de quartzo secundário (LP 200x). LP: Polarizadores Cruzados.



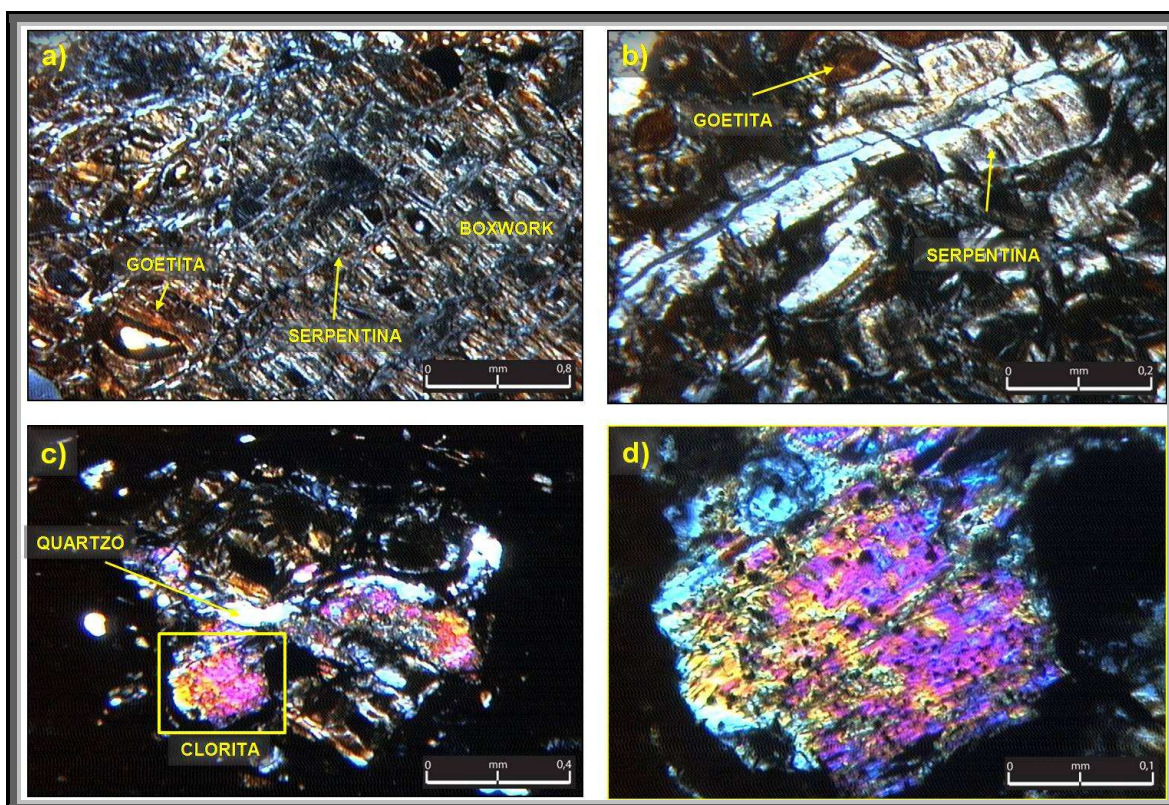
**Figura 90** - Fotomicrografias referentes à amostra 235248. a) Cr-espínélio em meio à massa de serpentina (LP 100x). b) Idem anterior demonstrando borda de oxidação (LR 100x). LP: Polarizadores Cruzados. LR: Luz Refletida.

Quando observados os fragmentos compostos de uma massa serpentinítica é possível identificar cristais de Cr-espínélio (0,3mm) em meio à mesma (**Figura 90**), o que normalmente é acompanhado de borda de oxidação onde os minerais do grupo das goetitas

iniciam desenvolvimento e, não raro, estes são transformados em hematita por processo de hidratação.

#### 6.5.4.2 AM 235239

A amostra AM 235239, assim como a amostra descrita anteriormente, tem alta concentração de MgO quando analisado quimicamente (21,31%), o que nos remete a um predomínio serpentínico na sua mineralogia, contudo, a petrografia óptica novamente aqui revelou que a grande massa mineralógica é composta de matriz de óxido/hidróxido de ferro (69,33%), seguido de goetita (8,5%), cromita (5,17%), serpentina com textura *interlocking* e *mesh* (4,5%), quartzo (3,17%), hematita (3%), magnetita (2,33%), calcedônia (2,33%) e Cr-espinélio (1,67%). (ANEXO II – Petrografia Óptica).



**Figura 91** - Mosaico de fotomicrografias referentes a amostra AM 235239. a) Relictos de serpentina com textura *mesh* e *interlocking* alterada para *boxwork* (LP 25x). b) Detalhe da serpentina com magnetita parcialmente alterada para goetita e hematita (LP 100x). c) Cloritização (LP 50x). d) Detalhe da cloritização (LP 200x). LP: Polarizadores Cruzados.



Igualmente singular é a alta concentração de Ni neste horizonte, uma vez que o mesmo atinge 3,28% neste ponto, fato incomum para uma grande massa mineralógica formada por minerais dos grupos dos óxidos e hidróxidos.

Ao observar a **figura 91a** verifica-se o desenvolvimento de textura tipo *boxwork* na massa serpentinítica, onde o processo de alteração lixívia os constituintes químicos mais móveis e culmina com a geração de quartzo secundário a partir da perda de SiO<sub>2</sub> por parte da serpentina, além de hematita e goetita (**FIG. 91b**).

A serpentinização do protólito ultramáfico gerou, ainda, clorita altamente birrefringente quando observada a luz polarizada (**Figura 91c,d**), a qual, por vezes, encontra-se associada com cristais de quartzo secundário

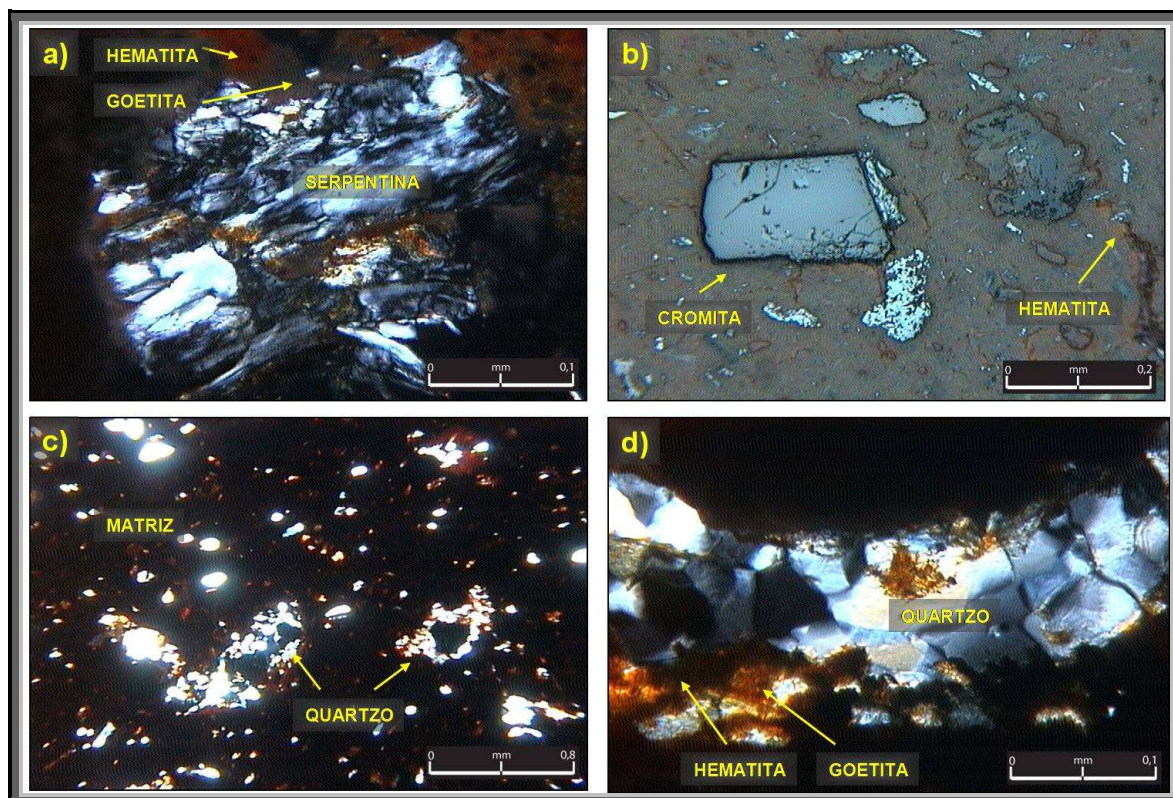
#### 6.5.4.3 AM 235237

À medida que ascendemos no perfil de alteração nota-se o contínuo crescimento, em massa, da matriz oxidada, onde aqui já contempla 79,83% do total mineralógico. O quartzo tem 10,67% do total, seguido de magnetita (3,83%), cromita (2,83%), goetita (1%), serpentina (1%) e hematita (0,83%). (**ANEXO II – Petrografia Óptica**).

Deve-se salientar que o baixo percentual de hematita e goetita se deve ao fato dos mesmos estarem incorporados na massa matricial oxidada, logo, indiferenciados através da petrografia óptica convencional (**FIG. 92c**). O detalhamento mais acurado para este tipo de material vai se encontrar na análise modal semi-quantitativa através de DRX, o que pode ser discutido adiante no presente trabalho.

A descrição petrográfica da amostra AM 235237 identifica relictos de cristais de serpentina com textura *mesh* parcialmente preservada, com forte halo de alteração com goetita e hematita (**FIG. 92a**). Como conseqüência do contínuo processo de alteração, cristais de cromita (0,05mm a 3mm) parcialmente hematitizados estão dispersos em meio a massa oxidada (**FIG. 92b**).

Apesar do amplo predomínio de óxidos e hidróxidos de ferro na amostra, a acumulação relativa de  $\text{SiO}_2$  é bem destacada, como pôde ser observado nos gráficos de balanço de massa discutidos anteriormente, de tal sorte que a disposição de quartzo secundário é notória em lâmina delgada (**FIG. 92d**).



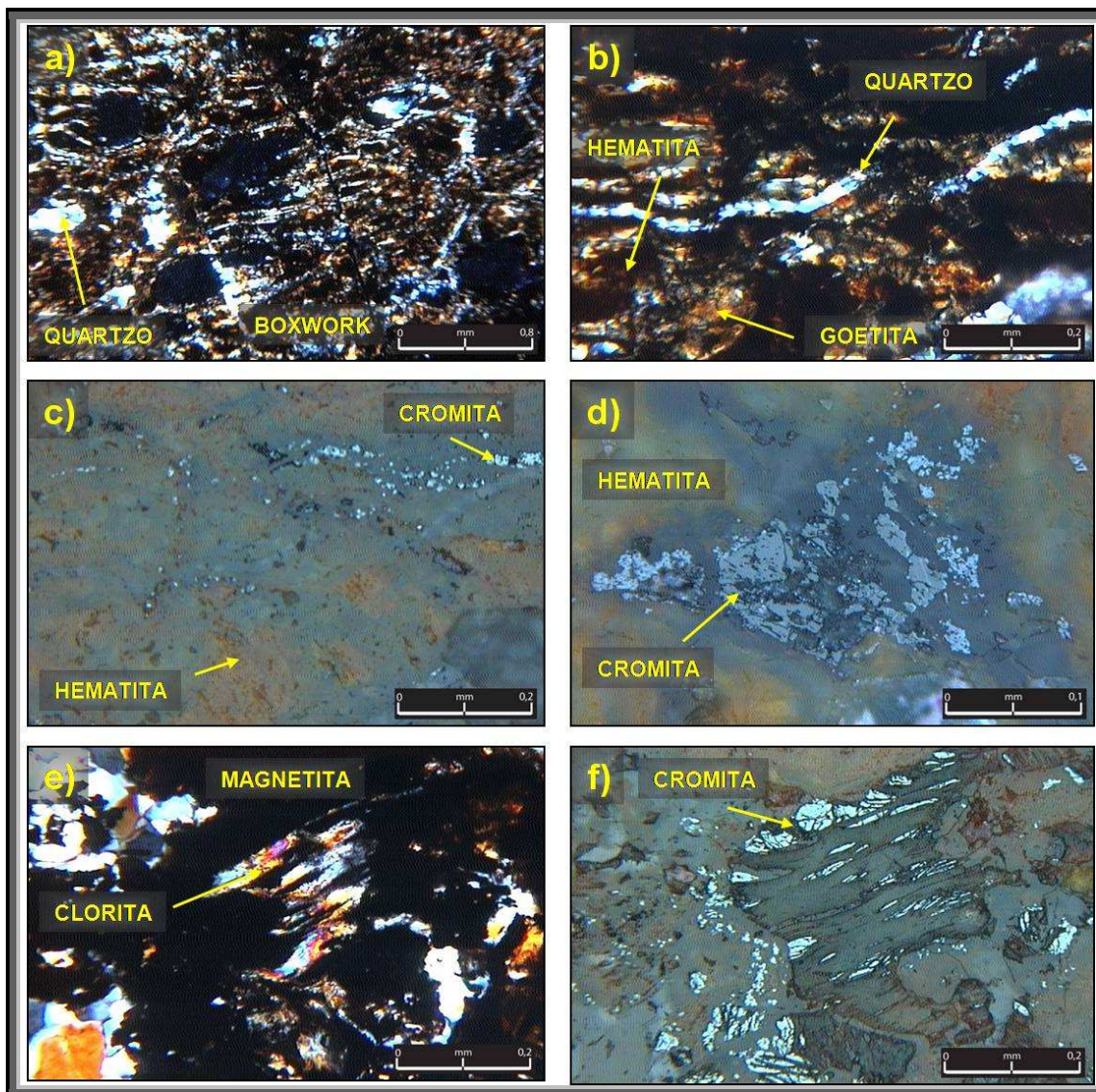
**Figura 92** - Mosaico de fotomicrografias referentes à amostra AM 235237. a) Relictos de serpentina com textura *mesh* (LP 200x). b) Cromita parcialmente hematizada (LR 100x). c) Matriz de óxido/hidróxido de Fe (LP 25x). d) Agregado de quartzo com goetita e hematita (LP 200x). LP: polarizadores Cruzados. LR: Luz Refletida.

O teor de Ni para a amostra em tela é de 2,18%, o que caracteriza o horizonte como em alto teor para os padrões propostos no trabalho. A exemplo do que aconteceu na amostra descrita anteriormente, aqui também a mineralogia não favorece um enriquecimento significativamente alto como observado, uma vez que os minerais do grupo da serpentina foram praticamente lixiviados. Assim, nota-se novamente a atuação destacada dos óxidos e hidróxidos na fixação do Ni no sistema, seja de forma absorvida ou adsorvida.



#### 6.5.4.4 AM 235231

A amostra AM235231 representa o material interceptado pela sondagem com 50 metros de profundidade e apresenta 1,05% Ni.



**Figura 93** - Mosaico de fotomicrografias referentes à amostra AM 235231. a) Textura asbestiforme alterada para *boxwork* através de lixiviação e silicificação (LP 25x). b) Detalhe da substituição de serpentina por quartzo (LP 100x). c) Idem anterior com presença de cromita e hematita (LR 100x). d) Detalhe da cromita hematitizada (LR 200x). e) Clorita associada com magnetita (LP 100x). f) Idem anterior com detalhe a cromita hematitizada associada a clorita (LP 100x). LP: Polarizadores Cruzados. LR: Luz Refletida.

Verifica-se uma diminuição nos minerais oxidados que formam a matriz da amostra, em comparação as amostras anteriormente descritas para o furo FJA 373, porém, aumento significativo na cristalização de quartzo secundário, dando o caráter laterítico silicoso típico para a amostra.

Assim, a matriz oxidada indiferenciada continua compondo a maioria da massa com 47,27% da modal mineralógica, seguida por quartzo com 37%, goetita (8,38%), calcedônia (3,13%), magnetita (2,63%), cromita (1,5%) e por fim clorita (0,13%) (**ANEXO II – Petrografia Óptica**).

O estudo petrográfico revela que praticamente toda a serpentina está alterada para quartzo com processo de oxidação avançado. A alteração da serpentina faz com que sua textura asbestiforme seja mantida na forma de "esqueleto de vênulas" através do processo de silicificação, e o restante da serpentina (lizardita e antigorita principalmente) seja completamente lixiviado. Assim, a textura tipo *boxwork* passa a predominar na amostra, com mineralogia baseada em hematita e quartzo (por vezes calcedônia) (**FIG. 93a,b**).

A alteração hidrotermal promoveu a cloritização em pequena escala, de parte dos cristais de serpentina, os quais hoje recristalizaram parcialmente na forma de quartzo secundário, contudo a clorita (ou parte dela) se mantém preservada (**FIG. 93e**).

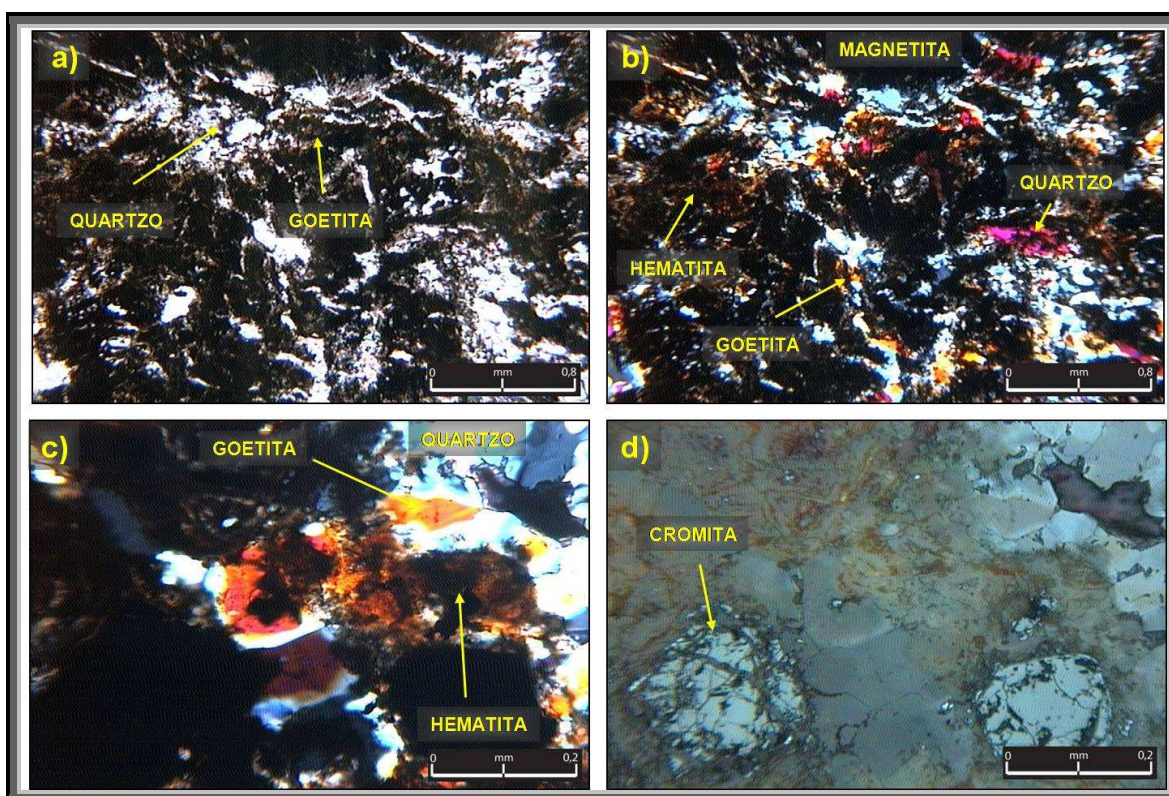
Os cristais de cromita estão fragmentados devido ao processo intempérico e, comumente, encontram-se hematitizados (**FIG. 93c,d,f**).

#### 6.5.4.5 AM 235170

A amostra AM 235170 representa o topo do furo de sonda FJA 373 e apresenta teores químicos de 0,29% Ni e 78,62% de SiO<sub>2</sub>, caracterizando-se como laterita silicosa de baixo teor. Mineralogicamente a amostra em tela reflete muitas semelhanças com a amostra descrita anteriormente, mostrando total destruição da serpentina primária, alta atividade de silicificação secundária e oxidação generalizada (**FIG. 94a**).



Neste sentido, a mineralogia é composta por matriz de óxido/hidróxido indiferenciada (47,38%), quartzo (33,5%), goetita (9,13%), magnetita (5,50%), cromita (2,88%) e hematita com 1,63%. Cabe salientar novamente que grande proporção da massa matricial oxidada é composta por goetitas e hematitas, porém indiferenciáveis através de petrografia óptica.



**Figura 94** - Mosaico de fotomicrografias referentes à amostra AM 235170. a) Quartzo secundário e goetita associada (LN 25x). b) Destruição total do protólito serpentínico e alta concentração de goetita, hematita e magnetita (LP 25x). c) Detalhe de quartzo secundário associado com goetita e hematita (LP 100x). d) Detalhe da cromita hematizada (LR 100x). LN: Luz Natural. LP: Luz polarizada. LR: Luz Refletida.

A observar a **Figura 94b** percebe-se a presença de agregados de cristais de quartzo secundário de alta birrefringência, acompanhado de grande concentração de óxidos e hidróxidos como goetita, hematita, magnetita e cromita. Nesta mesma figura fica evidente a destruição da pretérita matriz serpentínica sua transformação em quartzo, mantendo apenas o "esqueleto" da textura asbestiforme original.

A predominância da modal mineralógica continua sendo a matriz oxidada, a qual encontra cristais de quartzo imersos em sua massa, e estes com alterações de goetita e hematita. Fato semelhante ocorre com os cristais de cromita, em franco processo de destruição e alteração para a mesma assembléia mineral descrita acima. (**FIG. 94c,d**).

#### 6.5.5 Difração de Raios X

Foram analisadas treze amostras por Difração de Raios X (DRX) referentes ao furo FJA 373, com o objetivo de obter um detalhamento na identificação mineral envolvendo fração <20 $\mu$ m) e fração <2 $\mu$ m.

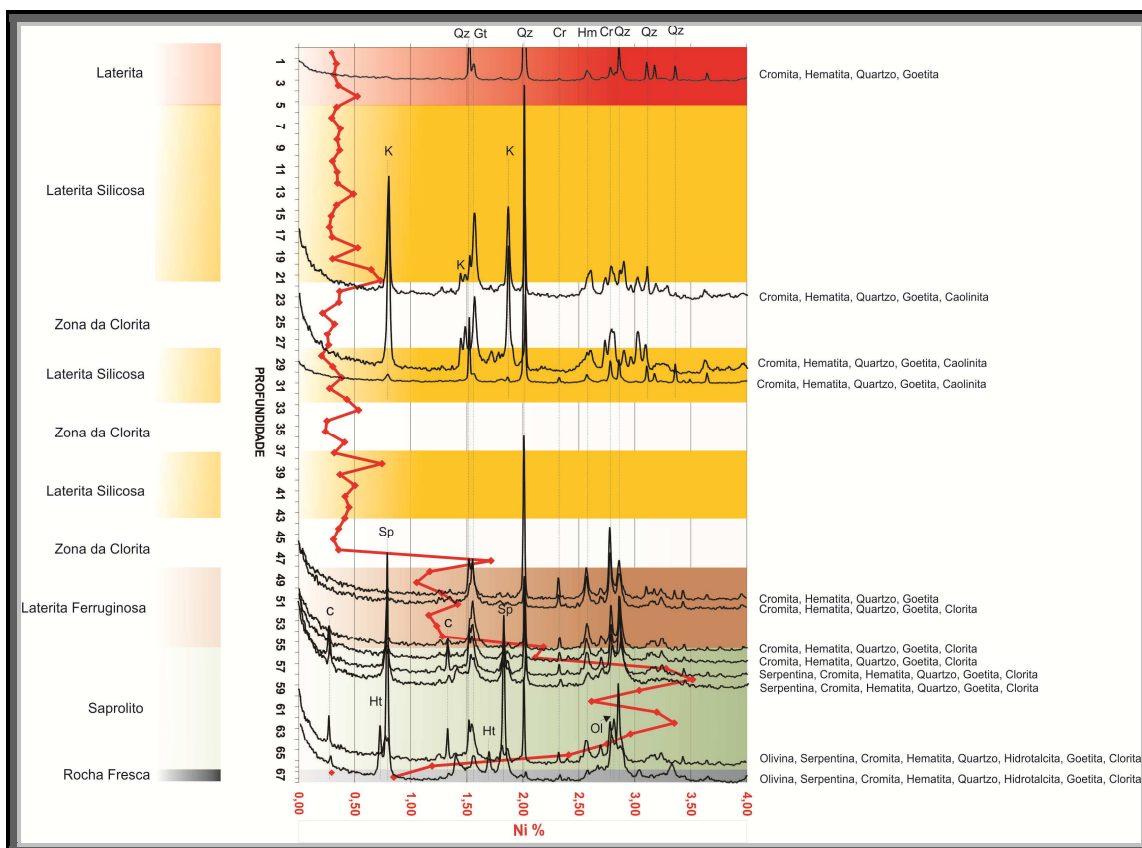
Como citado anteriormente, o perfil de alteração em questão apresenta grande variabilidade química e mineralógica, inclusive com indicação de diferentes protólitos acamadados.

A base do perfil possui mineralogia constituída por olivina, serpentina, quartzo, cromita, hematita, goetita e clorita, além de mineral carbonático níquelífero do grupo das hidrotalcitas. Esta mineralogia se aplica a rocha fresca e a base da zona saprolitizada (**FIG. 95**).

O topo da zona saprolítica, onde os melhores teores de Ni são encontrados (>3%), tem mineralogia composta por cromita, hematita, quartzo, goetita e clorita (**FIG. 95**).

A partir do metro 56, os teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> têm significativo aumento, enquanto os teores de MgO recuam, mas ainda com teores altos de Ni (2,18%), o que caracteriza a formação da zona laterítica ferruginosa. Embora haja a mudança química no horizonte em destaque, mineralogicamente existe muita semelhança com a porção saprolítica imediatamente abaixo, ou seja, predomínio de cromita, hematita, quartzo, goetita e clorita.

O topo da zona laterítica ferruginosa apresenta a mesma mineralogia da sua base, a exceção da clorita, que desaparece do perfil neste momento, concomitante com a diminuição dos teores de Ni.



**Figura 95** - Superposição de Difratomogramas em relação ao perfil geológico e consecutiva variação de Ni do furo de sonda FJA 373. Legenda: Sp – serpentina; Cr – magnetita\cromita\Cr-espinélio; Ol – olivina; Hm – hematita; C – clorita; Qz – quartzo, Ht - hidrotalcita, K - Caolinita.

Ascendendo no perfil, existe a intercalação entre a zona da clorita e zona laterítica silicosa, as quais demonstram mineralogia composta por cromita, hematita, quartzo, goetita e caolinita. Ambas as zonas tem baixo teor de Ni. Deve-se destacar que, apesar de ambas as zonas contarem com a clorita como componente mineralógico, é na zona da clorita que a cristalinidade deste mineral se destaca, sendo menor na zona silicosa (**FIG. 95**).

Por fim, o topo da seção é composto essencialmente por quartzo, hematita, goetita e cromita.

Ao analisar o empilhamento de difratogramas representando alguns horizontes selecionados do furo FJA 373, observa-se que a olivina está presente nas duas amostras basais (metros 68 e 67), ocupando o pico 2.499 (**FIG. 96**). Esta feição foi

corroborada pela petrografia óptica descrita anteriormente, onde se identificou claramente alguns cristais de olivina em meio a massas esparsas de serpentina parcialmente alterada. O estudo do difratograma mostra que a serpentina, apesar de alterada, ainda apresenta boa cristalinidade.

A exemplo do que aconteceu no FJA 245, aqui também minerais carbonáticos do grupo das hidrotalcitas são observáveis nos picos 7.991 e 3.895 (**FIG. 96**).

No metro 58, representando o topo da zona saprolítica, obtém 3,28% Ni, concomitante com o desaparecimento dos minerais carbonáticos e destruição total das olivinas reliquiares. Esta amostra contempla clorita (pico 14.259, 7.186, 4.781), serpentina (pico 7.292, 4.570, 3.652), quartzo (4.260, 3.340, 2.458), além de cromita, hematita e goetita (**FIG. 96**).

Aliando a petrografia óptica as técnicas de DRX, nota-se que o Ni tende a se estabelecer associado aos minerais oxidados, provavelmente em ambientes que sofrem oxidação e redução, de tal sorte a variação do nível do lençol freático faz com que o gel níquelífero fornecido ao sistema, a partir da alteração dos minerais do grupo das serpentinas, associa-se principalmente a goetitas num dado momento onde  $Fe^{2+}$  recebe elétrons do sistema e transforma-se em  $Fe^{3+}$ , o qual é menos móvel no sistema.

Contudo, esta "janela de fixação" tem um período reduzido no sistema, uma vez que com a ascensão ao topo do perfil, mais oxidado fica o sistema e menos afinidade química o Ni tem para entrar no sistema dessas goetitas, seja de forma absorvida ou mesmo adsorvida.

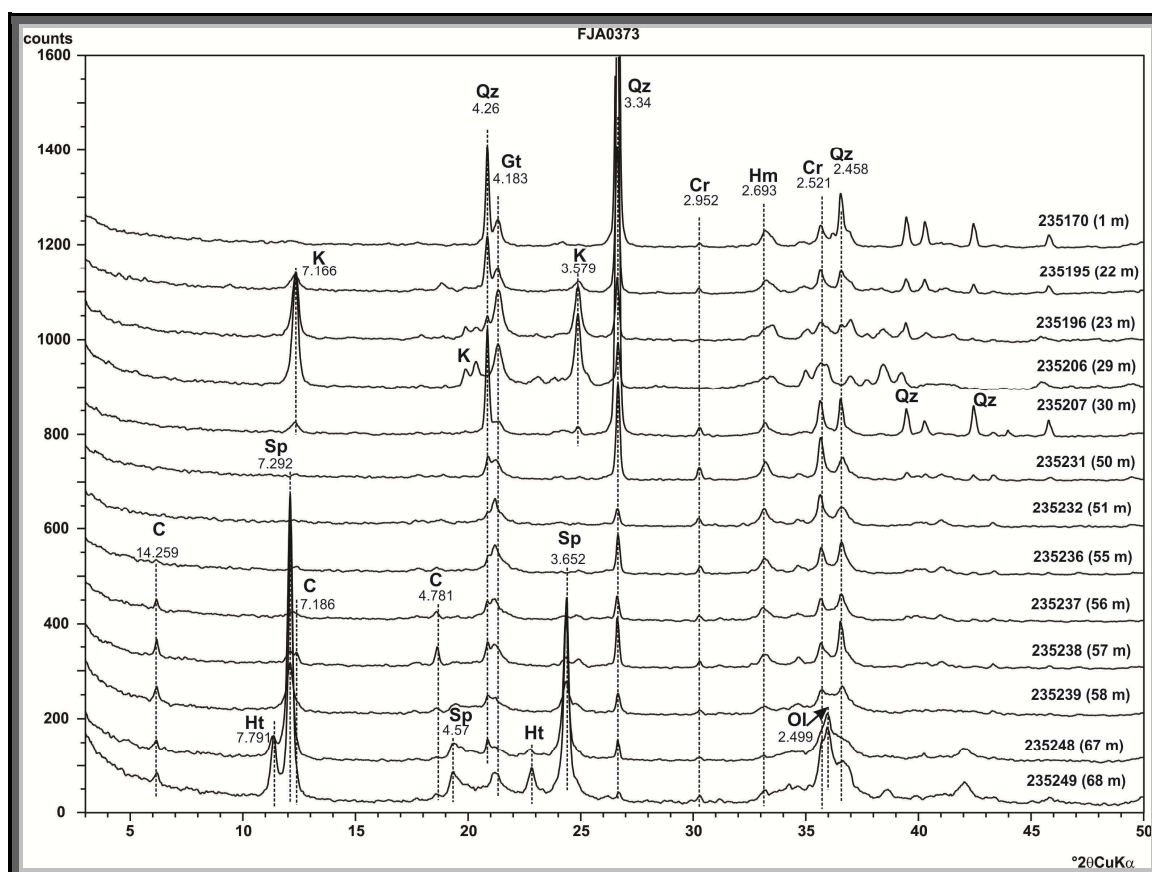
Isto pode ser comprovado quando analisamos os difratogramas encontrados no horizonte ferruginoso (metros 56 ao 48). Nota-se uma grande amplitude na cristalização do quartzo, principalmente os picos 4.260 e 3.340, bem como os demais componentes da mineralogia (hematita, cromita e goetita). Exceção se faz a clorita, a qual desaparece à medida que ascende no sistema, dando lugar a caolinita (**FIG. 96**).

Ao adentrar na zona laterítica silicosa (metro 30) o processo de oxidação continua e pode-se constatar a grande cristalinidade que o quartzo atinge (pico 4.260, 3.340, 2.458). O metro 29, por sua vez, demonstra a grande cristalinidade da caolinita, a qual foi gerada a partir da clorita e dá respaldo ao alto teor de  $Al_2O_3$  encontrado neste metro (28,74%).

Por fim, inserido na carapaça laterítica, a mineralogia se restringe a um predomínio de quartzo, seguido de goetita, hematita e cromita, sem valores econômicos de Ni.

Cabe salientar que apesar das zonas da clorita identificadas no presente trabalho não conterem mineralizações de Ni acima do *cut of* estabelecido, existem relatos de o mesmo material apresentar quantidades significantes de Ni, o que foi identificado em outros furos de sondagem fora do escopo da dissertação.

Ainda neste sentido, a zona laterítica silicosa aqui descrita não obteve mineralização de Ni acima do *cut of*, o que não reflete a realidade do depósito, uma vez que este tipo de material é parte integrante das avaliações de recursos e reservas, onde diversos furos de sonda realizados na área comprovaram sua fertilidade em Ni.



**Figura 96** - Superposição de Difratomogramas (fração < 20µm), segundo a profundidade, do furo de sonda FJA 373. Legenda: Sp – serpentina; C – clorita; Ht – hidrotalcita; Cr – magnetita\cromita\Crespinélio; Ol – olivina; Hm – hematita; Qz – quartzo; Gt - goetita; K - caolinita.

Para obter maior acuracidade na resposta dos difratogramas foi realizada a separação de frações  $< 2\mu\text{m}$ , visando identificar possíveis minerais do grupo das argilas ao longo do perfil.

Observa-se que da base do furo até os 57 metros de profundidade são identificados os minerais do grupo da serpentina (pico 7.328) e goetita (pico 4.183) (**FIG 97**). A partir daí em direção ao topo, há a cristalização da hematita (pico 2.693) e caolinita (picos 7.166 e 3.579), ao mesmo tempo em que a serpentina desaparece e, por fim, quartzo é encontrado na fração estudado a partir do metro 22 até o topo.

Nota-se com destaque a cristalinidade dos minerais do grupo da caolinita em direção ao topo, bem como as goetitas

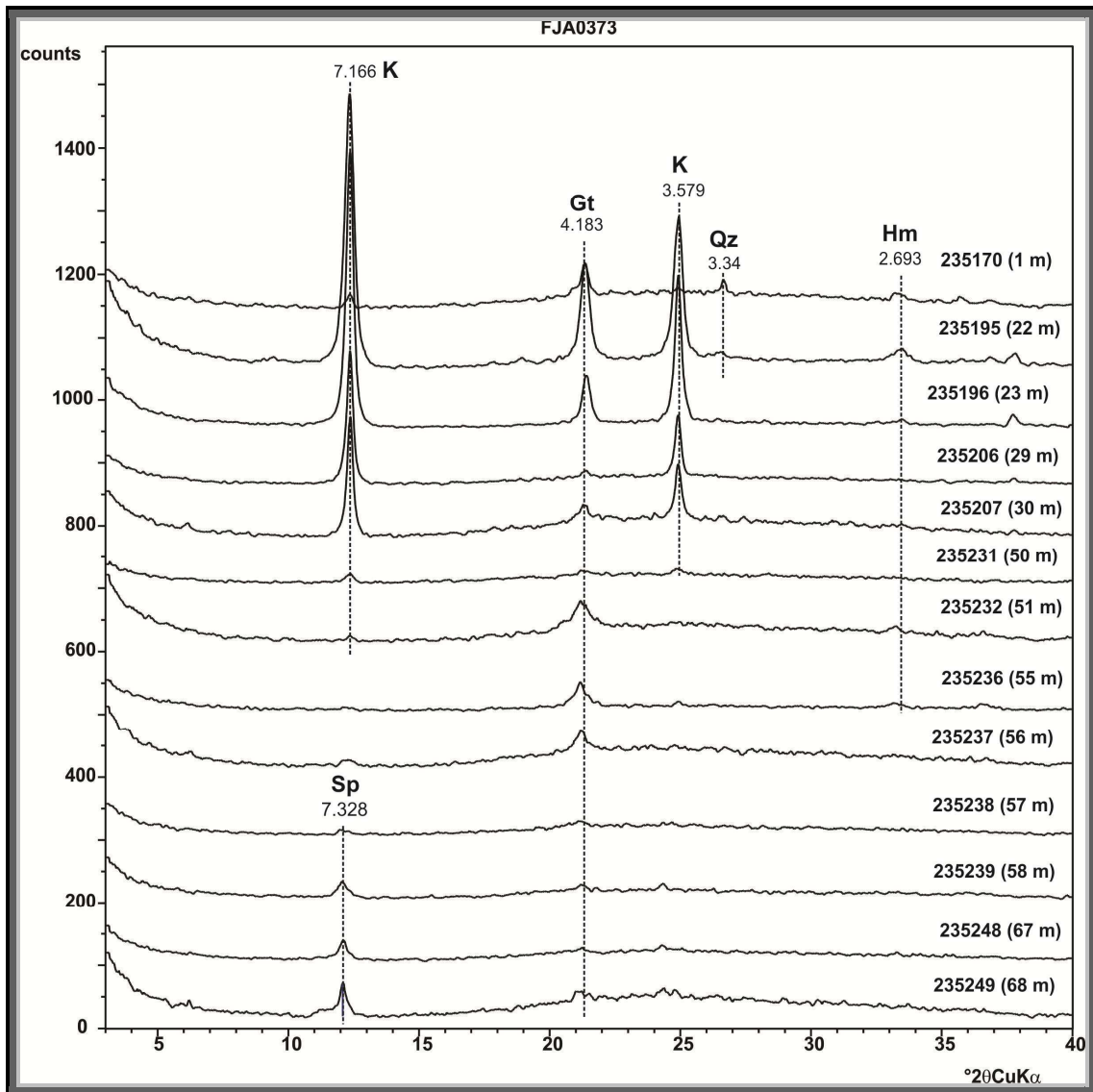
Devido ao alto grau de oxidação em que as amostras que compõem o furo FJA 373 se encontram, desde sua base até o topo da seção, a quantificação da mineralogia modal via petrografia óptica encontra sérias limitações. Assim, a estimativa das porcentagens da paragenese mineral do furo através de estudo semi-quantitativo via DRX se mostra como ferramenta de alto potencial.

A **Figura 98** representa graficamente a variação semi-quantitativa da mineralogia ao longo do furo.

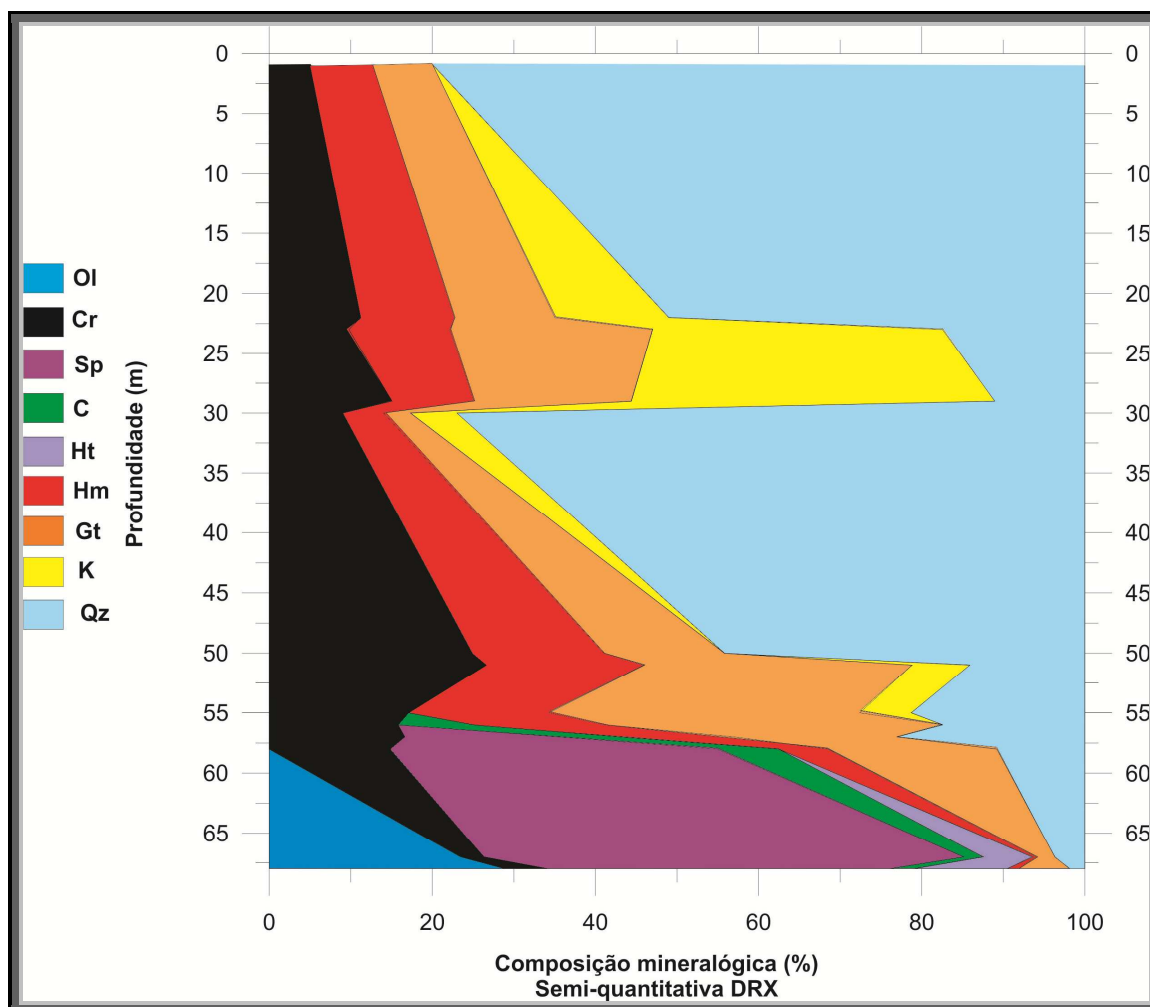
Percebe-se que no horizonte de maior concentração de Ni de alto teor do furo (66m a 56m), a serpentina se mantém como principal destaque na modal mineralógica, contudo os óxidos iniciam uma grande expansão, ao mesmo tempo em que o quartzo começa a substituir a serpentina, a qual diminui gradualmente até o topo.

Outro destaque na avaliação é o pico de caolinita concomitante com a zona da clorita, e o grande predomínio de quartzo a partir do metro 50 até o topo do furo.





**Figura 97** - Mosaico de Difrátogramas (fração < 2 $\mu$ m) do furo de sonda FJA 373. Legenda: Sp – serpentina; K – caolinita; Hm – hematita; Gt - goetita; Qz - quartzo.

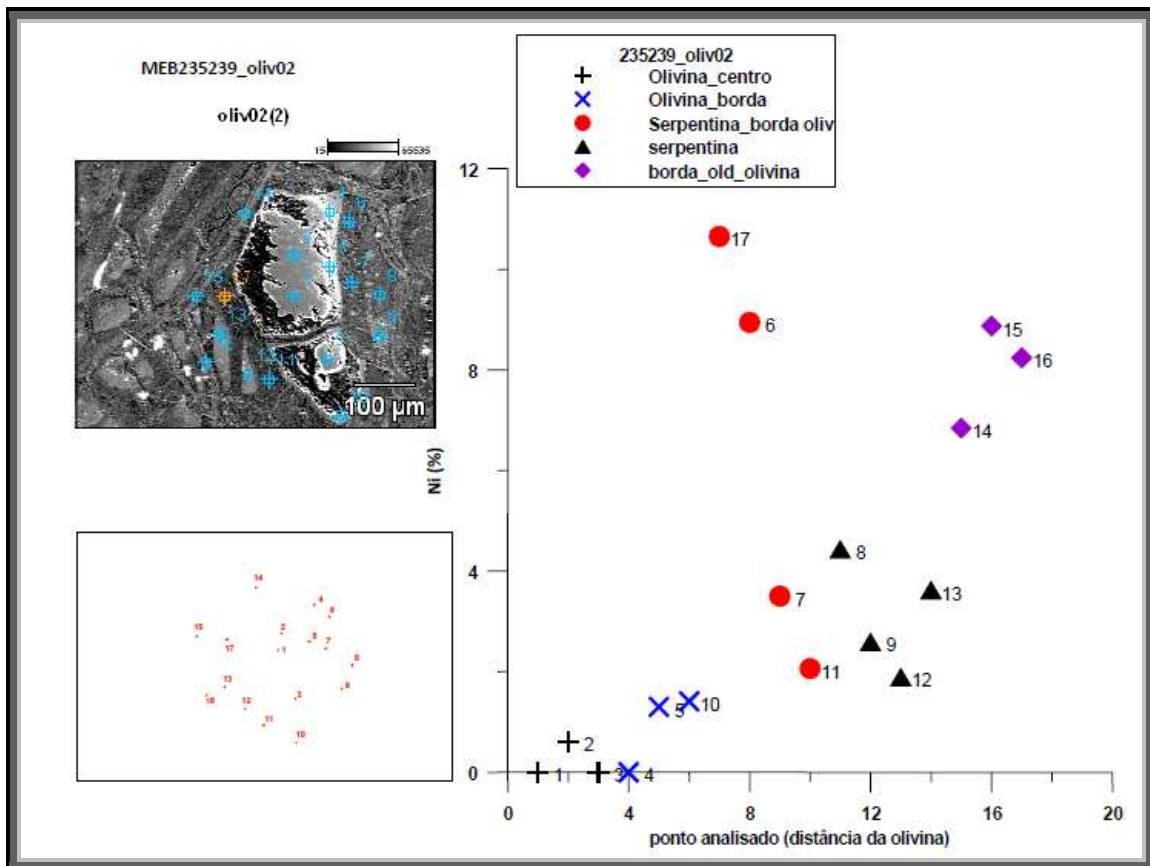


**Figura 98** - Distribuição mineralógica estimada a partir da análise modal semi-quantitativa por meio de DRX (cálculo a partir da integração das áreas e do nível de contagem dos picos identificados dos minerais) do furo de sonda FJA 373. Legenda - Ol: olivina; Cr: magnetita/cromita/cromo-espinélio; Sp: serpentina; C: clorita; Ht: hidrotalcita; Hm: hematita; Gt: goetita; K: caolinita; Qz: quartzo.

### 6.5.6 Microscopia Eletrônica de Varredura

Visando observar mais detalhadamente a distribuição do níquel nas amostras procederam-se análises químicas pontuais diretamente em secções previamente escolhidas nas lâminas petrográficas. Em especial, direcionou-se para secções com grãos de olivina via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), desde o seu centro até os cristais de serpentina circundantes. (Ni, Mg, Si e Fe).

A amostra escolhida é originada do metro 67, inserido no contexto saprolítico, imediatamente acima da rocha fresca, e com teor de Ni no citado metro da ordem de 1,19%.



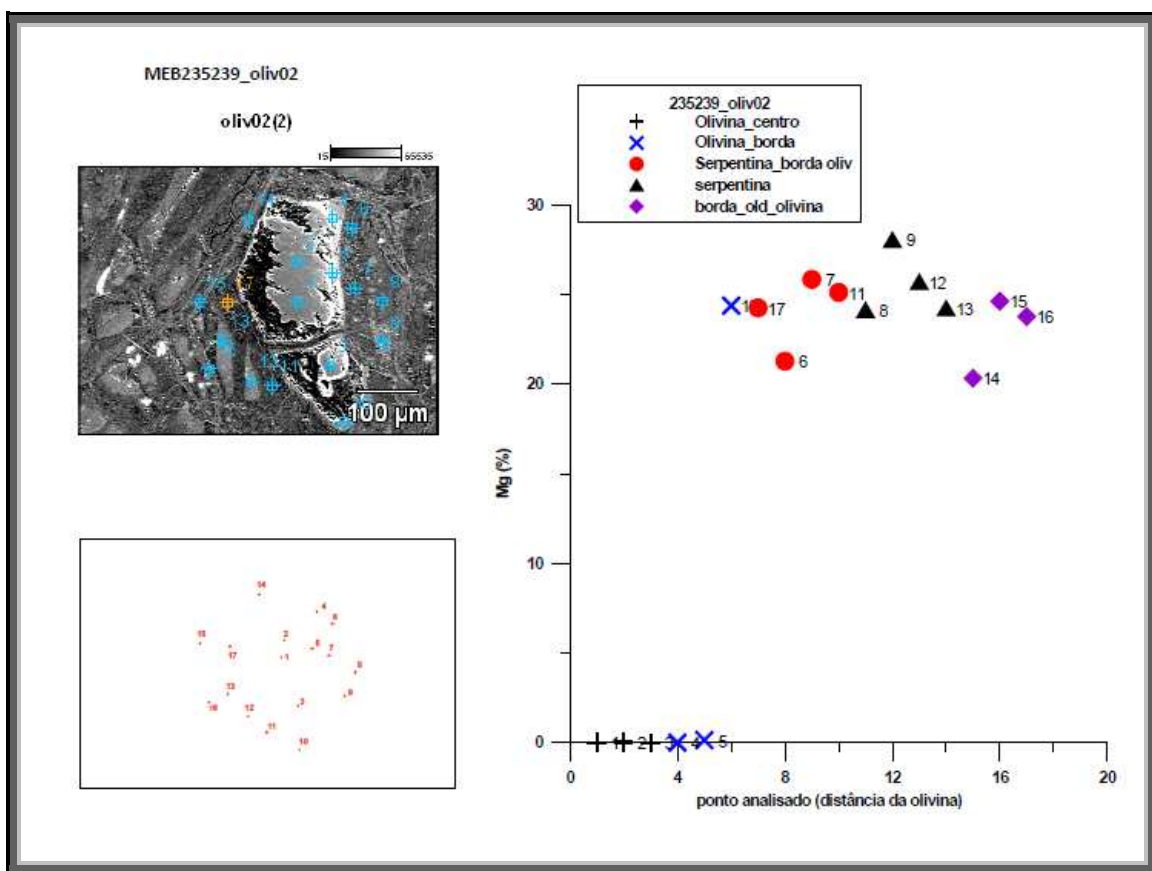
**Figura 99** - Imagem em eletrons retroespalhados da seção analisada e resultados semi-quantitativos obtidos em relação a concentração de níquel.

A disposição dos resultados plotados na figura abaixo (Figura 99) mostra que o Ni migrou praticamente integralmente para os grãos de serpentina, de forma que o elemento inexistente no centro do cristal de olivina, tem um discreto aumento em direção a sua borda, aumenta consideravelmente na antiga borda da olivina (agora substituída por serpentina) e atinge o pico na borda da olivina atual.

Apesar dos dados de MEV aqui apresentados serem de caráter preliminar, nota-se que o pico do Ni foi alcançado na borda de um cristal de olivina, em contato com o cristal de serpentina, justamente onde o processo de oxidação inicia, de forma que

vinculamos a alto teor de Ni neste local a sua possível ligação com minerais oxidados tipo goetitas.

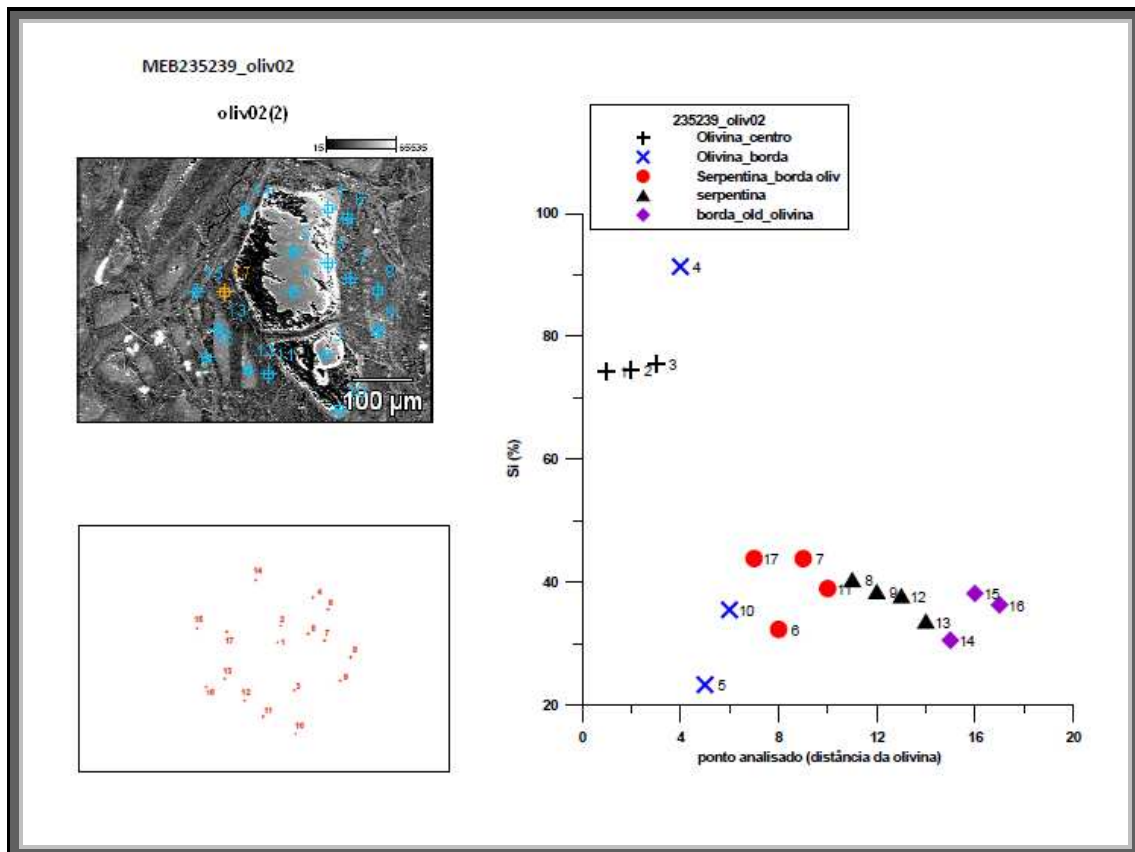
A análise do MgO na amostra igualmente revelou sua total migração a partir da olivina para o meio, visto que tanto o centro da olivina quanto a sua borda apresentam valores próximo a zero. Em contrapartida, os pontos analisados nas serpentinas e entorno dos cristais de olivina apresentaram alta concentração de MgO, representando os sítios de alocação deste elemento nestes estágios iniciais de alteração (**FIG. 100**).



**Figura 100** - Imagem em eletrons retroespalhados da seção analisada e resultados semi-quantitativos obtidos em relação a concentração de magnésio.

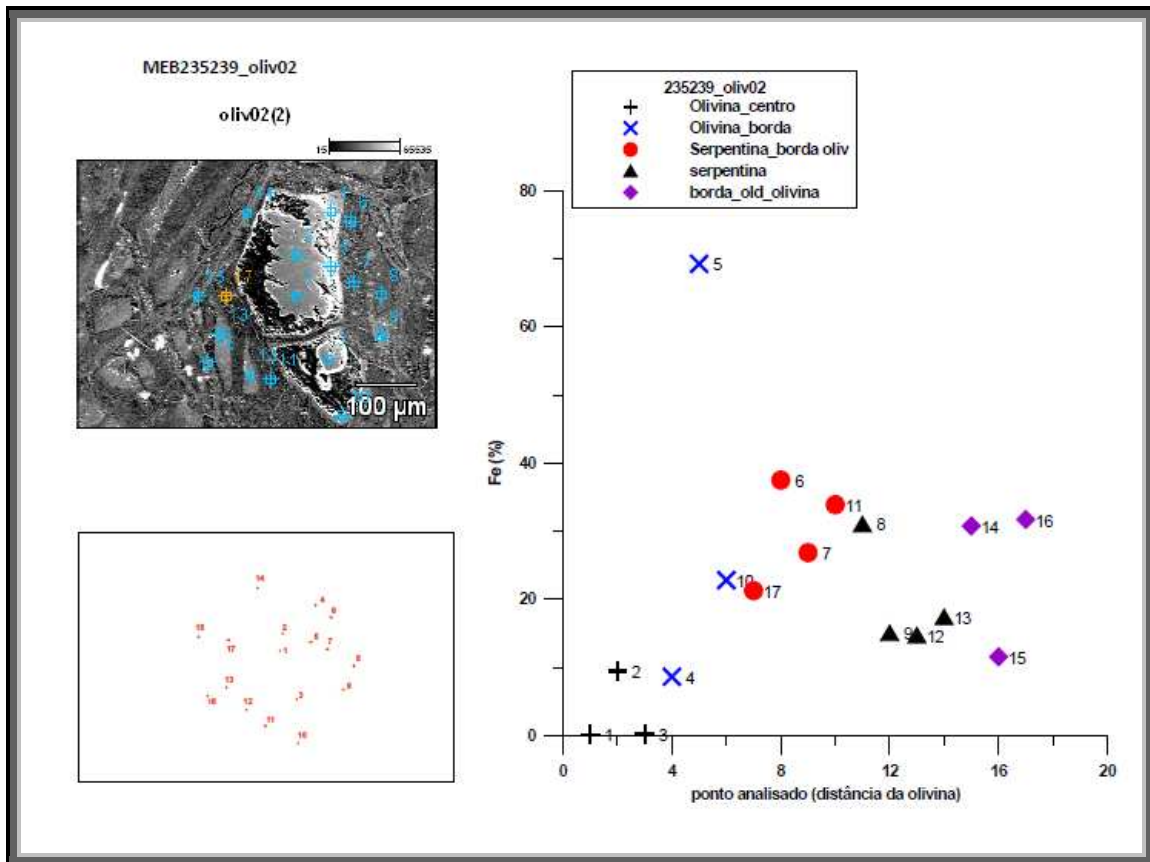
O processo de alteração fica muito claro quando observamos o comportamento da sílica, onde o centro e a borda do cristal de olivina detêm altíssimas concentrações do elemento, enquanto a região circundante ao cristal olivina, bem como os grãos de serpentina mostram concentrações mais modestas, entre 30% e 50% (FIG. 101).

Isto corrobora os dados químicos de rocha total e petrografia, onde a sílica se mostra como elemento resistado ao processo intempérico neste nível de alteração, inclusive em alguns momentos com comportamento muito similar ao Cr.



**Figura 101** - Imagem em eletrons retroespalhados da seção analisada e resultados semi-quantitativos obtidos em relação a concentração de sílica.

Quando observados os valores de  $Fe_2O_3$  (**Figura 102**), percebe-se que o centro da olivina apresenta os menores valores do elemento, o que é esperado devido a maior mobilidade do Fe em ambiente com tendência a redutor, especialmente nas partes mais profundas do perfil de alteração (porém sazonalmente oxidante em função da maior ou menor circulação da água). As concentrações de ferro se deram entre 10% e 40%, proeminentemente nas serpentinas e zonas de contato da serpentina com o grão de olivina, mostrando a trajetória de migração do elemento. Uma amostra apresentou 70% de  $Fe_2O_3$ , o que revela o início de formação de goetitas e hematitas.



**Figura 102** - Imagem em eletrons retroespalhados da seção analisada e resultados semi-quantitativos obtidos em relação a concentração de ferro.

### 6.5.7 Microsonda Eletrônica

As análises via Microsonda Eletrônica não obtiveram o resultado desejado no presente trabalho devido a uma série de problemas técnicos e não operacionalidade do equipamento do Instituto de Geociências da UFRGS durante o desenvolvimento da dissertação que coincidiram com a falta de acesso a técnica em outros laboratórios do país, o que acarretou na não realização da grande maioria das análises previamente definidas, ou falhas no fechamento das amostras (100%) que por ventura tiveram suas análises completas.

Assim, os resultados obtidos não serão usados para discussão na presente dissertação.



## 7 Discussão e Conclusões.

### 7.1 Evolução Geomorfológica e Geodinâmica

A especulação sobre a dinâmica de formação da Serra do Jacaré e sua consecutiva evolução geomorfológica é aqui descrita com base na experiência de campo do autor, bem como a integração dos dados químicos e mineralógicos avaliados no trabalho. As figuras apresentadas neste capítulo são meramente ilustrativas, com o intuito único de expressar graficamente da melhor forma as idéias de mudança do modelado ao longo do tempo.

Inicialmente, nota-se a intrusão do corpo máfico-ultramáfico do Jacaré acompanhando as zonas de cisalhamento orientado segundo os principais *trends* estruturais (NS e E-W) do Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas. A zona de cisalhamento Itacaiunas gerou fases posteriores de fraquezas estruturais, as quais foram responsáveis por diques intrusivos, como um grande dique de gabro que corta o corpo ultramáfico na sua porção central (**FIG 103a**).

O processo erosivo é favorecido pelas falhas, o qual se utiliza das fraquezas estruturais para gerar vales incisos na rocha encaixante, fazendo com que o corpo ultramáfico seja paulatinamente exumado (**FIG. 103b**).

O continuado processo erosivo culmina com a forte dissecação da rocha encaixante e consecutiva exumação do corpo ultramáfico serpentizado, o qual inicia o processo de geração de cristas a partir da silicificação da sua porção superior (**FIG. 103c**).

O sistema de falhas NE-SW que corta o corpo do jacaré facilita o aprofundamento da erosão nestes locais, o que compartimenta o corpo de forma mais evidente, gerando os atualmente conhecidos blocos norte, central e sul (**FIG. 103d**). Desta forma, a primeira inversão de relevo da área que compreende o depósito do Jacaré é concretizada.

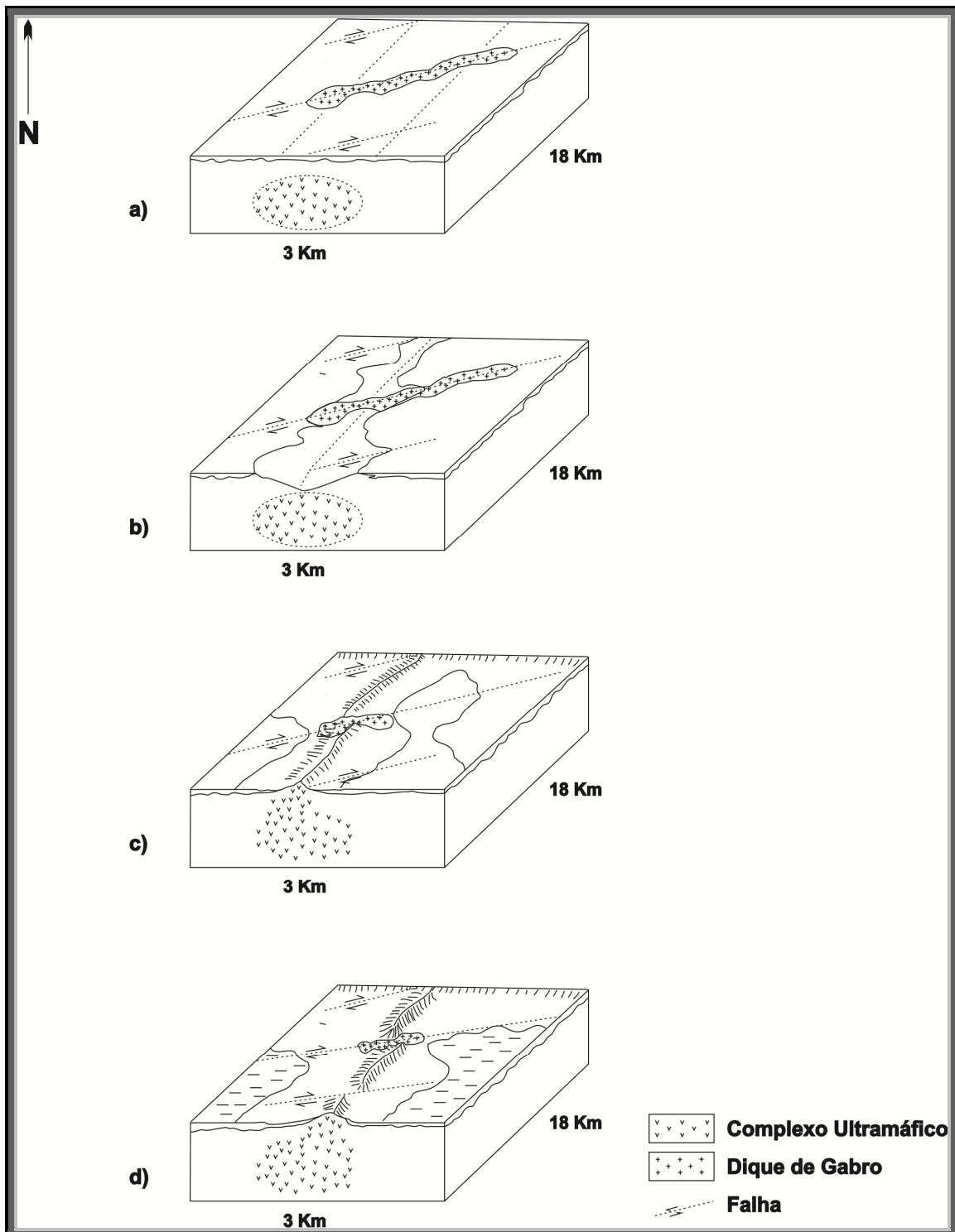


Figura 103 - Modelo de evolução geomorfológica do depósito do Jacaré (1ª inversão de relevo).

A partir do estabelecimento da Serra, onde a crista é mantida devido à silicificação dos serpentinitos, uma série de processos físico-químicos começa a atuar na configuração do modelado geomorfológico.

O processo de alteração atua nos serpentinitos de forma a lixiviar os elementos mais móveis (*e.g.* Mg) e manter os menos móveis (Si, Fe), de tal sorte que a carapaça silexítica é formada onde a textura *boxwork* característica aparece. Por outro lado, a atuação hídrica se faz presente tanto pela água meteórica quanto pelo lençol freático, de sorte que um gradiente iônico é formado na interface de atuação do nível d'água. O citado horizonte de influência da água atua na forma de processar a redução do ferro, principalmente em períodos de chuva, e oxidação do mesmo, proeminentemente em períodos de seca, gerando, assim, as zonas lateríticas ferruginosas sobrepondo zonas mais neutras a básicas, onde se desenvolve o saprolito (**FIG. 104e**).

O continuado processo erosivo e de alteração faz com que as falhas e fraturas se tornem locais de maior percolação de água meteórica e ascensão do freático e, assim, favoreçam o processo de oxidação e redução em porções mais elevadas do perfil de alteração, neste caso, dentro do próprio horizonte silicoso. A porção superior da laterita silicosa, por sua vez, gera uma pequena carapaça laterítica com enriquecimento em Fe e Si, e o rebaixamento topográfico por erosão diferencial se dá de forma constante. Este é o momento geomorfológico atual no bloco norte do Depósito do Jacaré (**FIG.104f**).

A zona laterítica silicosa que até o momento preserva o relevo do alto topográfico, vai sofrendo desgaste erosivo físico e químico até o momento em que praticamente desaparece (**FIG. 104g**). Ao mesmo tempo, o ferro alcança tal grau de oxidação que o Fe<sup>3+</sup> (pouco móvel) cristaliza nódulos até sua evolução a carapaças, formando, assim, a "capa de ferro", a qual serve de anteparo geomorfológico para os processos erosivos na forma de uma barreira química e mineral.

Na **Figura 104h**, tem-se a total dissolução da laterita silicosa e franco desenvolvimento, do topo para a base, de "capa de ferro", laterita ferruginosa e saprolito. Desta forma, a "capa de ferro" favorece a formação de relevos planos, porém mais resistentes ao processo de erosão do que a rocha encaixante. Este é o momento geomorfológico atual no bloco sul do Depósito do Jacaré. A evolução natural destas formas

é o desenvolvimento de mesas e rebaixamento da encaixante, como demonstrado na FIG. 104i.

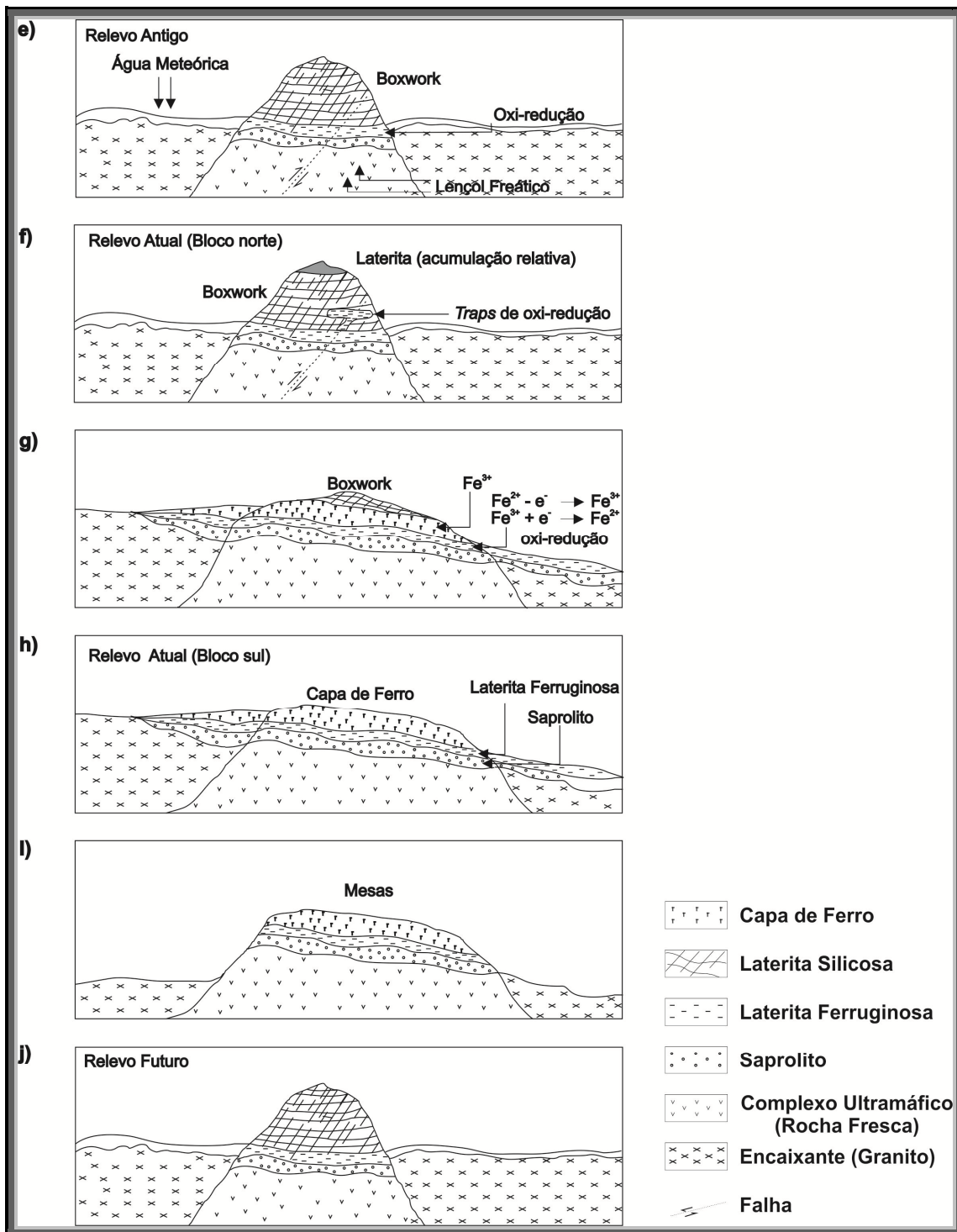


Figura 104 - Modelo de evolução geomorfológica do depósito do Jacaré (2ª inversão de relevo).

Por fim, o processo erosivo contínuo irá culminar, no futuro, com a lixiviação do  $\text{Fe}^{3+}$  e consecutivamente a "capa de ferro", expondo, novamente, o protólito ultramáfico, de sorte que toda a atividade de erosão, trocas iônicas, substituição e modelamento geomorfológico reiniciam de forma cíclica e, assim, completando a segunda inversão e relevo (**FIG. 104J**).

## 7.2 Evolução Mineralógica e Geoquímica

A análise dos resultados geoquímicos e mineralógicos envolvendo as amostras do Depósito do Jacaré revelou similaridades quanto aos seus constituintes, porém um tanto quanto diferenciada daquilo que se esperava de porções portadores de alto teor de Ni.

Os horizontes saprolíticos são, de fato, os portadores das maiores concentrações de Ni e este, por sua vez, apresenta os minerais do grupo da serpentina como seus detentores principais. As serpentinas tem a textura *interpenetrating* como a mais presente em suas associações, seguida por *interlocking*, veios asbestiformes e não asbestiformes e, em menor grau de ocorrência, textura *hourglass* e *mesh*.

Todavia, ficou clara a participação dos minerais oxidados como goetita ( $\alpha\text{FeO.OH}$ ) e hematita ( $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) nas zonas de alta concentração de Ni, onde este se ligou de forma absorvida e/ou adsorvida junto aos minerais supra-citados.

A partir da alteração dos minerais constituintes das rochas ultramáficas, o desenvolvimento dos óxidos e hidróxidos se deu através de processo de oxidação e redução comuns em ambientes tropicais como o da área do depósito, onde a sazonalidade climática, ou seja, períodos definidos de chuva e períodos definidos de seca geram o gradiente geoquímico ideal para as trocas iônicas. Ao longo do perfil de alteração, o ambiente abaixo do nível d'água é predominantemente redutor, onde nesta situação o ferro ocorre de forma reduzida:  $\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- = \text{Fe}^{2+}$ , favorecendo a sua migração em solução. Da mesma forma o níquel neste ambiente apresenta um comportamento muito próximo ao do  $\text{Fe}^{2+}$ . Nas porções acima do nível d'água no perfil, o qual apresenta um rebaixamento de se nível nos períodos do ano mais secos, o ambiente é favorável para a oxidação do ferro:  $\text{Fe}^{2+} - \text{e}^- =$

$\text{Fe}^{3+}$  (parte superior do perfil de alteração), fixando-o inicialmente na forma de polímeros amorfos que evoluem para formas mais estáveis como as goetitas e hematitas (Pedro & Melfi, 1983). Neste momento, o Ni dissociado em solução pode aderir a estes polímeros, normalmente de forma adsorvida, gerando Ni-goetitas.

Devido ao lento processo de cristalização das hematitas, diversos compostos intermediários são encontrados na natureza (protohematitas), os quais possuem diferentes capacidades de absorção de íons, entre eles os enriquecidos em Ni. Desta forma, a não detecção de hematita via DRX em algumas porções dos horizontes mineralizados, porém com identificação em petrografia óptica, se dá justamente devido a esta característica de formação das hematitas.

À medida que ascende no perfil até o topo, os minerais oxidados passam a compor a grande maioria da mineralogia, sendo responsáveis pela fixação do Ni nos horizontes de forma inversamente proporcional a diminuição do pH no ambiente. Assim, quando o alterito atinge sua posição mais superior (metro1) a condição de oxidação não permite mais a fixação do  $\text{Ni}^{2+}$  com o  $\text{Fe}^{3+}$ , o que o deixa móvel novamente, lixiviando para áreas adjacentes ou mesmo permitindo sua reintegração ao sistema, através de migração em direção a base do perfil utilizando a água meteórica.

Quanto mais próximo da superfície, em zonas secas e com tendência a pH ácido, o processo de oxidação é dominante, enriquecendo o sistema em ferro e formando nódulos e carapaças lateríticas, podendo evoluir até "chapéu de ferro".

O processo de oxidação e redução foi favorecido pela geologia estrutural, a qual permitiu uma maior percolação de fluidos meteóricos até a zona de redução, o que altera significativamente a atividade iônica no local e, consecutivamente, o poder de absorção do material.

Assim, ficou evidenciado no presente trabalho que sistemas de falhas e fraturas ocorrem intensamente ao longo do depósito, favorecendo a maior concentração de Ni ligado de forma adsorvida ou adsorvida nos gels de Si-Fe e, principalmente nos óxidos e proto-óxidos gerados a partir do processo de alteração.

Em contrapartida, os chamados "minerais garnieríticos", apesar de existirem no depósito e estarem associados preferencialmente em zonas de falhas e fraturas, não apareceram em zonas do perfil de alteração dos furos analisados na presente dissertação, o



que descarta esta fase mineral como portadora principal das zonas de alto teor em Ni, como pensado até o momento.

A ausência ou baixa concentração de talco nos remete a rochas essencialmente duníticas como formadoras do complexo, onde a fase fluida possuía concentrações de CO<sub>2</sub> extremamente baixas, inibindo a formação expressiva de talco.

Entretanto, horizontes enriquecidos em clorita (aluminosos) foram identificados e, sua evolução para caolinita e gibsitita ficou clara, ocorrendo de forma rítmica e intercalada, como no furo FJA 373. A interpretação dada a estes horizontes aluminosos é perceptivelmente litológica, herdado de diferenciações da rocha ultramáfica, onde a cristalização de termos mais fracionados, tal como peridotitos feldspáticos e/ou gabros, é a explicação mais coerente para os dados existentes.

Assim, as características mineralógicas e geoquímicas do manto de alteração preservado no furo FJA 337 e, principalmente no furo FJA 373, são interpretadas como derivadas e herdadas do acamamento magmático primário do depósito, comparando-se com qualquer especulação ofiolítica que por ventura possa existir.

O balanço de massa realizado com os dados químicos dos furos selecionados mostrou que o enriquecimento do alto teor se dá de forma relativa, ou seja, através da lixiviação dos elementos mais móveis e concentração dos menos móveis, entre eles o Ni quando as condições do meio (pH, Eh) permitem. Esta conclusão foi corroborado em escala petrográfica e pelos dados de MEV. Única exceção ocorreu no furo FJA 245, o qual mostrou que os dois primeiros metros do topo do perfil possuem concentrações em Ni através de enriquecimento absoluto, provavelmente com aporte de material coluvionar das zonas topograficamente mais elevadas.

O cruzamento das informações químicas e mineralógicas mostrou que nos furos FJA 146 e FJA 245 há uma relação inversamente proporcional do teor de Ni e a existência de clorita, de tal sorte que os teores de Ni concentram no perfil a partir da diminuição ou até extinção da clorita. Em contrapartida, a existência das cloritas nos demais furos não tem relação direta com o teor de Ni, de tal sorte que qualquer associação entre os teores de Ni e a cristalização de minerais do grupo das cloritas não apresenta correspondência direta.

Através da DRX foi possível identificar minerais do grupo das hidrotalcitas, os quais se caracterizam como carbonatos magnesianos com possibilidade de conter Ni em sua estrutura. A ocorrência destes minerais reforça a existência de um ambiente com tendências neutras a alcalinas com restrição a circulação de água, favorecendo a saturação da mesma com os elementos mais solúveis (*e.g.* Mg), típica dos horizontes de base dos furos onde o mineral foi identificado e de ambientes tropicais como o de Carajás.

A ausência de argilominerais do grupo das esmectitas na base dos perfis de alteração dificultou a fixação do Ni no ambiente secundário, diferentemente ao observado em outros depósitos de Ni laterítico (*e.g.* Murrin Murrin)

Assim, verificou-se na presente dissertação que o Ni de alto teor está concentrado essencialmente em serpentinas junto ao horizonte saprolítico, favorecendo a rota pirometalúrgica para a produção da liga ferro-níquel. Porém, existe marcante concentração de níquel em meio aos óxidos existentes nestes mesmos horizontes, de tal forma que a quantidade do Ni nestas estruturas oxidadas permanece desconhecida, assim, merecendo estudos futuros mais detalhados.

A identificação da relativa alta concentração de Ni em óxidos num horizonte saprolítico, impacta diretamente no processo de pré-calcinação e calcinação do material em escala de planta, uma vez que o consumo de energia para realizar tal atividade pode ser aumentado consideravelmente, acarretando em custos adicionais de operação.

As lateritas silicosas e ferruginosas não apresentaram divergências na sua composição quando comparadas aos depósitos minerais de mesma característica conhecidos mundialmente, assim, podendo ser inseridas nas rotas hidrometalúrgicas sem maiores complicações do ponto de vista químico e mineralógico.

## 8 Bibliografia

ALEVA, G.J.J. (compiler) Laterites – Concepts, geology, morphology and chemistry. Netherlands: ISRIC, 1994, cap. 4, p. 13.

ALMEIDA, F.F.M. de *et al.* Províncias Estruturais Brasileiras. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, Campina Grande, 1977. Ata. Campina Grande, Sociedade Brasileira de Geologia, 1977.499p (Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo do Nordeste, 6) p. 363-91.

ARAÚJO, O. J. B. *et al.* – A megaestrutura Arqueana da Folha Serra dos Carajás. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE GEOLOGIA, 7, 1988, Belém, Anais do Belém: SBG, 1988, p. 324-338.

ARAÚJO, O. J. B., MAIA, R. G. N.(org.). Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: Programa Grande Carajás. Serra dos Carajás-Folha SB.22-Z-A, Estado do Pará. Brasília: DNPM/CPRM, p. 1991, 164.

BRAND, N. W., BUTT, C. R. M., ELIAS, M. 1998. Nickel laterites: classification and features. AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, 17 (4), p. 81-88.

BRINDLEY G. M. 1978. The structure and chemistry of hydrous nickel-containing silicate and aluminate minerals. Bull. Bur. Rech. Géol. Min., sect. II, 3, p. 233-245.

BROOKINS, D.G. 1987. Eh-pH Diagrams for Geochemistry. Springer-Verlag. pp 176.

BUCHER, K., FREY, M. 1994. Petrogenesis of metamorphic rocks. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 6<sup>th</sup> ed, pp. 341.

BUTT, C. R. M., 1979. Geochemistry of a pseudo-gossan developed on a black shale dolerite contact, Killara, Western Austrália. *Journal of Geochemical Exploration*, 11, p. 131-156.

CARLON, A.J., MOLINARI, L., QUEIROZ, R., & FELIX DE MELO, J. 2006. The discovery and exploration of the Jacaré (“Alligator”) nickel laterite-saprolite deposit, Para State, Brazil. AESC 2006, Melbourne, Australia.

CORDANI, U.G., TASSINARI, C.C.G., TEIXEIRA, W, BASEI, M.A.S., KAWASHITA, K. 1979. Evolução da Amazônia com base nos dados geocronológicos. In: *Actas do II Congresso Chileno*, Arica, Chile, v.4, p.137- 148.

CPRM, 1991. Serra dos Carajás. Folha SB.22-Z-A Estado do Pará. Brasília DNPM/CPRM, PP.136 . (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil).

CPRM. 1997. São Felix do Xingu. Folha SB.22-Y-B. Estado do Pará. Belém, DNPM/CPRM, pp. 344 . (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil).

CPRM. 2001. Prospecção Geológica e Geoquímica nos Corpos Máfico-Ultramáficos da Suíte Intrusiva Catete – Pará. MME/CPRM, pp. 145. Projeto Platina e Associados.

DALVI, Ashok D.; BACON, Gordon W., OSBORNE, Robert C. The Past and the Future of Nickel Laterites. In: *PDAC 2004 International Convention – Trade Show & Investors Exchange*. 2004

DOCEGEO - Província Mineral de Carajás; litoestratigrafia e principais depósitos minerais. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 35 1988, Belém. Anexos aos Anais.... Belém: CVRD/SBG, 1988, pp. 165

D’HOORE, J. L., 1954. L’accumulation des sesquioxides libres dans les sols tropicaux INEAC Serie Sc. N° 62, pp.131. PhD Thesis, University Gent, Belgium.

---

DOLABELA, A. F. e GUENAGA, C.M.L. - Projeto Morro Pelado, Lixiviação em Pilha de Minério de Ouro - II Congresso Brasileiro de Mineração, Coletânea de Trabalhos Técnicos, p. 379-393, IBRAM, 1987.

DUCLOUX, J. MEUNIER, A. E VELDE, B. 1976. Smectite, chlorite and regular interlayered chlorite-vermiculite in soils developed on a small serpentinite body Massif Central, France. *Clay Minerals* 11. p 121-135.

ELIAS, M. 2004. Nickel lateritic deposits – geological overview, resources and exploitation. In: *Giant Ore Deposits: Characteristics, genesis and exploration*. CODES Special Publication 4, Centre for Ore Deposit Research, University of Tasmania, p. 205-220.

FERREIRA FILHO, C. F., et al. Contribuições à Geologia da Amazônia.. In: *IX Simpósio de Geologia da Amazônia*, 5, 2007, Belém: SBG, Núcleo Norte, 2007, v. 5.

FORMOSO, M. L. L., 2006. Some topics on geochemistry of weathering: a review. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, N° 78 (4), p. 809-820.

GLEESON, S.A., BUTT, C.R.M. AND ELIAS, M. 2003. Nickel Laterites: a review, *Society of Economic Geologists newsletter*, 54, p. 1-16.

HIRATA, W. K., et al. Geologia regional da Província Mineral de Carajás. In: *SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA*, 1, 1982, Belém. *Anais do Belém: SBG, Núcleo Norte*, 1982, v. 1, p. 100 – 110. il.

HOSTETLER, P. B. COLEMAN, R. G., MUMPTON, F. A., EVANS, B. W. 1966. Brucite in Alpine serpentinites. *Am. Mineral.* 51, p. 75-98.

HOBBS, B. E., MEANS, W.D. e WILLIAMS P.F.1981 *Geologia Estrutural*, 1a. edição Barcelona, Edicione Omeg. pp. 518.

MACAMBIRA, E. B. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: Programa Grande Carajás. São Félix do Xingu - Folha SB-22-Y-B, Estado do Pará. Brasília: DNPM/CPRM, 1996, pp. 384.

MACAMBIRA, M. J. B. & LAFON, J. M. 1995. Geocronologia da província Mineral de Carajás, síntese dos dados e novos desafios. Bol. Mus. Par. Emílio Goeldi, 7, p. 263-288.

MACHADO, N., LINDENMAYER, Z. G., KROUGH, T. E., LINDENMAYER, D. H. 1991. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon Shield, Brazil. Precambrian Research, 49, p. 1-26.

MARANHÃ, O R.J.L. - 1983 - Introdução à Pesquisa Mineral 2a. edição, Fortaleza, Banco do Nordeste do Brasil, pp. 682.

MARKER, A., FRIEDRICH, G. CARVALHO, A. E MELFI, A. 1991. Control of the distribution of Mn, Co, Zn, Zr, Ti e REEs during the evolution of lateritic covers above ultramafic complexes. Journal of Geochemical Exploration, 40. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, p. 361-383.

MEDEIROS, H. de. – Petrologia da porção leste do Maciço Granodiorítico de Rio Maria, Sudoeste do Pará (Tese, M. C. Geológicas, UFPa) Belém 1987, il.

MELFI, A. J., TRESCASES, J. J., CARVALHO, A. OLIVEIRA, S. M. B., RIBEIRO FILHO, E., FORMOSO, M. L. L. 1988. The lateritic ore deposits of Brazil. Sci. Géol., Bull., 41, 1, p. 5 – 36. Strasbourg.

MELLO, KRAY SADI, 2007. Intemperismo Tropical – Lateritas. Monografia para exame de qualificação, PP. 45 . Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MME-DNPM - 1985 - Métodos e Técnicas de Pesquisa Mineral, 1a. edição, PLANFAP, Brasília/DF, pp. 355.



MERRILL, G. P., 1887. A treatise on rocks, rock-weathering and soils. McMillan, New York, pp. 411.

MOODY, J. B. 1976. Serpentinization: a review. *Lithos* 9, p. 125-138

MOODY, J. B. 1976. An experimental study on the serpentinization of iron-bearing olivines. *The Canadian Mineralogist*, vol. 14, n 4, p. 462-478.

NAHON, D. 1986, Evolution of iron crusts in tropical landscapes in Coleman, S.N., and Dethier, D.P., eds., Rates of chemical weathering of rocks and minerals: New York, Academic Press, p. 169-191.

OLDFIELD, S. 2007. The magmatic fertility for sulphide mineralisation of the, layered igneous intrusion, laterite protoliths of Central Brazil. Anglo American – Internal Report.

OLIVEIRA, S. M. B., TRESCASES, J. J., MELFI, J. A. 1992. Lateritic nickel deposits of Brazil. *Mineralium Deposita*, . 27, p. 137-146.

PEDRO, G. & MELFI A. J., 1983. The superficial alteration in tropical regions and laterization phenomena. In: A. J. Melfi & A. Carvalho, Eds., Laterisation Processes, Proc. II Int. Sem. On Laterisation processes, 1983, São Paulo, Brazil, p. 3-13.

PORTO, C. G., HALE, M. 1995. Gold Redistribution in the Stone Line Lateritic Profile of the Posse Deposit, Central Brazil. *Economic Geology*, vol. 90, p. 308-321.

SHELLMAN, W. 1989. Allochthonous surface alteration of Ni laterites, *Chemical Geology*, 74, p. 351-364.

---

SILVA, G. H. da et. al. - FOLHA SB.22 – Araguaia e parte da Folha SC.22 - Tocantins, geologia, geomorfologia, solos e uso potencial da terra. Rio de Janeiro. Projeto RADAM, 1974 (Levantamentos de Recursos Naturais)

SOARES, A. D. V. et. al. – Geologia regional das cabeceiras do rio Aquiri, extremo oeste da Província de Carajás-Pa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, 1988, Belém: Anais do. Belém : SBG, 1988. p. 2704 - 2712.

STRECKEISEN, A. 1967. Classification and Nomenclature of Igneous Rocks. N.Jb.Mineral.Abh.,107(2), p. 144-214.

TEIXEIRA, W.TASSINARI, C.C.G.; CORDANI, U.G. and KAWASHITA, K.1989. A Review of the geochronology of the Amazon Craton: tectonic implications, Precambrian, res, 42, p. 213-227.

TRESCASES, JJ. 1975. L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiqes en zonotropical – Formation des gesiments nickélfères de Nouvelle-Calédonie. Tese de Doutorado, Mémoires O.R.S.T.O.M. N° 78, Paris, França.

WAGER, L. R., BROWN, G. M. 1968. Layered Igneous Rocks. Oliver and Boyd Ltd. Edinburgh, pp. 588.

WHITTAKER, E. J. W., WICKS, F. J. 1970. Chemical differences among the serpentine polymorphs: a discussion. American Mineral. 55, p. 1025-1047.

WICKS, F. J., WHITTAKER, E. J. W. 1977. Serpentine textures and Serpentinization. Canadian Mineralogist, vol. 15, p. 459-488.

WYLLIE, P. J. 1967. Ultramafic and related rocks. Wiley, New York, pp. 464.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Instituto de Geociências  
Programa de Pós Graduação em Geociências

---

## **ANEXO I - ANÁLISES QUÍMICAS**

FURO	DE	ATÉ	AMOSTRA	Ni(%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe(%)	SiO <sub>2</sub> (%)	MgO(%)	Co(%)	Cu(%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO(%)	MnO(%)	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O(%)	K <sub>2</sub> O(%)	TiO <sub>2</sub> (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Ba(ppm)	Sr(ppm)	Zr(ppm)	Y(ppm)	Nb(ppm)	Sc(ppm)
FJA046	0.00	1.00	183818	1.04	77.99	57.71	5.84	0.67	0.16	0.01	5.25	0.01	1.02	1799.00	0.01	0.04	0.23	0.09	114.00	5.00	43.00	19.00	26.00	36.00
	1.00	2.00	183819	2.00	25.84	19.12	30.96	26.41	0.05	0.00	1.34	0.01	0.35	1094.00	0.01	0.04	0.08	0.07	38.00	5.00	8.00	13.00	14.00	12.00
	2.00	3.00	183820	2.30	13.53	10.01	37.34	33.11	0.02	0.00	0.34	0.01	0.16	0.59	0.01	0.04	0.01	0.03	16.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
	3.00	4.00	183821	2.22	15.29	11.31	35.43	31.35	0.02	0.00	1.48	0.01	0.16	2001.00	0.01	0.04	0.02	0.03	9.00	5.00	5.00	5.00	6.00	7.00
	4.00	5.00	183822	2.32	23.07	17.07	32.67	28.23	0.04	0.00	0.58	0.01	0.25	1056.00	0.01	0.04	0.02	0.06	14.00	5.00	5.00	24.00	9.00	9.00
	5.00	6.00	183823	2.18	16.86	12.48	35.97	31.02	0.03	0.00	0.63	0.01	0.19	0.70	0.01	0.04	0.03	0.04	9.00	5.00	5.00	12.00	11.00	7.00
	6.00	7.00	183824	2.42	12.99	9.61	37.90	32.71	0.02	0.00	0.60	0.01	0.15	0.55	0.01	0.04	0.03	0.03	9.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
	7.00	8.00	183825	2.06	12.11	8.96	38.68	33.66	0.02	0.00	0.61	0.01	0.13	0.44	0.01	0.04	0.03	0.01	6.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
	8.00	9.00	183826	1.67	12.44	9.21	39.13	33.49	0.02	0.00	0.22	0.01	0.14	0.51	0.01	0.04	0.01	0.03	8.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
	9.00	10.00	183827	1.53	11.88	8.79	38.93	34.05	0.02	0.00	0.52	0.01	0.12	0.47	0.01	0.04	0.02	0.03	7.00	5.00	5.00	5.00	11.00	5.00
	10.00	11.00	183828	1.24	4.18	3.09	38.85	28.99	0.01	0.00	13.18	0.01	0.12	0.16	0.01	0.04	0.79	0.02	21.00	5.00	63.00	5.00	5.00	14.00
	11.00	12.00	183829	1.16	4.67	3.46	40.02	30.66	0.01	0.00	9.97	0.02	0.14	0.19	0.01	0.04	0.59	0.02	11.00	5.00	47.00	5.00	7.00	14.00
	12.00	13.00	183830	0.44	8.86	6.56	40.21	36.96	0.01	0.00	0.43	0.01	0.09	0.33	0.01	0.04	0.02	0.02	7.00	5.00	5.00	5.00	5.00	4.00
	13.00	14.00	183835	0.46	10.24	7.58	41.40	34.90	0.02	0.00	0.18	0.01	0.13	0.37	0.01	0.04	0.01	0.03	7.00	5.00	5.00	5.00	5.00	4.00
	14.00	15.00	183836	0.38	8.64	6.39	41.36	36.23	0.01	0.00	0.17	0.03	0.11	0.31	0.01	0.04	0.01	0.04	8.00	5.00	5.00	5.00	5.00	4.00

FURO	DE	ATÉ	AMOSTRA	Ni(%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe(%)	SiO <sub>2</sub> (%)	MgO(%)	Co(%)	Cu(%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO(%)	MnO(%)	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O(%)	K <sub>2</sub> O(%)	TiO <sub>2</sub> (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Ba(ppm)	Sr(ppm)	Zr(ppm)	Y(ppm)	Nb(ppm)	Sc(ppm)
FJA 245	0.00	1.00	201181	2.12	24.94	18.46	32.18	25.81	0.05	0.00	1.13	0.01	0.35	1.82	0.01	0.04	0.04	0.01	29.00	5.00	5.00	5.00	5.00	9.00
	1.00	2.00	201182	2.14	23.40	17.32	32.18	27.36	0.04	0.00	0.84	0.01	0.30	1.46	0.01	0.04	0.03	0.03	23.00	5.00	5.00	5.00	5.00	8.00
	2.00	3.00	201183	2.21	24.17	17.89	31.54	27.28	0.04	0.00	0.61	0.01	0.28	1.09	0.01	0.04	0.02	0.02	10.00	5.00	5.00	5.00	5.00	8.00
	3.00	4.00	201184	2.33	19.39	14.35	34.24	29.91	0.03	0.00	0.47	0.01	0.22	0.72	0.01	0.04	0.02	0.01	10.00	5.00	5.00	5.00	5.00	7.00
	4.00	5.00	201185	2.48	20.67	15.30	33.66	29.05	0.04	0.00	0.40	0.01	0.24	0.73	0.01	0.04	0.02	0.03	7.00	5.00	5.00	5.00	5.00	7.00
	5.00	6.00	201186	2.57	17.22	12.74	35.44	30.99	0.03	0.00	0.28	0.01	0.20	0.61	0.01	0.04	0.01	0.02	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	6.00
	6.00	7.00	201187	2.47	24.83	18.37	31.79	27.39	0.04	0.00	0.42	0.01	0.29	0.77	0.01	0.04	0.02	0.01	23.00	5.00	5.00	5.00	6.00	8.00
	7.00	8.00	201188	2.23	19.39	14.35	33.99	30.25	0.03	0.00	0.35	0.01	0.19	0.59	0.01	0.04	0.01	0.01	22.00	5.00	5.00	5.00	5.00	7.00
	8.00	9.00	201189	2.55	23.88	17.67	32.18	27.55	0.04	0.00	0.51	0.01	0.27	0.78	0.01	0.04	0.02	0.02	8.00	5.00	5.00	5.00	5.00	8.00
	9.00	10.00	201190	2.56	25.22	18.66	31.53	26.91	0.05	0.00	0.61	0.01	0.30	0.73	0.01	0.04	0.02	0.01	10.00	5.00	5.00	11.00	5.00	8.00
	10.00	11.00	201195	2.41	39.85	29.49	24.38	19.86	0.09	0.00	0.92	0.01	0.56	1.22	0.01	0.04	0.03	0.03	48.00	5.00	5.00	14.00	5.00	14.00
	11.00	12.00	201196	2.18	54.81	40.56	17.20	12.92	0.13	0.00	1.17	0.01	0.72	1.77	0.01	0.04	0.04	0.07	23.00	5.00	5.00	24.00	5.00	20.00
	12.00	13.00	201197	2.25	25.12	18.59	31.79	27.20	0.05	0.00	0.43	0.02	0.30	0.72	0.01	0.04	0.02	0.07	7.00	5.00	5.00	17.00	5.00	9.00
	13.00	14.00	201198	2.09	15.17	11.23	37.32	31.74	0.03	0.00	0.25	0.01	0.17	0.50	0.01	0.04	0.01	0.03	6.00	5.00	5.00	11.00	5.00	5.00
	14.00	15.00	201199	1.85	12.91	9.55	37.90	33.53	0.02	0.00	0.25	0.01	0.15	0.52	0.01	0.04	0.01	0.03	11.00	5.00	5.00	5.00	5.00	4.00
	15.00	16.00	201200	0.91	11.34	8.39	36.17	36.77	0.02	0.00	0.25	0.01	0.13	0.59	0.01	0.04	0.01	0.03	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	4.00
	16.00	17.00	201201	0.57	9.81	7.26	35.83	37.59	0.02	0.00	0.43	0.01	0.11	1.00	0.01	0.04	0.01	0.05	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	3.00
	17.00	18.00	201202	0.52	9.66	7.15	35.56	38.10	0.01	0.00	0.28	0.01	0.10	0.76	0.01	0.04	0.01	0.04	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	3.00
	18.00	19.00	201203	0.48	9.56	7.07	35.47	37.98	0.01	0.00	0.45	0.01	0.12	1.07	0.01	0.04	0.01	0.01	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	3.00
19.00	20.00	201204	0.38	8.83	6.53	35.70	38.63	0.01	0.00	0.34	0.01	0.10	0.87	0.01	0.04	0.01	0.10	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	3.00	

FURO	DE	ATÉ	AMOSTRA	Ni(%)	Fe2O3(%)	Fe(%)	SiO2(%)	MgO(%)	Ca(%)	Cu(%)	Al2O3(%)	CaO(%)	MnO(%)	Cr2O3(%)	Na2O(%)	K2O(%)	TiO2(%)	P2O5(%)	Ba(ppm)	Sr(ppm)	Zr(ppm)	Y(ppm)	Nb(ppm)	Sc(ppm)
FJA 255	0.00	1.00	201345	2.62	19.75	14.62	34.60	28.23	0.05	0.00	1.22	0.01	0.23	0.54	0.01	0.04	0.07	0.01	13.00	5.00	5.00	5.00	5.00	11.00
	1.00	2.00	201346	2.67	13.75	10.18	39.44	30.33	0.03	0.00	0.47	0.01	0.16	0.33	0.01	0.04	0.02	0.01	9.00	5.00	5.00	5.00	5.00	7.00
	2.00	3.00	201347	2.96	13.70	10.14	40.00	29.71	0.04	0.00	0.36	0.01	0.17	0.32	0.01	0.04	0.02	0.01	12.00	5.00	5.00	5.00	5.00	7.00
	3.00	4.00	201348	2.54	11.43	8.46	40.33	32.10	0.03	0.00	0.36	0.01	0.13	0.34	0.01	0.04	0.01	0.01	12.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
	4.00	5.00	201349	2.70	11.20	8.29	41.37	31.40	0.04	0.00	0.35	0.01	0.13	0.35	0.01	0.04	0.01	0.01	13.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
	5.00	6.00	201350	2.50	12.80	9.47	41.60	29.93	0.03	0.00	0.41	0.01	0.14	0.36	0.01	0.04	0.02	0.02	16.00	5.00	5.00	5.00	5.00	6.00
	6.00	7.00	201351	2.24	12.71	9.41	40.22	31.39	0.03	0.00	0.51	0.01	0.14	0.34	0.01	0.04	0.02	0.01	28.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
	7.00	8.00	201352	2.27	13.02	9.63	37.97	32.79	0.03	0.00	0.49	0.01	0.16	0.33	0.01	0.04	0.02	0.01	26.00	5.00	5.00	5.00	5.00	6.00
	8.00	9.00	201353	2.20	11.93	8.83	42.49	30.39	0.02	0.00	0.44	0.01	0.13	0.37	0.01	0.04	0.02	0.01	28.00	5.00	5.00	5.00	7.00	5.00
	9.00	10.00	201354	2.35	12.98	9.61	39.16	31.68	0.02	0.00	0.43	0.01	0.14	0.36	0.01	0.04	0.02	0.01	29.00	5.00	5.00	5.00	8.00	6.00
	10.00	11.00	201355	2.40	12.75	9.44	38.48	32.47	0.03	0.00	0.43	0.01	0.14	0.24	0.01	0.04	0.02	0.01	28.00	5.00	5.00	5.00	6.00	6.00
	11.00	12.00	201356	2.25	13.71	10.15	37.79	32.50	0.03	0.00	0.49	0.01	0.16	0.25	0.01	0.04	0.02	0.01	24.00	5.00	5.00	5.00	5.00	6.00
	12.00	13.00	201357	1.75	12.08	8.94	38.40	33.85	0.02	0.00	0.54	0.01	0.14	0.46	0.01	0.04	0.02	0.01	31.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
	13.00	14.00	201358	1.77	13.83	10.23	37.62	32.72	0.03	0.00	0.56	0.01	0.16	0.48	0.01	0.04	0.02	0.01	29.00	5.00	5.00	5.00	5.00	6.00
	14.00	15.00	201359	1.68	13.54	10.02	38.29	32.40	0.03	0.00	0.59	0.01	0.17	0.51	0.01	0.04	0.02	0.01	34.00	5.00	5.00	5.00	7.00	6.00
	15.00	16.00	201360	1.62	13.80	10.21	37.39	33.15	0.03	0.00	0.59	0.01	0.17	0.42	0.01	0.04	0.02	0.01	48.00	5.00	5.00	5.00	5.00	6.00
	16.00	17.00	201365	1.58	12.90	9.55	38.40	33.41	0.03	0.00	0.49	0.01	0.16	0.43	0.01	0.04	0.02	0.01	34.00	5.00	5.00	5.00	5.00	6.00
	17.00	18.00	201366	1.51	14.13	10.46	37.78	32.73	0.03	0.00	0.51	0.01	0.19	0.43	0.01	0.04	0.02	0.01	43.00	5.00	5.00	5.00	5.00	7.00
	18.00	19.00	201367	1.15	14.37	10.63	36.98	33.42	0.02	0.00	0.62	0.01	0.22	0.40	0.01	0.04	0.02	0.01	104.00	5.00	5.00	5.00	8.00	6.00
	19.00	20.00	201368	1.45	18.57	13.74	35.47	30.80	0.04	0.00	0.65	0.01	0.23	0.30	0.01	0.04	0.02	0.01	71.00	5.00	5.00	5.00	5.00	8.00
	20.00	21.00	201369	1.46	15.98	11.83	36.42	32.75	0.04	0.00	0.56	0.02	0.20	0.18	0.01	0.04	0.02	0.01	100.00	5.00	5.00	5.00	5.00	7.00
	21.00	22.00	201370	2.11	15.61	11.55	45.48	25.41	0.05	0.00	0.63	0.01	0.23	0.30	0.01	0.04	0.02	0.01	91.00	5.00	5.00	6.00	11.00	6.00
	22.00	23.00	201371	1.85	10.86	8.04	43.07	30.98	0.04	0.00	0.53	0.01	0.51	0.51	0.01	0.04	0.02	0.01	300.00	5.00	5.00	5.00	6.00	4.00
	23.00	24.00	201372	0.76	11.99	8.87	37.92	35.74	0.02	0.00	0.52	0.02	0.15	0.49	0.02	0.04	0.02	0.01	55.00	5.00	5.00	5.00	8.00	5.00
	24.00	25.00	201373	0.49	11.08	8.20	38.33	36.51	0.02	0.00	0.44	0.01	0.13	0.46	0.01	0.04	0.02	0.01	24.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
	25.00	26.00	201374	0.56	11.08	8.20	38.32	36.41	0.02	0.00	0.44	0.01	0.13	0.33	0.01	0.04	0.01	0.01	38.00	5.00	5.00	5.00	10.00	4.00
	26.00	27.00	201375	0.59	9.48	7.02	39.96	36.43	0.02	0.00	0.34	0.01	0.12	0.20	0.01	0.04	0.01	0.01	39.00	5.00	5.00	5.00	7.00	4.00
27.00	28.00	201376	0.35	8.39	6.21	40.37	37.00	0.01	0.00	0.44	0.01	0.10	0.46	0.01	0.04	0.01	0.01	25.00	5.00	5.00	5.00	13.00	3.00	

FURO	DE	ATÉ	AMOSTRA	Ni(%)	Fe2O3(%)	Fe(%)	SiO2(%)	MgO(%)	Ca(%)	Cu(%)	Al2O3(%)	CaO(%)	MnO(%)	Cr2O3(%)	Na2O(%)	K2O(%)	TiO2(%)	P2O5(%)	Ba(ppm)	Sr(ppm)	Zr(ppm)	Y(ppm)	Nb(ppm)	Sc(ppm)
FJA037	0.00	1.00	205147	0.34	67.85	50.21	7.97	1.94	0.02	0.00	10.13	0.01	0.24	1.55	0.01	0.04	0.89	0.08	14.00	5.00	244.00	16.00	12.00	39.00
	1.00	2.00	205148	0.45	69.19	51.20	6.92	1.52	0.02	0.00	8.90	0.01	0.22	2.30	0.01	0.04	0.59	0.05	5.00	5.00	159.00	8.00	7.00	44.00
	2.00	3.00	205149	0.57	73.50	54.39	4.01	0.30	0.03	0.01	8.25	0.01	0.27	1.99	0.01	0.04	0.41	0.01	5.00	5.00	113.00	10.00	10.00	53.00
	3.00	4.00	205150	0.44	67.80	50.17	6.42	0.74	0.02	0.01	11.68	0.01	0.30	1.47	0.01	0.04	0.87	0.08	5.00	5.00	199.00	10.00	20.00	46.00
	4.00	5.00	205151	0.47	67.82	50.19	7.12	1.21	0.02	0.01	10.88	0.01	0.31	1.49	0.01	0.04	0.77	0.06	7.00	5.00	174.00	8.00	12.00	44.00
	5.00	6.00	205152	0.43	70.41	52.10	7.12	0.35	0.02	0.01	11.14	0.01	0.57	0.55	0.01	0.04	0.69	0.07	29.00	5.00	152.00	8.00	9.00	43.00
	6.00	7.00	205153	0.47	72.35	53.54	7.07	0.33	0.02	0.00	10.06	0.01	0.55	0.48	0.01	0.04	0.52	0.07	31.00	5.00	97.00	5.00	5.00	41.00
	7.00	8.00	205154	0.45	69.96	51.77	9.27	0.33	0.02	0.01	10.27	0.01	0.54	0.44	0.01	0.04	0.50	0.01	36.00	5.00	104.00	6.00	6.00	40.00
	8.00	9.00	205155	0.47	70.40	52.10	10.01	0.32	0.02	0.01	9.59	0.01	0.58	0.37	0.01	0.04	0.51	0.02	42.00	5.00	97.00	6.00	5.00	38.00
	9.00	10.00	205156	0.61	78.85	58.35	6.25	0.33	0.03	0.01	6.29	0.01	0.61	0.34	0.01	0.04	0.29	0.05	118.00	5.00	59.00	7.00	5.00	37.00
	10.00	11.00	205157	0.67	81.01	59.95	3.95	0.30	0.02	0.01	5.00	0.01	0.43	0.58	0.01	0.04	0.13	0.07	39.00	5.00	32.00	7.00	5.00	51.00
	11.00	12.00	205158	0.72	85.10	62.97	1.90	0.37	0.02	0.01	3.25	0.01	0.42	0.32	0.01	0.04	0.06	0.09	25.00	5.00	14.00	6.00	5.00	61.00
	12.00	13.00	205159	0.88	83.94	62.12	1.72	0.43	0.03	0.01	3.12	0.01	0.39	0.35	0.01	0.04	0.06	0.10	11.00	5.00	14.00	5.00	5.00	64.00
	13.00	14.00	205160	0.92	83.20	61.57	1.94	0.40	0.03	0.01	3.56	0.01	0.38	0.29	0.01	0.04	0.07	0.10	16.00	5.00	15.00	8.00	5.00	59.00
	14.00	15.00	205165	0.77	84.34	62.41	2.14	0.29	0.02	0.01	3.66	0.01	0.36	0.28	0.01	0.04	0.07	0.11	38.00	5.00	15.00	6.00	6.00	43.00
	15.00	16.00	205166	0.84	85.00	62.90	1.61	0.26	0.03	0.01	3.06	0.01	0.69	0.29	0.01	0.04	0.05	0.15	352.00	5.00	9.00	12.00	5.00	44.00
	16.00	17.00	205167	1.02	77.56	57.39	3.73	0.40	0.21	0.02	5.11	0.01	1.63	0.42	0.01	0.04	0.06	0.11	477.00	5.00	14.00	12.00	5.00	50.00
	17.00	18.00	205168	1.06	78.25	57.91	3.26	0.70	0.31	0.03	4.13	0.01	2.06	0.34	0.01	0.04	0.06	0.10	486.00	5.00	17.00	12.00	5.00	51.00
	18.00	19.00	205169	1.02	80.96	59.91	2.44	0.63	0.22	0.02	3.43	0.01	1.72	0.27	0.01	0.04	0.06	0.12	420.00	5.00	16.00	12.00	5.00	48.00
	19.00	20.00	205170	0.94	84.47	62.51	2.05	0.52	0.07	0.02	2.77	0.01	0.99	0.23	0.01	0.04	0.07	0.07	116.00	5.00	18.00	11.00	5.00	44.00
	20.00	21.00	205171	0.94	86.77	64.21	2.23	0.48	0.05	0.01	2.49	0.01	0.75	0.16	0.01	0.04	0.05	0.05	58.00	5.00	14.00	10.00	5.00	36.00
	21.00	22.00	205172	1.04	86.47	63.99	2.51	0.46	0.05	0.01	2.92	0.01	0.76	0.19	0.01	0.04	0.08	0.05	79.00	5.00	19.00	8.00	5.00	35.00
	22.00	23.00	205173	1.02	87.20	64.53	2.25	0.38	0.07	0.01	2.62	0.01	0.											

FURO	DE	ATÉ	AMOSTRA	Ni(%)	Fe2O3(%)	Fe(%)	SiO2(%)	MgO(%)	Cu(%)	Cu(%)	Al2O3(%)	CaO(%)	MnO(%)	Cr2O3(%)	Na2O(%)	K2O(%)	TiO2(%)	P2O5(%)	Ba(ppm)	Sr(ppm)	Zr(ppm)	Y(ppm)	Nb(ppm)	Sc(ppm)
EJA0373	0.00	1.00	235170	0.29	15.36	11.37	78.62	1.08	0.01	0.00	1.02	<0.1	0.12	0.90	0.01	<0.4	0.03	0.02	47.00	<5	6.00	<5	<5	8.00
	1.00	2.00	235171	0.34	14.63	10.83	77.74	2.78	0.02	0.00	0.69	<0.1	0.15	1.05	0.01	<0.4	0.02	0.02	36.00	<5	<5	<5	<5	7.00
	2.00	3.00	235172	0.31	12.94	9.58	80.10	2.45	0.01	0.00	0.64	<0.1	0.12	1.02	<0.1	<0.4	0.01	0.01	36.00	<5	5.00	<5	<5	6.00
	3.00	4.00	235173	0.35	16.97	12.56	75.37	2.25	0.02	0.00	0.75	0.01	0.24	1.21	0.01	<0.4	0.02	0.02	109.00	<5	5.00	<5	<5	8.00
	4.00	5.00	235174	0.52	38.19	28.26	44.31	1.18	0.02	0.00	6.48	<0.1	0.32	2.57	<0.1	<0.4	0.14	0.03	88.00	<5	25.00	<5	<5	24.00
	5.00	6.00	235175	0.34	18.85	13.95	72.69	1.13	0.01	0.00	2.27	0.01	0.12	1.31	0.15	0.10	0.04	0.02	75.00	5.00	15.00	<5	<5	10.00
	6.00	7.00	235178	0.29	13.92	10.30	80.36	1.20	0.01	0.00	0.80	<0.1	0.11	0.98	0.01	<0.4	0.02	<0.1	35.00	<5	5.00	<5	<5	7.00
	7.00	8.00	235181	0.37	22.01	16.29	68.13	1.14	0.01	0.00	2.74	0.02	0.14	1.48	0.18	0.12	0.05	0.02	79.00	6.00	17.00	<5	<5	11.00
	8.00	9.00	235182	0.34	19.06	14.10	72.34	1.12	0.01	0.00	2.29	0.02	0.12	1.32	0.15	0.10	0.04	0.02	72.00	5.00	14.00	<5	<5	10.00
	9.00	10.00	235183	0.36	13.63	10.09	80.01	1.49	0.01	0.00	0.86	<0.1	0.09	1.12	0.01	<0.4	0.02	<0.1	18.00	<5	5.00	<5	<5	7.00
	10.00	11.00	235184	0.30	9.40	6.96	85.43	1.40	0.01	<0.01	0.50	<0.1	0.07	0.94	0.01	<0.4	0.01	0.02	15.00	<5	5.00	<5	<5	4.00
	11.00	12.00	235185	0.34	10.63	7.87	83.54	2.02	0.02	0.00	0.53	<0.1	0.09	0.95	<0.1	<0.4	0.01	<0.1	11.00	<5	<5	<5	<5	5.00
	12.00	13.00	235186	0.35	9.34	6.91	86.07	1.22	0.02	0.00	0.46	<0.1	0.11	0.80	0.01	<0.4	0.01	<0.1	75.00	<5	<5	<5	<5	4.00
	13.00	14.00	235187	0.49	16.95	12.54	75.08	1.10	0.04	0.00	2.22	<0.1	0.38	0.74	0.01	<0.4	0.08	0.02	123.00	<5	9.00	<5	<5	7.00
	14.00	15.00	235188	0.34	9.11	6.74	86.21	1.50	0.02	0.00	0.39	<0.1	0.12	0.76	<0.1	<0.4	<0.1	0.01	73.00	<5	<5	<5	<5	4.00
	15.00	16.00	235189	0.29	9.25	6.85	86.89	1.05	0.02	0.00	0.40	<0.1	0.17	0.66	<0.1	<0.4	<0.1	0.01	59.00	<5	<5	<5	<5	4.00
	16.00	17.00	235190	0.27	7.98	5.91	88.26	1.08	0.02	0.00	0.33	<0.1	0.18	0.61	<0.1	<0.4	<0.1	<0.1	78.00	<5	<5	<5	5.00	4.00
	17.00	18.00	235191	0.30	9.40	6.96	86.35	1.18	0.04	0.00	0.37	<0.1	0.28	0.62	<0.1	<0.4	<0.1	0.01	133.00	<5	<5	<5	5.00	4.00
	18.00	19.00	235192	0.53	15.96	11.81	75.60	0.87	0.24	0.00	0.88	<0.1	0.21	0.64	0.01	<0.4	0.01	0.01	1690.00	<5	<5	<5	<5	10.00
	19.00	20.00	235193	0.30	11.56	8.55	83.79	1.10	0.05	0.00	0.41	<0.1	0.37	0.67	<0.1	<0.4	<0.1	<0.1	114.00	<5	<5	<5	<5	5.00
	20.00	21.00	235194	0.65	31.15	23.05	56.71	1.40	0.10	0.00	3.75	0.01	0.64	1.19	0.01	<0.4	0.03	0.02	59.00	<5	8.00	<5	<5	12.00
	21.00	22.00	235195	0.73	23.03	17.04	59.25	0.85	0.42	0.01	6.50	<0.1	2.31	0.88	0.01	<0.4	0.34	0.04	545.00	<5	28.00	6.00	<5	17.00
	22.00	23.00	235196	0.36	25.55	18.91	44.76	0.45	0.11	0.01	16.94	<0.1	0.69	1.19	<0.1	<0.4	1.05	0.04	11.00	<5	86.00	6.00	<5	33.00
	23.00	24.00	235197	0.36	24.14	17.86	53.81	0.73	0.12	0.01	10.90	<0.1	0.75	1.29	0.01	<0.4	0.82	0.04	269.00	<5	67.00	6.00	<5	27.00
	24.00	25.00	235198	0.21	20.36	15.07	34.71	0.07	0.15	0.01	29.43	<0.1	0.85	0.54	<0.1	<0.4	1.26	0.02	87.00	<5	101.00	5.00	<5	52.00
	25.00	26.00	235199	0.32	28.71	21.25	32.16	0.13	0.19	0.01	23.40	<0.1	1.15	1.05	0.01	<0.4	1.66	0.03	121.00	<5	135.00	6.00	<5	47.00
	26.00	27.00	235200	0.26	19.87	14.70	39.18	0.57	0.21	0.01	25.97	0.01	0.91	0.53	0.01	<0.4	1.05	0.02	157.00	<5	83.00	5.00	<5	45.00
	27.00	28.00	235205	0.27	28.37	20.99	29.66	0.21	0.23	0.01	25.72	<0.1	0.79	0.90	<0.1	<0.4	1.79	0.03	74.00	<5	146.00	7.00	8.00	65.00
	28.00	29.00	235206	0.20	22.94	16.98	33.02	0.07	0.09	0.01	28.74	<0.1	0.47	0.72	<0.1	<0.4	1.41	0.03	76.00	<5	120.00	7.00	<5	48.00
	29.00	30.00	235207	0.30	14.29	10.57	78.47	1.36	0.04	0.00	1.99	<0.1	0.22	0.97	<0.1	<0.4	0.08	0.03	33.00	<5	10.00	<5	<5	9.00
	30.00	31.00	235208	0.38	9.05	6.70	83.29	1.02	0.25	0.01	0.76	<0.1	0.31	0.58	<0.1	<0.4	0.02	<0.1	2261.00	<5	<5	7.00	<5	9.00
	31.00	32.00	235209	0.28	8.48	6.28	86.26	1.35	0.08	0.00	0.37	<0.1	0.99	0.60	<0.1	<0.4	<0.1	0.02	917.00	<5	<5	<5	<5	5.00
	32.00	33.00	235210	0.43	17.48	12.94	71.83	1.14	0.20	0.01	3.58	<0.1	1.19	0.90	<0.1	<0.4	0.07	0.03	361.00	<5	10.00	<5	<5	12.00
	33.00	34.00	235211	0.53	33.27	24.62	35.19	0.55	0.22	0.01	17.26	<0.1	1.08	1.59	<0.1	<0.4	0.74	0.06	207.00	<5	69.00	7.00	7.00	40.00
	34.00	35.00	235212	0.25	22.15	16.39	33.23	0.14	0.14	0.01	28.59	<0.1	0.64	0.78	<0.1	<0.4	1.39	0.03	162.00	<5	112.00	8.00	<5	50.00
	35.00	36.00	235213	0.24	23.12	17.11	32.39	0.25	0.14	0.01	28.87	0.01	0.80	0.49	<0.1	<0.4	1.47	0.03	147.00	5.00	118.00	8.00	<5	46.00
	36.00	37.00	235214	0.41	25.51	18.88	48.58	0.54	0.14	0.01	14.62	<0.1	0.94	1.08	<0.1	<0.4	0.72	0.03	243.00	<5	63.00	6.00	6.00	31.00
	37.00	38.00	235215	0.32	19.51	14.44	64.99	0.93	0.06	0.01	7.84	<0.1	0.46	0.94	<0.1	<0.4	0.40	0.01	180.00	<5	37.00	<5	<5	18.00
	38.00	39.00	235216	0.74	35.92	26.58	30.59	0.38	0.31	0.01	18.27	<0.1	1.66	1.44	<0.1	<0.4	0.92	0.05	164.00	<5	66.00	7.00	<5	38.00
	39.00	40.00	235217	0.37	21.35	15.80	61.68	0.82	0.10	0.01	8.58	<0.1	0.73	1.00	<0.1	<0.4	0.40	0.03	257.00	<5	35.00	<5	8.00	19.00
	40.00	41.00	235218	0.50	29.37	21.73	50.59	0.85	0.12	0.01	9.64	<0.1	0.88	1.58	0.01	<0.4	0.46	0.03	203.00	<5	41.00	<5	6.00	24.00
	41.00	42.00	235219	0.41	15.48	11.46	74.95	0.82	0.11	0.00	3.51	<0.1	0.58	0.90	<0.1	<0.4	0.15	0.04	81.00	<5	15.00	<5	<5	11.00
	42.00	43.00	235220	0.45	13.02	9.63	79.45	0.85	0.14	0.00	1.81	<0.1	0.79	0.77	<0.1	<0.4	0.05	0.03	144.00	<5	8.00	<5	<5	8.00
	43.00	44.00	235221	0.41	19.65	14.54	57.76	0.71	0.15	0.01	11.86	0.01	0.89	1.25	<0.1	<0.4	0.64	0.05	87.00	<5	53.00	5.00	<5	24.00
	44.00	45.00	235222	0.36	25.19	18.64	36.06	0.21	0.18	0.01	23.59	<0.1	0.88	1.04	<0.1	<0.4	1.36	0.04	146.00	<5	111.00	10.00	5.00	45.00
	45.00	46.00	235223	0.31	22.90	16.95	32.61	0.09	0.13	0.01	28.20	0.01	0.76	0.85	<0.1	<0.4	1.49	0.02	78.00	<5	116.00	11.00	12.00	56.00
	46.00	47.00	235224	0.36	21.38	15.82	33.68	0.16	0.11	0.01	28.86	0.01	0.62	0.70	0.01	<0.4	1.41	0.02	66.00	<5	111.00	20.00	<5	54.00
	47.00	48.00	235225	1.71	21.06	15.58	33.45	4.62	0.10	0.02	23.41	0.10	0.42	0.95	<0.1	<0.4	1.29	0.03	138.00	<5	104.00	96.00	<5	47.00
	48.00	49.00	235230	1.17	32.66	24.17	47.01	1.89	0.25	0.01	7.60	0.03	0.99	1.33	0.01	<0.4	0.22	0.08	56.00	<5	24.00	41.00	<5	24.00
	49.00	50.00	235231	1.05	44.10	32.63	43.61	0.76	0.26	0.01	2.17	<0.1	1.15	1.37	0.01	<0.4	0.04	0.07	100.00	<5	9.00	16.00	<5	27.00
	50.00	51.00	235232	1.28	65.17	48.23	17.84	1.16	0.31	0.01	2.33	0.01	1.39	2.22	<0.1	<0.4	0.07	0.08	97.00	<5	17.00	20.00	7.00	40.00
	51.00	52.00	235233	1.42	67.01	49.59	8.12	2.15	0.23	0.01	5.86	0.01	0.95	5.55	<0.1	<0								





Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Instituto de Geociências  
Programa de Pós Graduação em Geociências

---

## **ANEXO II - PETROGRAFIA ÓPTICA**

FJA 255 AM 201376			FJA 146 AM 183819		
	N	(%)		N	(%)
SERPENTINAS	676	84.5	SERPENTINAS	432	54
Textura Mesh	0	0	Textura Mesh	14	1.75
Mesh Borda $\gamma$ (-)	0	0	Mesh Borda $\gamma$ (-)	11	1.375
Mesh Centro Isotrópica	0	0	Mesh Centro Isotrópica	0	0
Mesh Centro (Goethita)	0	0	Mesh Centro (Goethita)	3	0.375
Textura Hourglass	5	0.625	Textura Hourglass	6	0.75
Hourglass $\gamma$ (-)	5	0.625	Hourglass $\gamma$ (-)	6	0.75
Textura Interlocking	65	8.125	Textura Interlocking	19	2.375
Interlocking $\gamma$ (-)	65	8.125	Interlocking $\gamma$ (-)	19	2.375
Textura Interpenetrating	451	56.375	Textura Interpenetrating	212	26.5
Interpenetrating $\gamma$ (-)	451	56.375	Interpenetrating $\gamma$ (-)	212	26.5
Veios	155	19.375	Veios	181	22.625
Veios asbestiformes	128	16	Veios asbestiformes	119	14.875
Veios não-asbestiformes	27	3.375	Veios não-asbestiformes	62	7.75
OUTROS MINERAIS	124	15.5	OUTROS MINERAIS	368	46
Olivina	0	0	Olivina	0	0
Cr-espínélio	7	0.875	Cr-espínélio	0	0
Cromita	30	3.75	Cromita	5	0.625
Magnetita	4	0.5	Magnetita	5	0.625
Hematita	2	0.25	Hematita	132	16.5
Hematita - Concreções	0	0	Hematita - Concreções	0	0
Argilomineral verde	0	0	Argilomineral verde	0	0
Goethita	62	7.75	Goethita	223	27.875
Mg-clorita	6	0.75	Mg-clorita	3	0.375
Calcedónia	2	0.25	Calcedónia	0	0
Talco	11	1.375	Talco	0	0
"Mineral amarelo"	0	0	"Mineral amarelo"	0	0
Hidróxido de Fe ("matriz escura")	0	0	Hidróxido de Fe ("matriz escura")	0	0
Quartzo	0	0	Quartzo	0	0
Gibbsita	0	0	Gibbsita	0	0
TOTAL	800	100	TOTAL	800	100

FJA 337 AM 205187			FJA245 AM 201181		
	N	(%)		N	(%)
SERPENTINAS	246	30.75	SERPENTINAS	281	35.125
Textura Mesh	0	0	Textura Mesh	13	1.625
Mesh Borda $\gamma$ (-)	0	0	Mesh Borda $\gamma$ (-)	0	0
Mesh Centro Isotrópica	0	0	Mesh Centro Isotrópica	0	0
Mesh Centro (Goethita)	0	0	Mesh Centro (Goethita)	13	1.625
Textura Hourglass	0	0	Textura Hourglass	2	0.25
Hourglass $\gamma$ (-)	0	0	Hourglass $\gamma$ (-)	2	0.25
Textura Interlocking	41	5.125	Textura Interlocking	231	28.875
Interlocking $\gamma$ (-)	41	5.125	Interlocking $\gamma$ (-)	231	28.875
Textura Interpenetrating	173	21.625	Textura Interpenetrating	0	0
Interpenetrating $\gamma$ (-)	173	21.625	Interpenetrating $\gamma$ (-)	0	0
Veios	32	4	Veios	35	4.375
Veios asbestiformes	32	4	Veios asbestiformes	35	4.375
Veios não-asbestiformes	0	0	Veios não-asbestiformes	0	0
OUTROS MINERAIS	554	69.25	OUTROS MINERAIS	519	64.875
Olivina	0	0	Olivina	0	0
Cr-espínélio	0	0	Cr-espínélio	0	0
Cromita	26	3.25	Cromita	36	4.5
Magnetita	22	2.75	Magnetita	12	1.5
Hematita	0	0	Hematita	6	0.75
Hematita - Concreções	0	0	Hematita - Concreções	0	0
Argilomineral verde	0	0	Argilomineral verde	0	0
Goethita	78	9.75	Goethita	12	1.5
Mg-clorita	10	1.25	Mg-clorita	5	0.625
Calcedónia	0	0	Calcedónia	2	0.25
Talco	0	0	Talco	0	0
"Mineral amarelo"	0	0	"Mineral amarelo"	0	0
Hidróxido de Fe ("matriz escura")	418	52.25	Hidróxido de Fe ("matriz escura")	446	55.75
Quartzo	0	0	Quartzo	0	0
Gibbsita	0	0	Gibbsita	0	0
TOTAL	800	100	TOTAL	800	100

FJA245 AM201204			FJA 255 AM201345		
	N	(%)		N	(%)
SERPENTINAS	702	87.75	SERPENTINAS	468	58.5
Textura Mesh	4	0.5	Textura Mesh	1	0.125
Mesh Borda $\gamma$ (-)	0	0	Mesh Borda $\gamma$ (-)	0	0
Mesh Centro Isotrópica	1	0.125	Mesh Centro Isotrópica	0	0
Mesh Centro (Goethita)	3	0.375	Mesh Centro (Goethita)	1	0.125
Textura Hourglass	68	8.5	Textura Hourglass	4	0.5
Hourglass $\gamma$ (-)	68	8.5	Hourglass $\gamma$ (-)	4	0.5
Textura Interlocking	503	62.875	Textura Interlocking	12	1.5
Interlocking $\gamma$ (-)	503	62.875	Interlocking $\gamma$ (-)	12	1.5
Textura Interpenetrating	0	0	Textura Interpenetrating	368	46
Interpenetrating $\gamma$ (-)	0	0	Interpenetrating $\gamma$ (-)	368	46
Veios	127	15.875	Veios	83	10.375
Veios asbestiformes	115	14.375	Veios asbestiformes	83	10.375
Veios não-asbestiformes	12	1.5	Veios não-asbestiformes	0	0
OUTROS MINERAIS	98	12.25	OUTROS MINERAIS	332	41.5
Olivina	0	0	Olivina	0	0
Cr-espinelio	2	0.25	Cr-espinelio	13	1.625
Cromita	29	3.625	Cromita	19	2.375
Magnetita	13	1.625	Magnetita	24	3
Hematita	18	2.25	Hematita	16	2
Hematita - Concreções	0	0	Hematita - Concreções	0	0
Argilomineral verde	0	0	Argilomineral verde	0	0
Goethita	6	0.75	Goethita	102	12.75
Mg-clorita	18	2.25	Mg-clorita	0	0
Calcedônia	0	0	Calcedônia	0	0
Talco	0	0	Talco	1	0.125
"Mineral amarelo"	12	1.5	"Mineral amarelo"	0	0
Hidróxido de Fe ("matriz escura")	0	0	Hidróxido de Fe ("matriz escura")	141	17.625
Quartzo	0	0	Quartzo	16	2
Gibbsita	0	0	Gibbsita	0	0
TOTAL	800	100	TOTAL	800	100

FJA 255 AM201376			FJA 146 AM183819		
	N	(%)		N	(%)
SERPENTINAS	676	84.5	SERPENTINAS	432	54
Textura Mesh	0	0	Textura Mesh	14	1.75
Mesh Borda $\gamma$ (-)	0	0	Mesh Borda $\gamma$ (-)	11	1.375
Mesh Centro Isotrópica	0	0	Mesh Centro Isotrópica	0	0
Mesh Centro (Goethita)	0	0	Mesh Centro (Goethita)	3	0.375
Textura Hourglass	5	0.625	Textura Hourglass	6	0.75
Hourglass $\gamma$ (-)	5	0.625	Hourglass $\gamma$ (-)	6	0.75
Textura Interlocking	65	8.125	Textura Interlocking	19	2.375
Interlocking $\gamma$ (-)	65	8.125	Interlocking $\gamma$ (-)	19	2.375
Textura Interpenetrating	451	56.375	Textura Interpenetrating	212	26.5
Interpenetrating $\gamma$ (-)	451	56.375	Interpenetrating $\gamma$ (-)	212	26.5
Veios	155	19.375	Veios	181	22.625
Veios asbestiformes	128	16	Veios asbestiformes	119	14.875
Veios não-asbestiformes	27	3.375	Veios não-asbestiformes	62	7.75
OUTROS MINERAIS	124	15.5	OUTROS MINERAIS	368	46
Olivina	0	0	Olivina	0	0
Cr-espinelio	7	0.875	Cr-espinelio	0	0
Cromita	30	3.75	Cromita	5	0.625
Magnetita	4	0.5	Magnetita	5	0.625
Hematita	2	0.25	Hematita	132	16.5
Hematita - Concreções	0	0	Hematita - Concreções	0	0
Argilomineral verde	0	0	Argilomineral verde	0	0
Goethita	62	7.75	Goethita	223	27.875
Mg-clorita	6	0.75	Mg-clorita	3	0.375
Calcedônia	2	0.25	Calcedônia	0	0
Talco	11	1.375	Talco	0	0
"Mineral amarelo"	0	0	"Mineral amarelo"	0	0
Hidróxido de Fe ("matriz escura")	0	0	Hidróxido de Fe ("matriz escura")	0	0
Quartzo	0	0	Quartzo	0	0
Gibbsita	0	0	Gibbsita	0	0
TOTAL	800	100	TOTAL	800	100

FJA 146 AM 183836			FJA 373 AM 235170		
	N	(%)		N	(%)
SERPENTINAS	676	84.5	SERPENTINAS	0	0
Textura Mesh	83	10.375	Textura Mesh	0	0
Mesh Borda $\gamma$ (-)	0	0	Mesh Borda $\gamma$ (-)	0	0
Mesh Centro Isotrópica	78	9.75	Mesh Centro Isotrópica	0	0
Mesh Centro (Goethita)	5	0.625	Mesh Centro (Goethita)	0	0
Textura Hourglass	0	0	Textura Hourglass	0	0
Hourglass $\gamma$ (-)	0	0	Hourglass $\gamma$ (-)	0	0
Textura Interlocking	35	4.375	Textura Interlocking	0	0
Interlocking $\gamma$ (-)	35	4.375	Interlocking $\gamma$ (-)	0	0
Textura Interpenetrating	91	11.375	Textura Interpenetrating	0	0
Interpenetrating $\gamma$ (-)	91	11.375	Interpenetrating $\gamma$ (-)	0	0
Veios	467	58.375	Veios	0	0
Veios asbestiformes	436	54.5	Veios asbestiformes	0	0
Veios não-asbestiformes	31	3.875	Veios não-asbestiformes	0	0
OUTROS MINERAIS	124	15.5	OUTROS MINERAIS	800	100
Olivina	0	0	Olivina	0	0
Cr-espinelio	0	0	Cr-espinelio	0	0
Cromita	4	0.5	Cromita	23	2.875
Magnetita	1	0.125	Magnetita	44	5.5
Hematita	41	5.125	Hematita	13	1.625
Hematita - Concreções	0	0	Hematita - Concreções	0	0
Argilomineral verde	0	0	Argilomineral verde	0	0
Goethita	65	8.125	Goethita	73	9.125
Mg-clorita	11	1.375	Mg-clorita	0	0
Calcedônia	0	0	Calcedônia	0	0
Talco	1	0.125	Talco	0	0
"Mineral amarelo"	1	0.125	"Mineral amarelo"	0	0
Hidróxido de Fe ("matriz escura")	0	0	Hidróxido de Fe ("matriz escura")	379	47.375
Quartzo	0	0	Quartzo	268	33.5
Gibbsita	0	0	Gibbsita	0	0
TOTAL	800	100	TOTAL	800	100

FJA 373 AM 235231			FJA 373 AM 235237		
	N	(%)		N	(%)
SERPENTINAS	0	0	SERPENTINAS	6.00	1.00
Textura Mesh	0	0	Textura Mesh	0.00	0.00
Mesh Borda $\gamma$ (-)	0	0	Mesh Borda $\gamma$ (-)	0.00	0.00
Mesh Centro Isotrópica	0	0	Mesh Centro Isotrópica	0.00	0.00
Mesh Centro (Goethita)	0	0	Mesh Centro (Goethita)	0.00	0.00
Textura Hourglass	0	0	Textura Hourglass	0.00	0.00
Hourglass $\gamma$ (-)	0	0	Hourglass $\gamma$ (-)	0.00	0.00
Textura Interlocking	0	0	Textura Interlocking	0.00	0.00
Interlocking $\gamma$ (-)	0	0	Interlocking $\gamma$ (-)	0.00	0.00
Textura Interpenetrating	0	0	Textura Interpenetrating	4.00	0.67
Interpenetrating $\gamma$ (-)	0	0	Interpenetrating $\gamma$ (-)	4.00	0.67
Veios	0	0	Veios	2.00	0.33
Veios asbestiformes	0	0	Veios asbestiformes	2.00	0.33
Veios não-asbestiformes	0	0	Veios não-asbestiformes	0.00	0.00
OUTROS MINERAIS	800	100	OUTROS MINERAIS	594.00	99.00
Olivina	0	0	Olivina	0.00	0.00
Cr-espinelio	0	0	Cr-espinelio	0.00	0.00
Cromita	12	1.5	Cromita	17.00	2.83
Magnetita	21	2.625	Magnetita	23.00	3.83
Hematita	0	0	Hematita	5.00	0.83
Hematita - Concreções	0	0	Hematita - Concreções	0.00	0.00
Argilomineral verde	0	0	Argilomineral verde	0.00	0.00
Goethita	67	8.375	Goethita	6.00	1.00
Mg-clorita	1	0.125	Mg-clorita	0.00	0.00
Calcedônia	25	3.125	Calcedônia	0.00	0.00
Talco	0	0	Talco	0.00	0.00
"Mineral amarelo"	0	0	"Mineral amarelo"	0.00	0.00
Hidróxido de Fe ("matriz escura")	378	47.25	Hidróxido de Fe ("matriz escura")	479.00	79.83
Quartzo	296	37	Quartzo	64.00	10.67
Gibbsita	0	0	Gibbsita	0.00	0.00
TOTAL	800	100	TOTAL	600.00	100.00

FJA 373 AM 235239			FJA 373 AM235248		
	N	(%)		N	(%)
SERPENTINAS	27.00	4.50	SERPENTINAS	39.00	6.50
Textura Mesh	11.00	1.83	Textura Mesh	2.00	0.33
Mesh Borda $\gamma$ (-)	0.00	0.00	Mesh Borda $\gamma$ (-)	0.00	0.00
Mesh Centro Isotrópica	0.00	0.00	Mesh Centro Isotrópica	0.00	0.00
Mesh Centro (Goethita)	11.00	1.83	Mesh Centro (Goethita)	2.00	0.33
Textura Hourglass	0.00	0.00	Textura Hourglass	0.00	0.00
Hourglass $\gamma$ (-)	0.00	0.00	Hourglass $\gamma$ (-)	0.00	0.00
Textura Interlocking	16.00	2.67	Textura Interlocking	6.00	1.00
Interlocking $\gamma$ (-)	16.00	2.67	Interlocking $\gamma$ (-)	6.00	1.00
Textura Interpenetrating	0.00	0.00	Textura Interpenetrating	31.00	5.17
Interpenetrating $\gamma$ (-)	0.00	0.00	Interpenetrating $\gamma$ (-)	31.00	5.17
Veios	0.00	0.00	Veios	0.00	0.00
Veios asbestiformes	0.00	0.00	Veios asbestiformes	0.00	0.00
Veios não-asbestiformes	0.00	0.00	Veios não-asbestiformes	0.00	0.00
OUTROS MINERAIS	573.00	95.50	OUTROS MINERAIS	561.00	93.50
Olivina	0.00	0.00	Olivina	0.00	0.00
Cr-espínelio	10.00	1.67	Cr-espínelio	2.00	0.33
Cromita	31.00	5.17	Cromita	14.00	2.33
Magnetita	14.00	2.33	Magnetita	9.00	1.50
Hematita	18.00	3.00	Hematita	16.00	2.67
Hematita - Concreções	0.00	0.00	Hematita - Concreções	0.00	0.00
Argilomineral verde	0.00	0.00	Argilomineral verde	0.00	0.00
Goethita	51.00	8.50	Goethita	44.00	7.33
Mg-clorita	0.00	0.00	Mg-clorita	0.00	0.00
Calcedônia	14.00	2.33	Calcedônia	6.00	1.00
Talco	0.00	0.00	Talco	0.00	0.00
"Mineral amarelo"	0.00	0.00	"Mineral amarelo"	0.00	0.00
Hidróxido de Fe ("matriz escura")	416.00	69.33	Hidróxido de Fe ("matriz escura")	462.00	77.00
Quartzo	19.00	3.17	Quartzo	8.00	1.33
Gibbsita	0.00	0.00	Gibbsita	0.00	0.00
TOTAL	600.00	100.00	TOTAL	600.00	100.00