

**DANIELE FREITAS GONÇALVES**

**CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA EM PERFIS LATERÍTICOS  
ASSOCIADOS A CAVIDADES DA REGIÃO DE CARAJÁS**

**Paraupébas, PA**

**2019**

DANIELE FREITAS GONÇALVES

**CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA EM PERFIS LATERÍTICOS  
ASSOCIADOS A CAVIDADES DA REGIÃO DE CARAJÁS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista *lato sensu* em em Lavra de Minas a Céu Aberto

Orientador: Gian Franco Napa Garcia

Coorientadora: Aristotelina Ferreira da Silva

Parauapebas, PA

2019

Título: **CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA EM PERFIS LATERÍTICOS ASSOCIADOS A CAVIDADES DA REGIÃO DE CARAJÁS**

Classificação: ( ) Confidencial ( ) Restrita ( ) Uso Interno ( X ) Pública

**Informações Confidenciais** - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

**Informações Restritas** - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

**Informações de Uso Interno** - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço

**Informações Públicas** - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

G635c Gonçalves, Daniele Freitas

Caracterização geológico-geotécnica em perfis lateríticos associados a cavidades da região de Carajás / Daniele Freitas Gonçalves. Parauapebas - PA, 2019.

136 p.: il.

Monografia (Especialização Latu Sensu em Lavra de Minas a Céu Aberto) Instituto Tecnológico Vale, 2019.

Orientador: Prof. Gian Franco Napa Garcia

Co-Orientadora: Aristotelina Ferreira da Silva

1. Geologia. 2. Perfil Laterítico. 3. Crosta Laterítica.  
4. Resistência Geomecânica. I. Título

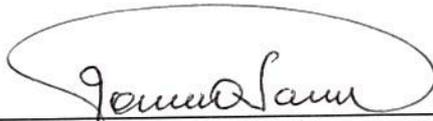
CDD.23. ed. 551.13

Especialização em Lavra de Minas a Céu Aberto

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA EM PERFIS LATERÍTICOS  
ASSOCIADOS A CAVIDADES DA REGIÃO DE CARAJÁS

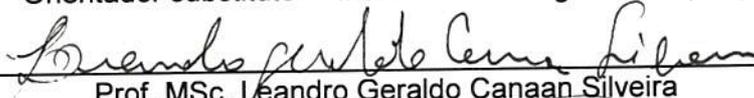
Autora: Daniele Freitas Gonçalves

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 23 de maio de 2019  
pela banca examinadora constituída pelos professores:



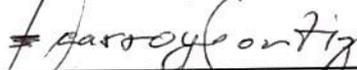
---

Prof. Ph.D. Vidal Félix Navarro Torres  
Orientador substituto – Instituto Tecnológico Vale (ITV)



---

Prof. MSc. Leandro Geraldo Canaan Silveira  
Instituto Tecnológico Vale (ITV)



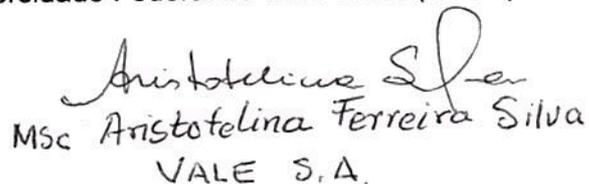
---

Prof. D.Sc. Carlos Enrique Arroyo Ortiz  
Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)



---

Prof. Ph.D. Hernani Mota de Lima  
Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)



MSc Aristotelina Ferreira Silva  
VALE S.A.

Dedico este trabalho à minha querida Alice, o amor mais lindo que tive oportunidade de viver.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos primeiramente a Deus, pela vida, saúde e força para enfrentar as lutas e desafios de cada dia.

À Vale, especialmente à Marlene Costa e ao Iuri Brandi pela oportunidade concedida e confiança dispensada durante o desenvolvimento deste estudo.

Ao Instituto Tecnológico Vale na pessoa do Prof. Dr. Vidal Torres, pela concessão dos equipamentos para a realização dos ensaios de plt e velocidade sônica.

À Carste, especialmente ao Dr. Augusto Auler por ter acreditado em minha ideia e embarcado comigo na construção e desenvolvimento deste estudo.

Às minhas queridas colegas Wilma Sousa e Vanese Vieira pelo maravilhoso trabalho que desenvolveram na aquisição de dados, realização dos ensaios e consolidação dos dados, além de todas as discussões técnicas que tivemos.

Ao colega e amigo Prof. Dr. Emídio Santos pelo apoio na elaboração e pelas imprescindíveis sugestões e recomendações.

Ao meu orientador Prof. Dr. Gian Franco Napa Garcia e a minha coorientadora Aristotelina Silva pelas valiosas contribuições, sugestões e orientações que tive ao longo deste trabalho.

Aos pesquisadores que compuseram a banca examinadora deste trabalho, pelas valiosas sugestões e recomendações que muito enriqueceram este trabalho.

À minha mãe, meu apoio constante em todos os momentos, principalmente nas horas de desânimo e cansaço. À minha filha, por me dar todos os dias o sorriso que sempre me acalma e ao meu amado Josué, por todo o carinho, cuidado e compreensão dispensados durante a realização deste trabalho.

Aos meus colegas de trabalho, Marcelo Barbosa (Marcelinho) e Rafael Guimarães (Guima, o cara!) pelo apoio, sugestões e orientações que contribuíram para a consolidação deste estudo. À Tatiana Bezerra, pelos momentos de descontração, que me proporcionaram calma, em meio a turbulência diária, para que eu pudesse finalizar com tranquilidade este trabalho. Aos demais colegas da gerência de Espeleologia da Vale, agradeço, as críticas construtivas que melhoraram consideravelmente este trabalho.

Há apenas uma maneira de evitar críticas: não fazer nada, não falar nada e não ser nada” – Aristóteles.

## RESUMO

Diversos estudos vêm sendo desenvolvidos envolvendo os horizontes lateríticos da região amazônica nas últimas décadas, em especial da região de Carajás, devido ao interesse exploratório do minério de ferro e sua relação com desenvolvimento das cavernas. Estudos multidisciplinares são imprescindíveis para a compatibilização da atividade mineral e a preservação das cavidades. Este trabalho tem por objetivo estudar os horizontes de intemperismo, por meio da obtenção de dados geológico-geotécnicos dos litotipos que os compõem. Foram previamente selecionadas duas áreas com características geológicas distintas, localizadas na borda oeste da cava de N4EN, Serra Norte, Carajás. A primeira área N4E-01 localiza-se em domínio geológico de rochas máficas pertencentes a Formação Igarapé Cigarra e a segunda área N4E-02 no domínio das rochas ferríferas da Formação Carajás. Regionalmente, esses domínios mostram-se interdigitados e subverticalizados, com direção norte-sul aproximadamente. Foram realizados levantamento de campo e ensaios de laboratório, tendo como foco três horizontes de intemperismo, do topo para base, a saber: (i) Crosta Laterítica, (ii) Horizonte de Transição e (iii) Saprolito. No domínio das rochas ferríferas foram observados os dois primeiros horizontes, representados, respectivamente, pelos litotipos Crosta laterítica ferruginosa (CLF) e Formação ferrífera laterítica (FFL). No domínio das rochas máficas os três horizontes estão representados pelos litotipos Crosta laterítica ferro-aluminosa (CLFA), Laterita ferro-aluminosa (LFA) e Saprolito de rocha máfica (SAP-RM). Localmente, ocorre nos dois domínios a presença da Crosta laterítica detrítica (CLD). Todos os litotipos mostraram elevada heterogeneidade e foram avaliados quanto às suas características mineralógicas, texturais e geotécnicas, sendo alvo de ensaios de resistência, velocidade de propagação de ondas e densidade. A partir disso, observou-se que: (i) As crostas lateríticas dos dois domínios (CLF e CLFA) mostram-se menos espessas e mais endurecidas, além de apresentar maior proporção de neoformações minerais e menor porosidade em relação aos horizontes subjacentes. (ii) A laterita ferro-aluminosa (LFA) apresenta elevada heterogeneidade, e constitui um horizonte de transição entre o saprolito e a CLFA, exibindo feições típicas destes dois horizontes. (iii) A formação ferrífera laterítica (FFL) constitui o horizonte de transição no domínio da Formação Carajás, e apresenta a típica estruturação das formações ferríferas e fraturas em arranjo subortogonal a oblíquo, embora se mostrem em geral obliteradas ou mascaradas pelo efeito do intemperismo/laterização. (iv) O saprolito, presente no domínio de rochas máficas, apresenta-se parcialmente laterizado, engloba núcleos menos e mais alterados e apresenta foliação reliquiar (por vezes milonítica) e fraturas. Constitui o horizonte menos permeável, onde a textura varia de maciça a porosa e, de forma restrita, vesicular. Apresenta anisotropia marcante a incipiente, marcada pela foliação, sendo esta, por vezes obliterada. (v) Os resultados dos ensaios mostraram, em geral, elevada dispersão dos dados, evidenciando a heterogeneidade das propriedades físicas dos materiais estudados. O litotipo que apresentou os maiores resultados dentre os parâmetros avaliados foi a CLF, seguida da CLFA e FFL, indicando uma melhor qualidade geomecânica para este litotipo (CLF), dentre os demais litotipos. LFA e SAP-RM, apresentaram os menores valores. O volume de dados estudados não possibilitou a obtenção de correlações estatisticamente satisfatórias ou conclusivas entre os parâmetros geomecânicos.

**Palavras-chave:** Perfil laterítico, Horizontes, Crosta laterítica, Resistência geomecânica.

## ABSTRACT

Several studies have been developed throughout lateritic horizons of the Amazon region. In the last decades, especially in Carajás, due to the exploratory interest of iron ore and its relationship with the development of caves. Multidisciplinary studies are essential in order to make possible mineral mining activity and preservation of the cavities. The goal of this work is to study weathering horizons to obtain lithologic, geologic, geotechnical, mechanical characteristics that compose them. Two areas have been selected previously: N4E-01 and N4E-02, west border of the digging of N4EN, which present different geological characteristics. The N4E-01 is located in a mafic rocks domain, related to Igarapé Cigarra Formation, while N4E-02 is throughout ferrous rocks of the Carajás Formation. In the regional context, those two domains are interdigitated and sub-verticalized, with north-south direction approximately. Field surveys and laboratory tests were carried out, focusing on three weathering horizons, from the top to the base, namely: (i) Lateritic Crust, (ii) Transition Horizon and (iii) Saprolite. Ferrous rocks domain presents two horizons lithotypes: iron lateritic crust (CLF) and iron lateritic formation (FFL). Mafic rocks domains are represented by lateritic iron-alumina crust (CLFA), iron-alumina laterite (LFA), mafic saprolite (SAP-RM) and, locally, detrital lateritic crust (CLD). All of the lithotypes has been showed high heterogeneity, which was analyzed according to mineralogical, textures, and geotechnical characteristics, being tested into resistance rehearsals, the speed of propagation of waves and density. From this, it was possible to observe that: (i) The lateritic crusts of the two domains (CLF and CLFA) come less thick and more hardened, besides presenting a larger proportion of secondary mineral and smaller porosity in relation to the underlying horizons. (ii) iron-alumina laterite (LFA) presents high heterogeneity, and it constitutes a transition horizon between the saprolites and CLFA, exhibiting typical features of these two horizons. (iii) The ferrous lateritic (FFL) constitutes the transition horizon in the domain of Carajás Formation and it presents the typical structure of the iron formations and fractures in sub-orthogonal to the oblique arrangement, although they are generally obliterated or masked by the effect of the weathering /laterization. (iv) Saprolite, present in the mafic rocks domain comes into laterite partially, altered, presenting relic foliation (mylonitic) and fractures. It represents the less permeable horizon, where the texture varies from solid to porous and, in a way restricted, vesicular, and presenting from incipient to strong anisotropy marked by the foliation, sometimes obliterated. (v) The results of the tests showed, in general, high dispersion of the data, evidencing the heterogeneity of the physical properties of the studied materials. The lithotype that presented the largest results among the appraised parameters was CLF, following by CLFA and FFL, indicating a better geomechanical quality for CLF, among the other lithotypes. LFA and to SAP-RM, they presented the smallest values. The volume of studied data didn't make possible the obtaining of correlations statistically satisfactory or conclusive among the geomechanics parameters.

**Keywords:** Lateritic profiles, Horizons, Lateritic Crusts, Geomechanical resistance.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa Geológico do Domínio Carajás e adjacências. ....	25
Figura 2 - Perfil laterítico típico da área de N4E.....	28
Figura 3 – Localização da região do estudo ( destacada em vermelho). ....	35
Figura 4 - Etapas desenvolvidas no presente estudo. ....	36
Figura 5 - Localização das seções N4E-01 e N4E-02 dentro da área de estudo. ....	37
Figura 6 - Detalhe da área da seção N4E-01. ....	38
Figura 7- Detalhe da área da seção N4E-02. ....	39
Figura 8 - Teste de dureza de Schmidt (esclerometria). ....	43
Figura 9 - Testes de dureza de Schmidt. (A) Teste realizado em janela de representação litomecânica (in situ); (B) Teste executado em corpo de prova (em laboratório). ....	44
Figura 10 - Equipamento para a execução do Ensaio de Carga Pontual. ....	45
Figura 11 - Equipamento de ensaio PLT – A) Utilização do equipamento em laboratório; B, C e D) Ruptura válida em corpo de prova ensaiado.....	46
Figura 12 - Relação das dimensões dos corpos de prova nos ensaios de carga pontual; a) ensaio diametral; b) ensaio axial; c) para amostras blocos; d) para formas irregulares. ....	47
Figura 13 - Esquema de carregamento de um ensaio de resistência à compressão uniaxial. ...	48
Figura 14 - Aparelhagem para realização do ensaio de compressão uniaxial (UCS).....	49
Figura 15 - Equipamento de Ultrassom Pundit PL 200 Pulse Echo e execução do ensaio de velocidade de propagação de ondas.....	51
Figura 16 - Equipamentos/materiais utilizados no ensaio de densidade. A) Pesagem de amostra (massa natural e submersa); B) Embalagem da amostra em filme plástico; C) Pesagem de amostra (com filme); D) Secagem das amostras na estufa.....	53
Figura 17 - Distribuição dos litotipos na seção esquemática N4E-01 - setor Sul. ....	57
Figura 18 - Distribuição dos litotipos na seção esquemática N4E-01 – setor Central. ....	58
Figura 19 - Distribuição dos litotipos na seção esquemática N4E-01 – setor Norte. ....	59
Figura 20 - Distribuição dos litotipos na seção esquemática N4E-02.....	60
Figura 21 - Crosta laterítica detrítica (CLD). (A e B) CLD localizada, recobrindo/preenchendo superfícies de fratura; (C) Detalhe dos clastos angulosos a sub-arredondados, mal selecionados e matriz argilo-arenosa. Composição: óxidos e hidróxidos de ferro. ....	62
Figura 22 - Aspectos gerais da CLFA. (A) Superfície de exposição essencialmente goethítica (10 cm) de coloração cinza-metálica; (B) Aspecto acamadado/anastomosado, topo essencialmente goethítico (10 cm) de coloração cinza-metálica e base apresentando feições	

pisolíticas; (C) Topo goethítico com feições pisolíticas e botrioidais; (D e E) Feições pisolíticas na base; (F) Detalhe das feições pisolíticas. ....	64
Figura 23 - Padrão de desenvolvimento de vazios da CLFA. (A) Vazios desenvolvidos entre feições pisolíticas em topo essencialmente goethítico; (B) Vazios alongados e distribuídos de forma subhorizontalizada dando aspecto laminado ao maciço; (C) Vazios desenvolvidos entre feições pisolíticas (aspecto vermiforme a vesicular); (D) Vazios milimétricos isolados desenvolvidos em matriz vermelha endurecida (textura porosa-vesicular).....	65
Figura 24 - Aspectos petrográficos da CLFA. Notar os vazios milimétricos ao longo da estruturação da CLFA. Em (A), imagem tomada em luz natural transmitida; (B) Imagem tomada em luz refletida. ....	66
Figura 25 - Composição química e mineralógica da CLFA. No difratograma de raios-X, notar a ocorrência de hematita, goethita, gibbista e quartzo.....	67
Figura 26 - Aspectos da CLF. Deve-se dar atenção a presença de lâminas/vênulas de oxihidróxidos de ferro (goethita) na porção brechada. (A) CLF brechada; (B) CLF bandada/fraturada. ....	68
Figura 27 - Distribuição de vazios na CLF. (A e B) Vazios na CLF brechada; (C e D) Vazios na CLF bandada.....	69
Figura 28 - Aspectos petrográficos da CLF. Notar os vazios milimétricos alongados dispersos ao longo da estruturação da CLF. Em (A), imagem da amostra tomada em luz natural transmitida; (B) Imagem tomada em luz refletida.....	70
Figura 29 - Composição química e mineralógica da CLF. No difratograma de raiosX, notar a ocorrência de hematita e goethita apenas. ....	71
Figura 30 - Laterita ferro-aluminosa. (A) Aspecto predominante da LFA com aspecto laminado-descontínuo, contendo proporção significativa de vazios (textura vesicular a microcavernosa); (B) Aspecto laminado-descontínuo marcado pelo padrão linear-alongado de vazios; (C) Porção mais litificada e endurecida, semelhante à crosta, apresentando orientação linear de vazios; (D) Aspecto maciço-poroso; (E) Núcleo saprolítico.....	74
Figura 31- Padrão de desenvolvimento de vazios na Laterita ferro-aluminosa. (A) Vazios orientados em porção mais goethítica; (B) e (C) Vazios contornados por finas películas (córtex/cutanes/vênulas) goethíticas, alguns parcialmente preenchidos por material silto-argiloso de coloração amarelo-ocre; (D) Feições botrioidais e pisolíticas entre e dentro de vazios; (E), (F) e (G) Vazios contornados por finas películas (córtex/cutanes/vênulas) goethíticas, com desenvolvimento de espeleotemas, configurando miniaturas de cavidades; (H) Textura microesponjosa.....	75

Figura 32 - Laterita ferro-aluminosa. (A) Mesocavidade aparentemente controlada pela laminação e fraturas; (B) Mesocavidades semicirculares. Notar a delimitação do horizonte de transição pelas linhas vermelhas pontilhadas; (C) Mesocavidade alongada parcialmente preenchida por sedimentos de coloração amarelo-ocre; (D) Vazio decimétrico preenchido por sedimentos de coloração amarelo-ocre e esverdeada. ....	76
Figura 33 - Características das Fraturas. (A) e (B) Fratura de elevada persistência, ondulada, preenchida por vênulas de oxi-hidróxidos de ferro, exibindo um aspecto laminado subverticalizado; (C) e (D) Fratura preenchida por vênulas de oxi-hidróxidos de ferro, exibindo um aspecto laminado subverticalizado com material detrítico. ....	77
Figura 34 - Aspectos petrográficos da LFA. Notar os vazios milimétricos dispersos de forma irregular e heterogênea ao longo da estruturação da LFA. Em (A), imagem tomada em luz natural transmitida; (B) Imagem tomada em luz refletida. ....	78
Figura 35 - Composição química e mineralógica da LFA. No difratograma de raios-X, notar a ocorrência de hematita, goethita e gibbista. ....	79
Figura 36 - Aspectos gerais da FFL. A linha pontilhada vermelha indica o limite superior da FFL. (A) Litotipo exibindo dobras e padrão de fraturamento típico de formação ferrífera bandada; (B) Litotipo com textura mesocavernosa; (C) Superfícies de cisalhamento observada no litotipo; (D) Bandamento e fraturamento típicos do litotipo. ....	80
Figura 37 - Formação ferrífera laterítica (FFL). (A), (B), (C) e (D) Aspecto mais alterado da FFL; (E), (F) e (G) Aspecto mais preservado da FFL. ....	81
Figura 38 - Desenvolvimento de vazios na FFL. (A) Mesocavidade desenvolvida no litotipo; (B) e (C) Vazios desenvolvidos ao longo dos planos de bandamento e fraturamento; (D) Vazio parcialmente preenchido por material de aspecto terroso, desenvolvido ao longo do plano de bandamento; (E) Vazios milimétricos desenvolvidos ao longo do bandamento; (F) Vazio centimétrico apresentando espeleotemas; (G) Vazio centimétrico com desenvolvimento de espeleotemas e feições botrioidais. ....	82
Figura 39 - Horizonte saprolítico. (A) Visão ampla do litotipo; (B) e (C) Saprolito com foliação milonítica; (D) e (E) Porções em estágio inicial de laterização, endurecidas, contendo grãos / fragmentos de oxi-hidróxidos de ferro; (F) Rocha máfica semi-decomposta; Solo saprolítico; (G) Solos residuais maduros. ....	84
Figura 40 - Configuração dos vazios no SAP-RM. (A) Vazios milimétricos no litotipo; (B) Vazios milimétricos desenvolvidos entre grãos/ fragmentos de oxi-hidróxidos de ferro; (C) Vazios contornados por fina película de oxi-hidróxido de ferro de coloração cinza-metálica. ....	85

Figura 41 - Aspectos petrográficos, químicos e mineralógicos do SAP-RM. Notar a diminuição na quantidade de vazios. Em (A), imagem tomada em luz natural transmitida; (B) Imagem tomada em luz refletida. No difratograma de raios-X, notar a ocorrência de gibbsita, hematita e goethita. ....	86
Figura 42 - Composição química e mineralógica do SAP- RM. No difratograma de raios-X, notar a ocorrência de gibbsita, hematita e goethita. ....	87
Figura 43 - Representação esquemática de perfil laterítico desenvolvido em domínio de rochas máficas.....	88
Figura 44 - Síntese das principais características dos litotipos presentes no perfil laterítico desenvolvido em domínio de rocha máfica. ....	89
Figura 45 - Representação esquemática de perfil laterítico desenvolvido em domínio de formação ferrífera. ....	90
Figura 46 - Síntese das principais características dos litotipos presentes no perfil laterítico desenvolvido em domínio de formação ferrífera.....	91
Figura 47 - Estereograma das fraturas no domínio da rocha máfica – N4E-01. (Máximos em 115/84, 010/88 e 250/79).....	92
Figura 48 - Padrão de fraturamento presente no domínio de rochas máficas. (A) Fratura paralela à face do talude; (B) Padrão de fraturamento com preenchimento plano-paralelo típico da área; (C) Preenchimento de material detrítico em fratura subparalela ao afloramento.....	93
Figura 49 - Estereograma do bandamento no domínio das formações ferríferas – (Máximos em 358/81 e 185/75).....	94
Figura 50 - Estereograma das fraturas no domínio das formações ferríferas (Máximos em 107/75 e 010/88).....	94
Figura 51- Padrão de estruturação das formações ferríferas. (A) Superfícies de cisalhamento; (B e C) Destaque para o bandamento e fraturas. ....	95
Figura 52 - Variação do grau de alteração dos litotipos. Os valores numéricos representam o número de registros obtidos no levantamento. ....	97
Figura 53 - Variação da resistência ao golpe de martelo dos litotipos. Os valores numéricos representam o número de registros obtidos no levantamento.....	98
Figura 54 - Variação do grau de fraturamento dos litotipos. Os valores numéricos representam o número de registros obtidos no levantamento. ....	98
Figura 55 - Variação do RQD dos litotipos. Os valores numéricos representam o número de registros obtidos no levantamento. ....	99

Figura 56 - Variação da condição de juntas dos litotipos (os valores correspondem ao somatório dos pesos obtidos para persistência, rugosidade, abertura, alteração da parede e preenchimento). .....	99
Figura 57 - Classificação geomecânica dos litotipos. Os valores numéricos representam o número de registros obtidos no levantamento. ....	100
Figura 58 - Localização das investigações em planta - Seção N4E-01. ....	102
Figura 59 - Localização das investigações em planta - Seção N4E-02. ....	103
Figura 60 - Quantitativo de ensaios esclerométricos realizados em campo, por litotipo (cada ensaio composto de 20 testes). ....	104
Figura 61- Quantitativo de ensaios esclerométricos realizados em laboratório, por litotipo (20 testes para cada ensaio). ....	104
Figura 62 - IE médio obtido em campo, para cada litotipo. ....	105
Figura 63 - IE médio obtido em laboratório (corpos de prova), para cada litotipo. ....	105
Figura 64 - Quantitativo dos testes de carga pontual válidos (número de amostras por bloco). .....	107
Figura 65 -Quantitativo dos testes de carga pontual válidos (número de amostras por litotipo, nas respectivas seções). ....	107
Figura 66 - Quantitativo dos testes de carga pontual válidos (número de amostras, por litotipo, considerando a anisotropia). ....	108
Figura 67 - Índice de carga pontual ( $I_s(50)$ ) médio e desvio padrão obtido para cada litotipo. .....	108
Figura 68- Índice de resistência pontual $I_s(50)$ médio e desvio padrão para os litotipos considerando a direção do ensaio em relação à anisotropia. ....	109
Figura 69 - Quantitativo dos testes de velocidade sônica válidos (por bloco). ....	110
Figura 70 - Quantitativo dos testes de velocidade sônica válidos (por litotipo). ....	111
Figura 71 - Quantitativo dos testes de velocidade sônica válidos (por litotipo, considerando a anisotropia). ....	111
Figura 72 - Velocidade sônica média ( $V_p$ ) e desvio padrão obtidos para cada litotipo. ....	112
Figura 73 - Velocidade sônica média ( $V_p$ ) e desvio padrão obtidos para cada litotipo, considerando a direção do ensaio em relação à anisotropia das amostras. ....	112
Figura 74 - Quantitativo dos ensaios de compressão uniaxial por litotipo (corpos de prova por bloco). ....	115
Figura 75 - Quantitativo dos ensaios de compressão uniaxial (por litotipo, considerando a anisotropia). ....	115

Figura 76 - Valores médios de resistência e desvio padrão à compressão uniaxial, para cada litotipo.....	116
Figura 77 - Valores médios de resistência à compressão uniaxial e desvio padrão, para cada litotipo, considerando a anisotropia.....	116
Figura 78 - Quantitativo dos testes (corpos de prova) de densidade (por bloco). ....	118
Figura 79 -Quantitativo dos testes (corpos de prova) de densidade (por litotipo, nas respectivas seções). ....	118
Figura 80 - Densidade média e desvio padrão obtidos para cada litotipo. ....	119
Figura 81 - Diagrama de correlação linear e principal equação de regressão para CLF. ....	122
Figura 82 - Diagrama de correlação linear e a principal equação de regressão para CLFA. .	123
Figura 83 - Diagrama de correlação linear para LFA.....	124
Figura 84 - Diagrama de correlação linear e equação de regressão para FFL.....	125
Figura 85 - Correlação linear e equações de regressão para SAP-RM.....	126

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coluna estratigráfica e resumo de dados geocronológicos da Província Mineral de Carajás. ....	24
Tabela 2 - Parâmetros, faixas de valores e pesos do sistema de classificação RMR. ....	30
Tabela 3 - Correção no RMR relacionada com a orientação das descontinuidades.....	31
Tabela 4 - Resultados do sistema de classificação RMR de Bieniawski.....	31
Tabela 5 - Parâmetros e respectivos pesos de ajuste propostos por Laubscher (1990). ....	32
Tabela 6 - Classes e pontuações do maciço segundo o Sistema Q.....	34
Tabela 7 - Teste de consistência das rochas com uso do martelo de geólogo. ....	42
Tabela 8 - Classificação dos litotipos e horizontes de intemperismo adotada no presente trabalho. ....	55
Tabela 9 - Quantitativo geral das investigações geológico-geotécnicas. ....	101
Tabela 10 - Exemplos de valores de velocidades de propagação de ondas longitudinais (ondas P).....	114
Tabela 11 - Relação dos resultados obtidos das investigações geológico-geotécnicas em campo e laboratório para cada litotipo. ....	120

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	19
1.1	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO .....	20
1.2	OBJETIVO GERAL .....	21
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1	Contexto Geológico regional .....	22
2.2	Coberturas Lateríticas .....	25
2.3	Classificações geomecânicas de maciços rochosos .....	28
2.3.1	SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO RMR .....	30
2.3.2	SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO MRMR.....	32
2.3.3	SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO Q .....	33
3	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	35
4	METODOLOGIA DA PESQUISA .....	36
4.1	Levantamento Geológico- geotécnico.....	39
4.1.1	CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA, MINERALÓGICA E QUÍMICA DOS LITOTIPOS ASSOCIADOS AOS PERFIS DE INTEMPERISMO .....	40
4.2	Ensaaios geomecânicos.....	40
4.2.1	TESTE DE RESISTÊNCIA COM MARTELO DE GEÓLOGO.....	41
4.2.2	TESTE DE DUREZA DE SCHMIDT (ESCLEROMETRIA) .....	42
4.2.3	ENSAIOS DE CARGA PONTUAL (PLT) .....	45
4.2.4	ENSAIOS DE COMPRESSÃO UNIAXIAL (UCS).....	48
4.2.5	ENSAIOS DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS (VELOCIDADE SÔNICA – $V_p$ ).....	50
4.2.6	DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE .....	52
4.3	Análises Estatísticas e Correlações .....	53
5	RESULTADO E DISCUSSÕES.....	55
5.1	Caracterização geológico- geotécnica.....	55
5.1.1	CARACTERIZAÇÃO DOS LITOTIPOS E HORIZONTES DE INTEMPERISMO .....	55
5.1.2	CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA .....	95
5.2	Investigações geológico- geotécnicas .....	100

5.2.1	ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO (IE) .....	103
5.2.2	ÍNDICE DE RESISTÊNCIA À CARGA PONTUAL ( <i>Point Load Test</i> ).....	106
5.2.3	VELOCIDADE SÔNICA ( $V_p$ ).....	110
5.2.4	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO UNIAXIAL (UCS).....	114
5.2.5	DENSIDADE (Peso Volúmico Seco).....	117
5.3	Análises Estatísticas, Correlações e Interpretação dos Resultados das Investigações de Campo e Laboratório.....	121
5.3.1	CROSTA LATERÍTICA FERRUGINOSA (CLF).....	122
5.3.2	CROSTA LATERÍTICA FERRO-ALUMINOSA (CLFA) .....	123
5.3.3	LATERITA FERRO-ALUMINOSA (LFA).....	124
5.3.4	FORMAÇÃO FERRÍFERA LATERÍTICA (FFL).....	125
5.3.5	SAPROLITO DE ROCHA MÁFICA (SAP-RM) .....	126
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	127
	REFERÊNCIAS .....	132

## 1 INTRODUÇÃO

A Amazônia Oriental Brasileira foi e ainda é uma região propícia ao desenvolvimento de perfis lateríticos devido à sua localização geográfica (zona intertropical) e às variações climáticas (alternância de períodos quentes e úmidos) que ocorrem nesta região. Neste contexto, perfis lateríticos ocorrem comumente sustentando platôs e/ou superfícies tabulares ligeiramente onduladas. O topo aplainado dos platôs é interpretado como testemunho da Superfície Sulamericana resultante de extensa pediplanização que afetou toda a Amazônia Oriental (COSTA 1991).

O intemperismo químico atuando sobre rochas, principalmente as silicáticas, tende a concentrar metais e, com isso originar depósitos minerais residuais de importância econômica. Uma grande parte de depósitos minerais residuais expressivos situa-se no Brasil. Dentre tais depósitos com maior importância na Amazônia brasileira destacam-se as jazidas de ferro de Carajás, as coberturas lateríticas auríferas dos setores Salobo e Pojuca, as lateritas niquelíferas do Vermelho e de São João do Piauí, as lateritas manganésíferas da Serra do Navio no Amapá e do Igarapé Azul na região de Carajás, as lateritas fosfáticas da região do Gurupi; as lateritas aluminosas e bauxitas das regiões do Baixo Amazonas e de Paragominas, bem como os depósitos de Caulim das regiões do rio Jari e Capim.

Perfis lateríticos ocorrem em toda a região amazônica e sempre estão associados a mineralizações de alto teor, conforme já mencionado anteriormente. O mesmo processo que originou os depósitos de ferro de alto teor da região de Carajás foi também responsável pelo surgimento e desenvolvimento de centenas de cavidades que ocorrem na região, que compõem a Unidade Espeleológica Carajás. A legislação vigente que regula o manejo das cavidades é extremamente nova e limitada e, com isso, surgem conflitos com relação a extração do minério de ferro e a conservação das cavidades. Poucos estudos relacionados a caracterização geológica destas formações foram realizados. Com relação a questão geotécnica, este será o primeiro estudo que irá executar um estudo sistemático coletando resistências e grau de intemperismo de cada horizonte laterítico e associando a ocorrência de cavidades. Este estudo também servirá de suporte para os demais estudos que estão sendo realizados visando a redução do raio de proteção de cavidades de máxima relevância, bem como o manejo adequado das cavidades bem como o melhor aproveitamento das reservas de minério de ferro.

## 1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

A Unidade Espeleológica Carajás, localizada no sudeste do Estado do Pará comporta hoje centenas de cavidades hospedadas em formações lateríticas desenvolvidas às custas das rochas do Grupo-Grão-Pará (formações ferríferas e rochas vulcânicas básicas). Uma grande parte das reservas de ferro de Carajás atualmente está bloqueada por encontrar-se em raios de influência de cavidades de máxima relevância, protegidas pela legislação brasileira vigente. Desta forma, para que o minério de ferro que ocorre nestas áreas seja explorado, é necessário que estudos técnicos direcionados para redução do raio de proteção de 250 m sejam realizados. Assim, estudos que tenham como premissa a caracterização geológica e geotécnica dos litotipos em que as cavidades ocorrem são de extrema importância para que possam suportar as questões de estabilidade e integridade física destas formações no momento da aproximação da lavra. Além disso, não existem nesta região, estudos desta natureza, que tenham sido realizados de forma sistemática. Desta forma, esta pesquisa será de extrema importância para contribuir com a resolução dos problemas de estabilidade das cavidades no momento da aproximação da lavra bem como de igual relevância para a evolução do conhecimento espeleológico da região amazônica.

Esse estudo permitirá que sejam sugeridos parâmetros geológico-geotécnicos para os litotipos em que as cavidades se desenvolveram. A partir daí, como benefício maior, têm-se a produção de informações que suportarão a tomada de decisão com relação a lavra em áreas com ocorrência de cavidades.

## **1.2 OBJETIVO GERAL**

Conhecer o comportamento geotécnico dos horizontes que compõem os perfis lateríticos da área de estudo, visto que esses horizontes estão relacionados à formação, evolução e preservação de cavidades naturais subterrâneas. Por meio disso, busca-se subsidiar, juntamente com os diversos estudos que vêm sendo desenvolvidos, a tomada de decisão por parte das equipes de gestão do patrimônio espeleológico e da atividade minerária adjacente.

## **1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- i. Caracterização geológico-geotécnica de cada horizonte do perfil de intemperismo da região de N4EN;
- ii. Elaborar padrões geológico-geotécnicos característicos para cada horizonte do perfil de intemperismo de forma sistemática.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A área de estudo encontra-se no domínio do Grupo Grão Pará (Supergrupo Itacaiúnas). Localiza-se na Província Mineral de Carajás (PMC), no extremo sudeste do Cráton Amazônico (ALMEIDA et al., 1981) e norte da Plataforma Sul-Americana (CORDANI & SATO, 1999). A Província Mineral de Carajás é uma das mais importantes reservas minerais do Brasil, contendo um dos maiores depósitos de ferro do mundo, além de outros minérios como cobre, ouro e manganês e tem sido uma das áreas mais estudadas do Cráton Amazônico. DOCEGEO (1988) subdivide a Província Mineral Carajás em três unidades:

- ✓ Complexo Xingu;
- ✓ Supergrupo Itacaiúnas, englobando todas as rochas metavulcanossedimentares (grupos Igarapé Salobo, Igarapé Pojuca e Grão-Pará) e metarenitos (Grupo Rio Fresco, correspondente à Formação Águas Claras de Araújo & Maia (1991) e;
- ✓ Granitos intrusivos proterozóicos.

Será apresentado um detalhamento maior do Grupo Grão Pará, onde a área de estudo está inserida.

O Grupo Grão Pará é subdividido, da base para o topo, em três formações: Parauapebas, Carajás e Igarapé Cigarra, esta última possivelmente equivalente ao Grupo Igarapé Bahia, definido na região de seu depósito homônimo, assim como os grupos Igarapé Salobo e Pojuca e Igarapé Boa Sorte (MACAMBIRA, 2003).

A Formação Parauapebas constitui-se de rochas vulcânicas de sequências bimodais de basaltos e riolitos com 4 a 6 km de espessura (PINHEIRO & HOLDSWORTH, 1997). As rochas vulcânicas apresentam idade de  $2758 \pm 39$  Ma, obtidas através de U-Pb em zircão, interpretadas como sendo a idade principal do derrame (GIBBS et al., 1986). A Formação Carajás engloba formações ferríferas bandadas constituídas por jaspelitos meso e microbandados formados por bandas de jaspe (chert impregnado por hematita microcristalina) e óxidos de ferro depositados em  $2.751 \pm 4$  Ma (KRYMSKY et al., 2002). Estas rochas exibem contato com a Formação Parauapebas e mostram intercalações entre as rochas vulcânicas máficas e formações ferríferas bandadas (GIBBS & WIRTH 1990). Volumes significativos de rocha básica estão encaixados nas rochas ferríferas, destacando-se diques e outros corpos

intrusivos. A Formação Igarapé Cigarra foi proposta por Macambira et al. (1990) para o conjunto de rochas denominado por Gibbs et al. (1986) como Unidade Superior. Possui contato concordante com a Formação Carajás e constitui-se de rochas máficas com intercalações de tufos, seguidos por sedimentos clásticos e químicos (MACAMBIRA, 2003). É composta por basaltos alterados hidrotermalmente, com textura ígnea preservada, semelhantes aos da Formação Parauapebas. Parece marcar o fim do vulcanismo, sedimentação química e contribuição clástica no Grupo Grão-Pará, iniciando desta forma uma sequência regressiva.

A Formação Igarapé Boa Sorte foi definida por Macambira et al. (1990) e constitui a unidade mais superior do Grupo Grão Pará. Gibbs & Wirth (1990) também interpretaram essas rochas como a parte superior do GGP. Ao contrário, Nogueira et al. (1995), consideraram-na como Membro Inferior da Formação Águas Claras. Esta formação é composta essencialmente por siltitos com intercalações de folhelhos, ambos carbonosos e carbonáticos, com níveis arenosos em direção à base. Esses siltitos e folhelhos são finamente laminados (0, 1 a 2 mm), cinza-escuros, constituídos por quartzo, rodocrosita, muscovita e caulinita, além de matéria carbonosa. As rochas dessa formação englobam o protominério da jazida de Mn do Azul e ocorrem também no trecho, do km 38 ao km 43, da estrada Azul-Bahia. A espessura dessa unidade foi estimada em 320 m, na área da Mina do Azul (Silva, 1988), apresentando a seguinte sequência:

No topo, ocorrem siltitos de cor marrom a vermelho com espessura superior a 70 m;

Unidade Manganésifera Superior (marga manganésifera rítmica) com espessura de 33 a 54 m;

Siltitos cinza claro a escuro e violeta com 17 a 44 m de espessura;

Siltito carbonoso com cerca de 50 m;

Unidade Manganésifera Inferior (rocha carbonática manganésifera) com 18 a 40 m de espessura;

Na base encontram-se siltitos e argilitos com espessura de 65 m;

Essa unidade representa depósitos carbonáticos associados a sedimentos pelíticos e elásticos finos que poderiam marcar a fase de fechamento da "bacia". Dardenne & Schobbenhaus (2001) classificam o depósito de Mn do Azul como do tipo marinho singenético, na margem de bacias anóxicas e afirmam que a mineralização original de rodocrosita deve ter se desenvolvido na zona do talude, entre a plataforma e a bacia profunda.

Neste trabalho será adotada a coluna estratigráfica adaptada de Macambira (2003).

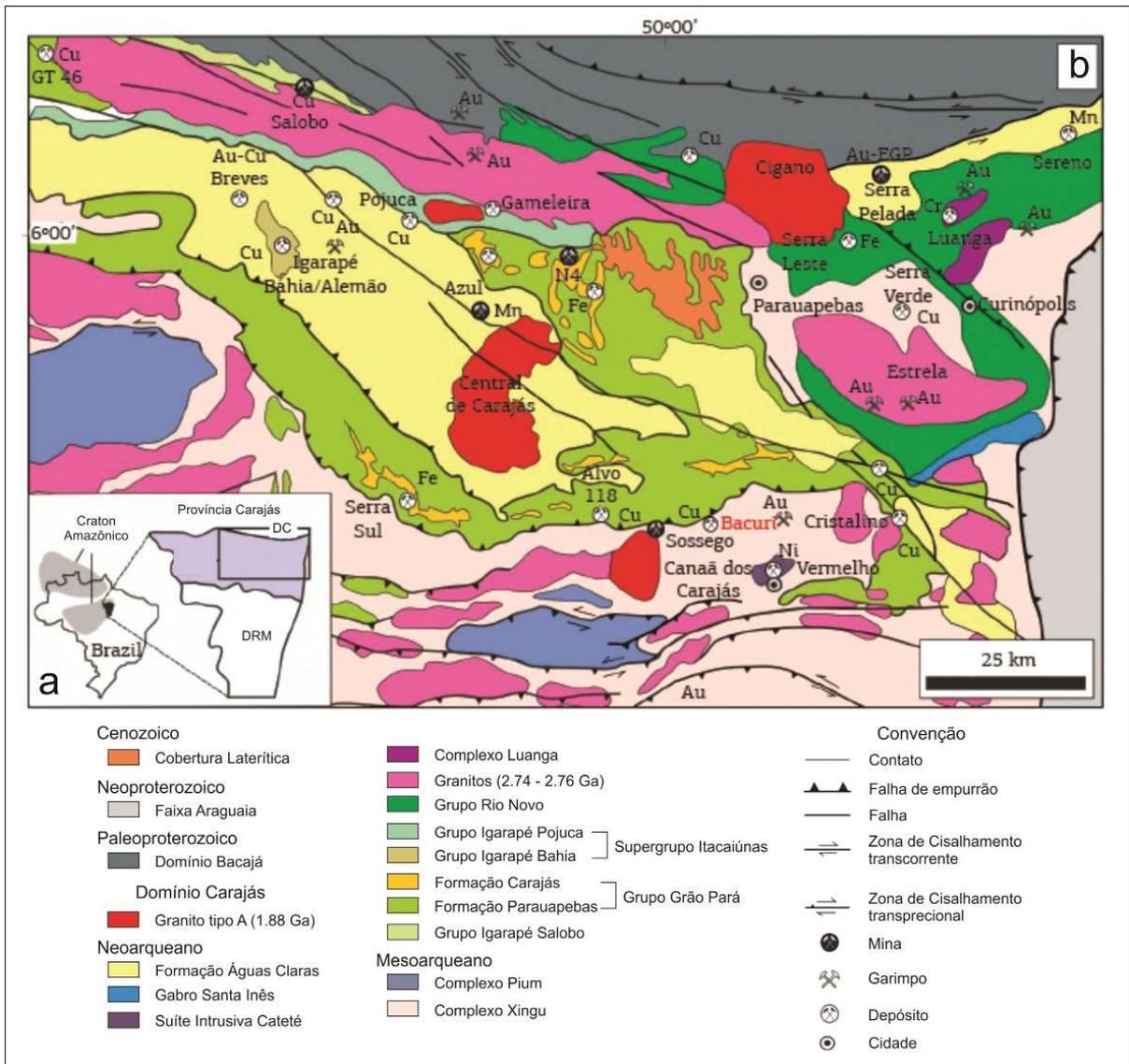
Tabela 1 - Coluna estratigráfica e resumo de dados geocronológicos da Província Mineral de Carajás.

EON	ERA	UNIDADE	DESCRIÇÃO
FANERÓZICO	PALEOZÓICO	<b>CORPOS MÁFICOS INTRUSIVOS</b>	Diques e soleiras de diabásios
PROTEROZÓICO	INFERIOR	<b>GRANITO SERRA DOS CARAJÁS</b>	Granitos a anfibólios e/ou biotita
		<b>GABRO SANTA INÊS</b>	Gabro grosseiro hidrotermalizado
		<b>FORMAÇÃO IGARAPÉ AZUL</b>	Arenitos com níveis conglomeráticos e siltitos intercalados
ARQUEANO	GRUPO GRÃO PARÁ	<b>Formação Igarapé Boa Sorte</b>	Siltitos e folhelhos carbonáticos, com arenitos subordinados
		<b>Formação Igarapé Cigarra</b>	Basaltos, tufos, BIF's, chert, quartzo wacke e quartzo arenito
		<b>Formação Carajás</b>	BIF's com soleiras de basalto
		<b>Formação Parauapebas</b>	Basaltos e riolitos
	GRUPO POJUÇA	<b>Formação Gameleira</b>	Meta-wackes e meta-siltitos
		<b>Formação Corpo 4</b>	BIF's (sulfeto) e xistos
		<b>Formação Bueno</b>	Anfibolitos e BIF's (óxido)
	<b>COMPLEXO XINGU</b>		Gnaisses granodioríticos e tonalíticos, anfibolitos e trondhjemitos

Fonte: Macambira, 2003.

Feio et al. (2013) consideram a Província Carajás constituída por dois domínios tectônicos distintos, um ao norte, denominado Domínio Carajás e outro a sul chamado de Domínio Rio Maria. Entre os dois, ocorreria a presença de um subdomínio de transição, com características similares aos dois Domínios. Os limites entre os blocos tectônicos permanecem incertos. O Domínio Carajás engloba a Bacia Carajás onde está localizada a área de estudo e o Subdomínio de Transição, já o Domínio Rio Maria por sua vez seria correspondente ao antigo Terreno Granito-Greenstone Rio Maria. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra o mapa geológico do Domínio Carajás modificado de Vasquez et al. (2008).

Figura 1 - Mapa Geológico do Domínio Carajás e adjacências.



Fonte: Adaptado de Vasquez et al., 2008.

## 2.2 COBERTURAS LATERÍTICAS

As Coberturas Lateríticas da Serra dos Carajás são horizontes lateríticos desenvolvidos, principalmente, a partir do intemperismo de rochas metavulcânicas das Formações Igarapé Cigarra e Parauapebas e das Formações Ferríferas Bandadas (FFB) da Formação Carajás, do Grupo Grão-Pará (PILO & AULER, 2009; MAURITY & KOTSCHOUBEY, 1995).

Estas rochas foram submetidas a processos de intemperismo de evolução polifásica, controlados por variações climáticas, que ocasionaram geração e transporte de fragmentos, e solubilização, redistribuição e cimentação de, principalmente, oxi-hidróxidos de ferro

(KOTSCHOUBEY & LEMOS, 1985; KOTSCHOUBEY et al., 1989; MACAMBIRA et al., 1990; SOUZA & KOTSCHOUBEY, 1991; SOUZA, 1993; TRENDALL et al., 1998; KRYMSKY et al., 2002; MACAMBIRA, 2003).

Tolbert et al. (1971) *apud* Maurity (1995), realizaram um dos primeiros trabalhos referentes ao manto de intemperismo da Serra dos Carajás, individualizando, na superfície do platô de Serra Norte, três tipos principais de canga, de acordo com características texturais e composicionais: canga hematítica, canga hematita-goethítica e hematita dura. A canga hematítica corresponde a um aglomerado de fragmentos hematíticos provenientes das FFB dessilicificadas. A canga hematita-goethítica corresponde a um aglomerado mal selecionado de seixos e fragmentos hematíticos, goethíticos, magnetíticos e de canga, cimentados por oxihidróxidos de ferro e contendo uma matriz argilosa em quantidade subordinada. Esta canga recobre tanto formações ferríferas como as rochas máficas. A hematita dura representaria o minério de ferro.

Maurity (1995) observou, nas áreas planas do platô N1 diversos tipos de cobertura laterítica, com características texturais e composicionais distintas, adotando, informalmente, três denominações principais: laterita ferro-aluminosa, conglomerado laterítico e brecha hematítica. Essas coberturas estão associadas a rochas do Grupo Grão Pará, representado pelas rochas metavulcânicas ácidas e básicas da Formação Parauapebas e rochas ferríferas da Formação Carajás. A laterita ferro-aluminosa comporta uma crosta ferro-aluminosa de até 15m de espessura que capeia um espesso pacote saprolítico proveniente de xistos miloníticos originados dos metavulcanitos do Grupo Grão Pará. Apresenta na base textura predominantemente esferulítica, composta por pseudo-óólitos milimétricos de composição ferro-aluminosa (gibbsita, Al-goethita e hematita), com zonas isoladas exibindo textura microporosa e foliação milonítica reliquiar. A parte mais superficial dessa crosta, de espessura de 0,5 a 1,0 m, encontra-se cortada por um sistema sub-horizontalizado e ligeiramente anastomosado de vênulas ou cutanes hematito-gibbsíticas que geralmente exibem microestruturas coliformes. Essa venulação confere a essa porção superior um grau maior de litificação do que o das porções inferiores. A brecha hematítica é desenvolvida sobre as formações ferríferas e comumente chamada de canga. É constituída de fragmentos centimétricos e angulosos, principalmente de hematita, em geral placóides, laminados a maciços, apresentando orientação desordenada e empacotamento denso. Preenchendo espaços intersticiais se tem uma matriz pouco abundante de consistência argilosa, composta essencialmente de hematita e goethita. O conglomerado laterítico representa depósitos de seixos e blocos de material proveniente do desmantelamento de crostas localmente sobrepostas ao

saprolito e ao minério de ferro, e preenche depressões restritas em forma de calhas. Os seixos são mal selecionados, variando de arredondados, angulosos ou placóides e formam arcação fechado. Os espaços intersticiais estão preenchidos por uma matriz argilosa, avermelhada, composta de hematita e caulinita, ou parcialmente cimentados por gibbsita macrocristalina alternando com filmes de hematita, tendo aspecto poroso e friável. Análises mineralógicas por difração de raios X mostraram seixos argilosos compostos de gibbsita, hematita e Al-goethita. A parte mais superficial desse pacote, submetido a uma ação mais vigorosa dos agentes intempéricos, apresenta-se normalmente mais litificada, compacta e ferruginosa. Ela comporta venulações ou cutanes hematito-goethíticas subhorizontalizadas, formando um sistema mais ou menos anastomosado de 0,5 a 1,0m de espessura.

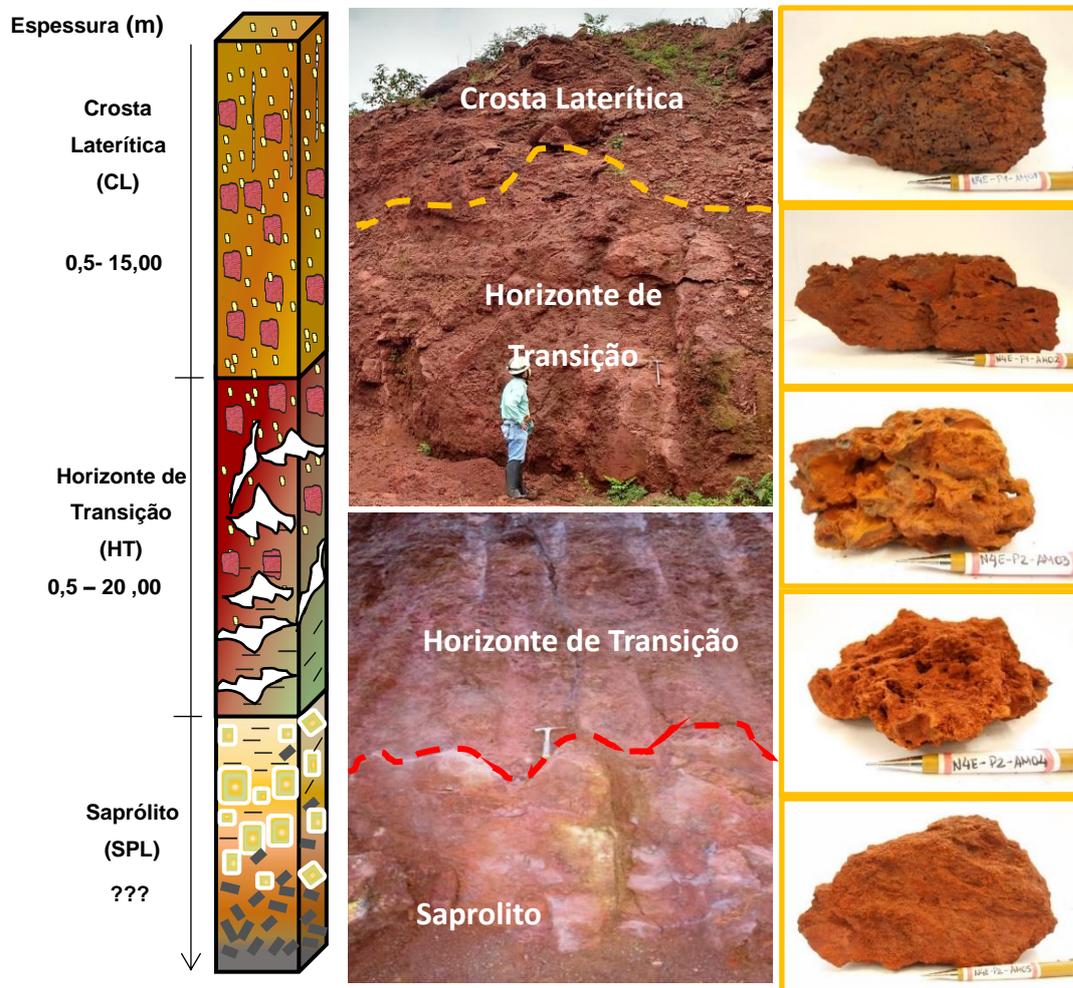
Um importante trabalho de conceituação e caracterização de lateritas brasileiras é apresentado no estudo de Bigarella et. al. (1996). Segundo estes autores, o termo laterito é utilizado para designar a laterita endurecida, também referida internacionalmente como *duricrust* e *ferricrete*.

Costa (1991), em seu trabalho intitulado “Aspectos Geológicos dos Lateritos da Amazônia” utiliza o termo laterito de forma mais abrangente, para designar rochas formadas ou em fase de formação por meio de intemperismo químico de rochas preexistentes, inclusive de lateritos antigos, sob condições tropicais. Os lateritos podem ser coesos, maciços, incoesos, terrosos ou argilosos, e ainda classificados como maduros ou imaturos, autóctones ou alóctones. A textura, estrutura, mineralogia, composição química e coloração das rochas lateríticas variam amplamente em seção vertical, dando origem a uma sucessão característica de horizontes subhorizontais que compõem os perfis lateríticos. Os lateritos mais antigos, designados Lateritos Maduros, constituem-se em perfis bem evoluídos e têm no topo um horizonte ferruginoso, ferro-aluminoso, bauxítico ou bauxítico-fosfático, que abriga a maioria dos depósitos de bauxita da região. A crosta ferruginosa ou ferro-aluminosa comporta-se como proteção parcial contra a erosão física e o intemperismo químico e na paisagem regional geralmente sustenta superfícies planas elevadas de platôs. Segundo este autor, estas rochas desenvolveram-se em dois períodos bem distintos: o Terciário Inferior (Eoceno-Oligoceno) e o Terciário Superior (Pleistoceno).

De acordo com Gonçalves et al (2016), mapeamentos geológicos sistemáticos realizados na mina de N4E e em cavidades do entorno permitiram a definição do perfil laterítico típico da região, e sua individualização em três horizontes principais, a saber, do topo para a base: Crosta laterítica (CL), Horizonte de Transição (HT) e Saprolito, oriundos do intemperismo de rochas vulcânicas (Figura 2). Estes três horizontes apresentam particularidades do ponto de vista textural e mineralógico, sendo uma destas relacionada à

ocorrência de “zonas de baixa densidade”, devido à presença de maciços com textura porosa e cavernosa (MAURITY, 1995).

Figura 2 - Perfil laterítico típico da área de N4E.



Fonte: Gonçalves et al, 2016.

### 2.3 CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS DE MACIÇOS ROCHOSOS

Os sistemas de classificação geomecânica foram desenvolvidos considerando determinadas características de maciços rochosos previamente selecionadas com o objetivo de se definir diferentes classes de maciço com visando apoiar decisões de engenharia. As classificações são elaboradas por meio da disposição hierárquica das características do maciço e organizadas em categorias. Tal concepção resulta em uma caracterização semiquantitativa de um maciço rochoso, implicando na previsão de suas aptidões e seu comportamento

geomecânico, em face de uma utilização específica de engenharia. O principal objetivo das classificações geomecânicas é prever o comportamento de maciços rochosos em escavações (JUNIOR & OJIMA, 1998).

Bieniawski (1989) ressalta que um sistema de classificação geomecânica não deve ser a única ferramenta aplicada em um projeto de engenharia devido tratar-se de uma abordagem empírica, exigindo com isso a necessidade de serem realizados estudos analíticos, observações e medidas de campo e bem como a análise de especialistas.

As técnicas de previsão do comportamento geomecânico dependem essencialmente da aquisição de dados confiáveis e relevantes. Deere e Miller (1966), Bieniawski (1973), Carter (1992) entre outros pesquisadores ressaltam que a caracterização geológica, variável fundamental em todos os sistemas de classificação geomecânica, sempre envolve certo grau de imprecisão.

A classificação geomecânica dos maciços rochosos envolve em síntese o levantamento de atributos qualitativos e quantitativos que permitem avaliar a qualidade geotécnica dos maciços e inferir previsões quanto a seu comportamento frente a esforços externos ou mesmo naturais. A metodologia de classificação dos maciços rochosos constitui-se de caracterização geológico-geotécnica específica, posicionamento das descontinuidades no espaço e a classificação dos parâmetros avaliados. Resumidamente, os sistemas de classificação geomecânica, quando aplicados, seguindo-se as recomendações propostas pelos pesquisadores que as conceberam, cumprem o seu objetivo principal que, segundo Bieniawski (1989), é a setorização do maciço rochoso de acordo com as características geológico-geotécnicas, de modo que seja possível expressar a qualidade de cada um desses setores por meio de classes.

Segundo Deere e Miller (1966), o RQD (Rock Quality Designation) baseia-se na resistência da rocha intacta e na frequência de fraturamento, sendo determinado pela avaliação de testemunhos de sondagem e foi desenvolvido para designar a qualidade média do maciço rochoso *in situ*. Conforme estes autores, a razão entre o comprimento de porções rígidas, relativamente pouco fraturadas do testemunho de sondagem e a recuperação é determinada, considerando-se apenas fragmentos acima de 10 cm. A rocha é então classificada como excelente, boa, razoável e ruim, em ordem decrescente de qualidade, com base na percentagem de fragmentos íntegros recuperados na manobra.

Priest & Hudson (1976) propõem uma abordagem teórica que relaciona o espaçamento das descontinuidades ao RQD com base na distribuição estatística de valores possíveis de

espaçamento. De acordo com esses autores, auferir o RQD consome tempo e, da forma como foi concebido, pode levar a resultados não representativos para o maciço rochoso. Os autores propõem uma equação matemática para o cálculo do RQD que demonstra uma correlação satisfatória entre esses valores e a forma estabelecida por Deere e Miller (1966), a qual é exposta na expressão abaixo:

$$RQD = 100e^{-0,1\lambda} (0,1\lambda + 1),$$

onde  $\lambda$  é o espaçamento das descontinuidades.

Abaixo serão detalhadas as características de alguns dos sistemas de classificação geomecânica consagrados na literatura.

### 2.3.1 SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO RMR

A classificação RMR (Rock Mass Rating) foi proposta em 1973 por Bieniawski. Desde então esta classificação vem sendo aperfeiçoada até a revisão de 1989. Este sistema é composto pela análise de nove parâmetros relativos ao maciço rochoso em estudo e às descontinuidades nele contidas, sendo que a cada parâmetro é atribuída uma nota e a somatória é o resultado do sistema de classificação (Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4).

Tabela 2 - Parâmetros, faixas de valores e pesos do sistema de classificação RMR.

Parâmetro		Faixa de Valores				
Rocha intacta	Resistência	Muito resistente	Resistente	Medianamente resistente	Branda	Muito branda
	Peso	15	12	7	4	2
RQD		90 a 100%	75 a 90%	50 a 75%	25 a 50%	<25%
Peso		20	17	13	8	3
Espaçamento		>2 m	0,6 a 2 m	0,6 a 2 m	0,2 a 0,06 m	<0,06 m
Peso		20	15	10	8	5
Condições das descontinuidades	Persistência	<1m	1 a 3 m	3 a 10 m	10 a 20 m	>20 m
	Peso	6	4	2	1	0
	Abertura	Nenhum	<0,1 mm	0,1 a 1 mm	1 a 5 mm	>5 mm
	Peso	6	5	4	1	0
	Rugosidade	Muito rugosa	Rugosa	Levemente rugosa	Lisa	Espelhada
	Peso	6	5	3	1	0
	Preenchimento	Nenhum	Duro	Levemente duro	Macio	Macio
	Peso	6	4	2	2	0
Alteração das paredes		Sã	Levemente alterada	Moderadamente alterada	Alterada	Decomposta
	Peso	6	5	3	0	0
Atividade hidrológica	Condições gerais	Seco	Úmido	Molhado	Gotas	Fluxo
	Peso	15	10	7	4	0
Orientação das descontinuidades	Túneis e minas subterrâneas	Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito Desfavorável
	Peso	0	-2	-5	-10	-12

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989).

Para que o sistema seja aplicado, o autor sugere que o maciço rochoso seja dividido em setores estruturais com características semelhantes, normalmente separados por grandes estruturas, e que a classificação seja aplicada à cada um desses setores. Após a obtenção dos valores para os nove parâmetros relativos ao maciço rochoso e às descontinuidades, Bieniawski sugere realizar uma correção relacionada à orientação das descontinuidades de acordo com sua influência na estabilidade da estrutura (Tabela 3).

Tabela 3 - Correção no RMR relacionada com a orientação das descontinuidades.

Orientação das descontinuidades					
Túneis e minas subterrâneas	Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Peso	0	-2	-5	-10	-12
Fundações	Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Peso	0	-2	-7	-15	-25
Taludes	Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Peso	0	-5	-25	-50	-60

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989).

Tabela 4 - Resultados do sistema de classificação RMR de Bieniawski.

Somatória	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
Número da classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Maciço muito bom	Maciço bom	Maciço regular	Maciço ruim	Maciço muito ruim

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989).

Os parâmetros considerados são: resistência da rocha intacta, RQD Deere & Miller (1966), espaçamento, persistência, abertura, rugosidade, preenchimento, alteração das paredes, atividade hidrológica e orientação das descontinuidades.

Para que os valores obtidos sejam representativos, é necessário que sejam delimitadas porções homogêneas da rocha, de forma que as características das descontinuidades e do maciço sejam similares. A definição dos pontos de mapeamento e a delimitação dos limites de classes deve ser feita de forma cuidadosa (BIENIAWSKI, 1989). Bieniawski, 1984, defendeu que a classificação seja aplicável a diversos projetos de engenharia, como taludes rochosos, fundações e minas subterrâneas, sendo a aplicação mais frequente em túneis.

### 2.3.2 SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO MRMR

Em 1974, o pesquisador Laubscher propôs um sistema de classificação geotécnica baseado no RMR de Bieniawski, incluindo quatro novas variáveis para a criação do Mining Rock Mass Rating - MRMR. O principal objetivo era obter um índice adequado às necessidades da mineração, considerando variáveis específicas desse contexto (LAUBSCHER, 1990).

Esse sistema de classificação realizou ajustes no sistema RMR de Bieniawski bem como correções em alguns fatores. Foram ainda propostos classes e pesos diferentes a partir dos que foram considerados por Bieniawski para os parâmetros geotécnicos considerados no RMR. Os parâmetros considerados nesta classificação são a umidade, a resistência e o RQD do maciço e o espaçamento e a condição das descontinuidades, envolvendo rugosidade, grau de alteração das paredes e preenchimento (LAUBSCHER, 1990). Para obter-se o MRMR pondera-se o RMR ajustado com quatro variáveis relacionadas a escavação mineral, as quais são: potencial de alteração do maciço ao longo do tempo, tensões induzidas pela mineração, orientação das descontinuidades e efeitos de detonação (Tabela 5). Com base na experiência empírica, este sistema sugere esses quatro parâmetros definindo com isso, a importância e os valores que devem ser adotados.

Tabela 5 - Parâmetros e respectivos pesos de ajuste propostos por Laubscher (1990).

<b>Parâmetro</b>	<b>Ajuste possível (%)</b>
Potencial de alteração do maciço ao longo do tempo	30-100
Tensões induzidas pela mineração	63-100
Orientação das descontinuidades	60-120
Efeitos de detonação	80-100

De acordo com Jakubec & Laubscher, (2000), o MRMR foi concebido para mineração subterrânea, mas seu uso foi expandido para diversas aplicações em operações minerárias. Estes autores ressaltam que não se trata de uma análise rigorosa pois os resultados estão sujeitos ao julgamento da engenharia. O sistema proposto por Laubscher é amplamente difundido na mineração subterrânea e considerado como uma das principais referências para consultores em todo o mundo (CHITOMBO, 2010).

### 2.3.3 SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO Q

O sistema Q de classificação geomecânica foi desenvolvido pelos pesquisadores noruegueses Barton, Lunde & Lien (1974). Esse sistema se baseia na relação algébrica entre 6 variáveis. O resultado obtido por meio dessa equação se relaciona à classe geomecânica do maciço, conforme exposto na expressão abaixo:

$$Q = (RQD/Jn) \times (Jr/Ja) \times (Jw/ SRF)$$

Onde:

RQD: Rock Quality Designation (DEERE E MILLER, 1966);

Jn: Número de famílias das estruturas;

Jr: Rugosidade da descontinuidade mais desfavorável;

Ja: Grau de alteração e/ou preenchimento da família mais desfavorável;

Jw: Condições de água da descontinuidade;

SRF: Fator de redução de tensão.

Dentro do que foi postulado por Barton et al. (1974), o primeiro fator (RQD/Jn) representa o tamanho médio dos blocos, considerando o fraturamento do maciço; o segundo fator (Jr/Ja) representa a rugosidade e o grau de alteração das paredes das juntas ou matérias de preenchimento, que pode ser considerado uma aproximação da resistência ao cisalhamento entre blocos; e o último fator (Jw/SRF) consiste em dois parâmetros referentes aos esforços ativos: o parâmetro Jw é referente à pressão de água existente, que pode gerar efeitos adversos na resistência ao cisalhamento das juntas devido à redução do esforço efetivo normal, enquanto que o parâmetro SRF, por sua vez, pode ser uma medida de (i) alívio de carga devido a escavações por zonas cisalhadas e rochas argilosas, (ii) esforços em rochas competentes ou (iii) deformações e fluidificação em rochas plásticas incompetentes (CHRISTOFOLLETTI, 2014).

Segundo Christofolletti (2014) outros parâmetros poderiam ser adicionados à classificação proposta por Barton et al. (1974), como por exemplo a orientação das descontinuidades, mesmo com baixa importância, pois os parâmetros já levantados seriam suficientes para definir o grau de liberdade de movimentação dos blocos, quando esse vier a ocorrer. Entretanto, em casos, em que se observa uma orientação especial de grande importância, como uma zona de cisalhamento espessa e preenchida por material argiloso, a

classificação Q não deve ser utilizada, devido tratar-se de um caso muito específico e, com isso deve ser analisada com uma abordagem mais adequada. As classes e pontuações de um maciço rochoso avaliados segundo o sistema Q de Barton, são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Classes e pontuações do maciço segundo o Sistema Q.

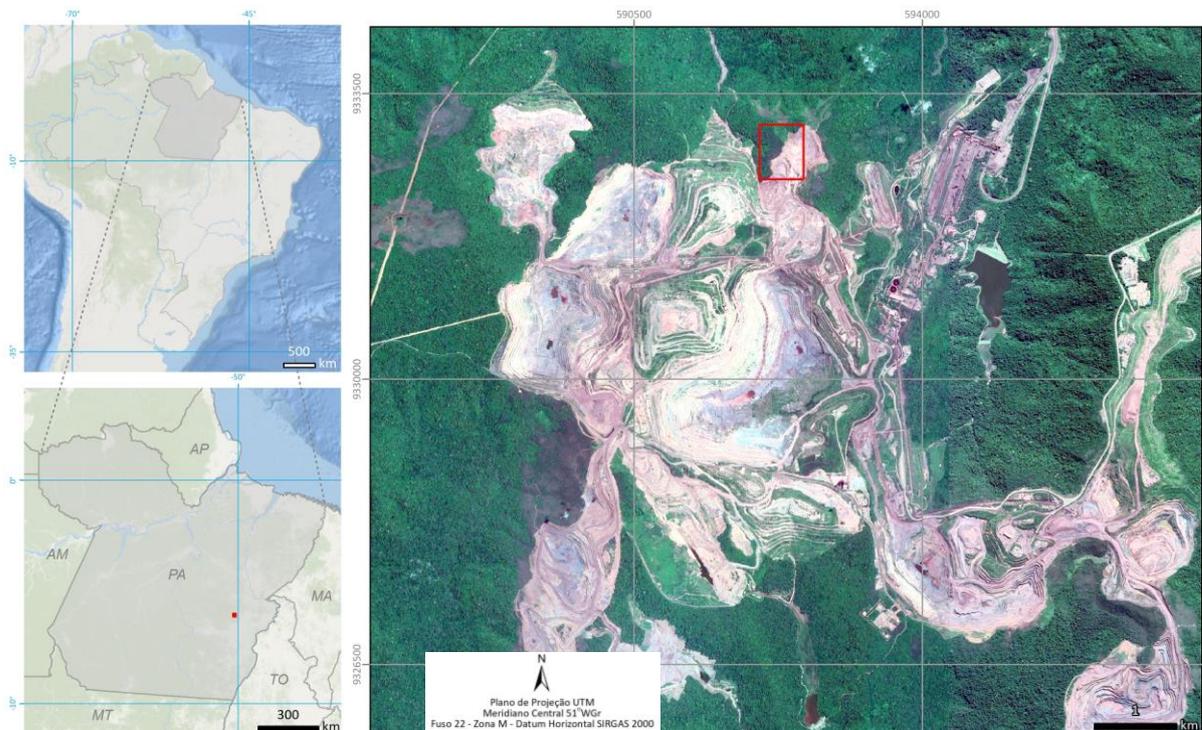
<b>Classe</b>	<b>Padrão geomecânico</b>	<b>Q</b>
I	Excelente	> 400
II	Ótimo	100 - 400
III	Muito bom	40 - 100
IV	Bom	out/40
V	Regular	04/out
VI	Ruim	01/abr
VII	Muito ruim	0,1 - 1
VIII	Extremamente ruim	0,01 - 0,1
IX	Péssimo	0,0001 - 0,01

Fonte: Adaptado de Barton et al, 1974.

### 3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A mina N4E pertence ao Complexo Minerador Serra Norte, que compõe a Província Mineral de Carajás, está localizada no município de Parauapebas, sudeste do Estado do Pará (Figura 3). O acesso à área, a partir do município de Marabá-PA, ocorre por aproximadamente 165 Km através da BR-155 até o município de Eldorado dos Carajás e, a partir daí, por meio da PA-275, por cerca de 65 Km, até o município de Parauapebas. Em seguida são percorridos cerca de 30 Km na Rodovia Raimundo Mascarenhas até a área da mina de N4E, em seu extremo norte.

Figura 3 – Localização da região do estudo (destacada em vermelho).



Fonte: a autora.

#### 4 METODOLOGIA DA PESQUISA

Os estudos realizados tiveram duração de 16 meses, com intercalação de atividades de escritório, campo e laboratório, e foram desenvolvidos em três etapas principais esquematizadas na Figura 4.

Figura 4 - Etapas desenvolvidas no presente estudo.

FASE PRÉ CAMPO	Revisão bibliográfica acerca da geologia geotecnia e geoespeleologia local
	Elaboração do plano de desenvolvimento da metodologia para o levantamento geológico/geotécnico
	Elaboração das bases de dados de campo: mapa planialtimétrico, imagem de satélite, traços dos perfis e mapas das cavidades
FASE CAMPO	Levantamento geológico-geotécnico
	Execução de testes <i>in situ</i> com o martelo de geólogo e ensaio de dureza com o esclerômetro de Schmidt
	Coleta de blocos/amostras para descrição textural/mineralógica, laminação e ensaios esclerométricos, de velocidade sônica (Vp), ensaios de Carga pontual (PLT) , ensaios de compressão uniaxial (UCS) e ensaios de densidade
FASE PÓS CAMPO	Tratamento dos dados de campo (organização das informações em planilha de dados, confecção das seções e perfis geológicos, organização dos registros fotográficos, tratamento dos dos ensaios realizados <i>in situ</i> )
	Análise e interpretação dos dados de campo
	Preparação dos blocos/amostras para descrição textural/mineralógica, laminação e ensaios esclerométrico, Vp, PLT, UCS e de densidade
	Execução dos ensaios esclerométrico, Vp, de densidade, UCS e PLT (em laboratório)
	Descrição petrográfica e mialológica dos blocos e amostras coletados
	Tratamento dos dados dos ensaios esclerométrico, Vp, PLT, UCS e de densidade, compreendendo a consolidação e digitalização dos resultados e organização dos registros fotográficos
	Análise, interpretação e integração dos dados de campo e laboratório
	Redação do TCC

Fonte: a autora.

A caracterização geológico-geotécnica consistiu no mapeamento de duas áreas predefinidas na mina N4E, Serra Norte de Carajás, denominadas seção N4E-01 e seção N4E-02 (Figura 5).

Figura 5 - Localização das seções N4E-01 e N4E-02 dentro da área de estudo.



Fonte: a autora.

A seção N4E-01 (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) é composta por três taludes de corte que marcam a borda oeste da cava de N4EN, denominados de setor Sul, setor Central e setor Norte. Estes taludes somam cerca 276 m de extensão e apresentam alturas variando de 2 a 8 m.

A seção N4E-02 (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) compreende uma escarpa natural localizada a oeste do setor Sul da seção N4E-01. Nesta escarpa se encontravam as quatro entradas da caverna N4E\_0026. Esta seção apresenta cerca de 92 m de extensão e altura variando de 2 a 6 m.

Figura 6 - Detalhe da área da seção N4E-01.



Fonte: a autora.

Figura 7- Detalhe da área da seção N4E-02.



Fonte: a autora.

#### 4.1 LEVANTAMENTO GEOLÓGICO- GEOTÉCNICO

O mapeamento geológico-geotécnico foi realizado por meio de caminhamento contínuo na base das escarpas/cortes de talude, com registro das informações em pontos espaçados de aproximadamente 20 m, de acordo com critérios avaliados em campo, sendo definidos 15 pontos (P1 a P15) na seção N4E-01 e 7 pontos (P1 a P7) na seção N4E-02. Por meio do uso de trena, foram marcados as principais estruturas e contatos litomecânicos, bem como realizado o registro fotográfico e o levantamento de informações de litotipos, estruturas, texturas e parâmetros geotécnicos.

A descrição litológica consistiu na caracterização dos diferentes litotipos e respectivos horizontes de intemperismo, abrangendo principalmente aspectos como estrutura, textura, grau de intemperismo/alteração, composição mineralógica e química, granulometria, porosidade e coloração. Destaque foi dado aos vazios presentes nos horizontes, sendo observada sua geometria, além da distribuição e controle estrutural, pois estas feições tem influência direta na resistência dos litotipos. Os dados deste levantamento foram registrados no mapa-base. Foram elaborados croquis e construídos registros fotográficos.

A descrição das estruturas consistiu na identificação, caracterização e medição da atitude das principais estruturas, representadas principalmente por fraturas, superfícies de cisalhamento e bandamento. A tomada de medidas das estruturas foi efetuada utilizando-se bússola de geólogo, com notação em trama: sentido do mergulho da camada /mergulho da camada (ex.: 120°/45°). O tratamento das medidas estruturais foi realizado por meio do *software* livre *Dips (Rocscience)*.

A caracterização geotécnica foi realizada segundo a metodologia RMR (*Rock Mass Rating*) de *Bieniawski* (1989), cujos parâmetros são recomendados pela ISRM (Sociedade Internacional de Mecânica de Rochas). Foram definidas janelas de representação dos pontos a serem observados no mapeamento. Em cada ponto separado para mapeamento dentro de cada horizonte do perfil foi separada uma área representativa deste ponto medindo 2m X 2m que consistiam nas janelas de representação. Na caracterização, foram considerados os atributos médios e representativos observados nas janelas de representação do ponto de mapeamento. Foram levantados os parâmetros de grau de alteração/intemperismo, resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, grau de fraturamento, RQD (*Rock Quality Designation*), condições das juntas e condição hidrológica.

#### **4.1.1 CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA, MINERALÓGICA E QUÍMICA DOS LITOTIPOS ASSOCIADOS AOS PERFIS DE INTEMPERISMO**

Análises petrográficas, mineralógicas e químicas foram realizadas nos litotipos dos perfis lateríticos tanto do domínio de rochas máficas como do domínio de formações ferríferas. As avaliações petrográficas foram realizadas tanto em luz transmitida quanto em luz refletida, no intuito de se identificar principalmente as relações texturais entre mineralogia e ocorrência de vazios. Foram realizadas análise de difração de raios X, pelo método do pó e em rocha total, visando a identificação dos minerais que ocorriam nos litotipos. Foram ainda realizadas análises químicas nos litotipos, com o intuito de verificar principalmente as relações entre Fe, Al e PF (perda ao fogo). Todas as análises foram realizadas no Centro de Desenvolvimento Mineral (CDM), em Santa Luzia/MG, pertencente a Vale S.A.

#### **4.2 ENSAIOS GEOMECÂNICOS**

Algumas propriedades das rochas têm uma importância particular no planejamento, execução e custo dos projetos de engenharia, onde estão envolvidas modificações do estado *in situ* (tensão e deformação) de maciços rochosos. O conhecimento destas propriedades índice,

que podem ser avaliadas a partir de testes em laboratório ou em campo, possibilitam a classificação dos maciços rochosos de acordo com vários critérios técnicos. A classificação dos maciços rochosos depende naturalmente do estado da matriz rochosa (rocha intacta) e das superfícies de descontinuidades que intersectam tal maciço. Além das classificações empíricas, amplamente utilizadas, especialmente em fase preliminar de um projeto, os critérios mais correntes (e não empíricos) de classificação do "material rocha" baseiam-se, na sua maioria, nos parâmetros resistência à compressão simples ( $\sigma_c$ ), módulo de elasticidade (E), e velocidade de propagação das ondas ou velocidade sônica (velocidade das ondas p -  $V_p$  e velocidade das ondas s -  $V_s$ ), por serem, valores que facilmente podem ser obtidos através de ensaios e, que caracterizam de modo significativo o comportamento mecânico da rocha. Ensaio de dureza de *Schmidt* e de carga pontual têm sido amplamente executados, com o objetivo de se estabelecer correlações para obtenção indireta da resistência à compressão uniaxial, uma vez que são mais simples, rápidos e menos onerosos do que estes.

No presente trabalho foram realizados testes destrutivos e não destrutivos *in situ* e em laboratório, incluindo testes com o martelo de geólogo, dureza de *Schmidt* (ou esclerometria), ensaios de carga pontual (PLT) e ensaios de compressão uniaxial (UCS), ensaios de Velocidade Sônica ( $V_p$ ) e de densidade. Buscou-se, com estes ensaios, compor uma base de dados geotécnicos mais detalhada e também o estabelecimento de correlações e implementação de curvas de resistência específicas para os materiais em estudo.

A definição dos pontos dos testes *in situ*, assim como os locais de coleta de amostras para os ensaios de laboratório obedeceram ao critério de representatividade dos diferentes litotipos/horizontes observados durante o levantamento. A preparação das amostras constituiu-se de corte com serra do tipo serra mármore, para composição dos corpos de prova. As dimensões dos corpos de prova foram estabelecidas de forma a obedecer às definições normativas específicas.

#### 4.2.1 TESTE DE RESISTÊNCIA COM MARTELO DE GEÓLOGO

Os testes de resistência utilizando o martelo de geólogo foram realizados de acordo com método adaptado de Brown (1981) (Tabela 7). É um método destrutivo que possibilita uma avaliação qualitativa da consistência das rochas por meio da sua reação a golpes de martelo. Esta qualificação é correlacionável a faixas aproximadas de resistência à compressão simples e ao Índice de compressão pontual ( $I_s$ ) das rochas. É muito utilizado em fases iniciais de projetos de engenharia, especialmente para se estabelecer preliminarmente as zonas / setores de

diferentes características geomecânicas. Os testes foram realizados *in situ*, sendo consideradas janelas de representação litomecânica nos pontos de mapeamento, de aproximadamente 2x2 m.

Tabela 7 - Teste de consistência das rochas com uso do martelo de geólogo.

ISRM (ADAPTADO)										
ÍNDICE DE RESISTÊNCIA <sup>2</sup>	Descrição	Rc (Mpa)	IS (Mpa)	AVALIAÇÃO DE CAMPO						RMR
				(1) martelo	(2) risco canivete <sup>1</sup>	(3) queda canivete	(4) raspagem canivete <sup>1</sup>	(5) risco unha	(6) pressão manual	
R6	Extremamente resistente	>250	>10	lascada	-	-	-	-	-	15
R5	Muito resistente	100-250	4-10	quebra com dificuldade com vários golpes	-	-	-	-	-	12
R4	Resistente	50-100	2-4	quebra com vários golpes	risco superficial	-	-	-	-	7
R3	Medianamente resistente	25-50	1-2	quebra com dificuldade com um golpe	risco superficial	ponto pequeno	com muita dificuldade	-	-	4
R2	Branda	10-25	-	quebra com um golpe	risca	ponto grande	com dificuldade	-	-	2
		5-10		fragmenta com golpe			produz pó	risco superficial	-	
R1	Muito branda	3-5	-	desagrega	risca fundo	penetra	com facilidade produz muito pó	risca	quebra pontualmente	1
		1-3					desagrega	penetra	quebra as bordas	
R0	Extremamente branda	0.25-1	-	-	-	penetra	-	corta	desagrega	0

Método de Avaliação de Campo de Consistência das Rochas											
1 - Reação ao golpe com o martelo de geólogo	4 - Reação à raspagem do canivete na borda da	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Resposta ao Método</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="background-color: red;"></td> <td>Alta</td> </tr> <tr> <td style="background-color: yellow;"></td> <td>Média</td> </tr> <tr> <td style="background-color: green;"></td> <td>Baixa</td> </tr> </tbody> </table>		Resposta ao Método			Alta		Média		Baixa
Resposta ao Método											
	Alta										
	Média										
	Baixa										
2 - Reação ao risco com a ponta do canivete	5 - Reação ao risco com a unha										
3 - Reação à queda da ponta do canivete	6 - Reação à pressão dos dedos										

<sup>1</sup> A resposta à utilização do martelo em amostras muito ricas em minerais lamelares é mais significativa que do canivete  
<sup>2</sup> Referências típicas: R0-R1<sup>+</sup> (saprolitos); R1<sup>+</sup> (tijolo); R2<sup>-</sup> (solo-cimento); R2<sup>+</sup> (concreto comum); R3 (concreto especial)

Fonte: Adaptado de Brown (1981).

#### 4.2.2 TESTE DE DUREZA DE SCHMIDT (ESCLEROMETRIA)

Os testes de dureza com o esclerômetro de *Schmidt* foram realizados em diferentes litotipos, *in situ* e em laboratório. Esse ensaio é normatizado pela *International Society for Rock Mechanics* - ISRM (1978) e ASTM D5873 (2000). O esclerômetro de *Schmidt* é um instrumento portátil para ensaios não destrutivos, que tem como base a aplicação de um impacto de uma massa de aço (pistão do esclerômetro) na superfície rochosa. Inicialmente foi desenvolvido para testar a dureza do concreto de forma não destrutiva posteriormente foi usado para ponderar a resistência de rochas. A reação da superfície da rocha ao impacto é proporcional à sua dureza (GUERREIRO, 2000). No presente trabalho foi utilizado o modelo *RockSchmidt* tipo L, com energia de impacto de 0,735 Nm (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**8).

Figura 8 - Teste de dureza de Schmidt (esclerometria).



Fonte: a autora.

A energia liberada após o impacto é dada pelo índice esclerométrico (IE), também chamado de número de ricochete (HR), cujo cálculo é a distância percorrida pela massa após o repique do disparo. O resultado é um número adimensional considerado como *índice de dureza* do material ensaiado, que varia em escala linear de 10 a 100 (KATZ et al., 2000; BASU e AYDIN, 2004 e BASU, 2005). Quanto maior a resistência da superfície ensaiada, menor a deformação e maior o ricochete (ou rebote).

Para os testes executados *in situ* (Figura 9A), foram consideradas as mesmas janelas de representação litomecânica definidas para a realização dos testes com martelo de geólogo. Levou-se em consideração o Método Médio ISRM, que recomenda efetuar vinte medições em cada superfície ensaiada. Sempre que possível, buscou-se realizar o teste em superfície perpendicular à direção de anisotropia, quando observada. As direções do teste também variaram de acordo com a superfície de exposição, sendo em geral horizontais (nas faces dos taludes), mas também verticais (para baixo, no piso) e oblíqua, em superfícies inclinadas.

Os testes executados em laboratório (Figura 9B) foram realizados após a moldagem de corpos de prova, também retirados dessas janelas de representação. Nesse caso, foi utilizado um corpo de prova (CP) para cada golpe, perfazendo-se um total de 20 golpes (em 20 CP) para compor um ensaio de acordo com a norma. Os testes foram executados na mesma direção dos ensaios Carga Pontual ou *Point Load Test* (PLT) (altura D do corpo de prova), e sempre

verticais (para baixo). A maioria dos corpos de prova permaneceu intacta ou soltou grãos/partículas, porém notou-se que alguns trincaram ou mesmo romperam com a aplicação do golpe. Devido à reação observada em algumas amostras destinadas aos ensaios de compressão uniaxial - UCS (perda de massa /trincas), optou-se por interromper os testes esclerométricos nessas amostras.

Figura 9 - Testes de dureza de Schmidt. (A) Teste realizado em janela de representação litomecânica (in situ); (B) Teste executado em corpo de prova (em laboratório).



Fonte: a autora.

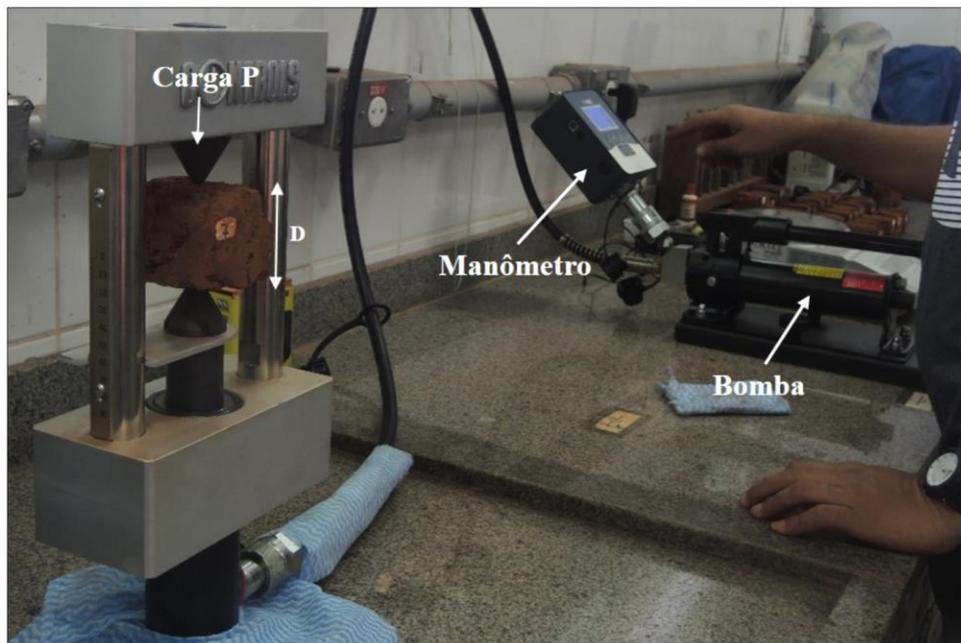
Nesse trabalho foram realizados 86 ensaios esclerométricos em campo (exposições) e 29 em laboratório (corpos de prova), sendo 20 testes /golpes executados para cada ensaio. Os dados coletados em campo foram baixados no programa *RockLink*, organizados e salvos em planilhas Excel e, posteriormente, correlacionados com os resultados obtidos com os testes com o martelo de geólogo e caracterização dos litotipos definidos.

### 4.2.3 ENSAIOS DE CARGA PONTUAL (PLT)

O Ensaio de Carga Pontual ou *Point Load Test* (PLT), também conhecido por ensaio de Franklin constitui um método alternativo simples de aferição da resistência das rochas, e consiste na determinação do *Índice de Resistência ou Índice de Carga Pontual* ( $I_s$ ). Foi concebido como um ensaio de referência para classificação da resistência das rochas, que pode ser correlacionado com a resistência à compressão uniaxial. Este ensaio conduz, em termos genéricos, à determinação do Índice de Resistência à Carga Pontual,  $I_s(50)$ . Basicamente, este método consiste em levar amostras de rocha à ruptura por meio de uma carga concentrada entre duas ponteiros cônicos, quer sob a forma de blocos prismáticos, cilíndricos ou de forma irregular; em que a direção de aplicação da carga pode ser axial ou diametral (Figura 10).

O equipamento do ensaio de PLT, quer em laboratório (ou em campo, é constituído por um sistema de aplicação contínua de carga, um sistema de medição da força (P) e um sistema de medição da distância (D), entre duas ponteiros, em regra, cônicas, através do qual é aplicada a carga (Figura 10 e 11).

Figura 10 - Equipamento para a execução do Ensaio de Carga Pontual.



Fonte: a autora.

Figura 11 - Equipamento de ensaio PLT – A) Utilização do equipamento em laboratório; B, C e D) Ruptura válida em corpo de prova ensaiado.



Fonte: a autora.

Como padrão, o Índice de carga pontual,  $I_s(50)$ , é definido para o ensaio realizado sobre corpos de prova cilíndricos de rocha com diâmetro  $D$  igual a 50 mm, em que a aplicação da carga  $P$  é feita na direção diametral, sendo calculado pela expressão:

$$I_{s(50)} = \frac{P}{D^2}$$

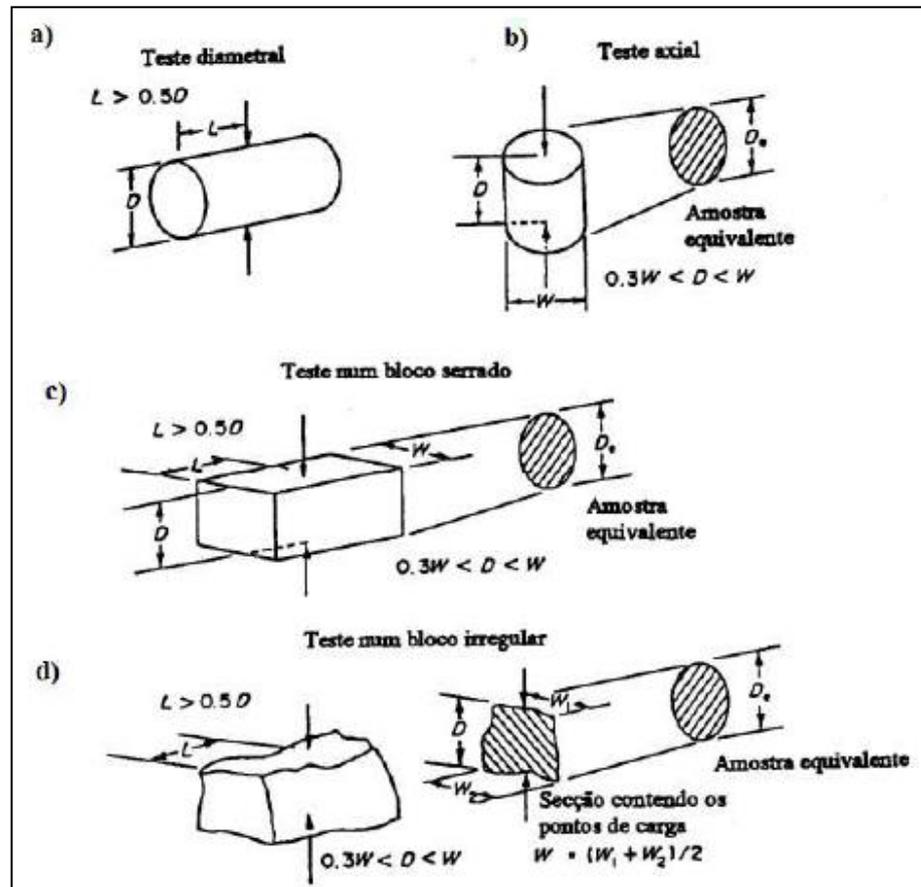
Onde,  $P$  é a carga de ruptura e  $D$  é a distância entre ponteiros cônicas.

O índice da resistência à carga pontual ( $I_s$ ) precisa ser corrigido para  $I_s(50)$ , ou seja, para o valor correspondente a  $D = 50$  mm. De acordo com a norma ISRM (2007), o valor médio de  $I_s(50)$  deverá ser calculado retirando-se os dois valores mais altos e os dois valores mais baixos, de uma amostra com dez corpos de prova (vinte para amostras irregulares), fazendo-se a média dos valores restantes. Para ensaios idênticos realizados sobre corpos de prova cilíndricos com outros diâmetros, a relação  $P/D^2$  deverá ser multiplicada por um fator corretivo ( $F$ ), a fim de se obter o índice de carga pontual normalizado, através da equação:

$$I_{s(50)} = F \frac{P}{D^2} \quad \text{Em que:} \quad F = \left(\frac{D}{50}\right)^{0,45}$$

No ensaio de carga pontual, podem ser testados não só corpos de prova cilíndricos comprimidos diametralmente, mas também axialmente, e, ainda, corpos de prova com outras formas, regulares ou irregulares, desde que obedeam aos critérios indicados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Figura 12 - Relação das dimensões dos corpos de prova nos ensaios de carga pontual; a) ensaio diametral; b) ensaio axial; c) para amostras blocos; d) para formas irregulares.



Fonte: Adaptado de ISRM (2007) (in Rezende, 2016).

Para estes casos, é necessário definir um diâmetro equivalente  $D_e$ , a partir da área da seção transversal equivalente passante pelos pontos de aplicação da carga, sendo o índice de carga pontual corrigido, calculado por meio das expressões a seguir.

$$A = WD = \frac{\pi}{4} D_e^2 \quad D_e = \sqrt{\frac{4WD}{\pi}} \quad I_{s(50)} = F \frac{P}{D_e^2} \quad F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0.45}$$

As dimensões dos corpos de prova foram estabelecidas de forma a obedecer as definições da norma da ISRM para amostras irregulares ( Figura 12). Foram estabelecidos, para cada bloco, sempre que possível, grupos de amostras com tamanhos diferentes, com o diâmetro  $D$  entre aproximadamente 30 e 85 mm, mantendo-se a largura e a profundidade maiores.

Nesse trabalho foram ensaiados 809 corpos de prova, sendo que destes, 508 apenas foram considerados válidos pois romperam dentro do tempo estabelecido pela norma (entre 10 e 60 s) e conforme o modo adequado de ruptura.

#### 4.2.4 ENSAIOS DE COMPRESSÃO UNIAXIAL (UCS)

Os ensaios de compressão uniaxial estão entre os mais utilizados para determinar as propriedades mecânicas de rochas. Baseia-se na aplicação de uma carga  $P$  distribuída uniformemente sobre a superfície de um corpo de prova, levando o mesmo à ruptura, com esquema de carregamento semelhante ao apresentado na Figura 13.

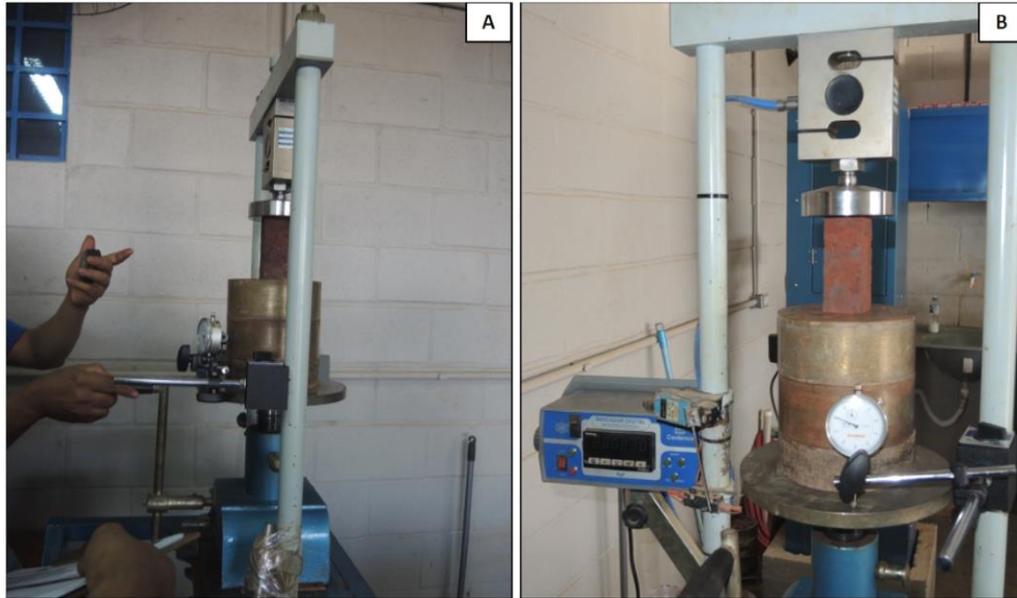
Figura 13 - Esquema de carregamento de um ensaio de resistência à compressão uniaxial.



Fonte: **Adaptado de ISRM** (2007) (in Rezende, 2016).

No presente trabalho os ensaios UCS foram realizados, no laboratório da empresa Geominas em Parauapebas (PA), sendo utilizada uma prensa de CBR (Índice de Suporte de Califórnia), com célula de carga (registro digital em kgf), com capacidade de 5 toneladas (Figura 14).

Figura 14 - Aparelhagem para realização do ensaio de compressão uniaxial (UCS).



Fonte: a autora.

A prensa foi operada no modo manual, buscando-se manter a velocidade constante, a fim de permitir o atendimento à norma (ISRM, 2007) com relação ao tempo de ruptura (5 a 10 min). Isso porque nos testes executados no modo servo-controlado (modo automático) as amostras se romperam com tempo inferior a 5 min. A determinação da rotação/carregamento mais adequada, dentro das limitações apresentadas, foi feita utilizando-se amostras para testes iniciais para cada bloco/litotipo, com a estimativa prévia da carga de ruptura e taxa de carregamento no tempo médio (7 min). De acordo com a ISRM (2007), “*o carregamento da amostra deve ser realizado de forma contínua e a uma taxa constante, até que a ruptura venha a ocorrer dentro de 5 a 10 minutos de carregamento. Alternativamente, a taxa de carregamento deve situar-se entre 0,5 a 1,0 MPa/s*”. Ressalta-se que o tempo de ruptura foi obedecido de acordo com essa norma, mas a taxa de carregamento por vezes foi menor, devido, possivelmente, às particularidades dos materiais ensaiados (alta porosidade e baixa resistência).

Foram utilizados 65 corpos de prova representativos dos diversos litotipos presentes nas duas áreas de estudo. Estes corpos de prova foram moldados com seção quadrada (devido à dificuldade/impossibilidade de se moldar corpos cilíndricos) e obedecendo aos critérios normativos de geometria:

H/L entre 2 e 3, preferencialmente em torno de 2,5.

Onde:

H = altura do corpo de prova;

L = largura do corpo de prova (acima de 10 grãos, quando possível em torno de 5 cm).

Neste trabalho foram moldados 2 tamanhos de corpos de prova: L x H = 4 x 10cm e 5 x 12,5 cm. Ressalta-se que os ensaios realizados no modo manual podem apresentar menor acurácia nos resultados quando comparados aos de um equipamento servo-controlado.

#### 4.2.5 ENSAIOS DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS (VELOCIDADE SÔNICA – $V_p$ )

As vibrações se propagam nas rochas, principalmente, por meio de ondas longitudinais e transversais. Teoricamente, a velocidade com que uma onda se propaga através da rocha depende exclusivamente de suas propriedades elásticas, módulo de elasticidade (E) e coeficiente de *Poisson* (U), e de sua massa específica (Y). De acordo com Goodman (1989), o grau de fraturamento e de alteração da rocha também interfere nessas medidas (a velocidade de propagação diminui com o aumento de fissuras). Desse modo, a velocidade de propagação da onda pode ser usada na avaliação do grau de fraturamento e de intemperismo da rocha.

No presente trabalho os ensaios foram executados em Carajás, precisamente no laboratório do Viveiro de Mudas utilizando-se o equipamento Ultrasson Pundit PL 200 Pulse Echo, de propriedade do ITV (Instituto Tecnológico Vale) (Figura 15).

Figura 15 - Equipamento de Ultrassom Pundit PL 200 Pulse Echo e execução do ensaio de velocidade de propagação de ondas.



Fonte: a autora.

No ensaio, um cristal piezoelétrico (quartzo), emissor de ondas longitudinais, é acoplado a uma extremidade do corpo de prova. Na face oposta, é acoplado outro cristal piezoelétrico receptor de vibrações. Uma fina camada de vaselina é colocada nas faces dos cristais (transdutores), para que se garanta um perfeito contato com as superfícies das amostras. A velocidade de propagação de ondas ( $V_p$ ) é calculada por meio do tempo necessário para que a onda sonora se propague de um transdutor a outro.

$$V_p = \frac{L}{t}$$

Onde:

L – comprimento do corpo-de-prova

t – tempo de percurso da onda (medido).

Estes ensaios foram executados nos mesmos corpos de prova moldados para os ensaios de PLT. Foi adotada nos ensaios, a direção perpendicular à altura (D), ou seja, a largura (L) ou profundidade (P). Em corpos anisotrópicos considerou-se também a direção da anisotropia (L, P ou D). Foram realizados 657 ensaios.

#### 4.2.6 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE

A determinação da densidade foi feita utilizando-se o princípio de Arquimedes, onde “todo corpo, parcial ou totalmente submerso em um líquido, fica sujeito a uma força de empuxo  $E$  do líquido, de direção vertical, de baixo para cima, e com intensidade igual ao peso do líquido deslocado”.

Os seguintes procedimentos foram adotados para determinação do volume da amostra: (i) pesagem do corpo de prova em seu estado natural (massa natural); (ii) proteção dos corpos de prova com filme plástico de densidade conhecida; (iii) pesagem do corpo de prova embrulhado (para obtenção da massa do filme plástico); (iv) pesagem do corpo de prova submerso, utilizando-se balança de molas, de precisão (determinação do empuxo ou massa submersa); (v) remoção do corpo de prova e secagem do filme plástico.

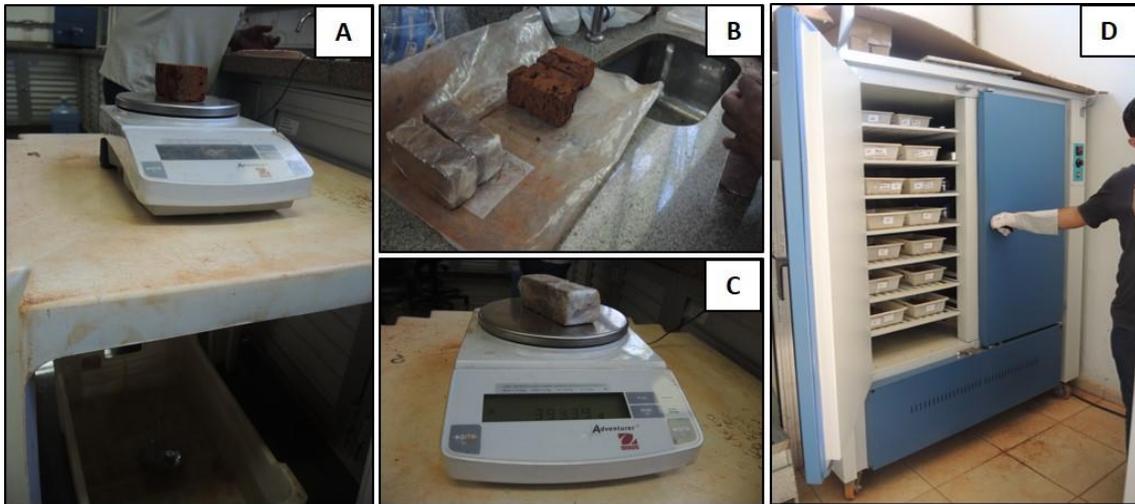
A determinação do teor de umidade ( $W$ ) foi realizada após a realização dos ensaios (PLT e UCS), adotando-se os seguintes procedimentos: (i) pesagem de pedaços dos corpos de prova (acima de 50 g) no estado natural (obtenção da massa natural); (ii) secagem na estufa a  $105^{\circ}\text{C}$  por 24 horas e (iii) obtenção da massa seca através da pesagem da amostras após secagem em estufa.

Para os cálculos dos volumes, das densidades e teor de umidade, tem-se:

- (i) Volume da amostra ( $\text{cm}^3$ ) = volume total – volume do filme plástico;
- (ii) Volume total ( $\text{cm}^3$ ) = (massa natural – massa submersa) / densidade da água ( $1 \text{ g/cm}^3$ );
- (iii) Volume do filme ( $\text{cm}^3$ ) = massa do filme / densidade do filme ( $0,92 \text{ g/cm}^3$ );
- (iv) Teor de umidade ( $W$ ) = (massa natural – massa seca) / massa seca;
- (v) Densidade natural ( $\text{g/cm}^3$ ) = massa natural / volume da amostra;
- (vi) Densidade seca ( $\text{g/cm}^3$ ) = densidade natural / (1 + teor de umidade ( $W$ )).

A Figura 16 ilustra os equipamentos utilizados. A proteção das amostras com filme plástico foi uma alternativa utilizada em decorrência da possibilidade de desagregação (e perda de massa) das mesmas quando submersas. Estes ensaios foram realizados no laboratório localizado no Viveiro de Mudas em Carajás.

Figura 16 - Equipamentos/materiais utilizados no ensaio de densidade. A) Pesagem de amostra (massa natural e submersa); B) Embalagem da amostra em filme plástico; C) Pesagem de amostra (com filme); D) Secagem das amostras na estufa.



Fonte: a autora.

### 4.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS E CORRELAÇÕES

Análises estatísticas dos resultados dos ensaios em geral trazem à luz importantes informações acerca das características dos materiais, possibilitando uma avaliação prévia de seu comportamento geomecânico frente a solicitações diversas. Neste trabalho foram realizadas análises estatísticas simples, com a obtenção de histogramas que representassem a variação (valores mínimo, médio e máximo) dos resultados dos ensaios, para cada litotipo. Além dessas análises simples, foram realizadas análises mais complexas no sentido de se obter curvas de correlação entre as propriedades geomecânicas representativas dos litotipos, de forma indireta, com a execução de ensaios mais simples, mais rápidos e menos onerosos (PLT, esclerômetro de Schmidt e  $V_p$ ) e não destrutivos (esclerômetro de Schmidt e  $V_p$ ) que o convencional ensaio de resistência à compressão uniaxial.

Os resultados dos ensaios (dados brutos disponibilizados em planilhas excel) foram inicialmente tratados de forma a preparar planilhas resumidas, apenas com os resultados dos ensaios em geral bem como por propriedade geotécnica ensaiada.

Posteriormente, para cada litotipo foram feitos os seguintes procedimentos de análise estatística:

- ✓ Estatística descritiva com verificação dos prováveis *outliers*;
- ✓ Avaliação de pressuposições teóricas, como por exemplo, normalidade estatística;

- ✓ Avaliação da Correlação Linear entre as variáveis quantitativas; e
- ✓ Avaliação da Correlação Não-Linear entre as variáveis quantitativas.

Para análise dos dados estatísticos, foram considerados os ensaios em que haviam mais de três blocos ensaiados por rocha, pois geometricamente sabe-se que, por dois pontos só passa uma reta, sempre resultando em uma correlação alta e falsa nos dados, o que não é recomendado. Portanto para os ensaios de Compressão Uniaxial (UCS) não foram aplicados tratamentos estatísticos devido ao baixo conteúdo amostral de blocos.

Ao final, apenas para aqueles grupos de dados para os quais tinham sido constatadas correlações acima de 0,80, realizou-se uma tentativa de se obter equações de correlação linear ou não-linear.

As análises estatísticas foram feitas utilizando pacotes do R (R CORE TEAM, 2018). Inicialmente, realizou-se uma análise geral dos dados a fim de se verificar a consistência dos mesmos, para tanto se fez uma análise da Estatística Descritiva Geral; Teste de Normalidade; Avaliação da correlação linear; Correlação Linear e Diagramas de dispersão; Avaliação da Correlação Não-Linear.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO- GEOTÉCNICA

#### 5.1.1 CARACTERIZAÇÃO DOS LITOTIPOS E HORIZONTES DE INTEMPERISMO

Os litotipos mapeados nas seções de estudo constituem produtos de intemperismo de dois principais grupos de rochas: as formações ferríferas da Formação Carajás (Jaspelitos) e as rochas máficas da Formação Igarapé-Cigarra (basaltos). Levando-se em consideração principalmente a afiliação genética e características mineralógicas, texturais e estágios de intemperismo-laterização, foram individualizados seis litotipos principais, que integram três horizontes de intemperismo (Tabela 8).

O horizonte de topo, denominado Crosta Laterítica (CL) é representado por três litotipos: crosta laterítica detrítica (CLD), crosta laterítica ferro-aluminosa (CLFA) e crosta laterítica ferruginosa (CLF). O horizonte intermediário, denominado Horizonte de Transição (HT), é constituído por dois litotipos: laterita ferro-aluminosa (LFA) e formação ferrífera laterítica (FFL); por fim, o horizonte de base, o Saprolito (SAP), é representado pelo saprolito de rochas máficas (SAP-RM).

Tabela 8 - Classificação dos litotipos e horizontes de intemperismo adotada no presente trabalho.

GRUPO GRÃO- PARÁ	DOMÍNIO DE ROCHAS MÁFICAS				DOMÍNIO DE FORMAÇÃO FERRÍFERA			
	FORMAÇÃO	HORIZONTE DE INTEMPERISMO	LITOTIPOS	SEÇÃO	FORMAÇÃO	HORIZONTE DE INTEMPERISMO	LITOTIPOS	SEÇÃO
IGARAPÉ CIGARRA	IGARAPÉ CIGARRA	CROSTA LATERÍTICA	CROSTA LATERÍTICA DETRÍTICA (CLD)	N4E-01	CARAJÁS	CROSTA LATERÍTICA	CROSTA LATERÍTICA DETRÍTICA (CLD)	N4E-01 E N4E-02
			CROSTA LATERÍTICA FERRO-ALUMINOSA (CLFA)				CROSTA LATERÍTICA FERRUGINOSA (CLF)	
	HORIZONTE DE TRANSIÇÃO	LATERITA FERRO- ALUMINOSA (LFA)	HORIZONTE DE TRANSIÇÃO			FORMAÇÃO FERRÍFERA LATERÍTICA (FFL)		
	SAPRÓLITO	SAPRÓLITO DE ROCHA MÁFICA (SAP-RM)						

Fonte: a autora.

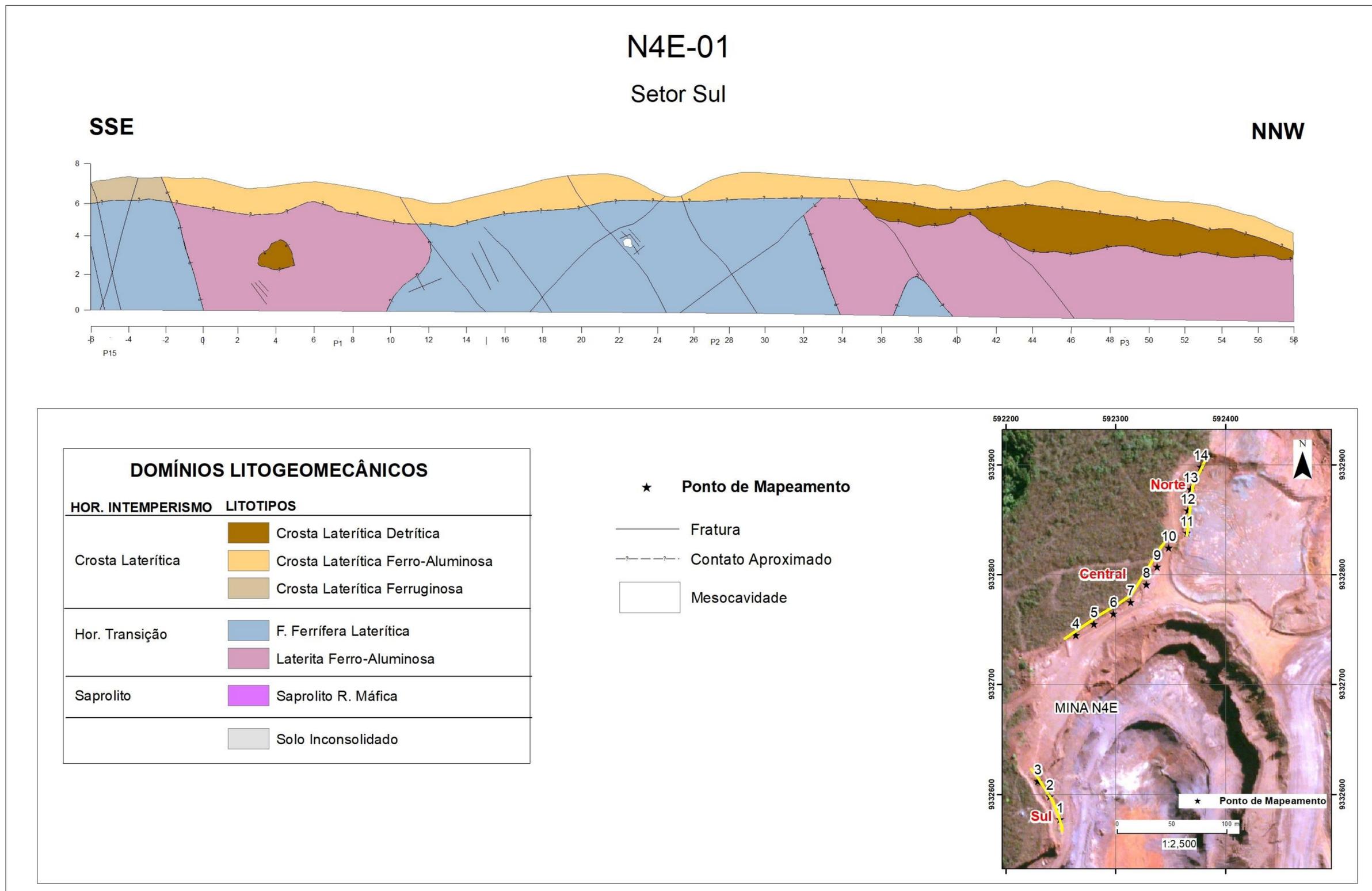
As Figuras 17 a 19 mostram a distribuição dos litotipos ao longo da Seção N4E-01, respectivamente nos setores sul, central e norte. Nesta seção foram registradas as duas unidades estratigráficas do Grupo Grão Pará: Formação Carajás (restrita às bordas dos setores Sul e Norte) e Formação Igarapé-Cigarra (predominante nos três setores). Observa-se contato

interdigitado entre as duas formações, aparentemente controlado por fraturas/superfícies de cisalhamento subverticalizadas.

A Figura 20 mostra os litotipos presentes na Seção N4E-02, representada essencialmente por formações ferríferas (Formação Carajás), com ocorrências muito localizadas (não individualizáveis) de rochas máficas da Formação Igarapé-Cigarra, em avançado estágio de laterização. Nessa região ocorrem mesocavidades que representam a maior interconexão dos poros e vazios identificados na crosta laterítica e que ocorrem e persistem com maior intensidade no horizonte de transição.

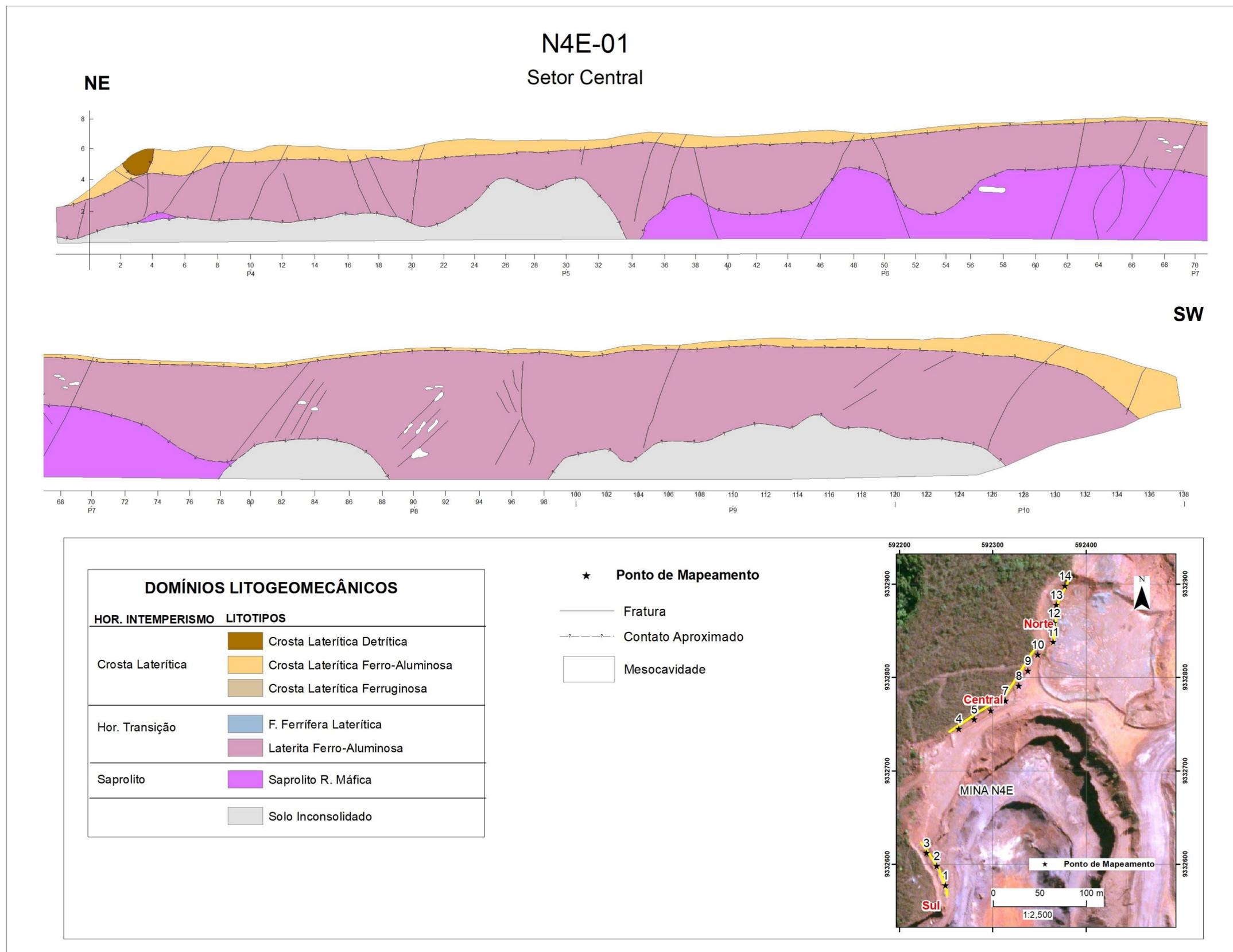
A seguir é apresentada a caracterização dos litotipos e horizontes de intemperismo de acordo com os resultados do levantamento.

Figura 17 - Distribuição dos litotipos na seção esquemática N4E-01 - setor Sul.



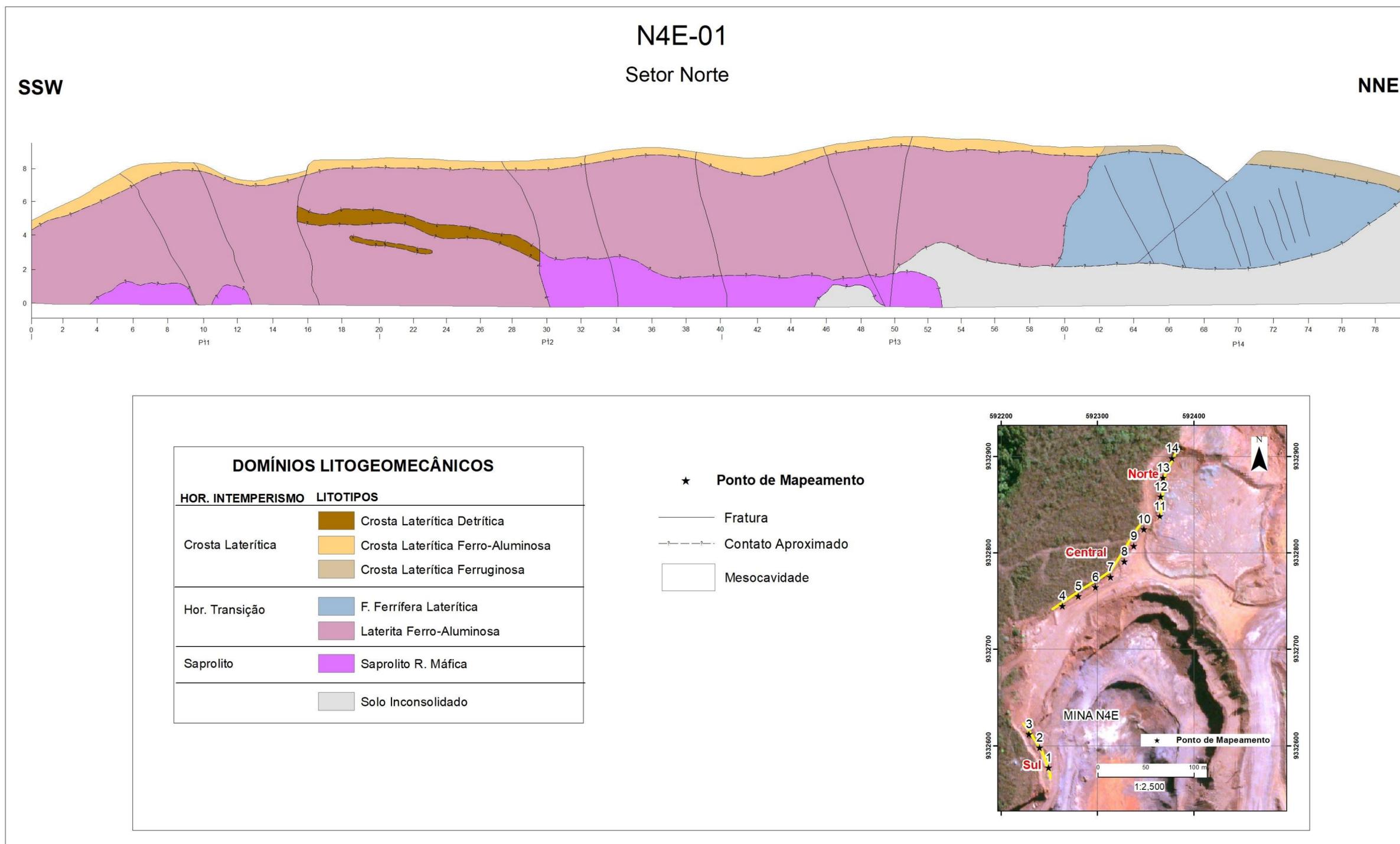
Fonte: a autora.

Figura 18 - Distribuição dos litotipos na seção esquemática N4E-01 – setor Central.



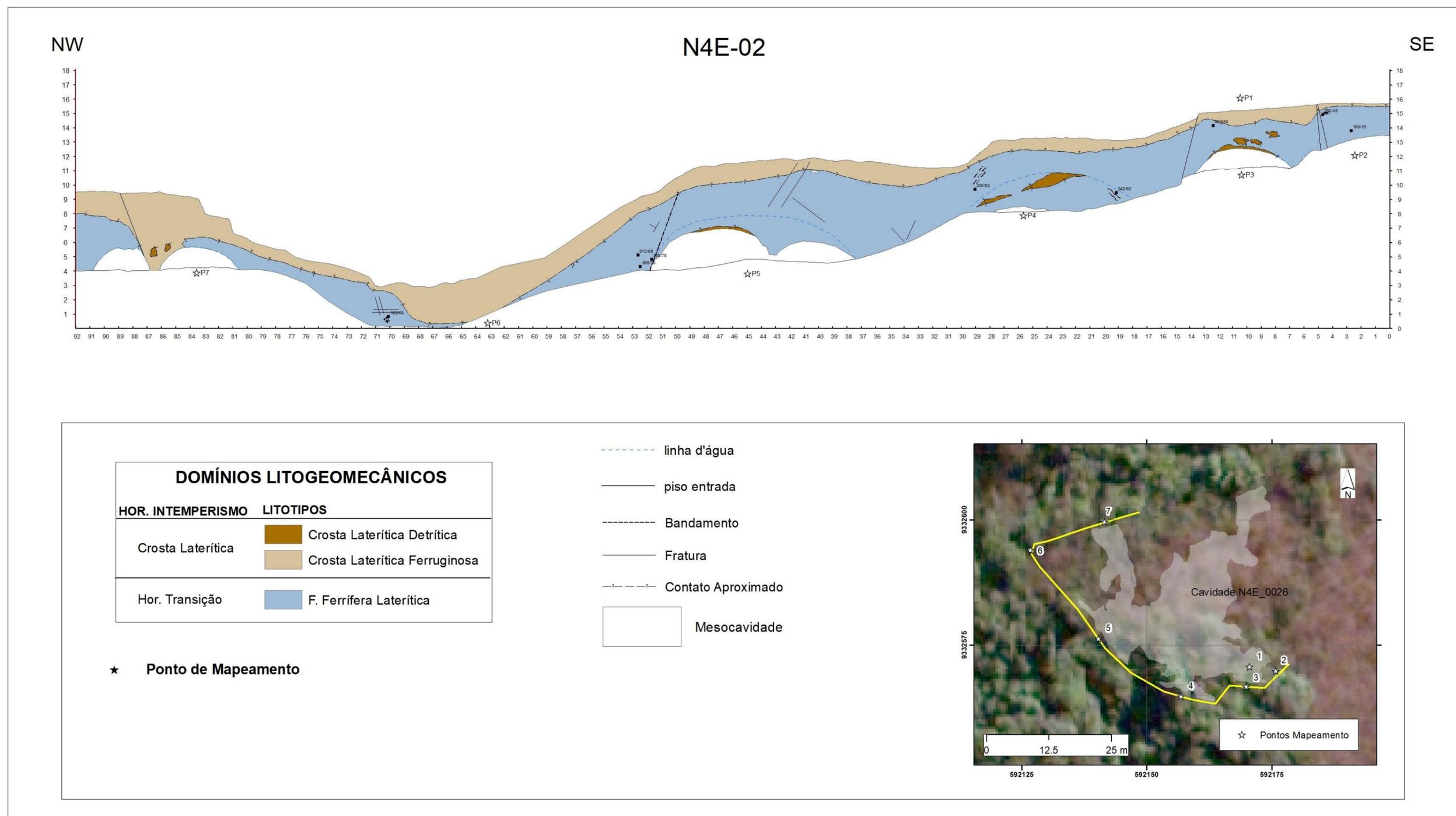
Fonte: a autora.

Figura 19 - Distribuição dos litotipos na seção esquemática N4E-01 – setor Norte.



Fonte: a autora.

Figura 20 - Distribuição dos litotipos na seção esquemática N4E-02.



Fonte: a autora.

#### 5.1.1.1 Horizonte Crosta Laterítica (CL)

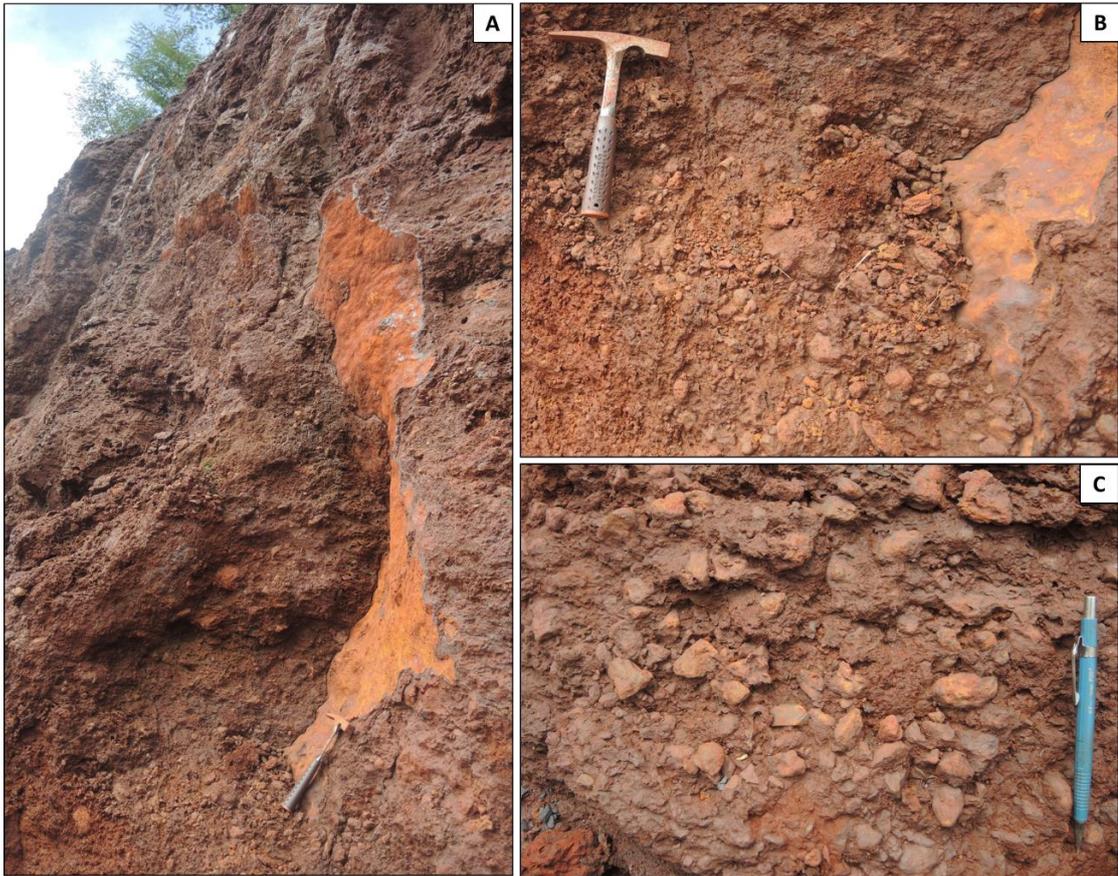
Este horizonte constitui a cobertura superficial, em geral mais endurecida que o subjacente, observada tanto no domínio de rochas máficas quanto no das ferríferas. Representa os lateritos, conforme definição de BIGARELLA (1996), mostrando-se como lateritas endurecidas ou ainda os “*duricrusts*” (WOOLNOUGH, 1927, *apud* BIGARELLA, 1996). Nesse horizonte observam-se texturas variando desde maciço-porosa a microcavernosa, raramente mesocavernosa. Os litotipos que representam este horizonte, subdivididos em função das características texturais/composicionais predominantes, foram denominados de crosta laterítica detrítica (CLD), crosta laterítica ferruginosa (CLF) e crosta laterítica ferro-aluminosa (CLFA), cuja descrição é apresentada a seguir.

##### 5.1.1.1.1 Crosta Laterítica Detrítica (CLD)

A crosta laterítica detrítica (CLD) é pouco expressiva na área de estudo, ocorrendo de forma localizada preenchendo fendas/vazios ou recobrindo superfícies de fraturas, na forma de bolsões, lentes ou camadas centimétricas a decimétricas pouco espessas (Figura 21). Por vezes ocorre no teto das cavidades. Trata-se de brechas e conglomerados compostos por clastos angulosos a sub-arredondados, centimétricos a milimétricos, em geral mal selecionados, de óxidos e hidróxidos de ferro de coloração cinza e matriz coesa ou inconsolidada, constituída por óxidos e hidróxidos de ferro na forma de material argilo-arenoso avermelhado e grãos submilimétricos. Apresenta aspecto maciço-poroso, em geral com poucos vazios ( $\leq 5\%$ ). Os vazios são em geral milimétricos e se desenvolvem com padrão irregular entre os clastos e matriz e no interior da matriz.

Figura 21 - Crosta laterítica detrítica (CLD). (A e B) CLD localizada, recobrindo/preenchendo superfícies de fratura; (C) Detalhe dos clastos angulosos a sub-arredondados, mal selecionados e matriz argilo-arenosa.

Composição: óxidos e hidróxidos de ferro.



Fonte: a autora.

Não foi realizada a caracterização mineralógica, petrográfica e química devido ao fato do material ser por vezes inconsolidado, o que dificultou os processos de preparação para as análises.

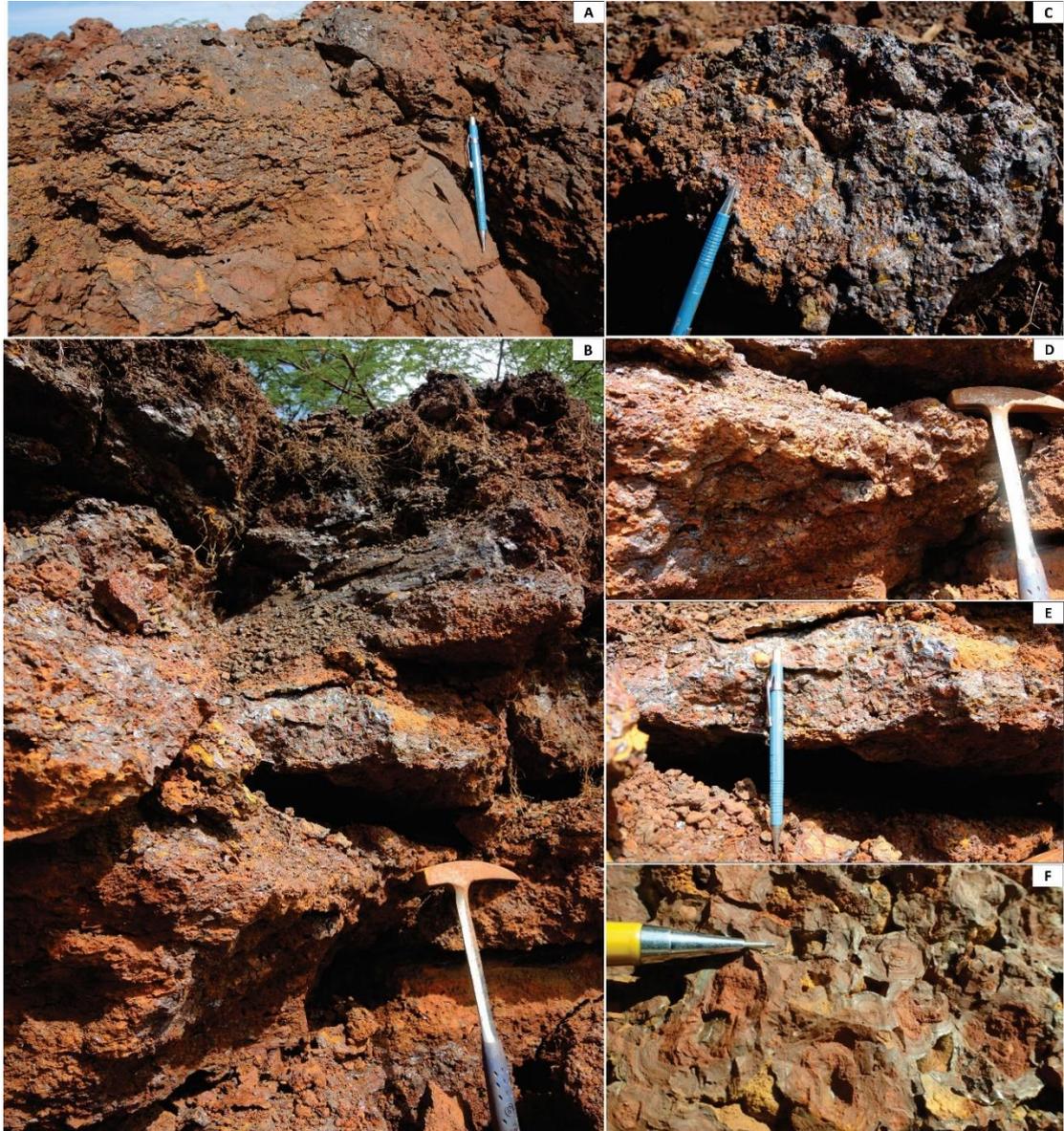
#### 5.1.1.1.2 Crosta Laterítica Ferro-aluminosa (CLFA)

A crosta laterítica ferro-aluminosa (CLFA) está presente no domínio das rochas máficas, é representada por um horizonte superficial, endurecido, de até 2 m de espessura, que recobre o horizonte subjacente (LFA) em contato gradacional ou abrupto e irregular. Foi também denominada informalmente como canga química ou simplesmente canga. Sua composição é principalmente de oxi-hidróxidos de ferro (principalmente goethita), de coloração cinza metálica ou fosca, imersos em material silto-argiloso, ferruginoso, vermelho e amarelo-ocre e subordinadamente de hidróxido de alumínio (gibbsita), este identificado por meio da presença

de pontos submilimétricos de brilho vítreo, e óxidos de ferro (hematita), principalmente nas regiões de contato com as formações ferríferas. Destaca-se a presença marcante de feições pisolíticas e significativa proporção de minerais neoformados de goethita, proporção esta que varia de 50 a até 80%. Essa proporção aumenta no topo da exposição, chegando a cerca de 95%, onde se desenvolve uma capa endurecida de cerca de 10 cm de espessura, com aspecto laminado-anastomosado e porosidade bem marcada. Nota-se a expressiva presença de cutans e vênulas goethíticas contornando e/ou preenchendo os vazios. Às vezes se observa estrutura acamadada/anastomosada com cerca de 20 a 30 cm de espessura, geralmente marcada, tanto em sua base quanto no topo, por feições pisolíticas e botrioidais (Figuras 22 e 23).

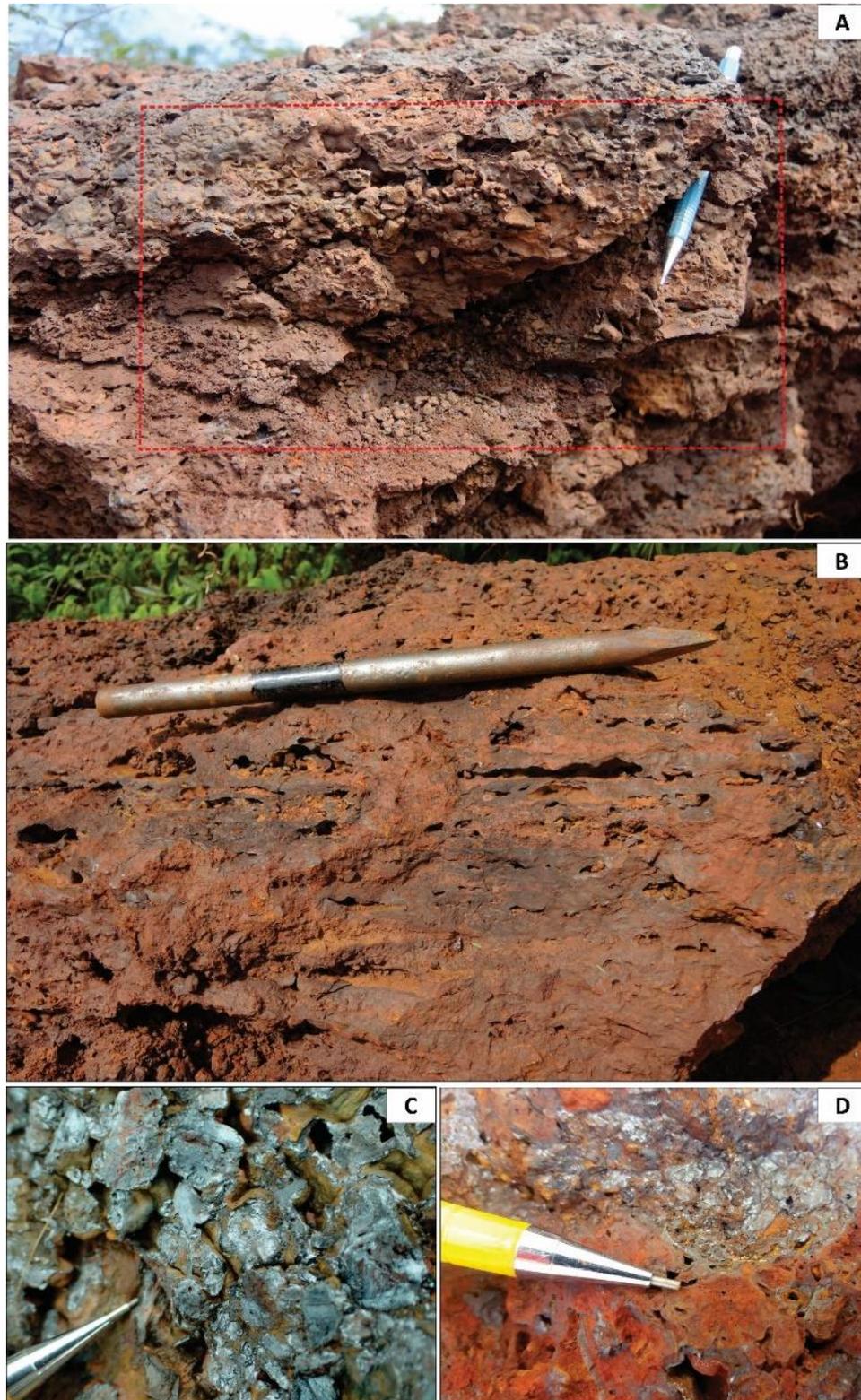
Os vazios conferem ao maciço textura porosa a microcavernosa (2 mm a 10 cm), exibem às vezes forma alongada e subhorizontalizada, resultando num aspecto laminado-descontínuo, às vezes anastomosado, especialmente nas porções basais e intermediárias da crosta. Como já citado, são normalmente contornados por película (vênulas/cutanes) de coloração cinza-metálica ou fosca (neoformações de goethita). Junto às porções pisolíticas os vazios apresentam forma e distribuição bastante irregular, mostrando-se isolados, por vezes interligados e alongados imprimindo um aspecto vermiforme à textura. Textura vesicular (2 a 16 mm) é observada especialmente na massa silto-argilosa endurecida (hidróxidos) (Figura 23). Para este litotipo estima-se porcentagem de vazios entre 10 e 25%.

Figura 22 - Aspectos gerais da CLFA. (A) Superfície de exposição essencialmente goethítica (10 cm) de coloração cinza-metálica; (B) Aspecto acamadado/anastomosado, topo essencialmente goethítico (10 cm) de coloração cinza-metálica e base apresentando feições pisolíticas; (C) Topo goethítico com feições pisolíticas e botrioidais; (D e E) Feições pisolíticas na base; (F) Detalhe das feições pisolíticas.



Fonte: a autora.

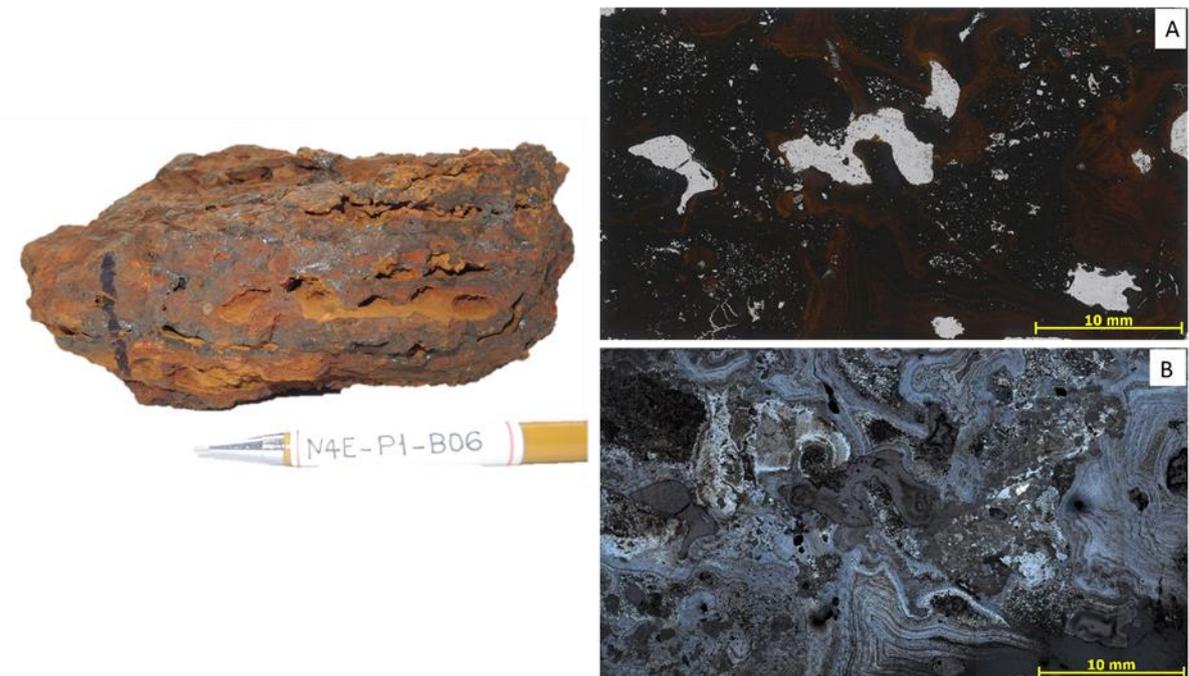
Figura 23 - Padrão de desenvolvimento de vazios da CLFA. (A) Vazios desenvolvidos entre feições pisolíticas em topo essencialmente goethítico; (B) Vazios alongados e distribuídos de forma subhorizontalizada dando aspecto laminado ao maciço; (C) Vazios desenvolvidos entre feições pisolíticas (aspecto vermiforme a vesicular); (D) Vazios milimétricos isolados desenvolvidos em matriz vermelha endurecida (textura porosa-vesicular).



Fonte: a autora.

Petrograficamente, a CLFA, mostra-se em geral sendo constituída por uma massa de coloração preta a marrom-avermelhada, em luz natural transmitida (Figura 24 A) de óxidos de ferro e hidróxidos de ferro e alumínio. Esta mesma massa, mostra-se em tons brancos e acinzentados quando submetida a luz refletida (Figura 24 B). Os vazios identificados em escala macroscópica e mesoscópica também são observados em escala microscópica e ocorrem dispersos de forma irregular por toda a estruturação da CLFA (Figura 24 A e B). Além disso, possuem formas e bordas irregulares.

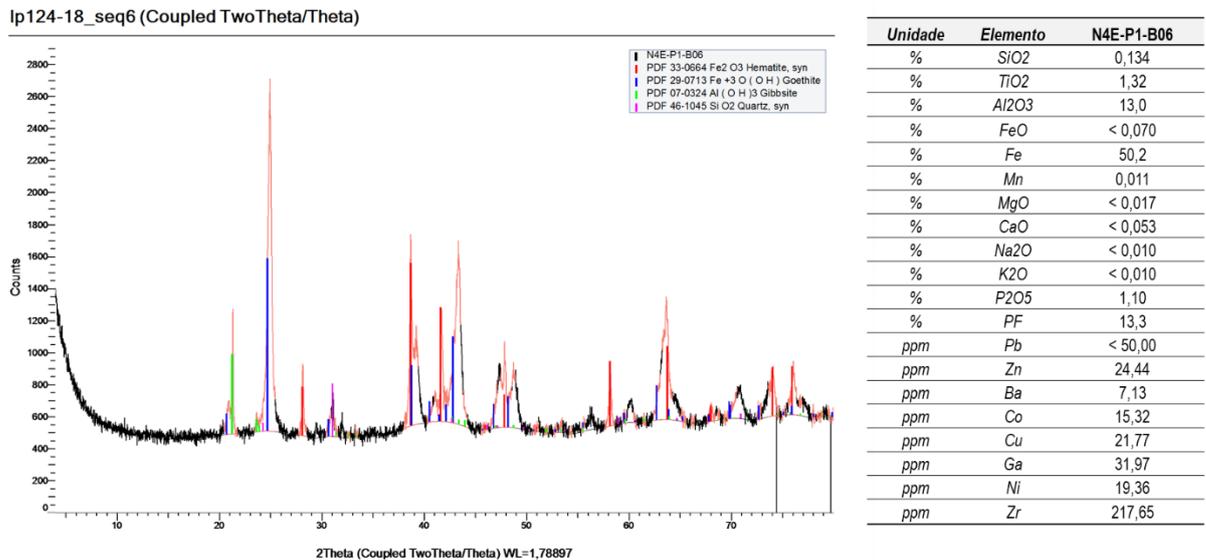
Figura 24 - Aspectos petrográficos da CLFA. Notar os vazios milimétricos ao longo da estruturação da CLFA. Em (A), imagem tomada em luz natural transmitida; (B) Imagem tomada em luz refletida.



Fonte: a autora.

Mineralogicamente, foram identificados hematita, goethita, gibbsita e, em menores proporções, o quartzo como pode ser verificado no difratograma de raios-X na Figura 25. Nesta mesma figura, também são apresentados os dados químicos da CLFA. Nota-se principalmente, que os teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e PF (perda ao fogo) estão relacionados principalmente a ocorrência de gibbsita, enquanto que o teor de ferro é atribuído principalmente a ocorrência da hematita e goethita. Os teores de MgO, CaO,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$  não atingiram o limite de detecção,  $\text{SiO}_2$  ocorre em pequenas quantidades e é relacionada a presença de quartzo nesta amostra. Os teores de  $\text{P}_2\text{O}_5$  ocorrem na ordem de 1%. Não foram identificados minerais de titânio e nem manganês. Pb, Zn, Ba, Co, Cu, Ga, Ni e Zr ocorrem em proporções mínimas na ordem de ppm.

Figura 25 - Composição química e mineralógica da CLFA. No difratograma de raios-X, notar a ocorrência de hematita, goethita, gibbista e quartzo.



Fonte: a autora.

#### 5.1.1.1.3 Crosta Laterítica Ferruginosa (CLF)

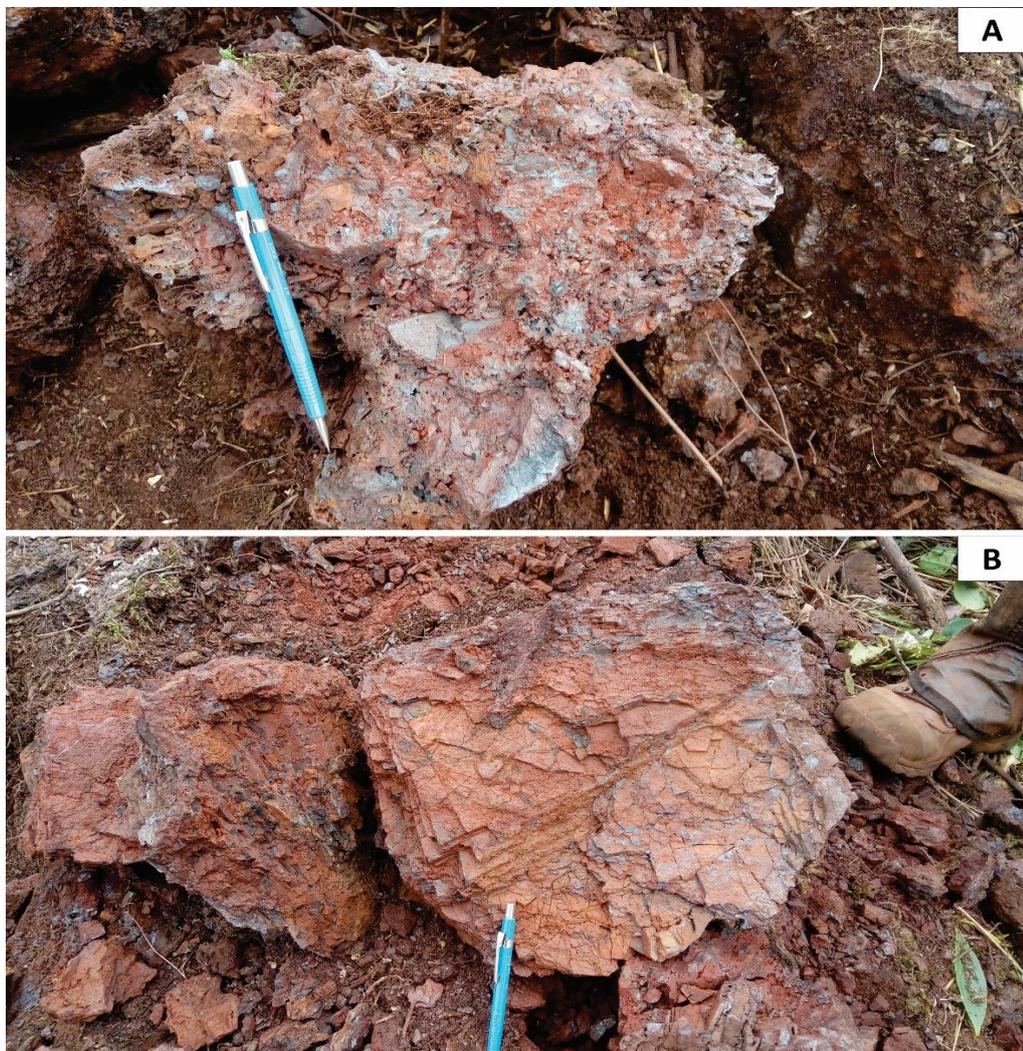
A crosta laterítica ferruginosa (CLF) constitui o horizonte de topo das formações ferríferas, sendo observada nas duas seções de estudo (Figuras 17 a 20). O contato com o horizonte subjacente se mostra ondulado e transicional, por vezes de difícil identificação devido à presença de vegetação e crostas, bem como dificuldades de acesso em alguns pontos. Apresenta espessura variável, principalmente entre 0,5 e 3,0m, podendo alcançar, localmente, até 5,0 m.

A CLF é composta, principalmente, por fragmentos em geral placóides de óxido de ferro de coloração cinza-fosca (hematita) e goethita cristalina de coloração cinza-metálica, imersos em material silto-argiloso de coloração avermelhada a amarelo-ocre (hidróxidos de ferro), em geral pouco abundante, constituindo um arcabouço em geral mais fechado e endurecido. Geralmente esse pacote mostra maior grau de litificação e maior proporção de goethita cristalina, além de apresentar maior grau de obliteração das estruturas geológicas, em relação ao horizonte subjacente (FFL).

Em função da texturas predominante, foram identificados maciços brechados e bandados, com predominância do primeiro tipo. Quando brechada, a CLF mostra fragmentos centimétricos (até 4 cm) de oxi-hidróxidos de ferro, de coloração cinza-fosca e/ou cinza-metálica, levemente alterados. A CLF bandada apresenta estruturas reliquias típicas da FF

como o bandamento reliquiar e fraturas, por vezes mostrando bandas preservadas e por vezes bastante obliteradas ou em arranjo desordenado. É comum a presença de lâminas/vênulas de oxi-hidróxidos de ferro (goethita) (Figuras 26 e 27). Localmente, recobrimo esses maciços, se observa uma camada superficial de espessura centimétrica a decimétrica (até 30 cm), porosa, onde há o predomínio de uma massa goethítica cristalina de coloração cinza metálica, com presença subordinada de material silto-argiloso de coloração amarelo ocre, em geral endurecido e, por vezes mostrando feições pisolíticas.

Figura 26 - Aspectos da CLF. Deve-se dar atenção a presença de lâminas/vênulas de oxi-hidróxidos de ferro (goethita) na porção brechada. (A) CLF brechada; (B) CLF bandada/fraturada.

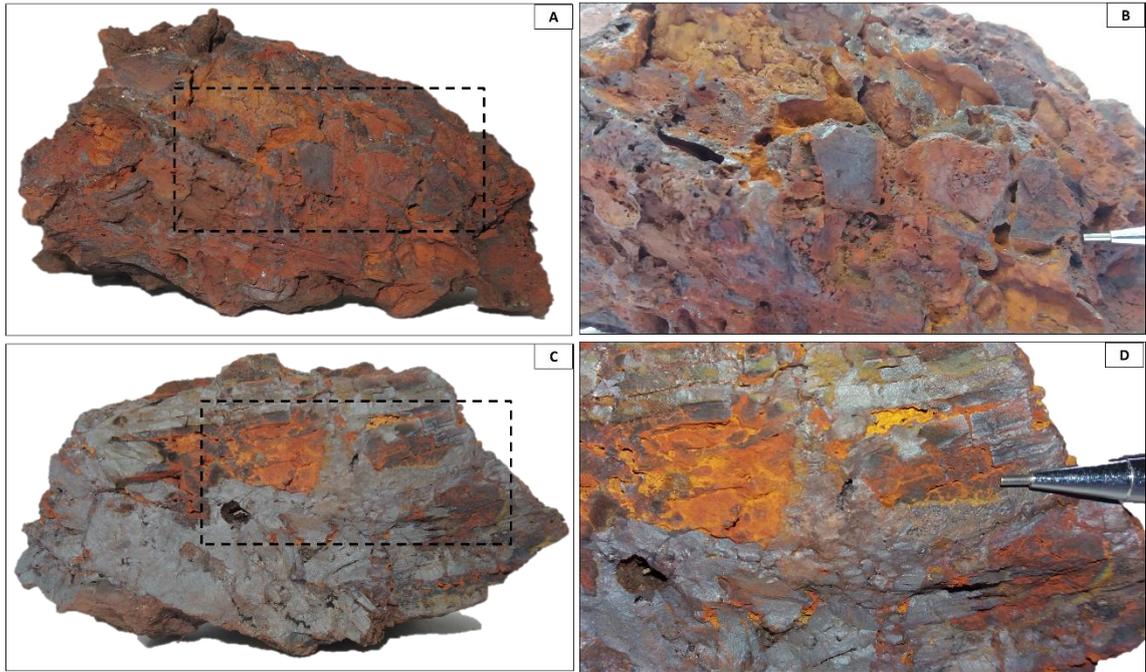


Fonte: a autora.

Em geral a CLF apresenta baixa proporção de vazios (estimado, em geral, em menos de 15%), onde o arcabouço é mais fechado (Figura 27). Os tamanhos e formas também são variáveis. Nota-se em geral textura porosa a vesicular (vazios de 1 a 5mm) e localmente

microcavernosa (vazios > 16mm), com distribuição irregular. No caso da CLF bandada, observou-se por vezes controle estrutural relacionado ao bandamento e/ou fraturas.

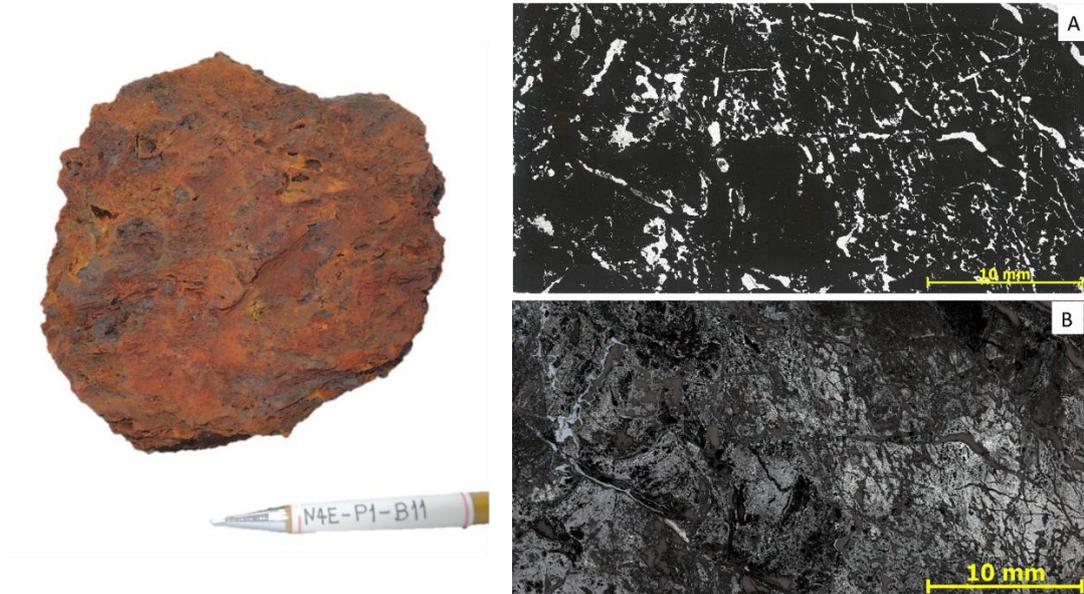
Figura 27 - Distribuição de vazios na CLF. (A e B) Vazios na CLF brechada; (C e D) Vazios na CLF bandada.



Fonte: a autora.

Ao microscópio, a CLF é constituída por uma massa de coloração preta em luz natural transmitida (Figura 28 A) de óxidos e hidróxidos de ferro. Em luz refletida, mostra-se em tons brancos e acinzentados (Figura 28 B). Os vazios identificados em escala macroscópica e mesoscópica também são observados em escala microscópica e ocorrem dispersos de forma irregular por toda a estruturação da CLF (Figura 28 A e B).

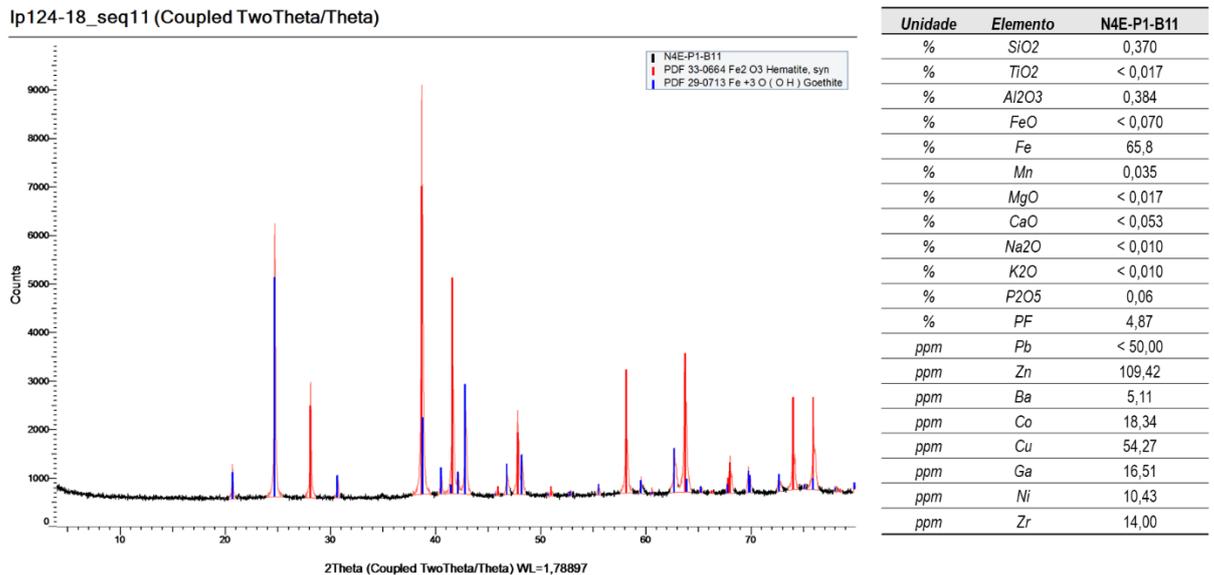
Figura 28 - Aspectos petrográficos da CLF. Notar os vazios milimétricos alongados dispersos ao longo da estruturação da CLF. Em (A), imagem da amostra tomada em luz natural transmitida; (B) Imagem tomada em luz refletida.



Fonte: a autora.

Mineralogicamente, foram identificados hematita e goethita como pode ser verificado no difratograma de raios-X na Figura 29. Também são apresentados os resultados químicos encontrados para a CLF. Nota-se principalmente que os teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e PF (perda ao fogo) são menores em relação a CLFA e estão relacionados principalmente a ausência de gibbsita, enquanto que o teor de Fe é atribuído a ocorrência da hematita e goethita. Os teores de  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$  não atingiram o limite de detecção,  $\text{SiO}_2$  ocorre em pequenas quantidades e não foi identificado quartzo nesta amostra. Os teores de  $\text{P}_2\text{O}_5$  ocorrem em menor proporção (menos que 1%) que na CLFA. Não foram identificados minerais de titânio e nem de manganês. Pb, Zn, Ba, Co, Cu, Ga, Ni e Zr ocorrem em proporções mínimas na ordem de ppm.

Figura 29 - Composição química e mineralógica da CLF. No difratograma de raiosX, notar a ocorrência de hematita e goethita apenas.



Fonte: a autora.

#### 5.1.1.2 Horizonte de Transição (HT)

Constitui o horizonte imediatamente subjacente à crosta superficial, em geral mais espesso e menos endurecido, e exibindo características tanto da crosta como dos horizontes. Caracteriza-se por apresentar um maior volume de vazios em relação aos maciços adjacentes. Nesse horizonte se observam texturas muito variáveis, desde maciço-porosa a cavernosa. Os principais litotipos que representam este horizonte foram denominados de laterita ferro-aluminosa (LFA), em domínio de rochas máficas, e formação ferrífera laterítica (FFL), em domínio de rochas ferríferas. Suas descrições são apresentadas a seguir.

##### 5.1.1.2.1 Laterita Ferro-aluminosa (LFA)

A LFA corresponde ao horizonte de transição no domínio das rochas máficas, constituída por um espesso pacote localizado entre a crosta laterítica ferro-aluminosa (CLFA) e o saprolito (SAP-RM), sendo os limites tanto de topo quanto de base em geral irregulares, gradacionais por vezes abruptos. Apresenta até 5 m de espessura na seção, sendo observados, em sondagens, até 20 m de espessura desse material. Este litotipo é informalmente denominado de canga química e/ou terrígena, canga e, por vezes solo laterítico. É composta de oxidróxidos de ferro (principalmente goethita), de coloração cinza metálica ou fosca, na forma de grãos, vênulas, cutans/ córtex neoformados, imersos em uma matriz silto-argilosa,

ferruginosa (hidróxido de ferro), de coloração vermelha amarronzada e amarelo-ocre e, ainda, subordinadamente, de hidróxido de alumínio (gibbsita), este identificado por meio da presença de pontos submilimétricos de brilho vítreo. Óxidos de ferro (hematita), são observados principalmente nas regiões de contato com as formações ferríferas. As texturas variam desde maciço-porosa a mesocavernosa.

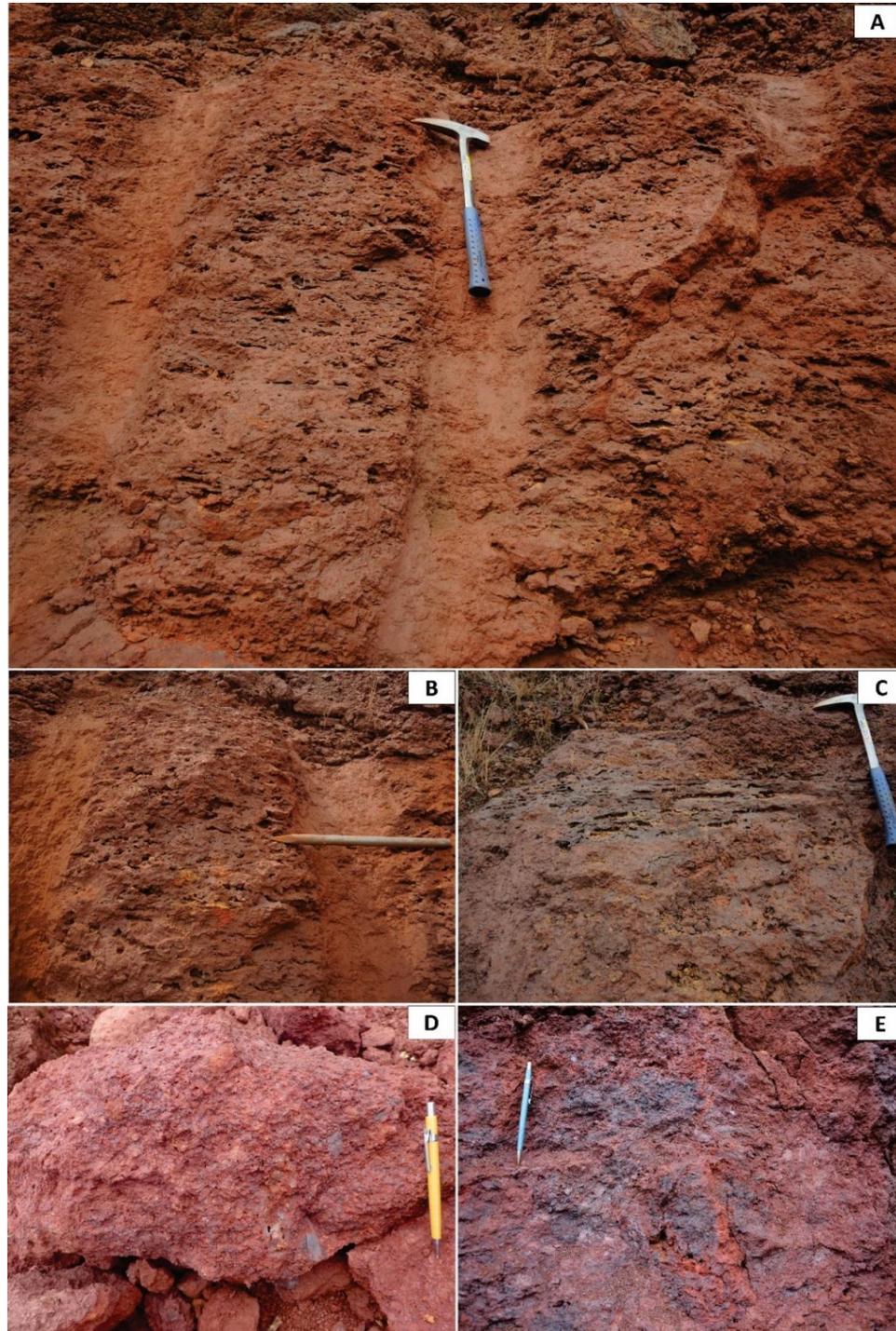
Predominam nesse pacote maciços contendo proporção significativa de vazios (15 a 30%), cuja distribuição e tamanho configuram textura principalmente vesicular a microcavernosa (Figura 30) e, mais restritamente, porosa (vazios < 2mm) (Figura 31H) e mesocavernosa (vazios > 10 cm) (Figura 32). Os vazios exibem, localmente, um padrão de alinhamento e alongamento subhorizontalizado, configurando um aspecto laminado-descontínuo, que varia de incipiente a marcante (Figuras 30A, B e C e Figura 31A). Esses vazios são comumente contornados por finas películas (córTEX/cutanes/vênulas) de oxi-hidróxido de ferro de coloração cinza-metálica ou cinza-fosca, e às vezes preenchidos por material silto-argiloso de coloração amarelo-ocre (Figuras 31B). São comuns feições botrioidais e pisolíticas (Figuras 31C e D). Nota-se, por vezes o desenvolvimento de espeleotemas, onde se configuram típicas cavidades centimétricas (Figuras 31 E, F e G). Os vazios encontrados nesse horizonte são maiores em relação aos encontrados no horizonte superior crosta laterítica, atingindo tamanhos decimétricos (< 60 cm), e, mostrando por vezes um desenvolvimento condicionado á ocorrência de fraturas. Localmente, podem apresentar em seu interior ou base, sedimentos argilosos de coloração amarela esverdeada a avermelhada (Figura 32C).

Estão presentes nesse domínio, de forma subordinada, porções mais litificadas e endurecidas, semelhantes à crosta (Figura 30C), assim como núcleos lateríticos maciços, e núcleos saprolíticos (Figura 30E). As porções maciças apresentam coloração avermelhada a alaranjada, compostas por material silto-argiloso ferruginoso, contendo fragmentos/grãos milimétricos a submilimétricos de oxi-hidróxido de ferro e minerais de gibbsita (pequenos pontos distribuídos no horizonte). Apresenta textura maciço-porosa (vazios < 2mm), com distribuição mais uniforme e em menor proporção (normalmente < 5%) (Figuras 30D e 31H).

Os núcleos saprolíticos apresentam coloração púrpura a avermelhada, consistência silto-argilosa, contendo grãos submilimétricos de oxi-hidróxidos de ferro, e aspecto e sedoso ao tato. São endurecidos ou macios, e às vezes exibem foliação incipiente (Figura 30E). Este

pacote é recortado por superfícies de fratura espaçadas com elevada persistência, em geral onduladas, por vezes com preenchimento espesso de material detrítico, além de fissuras pouco persistentes e menos espaçadas (Figuras 33C e D). Recobrindo ou preenchendo as paredes das fraturas, nota-se a presença de vênulas de oxi-hidróxidos de ferro, exibindo um aspecto laminado subverticalizado (Figuras 33A e B).

Figura 30 - Laterita ferro-aluminosa. (A) Aspecto predominante da LFA com aspecto laminado-descontínuo, contendo proporção significativa de vazios (textura vesicular a microcavernosa); (B) Aspecto laminado-descontínuo marcado pelo padrão linear-alongado de vazios; (C) Porção mais litificada e endurecida, semelhante à crosta, apresentando orientação linear de vazios; (D) Aspecto maciço-poroso; (E) Núcleo saprolítico.



Fonte: a autora.

Figura 31- Padrão de desenvolvimento de vazios na Laterita ferro-aluminosa. (A) Vazios orientados em porção mais goethítica; (B) e (C) Vazios contornados por finas películas (córTEX/cutanes/vênulas) goethíticas, alguns parcialmente preenchidos por material silto- argiloso de coloração amarelo-ocre; (D) Feições botrioidais e pisolíticas entre e dentro de vazios; (E), (F) e (G) Vazios contornados por finas películas (córTEX/cutanes/vênulas) goethíticas, com desenvolvimento de espeleotemas, configurando miniaturas de cavidades; (H) Textura microesponjosa.

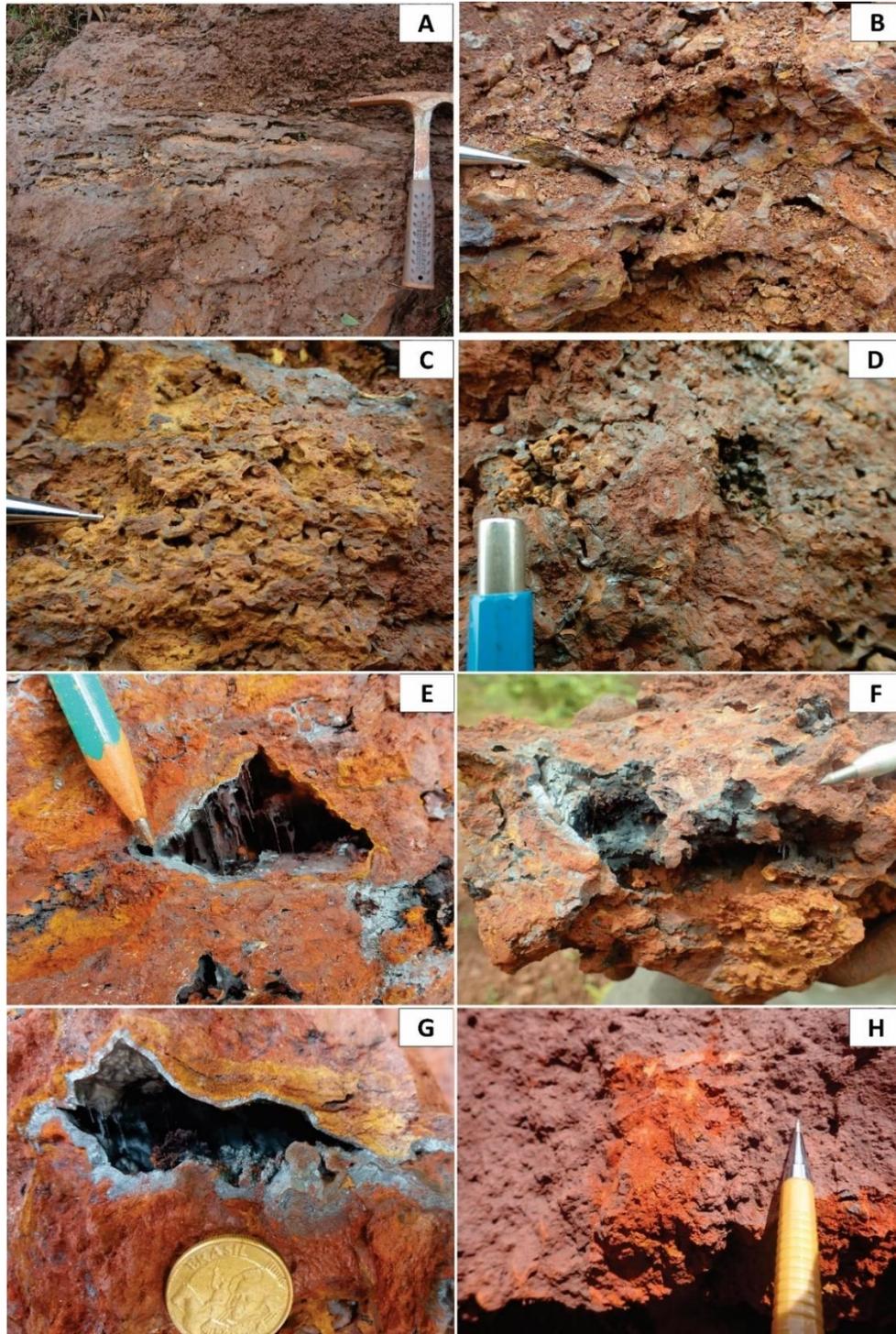
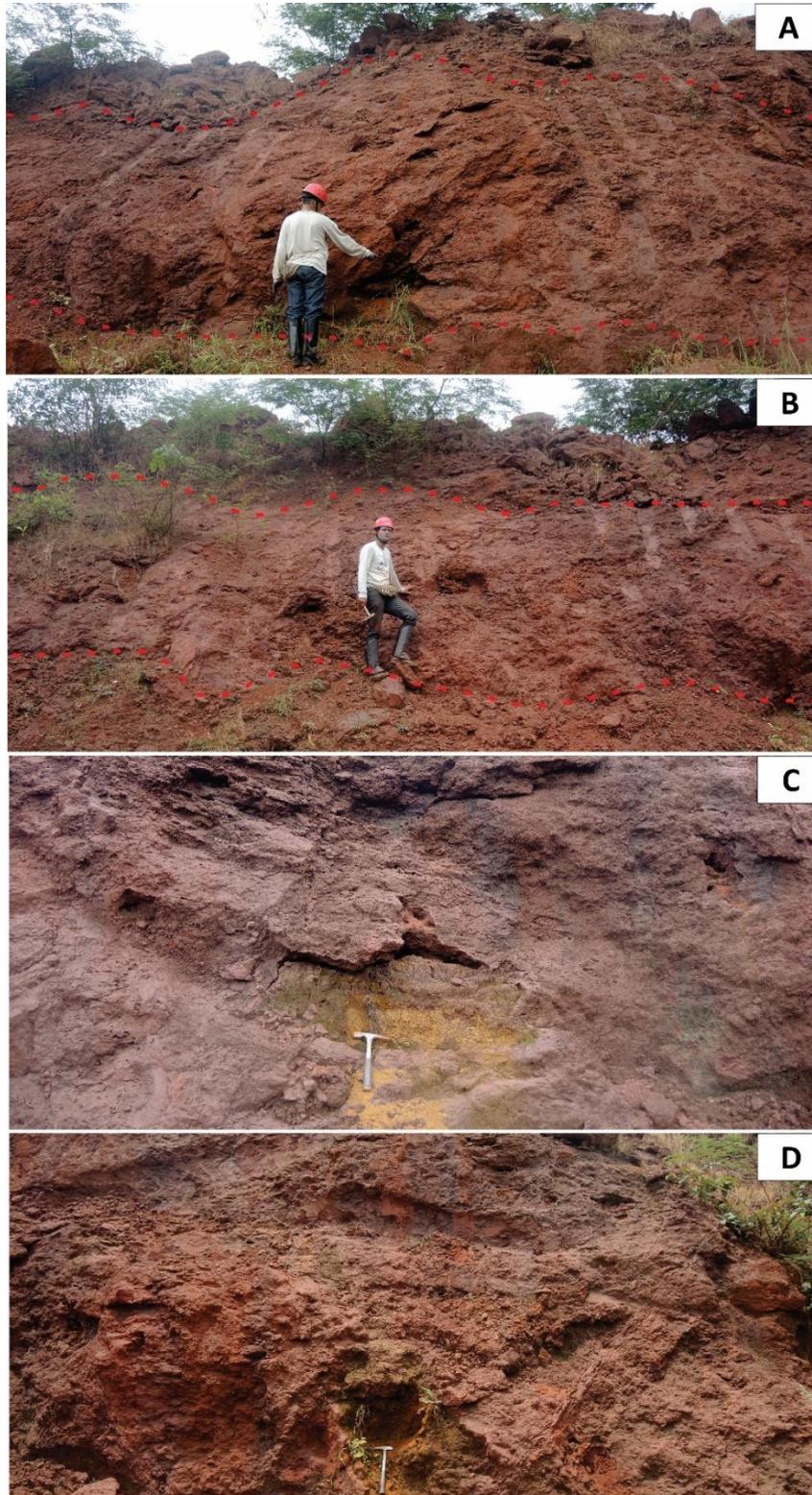


Figura 32 - Laterita ferro-aluminosa. (A) Mesocavidade aparentemente controlada pela laminação e fraturas; (B) Mesocavidades semicirculares. Notar a delimitação do horizonte de transição pelas linhas vermelhas pontilhadas; (C) Mesocavidade alongada parcialmente preenchida por sedimentos de coloração amarelo-ocre; (D) Vazio decimétrico preenchido por sedimentos de coloração amarelo-ocre e esverdeada.



Fonte: a autora.

Figura 33 - Características das Fraturas. (A) e (B) Fratura de elevada persistência, ondulada, preenchida por vênulas de oxi-hidróxidos de ferro, exibindo um aspecto laminado subverticalizado; (C) e (D) Fratura preenchida por vênulas de oxi-hidróxidos de ferro, exibindo um aspecto laminado subverticalizado com material detrítico.

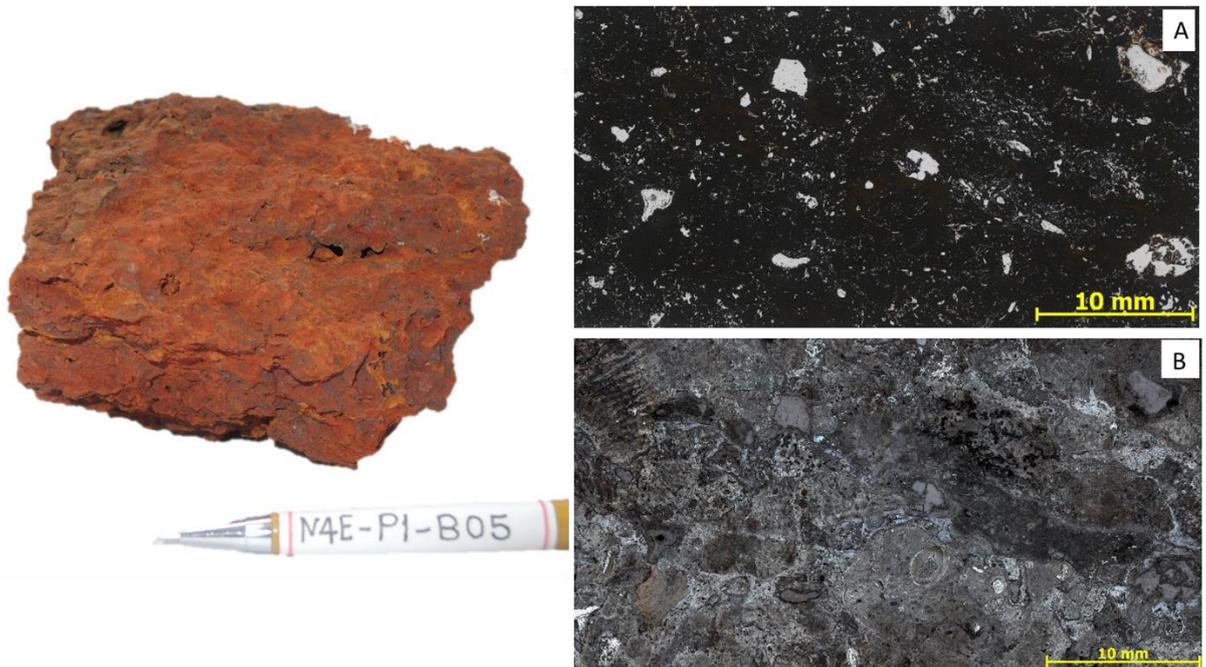


Fonte: a autora.

Petrograficamente, a LFA, mostra-se em geral constituída por uma massa de coloração preta a marrom-avermelhada, em luz natural transmitida (Figura 34 A) de óxidos de ferro e hidróxidos de ferro e alumínio. Tons brancos e acinzentados são observados quando a LFA é

submetida a luz refletida (Figura 34 B). Os vazios identificados em escala macroscópica e mesoscópica também são observados em escala microscópica e ocorrem mostrando formas e bordas irregulares e dispersos de forma heterogênea por toda a estruturação da LFA (Figuras 34 A e B).

Figura 34 - Aspectos petrográficos da LFA. Notar os vazios milimétricos dispersos de forma irregular e heterogênea ao longo da estruturação da LFA. Em (A), imagem tomada em luz natural transmitida; (B) Imagem tomada em luz refletida.

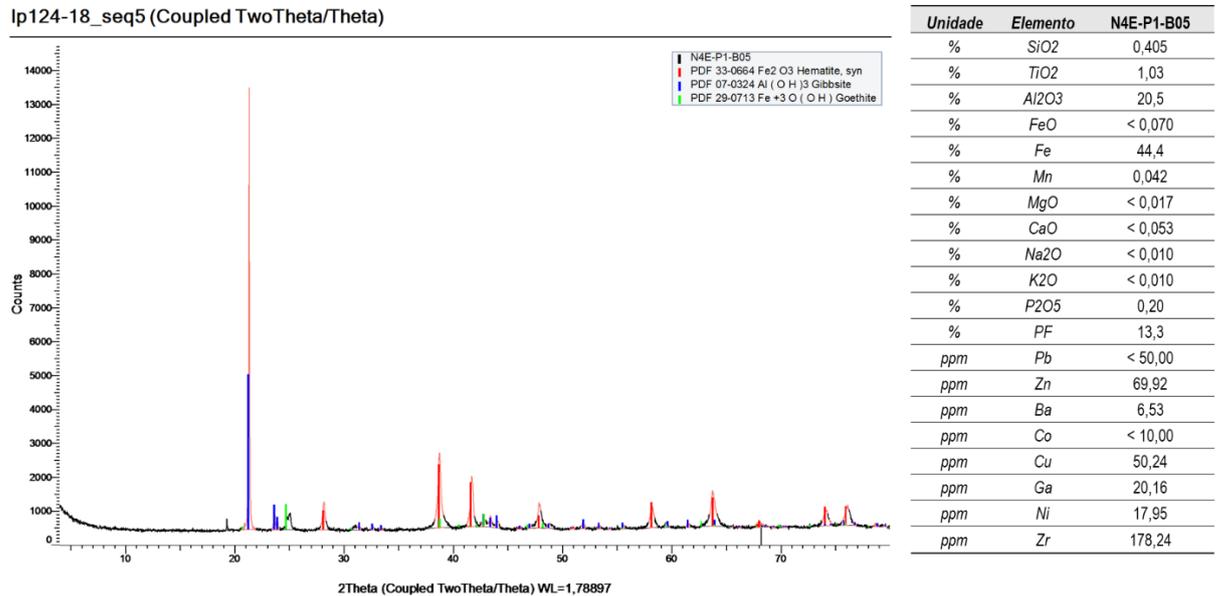


Fonte: a autora.

Mineralogicamente, foram identificados hematita, goethita e gibbsita registrados no difratograma de raios-X na Figura 35. São também apresentados os dados químicos da LFA, na qual nota-se principalmente que os teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  são maiores em relação a CLFA. Os teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e PF (perda ao fogo) estão relacionados principalmente à presença de gibbsita, enquanto que o teor de Fe é atribuído a ocorrência da hematita e goethita.

Os teores de MgO, CaO,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$  não atingiram o limite de detecção,  $\text{SiO}_2$  ocorre em pequenas quantidades e não foi identificado quartzo nesta amostra. Os teores de  $\text{P}_2\text{O}_5$  ocorrem em menor proporção (menos que 1%) que na CLFA. Não foram identificados minerais de titânio, nem de manganês. Pb, Zn, Ba, Co, Cu, Ga, Ni e Zr ocorrem em proporções mínimas na ordem de ppm.

Figura 35 - Composição química e mineralógica da LFA. No difratograma de raios-X, notar a ocorrência de hematita, goethita e gibbista.



Fonte: a autora.

#### 5.1.1.2.2 Formação Ferrífera Laterítica (FFL)

Este litotipo ocorre no horizonte de transição no domínio das formações ferríferas, subjacente à crosta laterítica ferruginosa. É caracterizado por apresentar intercalação de bandas de espessura milimétrica a centimétrica de óxidos de ferro de coloração cinza-fosca, com bandas avermelhadas, porosas, friáveis ou endurecidas (hidróxidos de ferro). O bandamento apresenta-se recortado por planos de fratura, em ângulo oblíquo a subortogonal. Essa estruturação apresenta-se por vezes bastante obliterada, em razão do intemperismo /laterização, sendo observados, entretanto, núcleos mais preservados. Dobras e superfícies de cisalhamento são também observadas (Figuras 36 e 37).

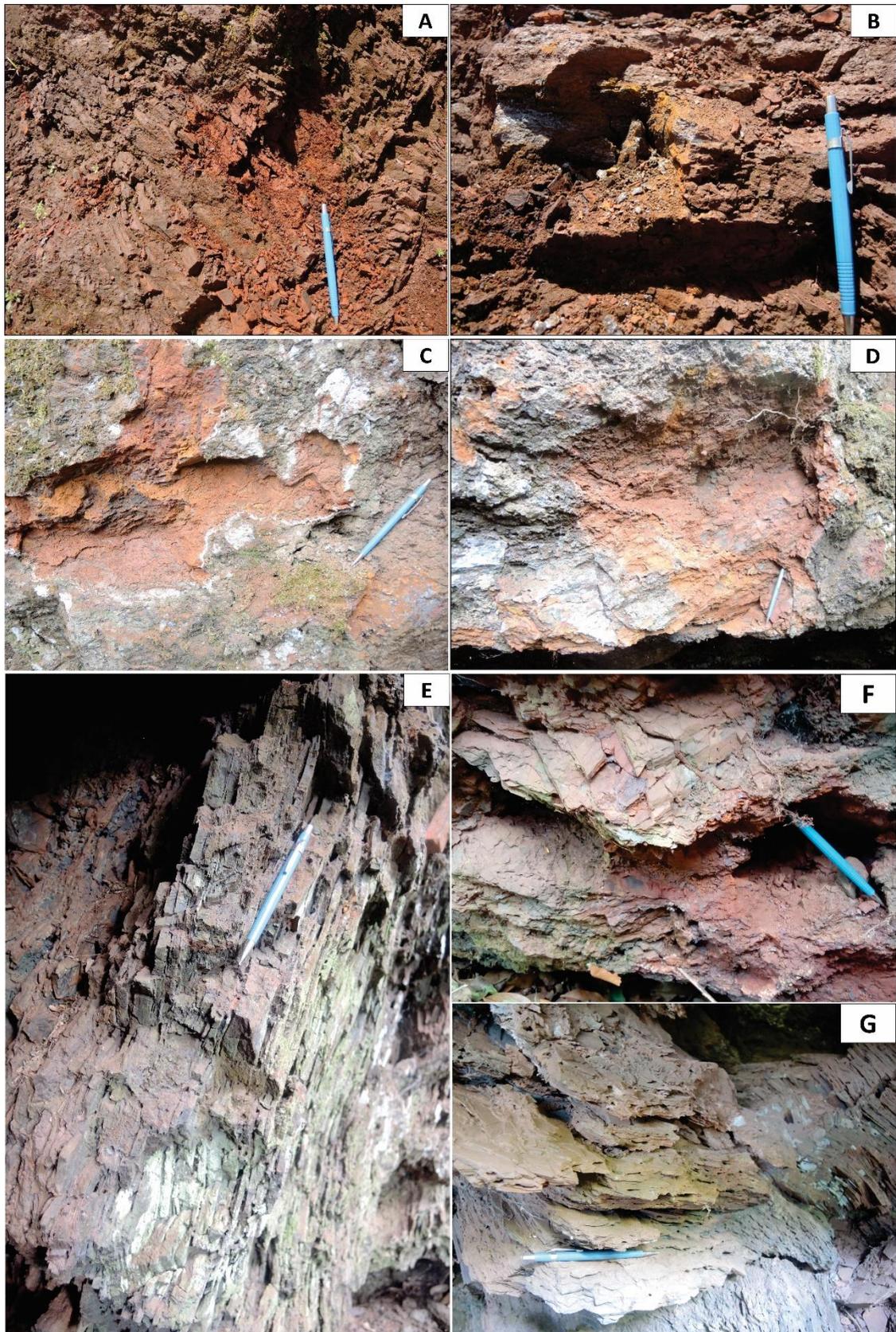
Esse litotipo apresenta significativa variação na proporção (<5 a 35%) e dimensão dos vazios, exibindo texturas desde maciço-porosa a cavernosa (vazios milimétricos a métricos). Nota-se sua distribuição irregular, em geral controlada pelos planos do bandamento e/ou interseção do bandamento com fraturas, alguns com o desenvolvimento de espeleotemas e feições botrioidais em seu interior. Quatro entradas da cavidade N4E\_0026 se encontram inseridas nesse domínio (Figura 38).

Figura 36 - Aspectos gerais da FFL. A linha pontilhada vermelha indica o limite superior da FFL. (A) Litotipo exibindo dobras e padrão de fraturamento típico de formação ferrífera bandada; (B) Litotipo com textura mesocavernosa; (C) Superfícies de cisalhamento observada no litotipo; (D) Bandamento e fraturamento típicos do litotipo.



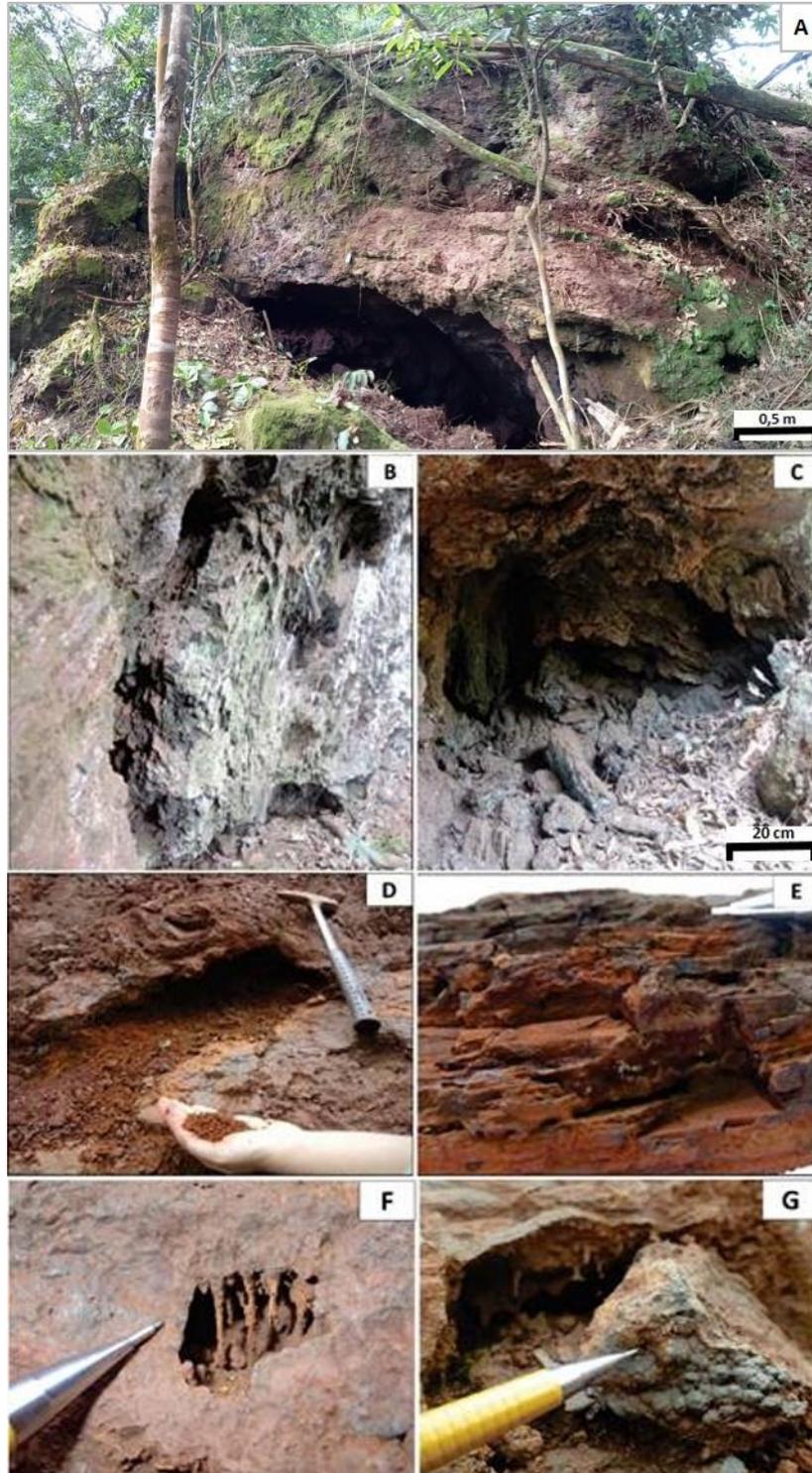
Fonte: a autora.

Figura 37 - Formação ferrífera laterítica (FFL). (A), (B), (C) e (D) Aspecto mais alterado da FFL; (E), (F) e (G) Aspecto mais preservado da FFL.



Fonte: a autora.

Figura 38 - Desenvolvimento de vazios na FFL. (A) Mesocavidade desenvolvida no litotipo; (B) e (C) Vazios desenvolvidos ao longo dos planos de bandamento e fraturamento; (D) Vazio parcialmente preenchido por material de aspecto terroso, desenvolvido ao longo do plano de bandamento; (E) Vazios milimétricos desenvolvidos ao longo do bandamento; (F) Vazio centimétrico apresentando espeleotemas; (G) Vazio centimétrico com desenvolvimento de espeleotemas e feições botrioidais.



Fonte: a autora.

Não foi realizada a caracterização mineralógica, petrográfica e química para a FFL devido ao fato do material ser bastante placoso e, por vezes inconsolidado, o que impediu a realização dos processos de preparação para as análises.

#### 5.1.1.3 Horizonte Saprolito (HS)

Este horizonte está presente no domínio de rochas máficas, nas porções basais da seção N4E-01, setores central e norte. Juntamente ao saprolito de rocha máfica, ocorrem núcleos pouco alterados de rocha cuja descrição é apresentada a seguir.

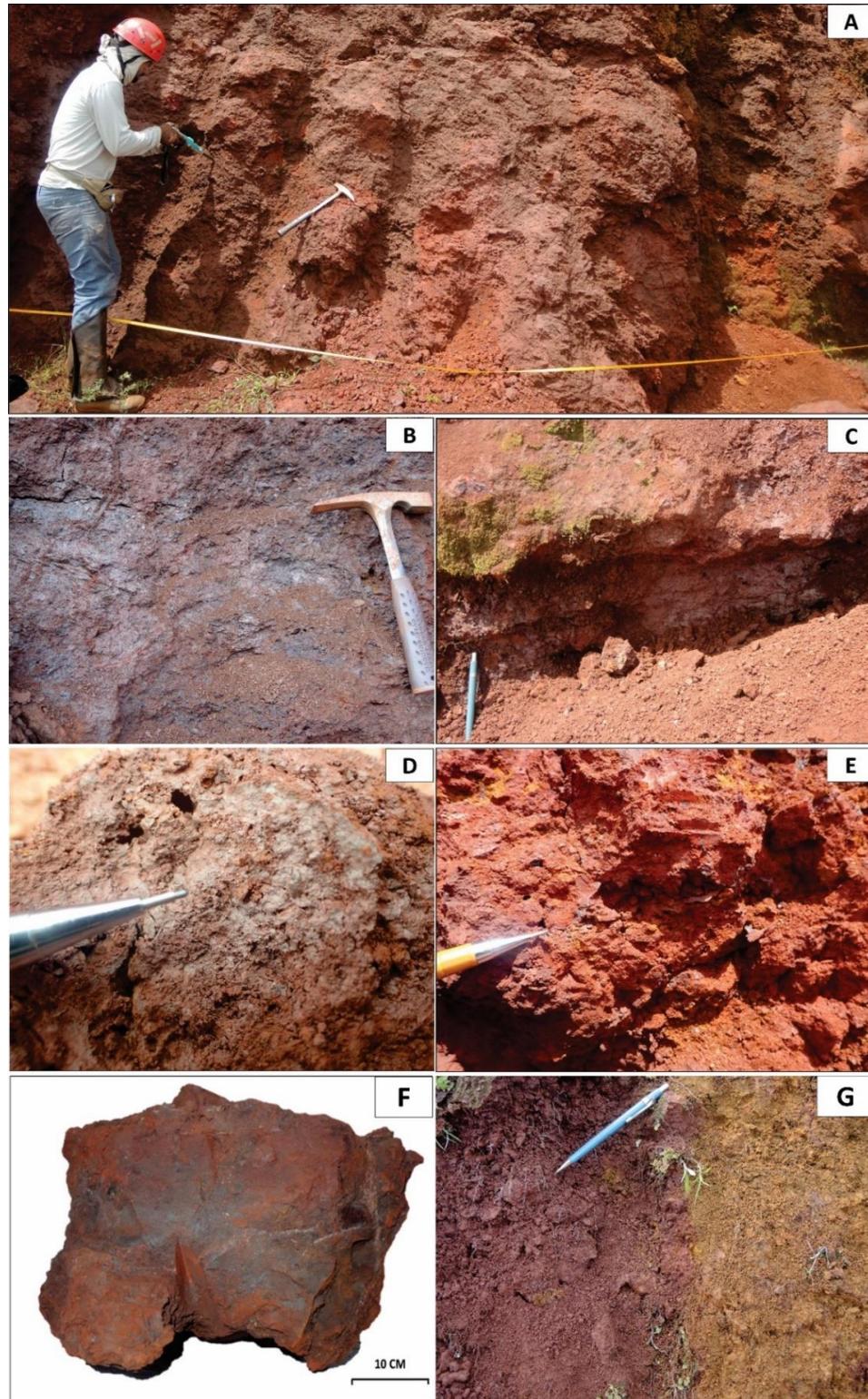
##### 5.1.1.3.1 Saprolito de Rocha Máfica (SAP-RM)

Este litotipo apresenta coloração púrpura a avermelhada e consistência silto-argilosa e aspecto sedoso ao tato. São endurecidos ou macios e exibem xistosidade incipiente a marcante, sendo observado às vezes foliação milonítica e fraturas. Apresenta gibbsita em sua composição, notada pela presença de pontos submilimétricos dispersos, de brilho vítreo. São observadas porções em estágio inicial de laterização, endurecidas, contendo fragmentos de oxi-hidróxidos de ferro.

Em contexto localizado se tem, associados ao saprolito, núcleos de rocha alterada (denominada comumente de rocha máfica semidecomposta) e de solos residuais (solo saprolítico/solo residual maduro). A rocha máfica semidecomposta apresenta coloração cinza-esverdeada, textura maciça a foliada e elevada resistência. Os solos apresentam coloração variando de púrpura, amarelo esverdeado e vermelho-amarronzado (Figura 39).

No saprolito, a ocorrência de vazios é menor que 5% (rocha em geral maciça a porosa), de distribuição irregular. Presença pontual de vazios maiores é observada (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**40 A, B e C), os quais apresentam-se por vezes sendo contornados por uma fina película de oxi-hidróxido de ferro de coloração cinza-metálica ou cinza-fosca.

Figura 39 -Horizonte saprolítico. (A) Visão ampla do litotipo; (B) e (C) Saprolito com foliação milonítica; (D) e (E) Porções em estágio inicial de laterização, endurecidas, contendo grãos / fragmentos de oxi-hidróxidos de ferro; (F) Rocha máfica semi-decomposta; Solo saprolítico; (G) Solos residuais maduros.



Fonte: a autora.

Figura 40 - Configuração dos vazios no SAP-RM. (A) Vazios milimétricos no litotipo; (B) Vazios milimétricos desenvolvidos entre grãos/ fragmentos de oxi-hidróxidos de ferro; (C) Vazios contornados por fina película de oxi-hidróxido de ferro de coloração cinza-metálica.

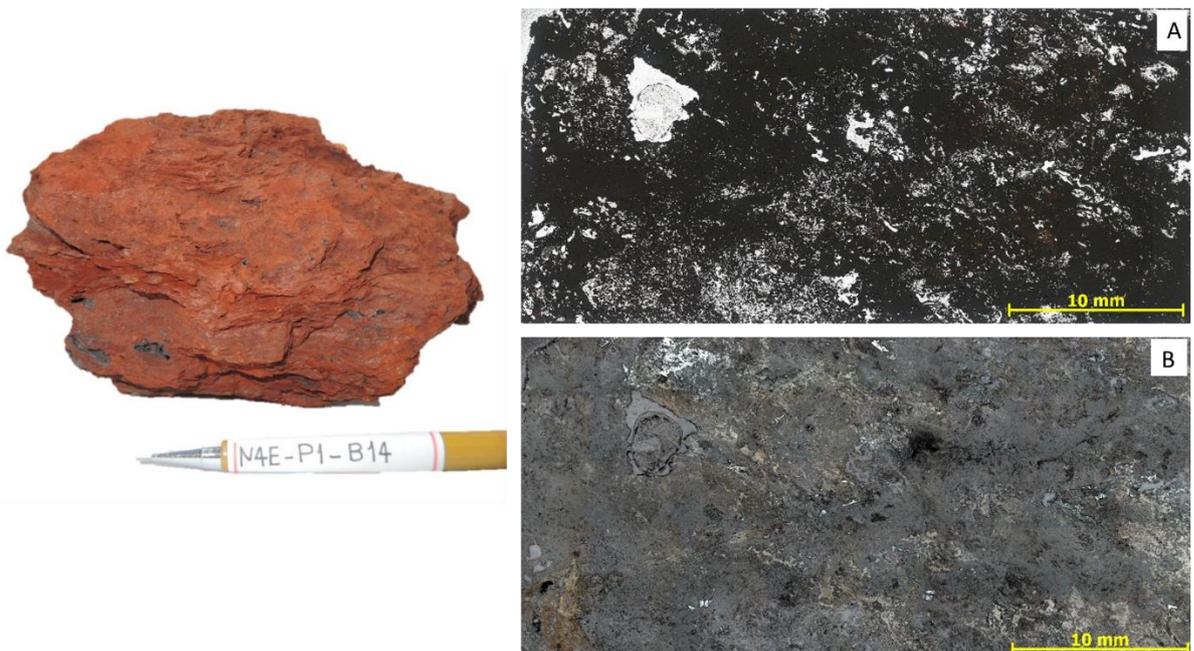


Fonte: a autora.

Ao microscópio, o SAP-RM, mostra-se constituído por uma massa de coloração preta a acinzentada composta por de óxido de ferro e hidróxidos de ferro e alumínio, quando

visualizado em luz natural transmitida (Figura 41A). A diminuição da quantidade de vazios neste litotipo é confirmada em escala microscópica, quando o SAP-RM é submetido a luz refletida, pois grande parte destes é preenchida por gibbsita (Figura 41B).

Figura 41 - Aspectos petrográficos, químicos e mineralógicos do SAP-RM. Notar a diminuição na quantidade de vazios. Em (A), imagem tomada em luz natural transmitida; (B) Imagem tomada em luz refletida. No difratograma de raios-X, notar a ocorrência de gibbsita, hematita e goethita.



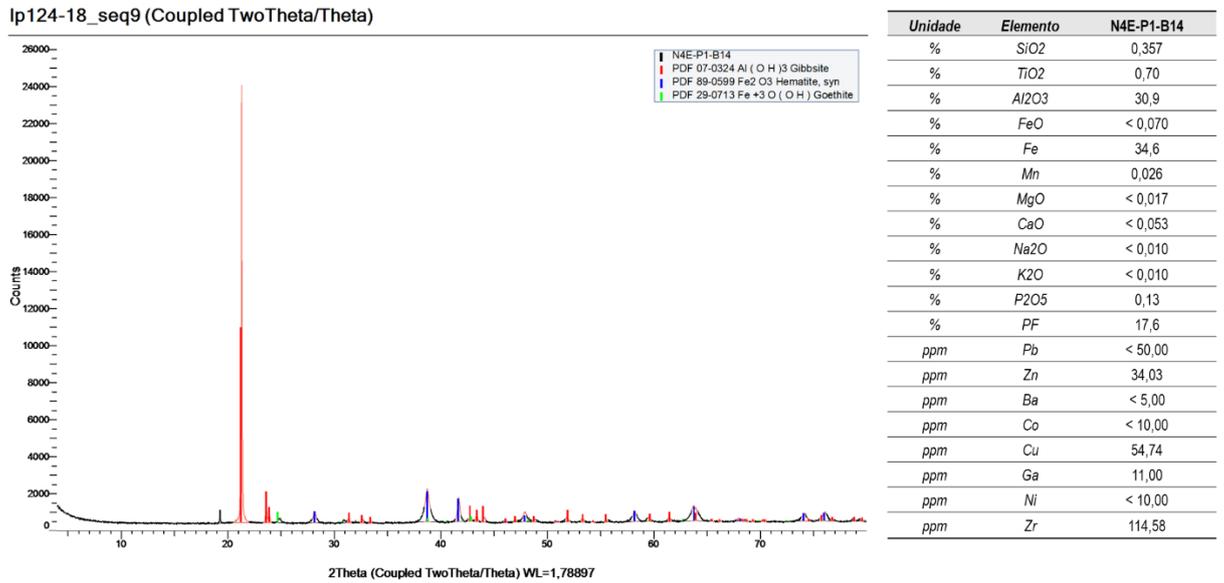
Fonte: a autora.

Mineralogicamente, foram identificados gibbsita, hematita e goethita registrados no difratograma de raios-X da Figura 42. Neste, é possível notar que a gibbsita mostra-se em maior quantidade, microcristalina e bem cristalizada, evidenciado principal pico elevado e simétrico. Também são apresentados os dados químicos do SAP-RM nos quais nota-se principalmente que os teores  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e PF (perda ao fogo) são maiores em relação a LFA e CLFA. Os teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e PF (perda ao fogo) estão relacionados principalmente á presença de gibbsita e confirmam também o aumento na quantidade deste hidróxido. O teor de Fe está relacionado principalmente a ocorrência da hematita e goethita.

Os teores de MgO, CaO,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$  não atingiram o limite de detecção,  $\text{SiO}_2$  ocorre em pequenas quantidades e não foi identificado quartzo nesta amostra. Os teores de  $\text{P}_2\text{O}_5$  ocorrem em menor proporção (menos que 1%) que na CLFA e LFA. Não foram identificados

minerais de titânio, nem de manganês. Pb, Zn, Ba, Co, Cu, Ga, Ni e Zr ocorrem em proporções mínimas na ordem de ppm.

Figura 42 - Composição química e mineralógica do SAP- RM. No difratograma de raios-X, notar a ocorrência de gibbsita, hematita e goethita.

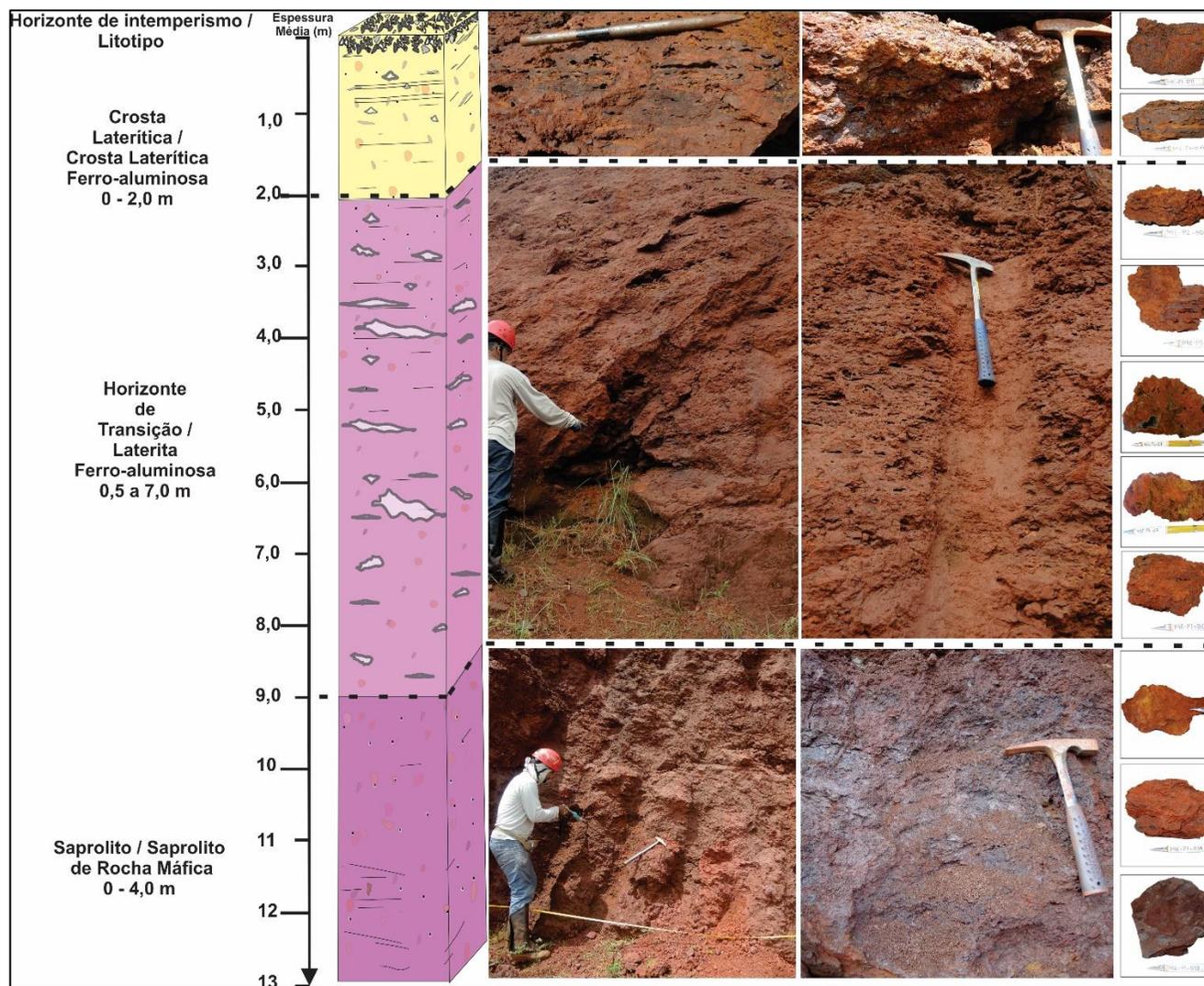


Fonte: a autora.

#### 5.1.1.4 Perfis de Intemperismo

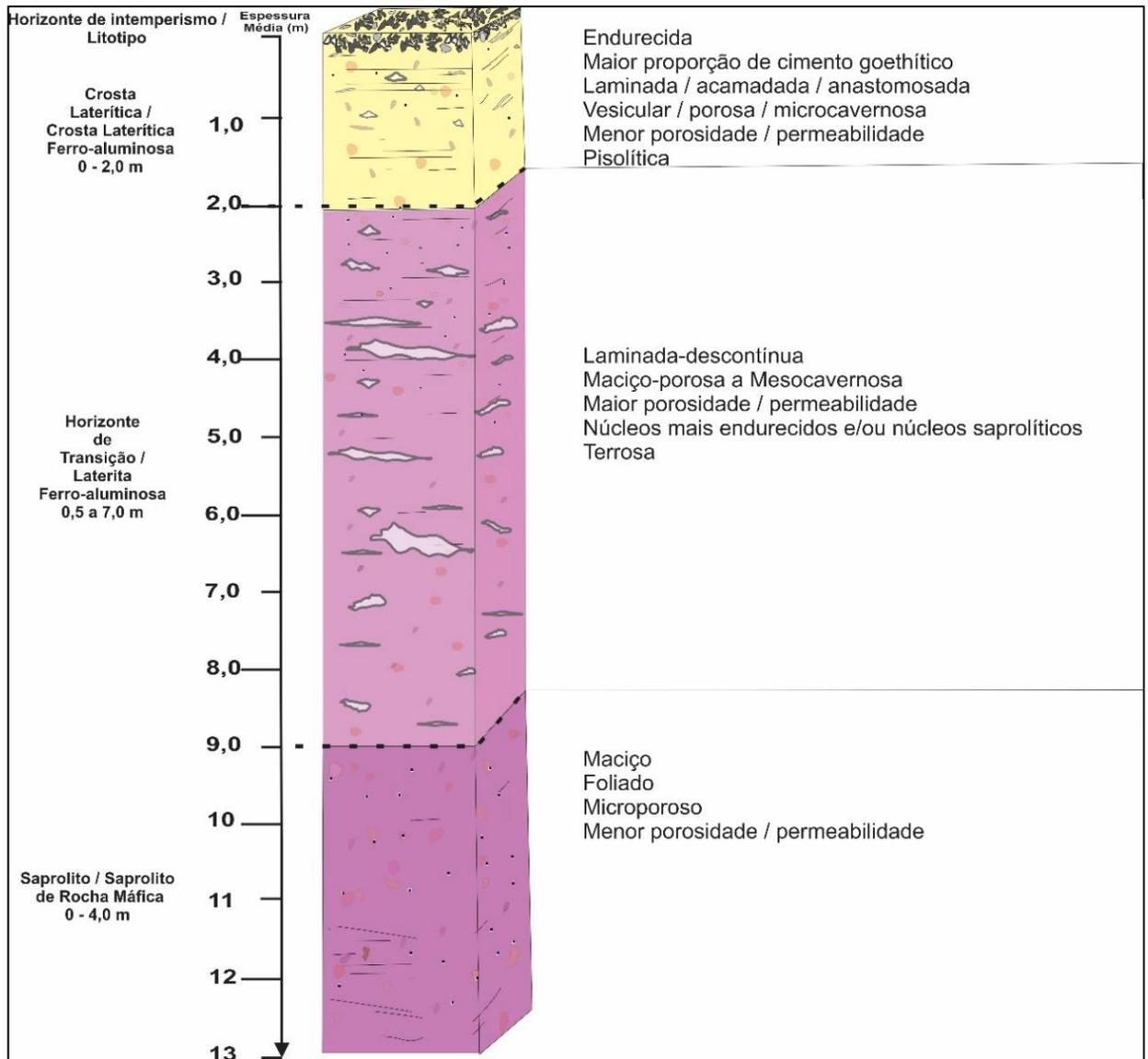
A seguir é mostrada a representação esquemática dos perfis lateríticos desenvolvidos nos domínios de rocha máfica e de formação ferrífera, contendo a síntese das suas características principais (Figuras 43 a 46).

Figura 43 - Representação esquemática de perfil laterítico desenvolvido em domínio de rochas máficas.



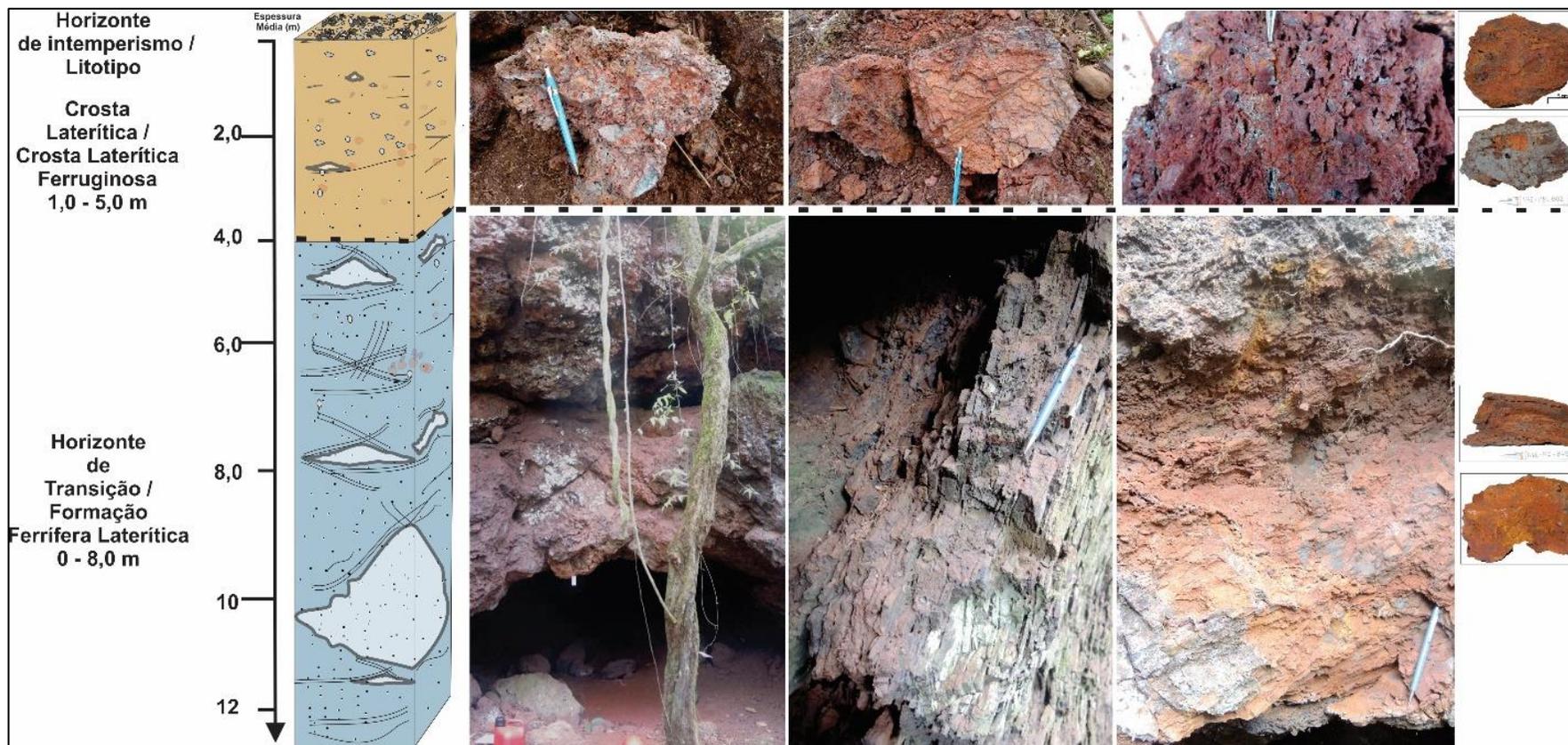
Fonte: a autora.

Figura 44 - Síntese das principais características dos litotipos presentes no perfil laterítico desenvolvido em domínio de rocha máfica.



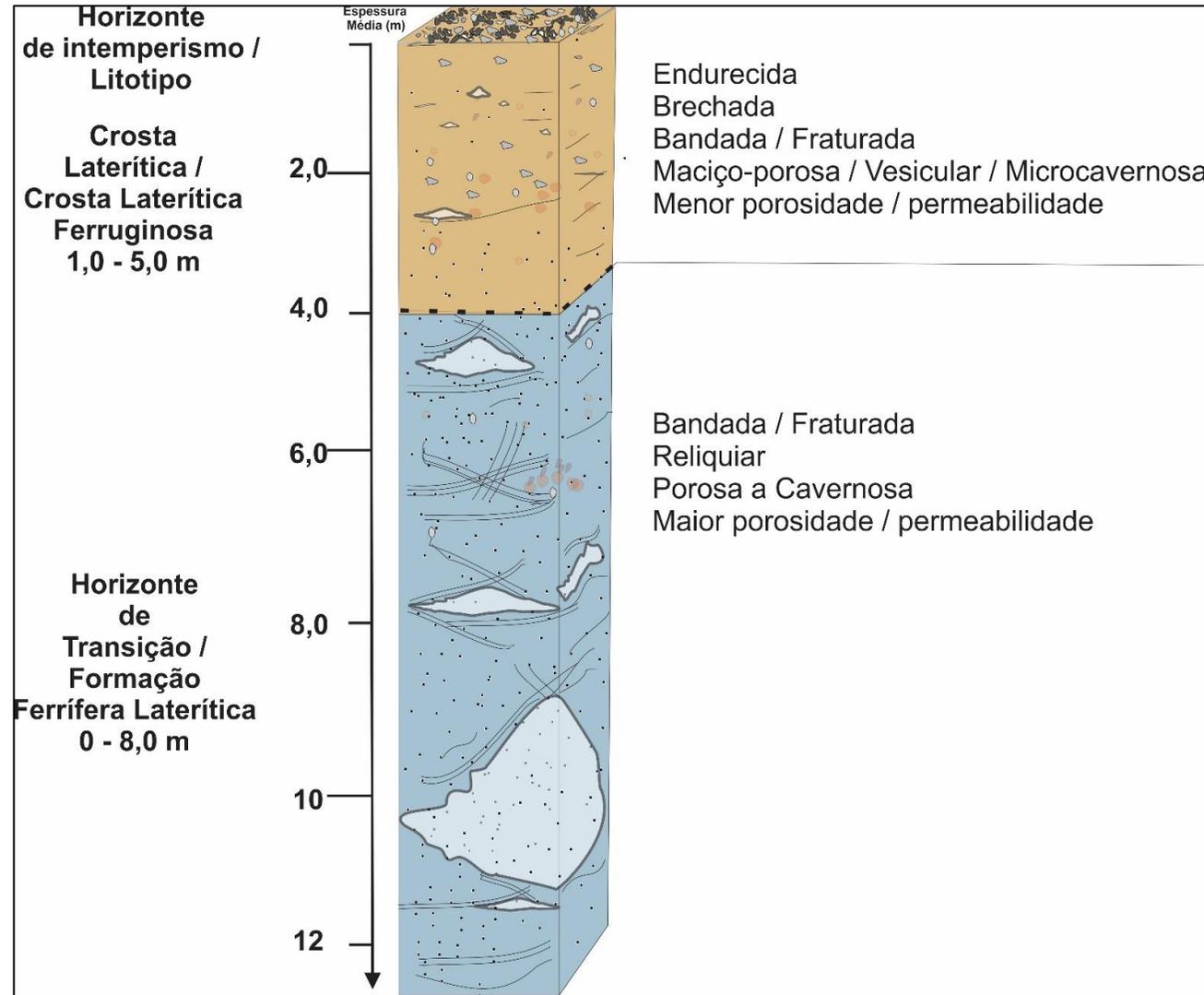
Fonte: a autora.

Figura 45 - Representação esquemática de perfil laterítico desenvolvido em domínio de formação ferrífera.



Fonte: a autora.

Figura 46 - Síntese das principais características dos litotipos presentes no perfil laterítico desenvolvido em domínio de formação ferrífera.



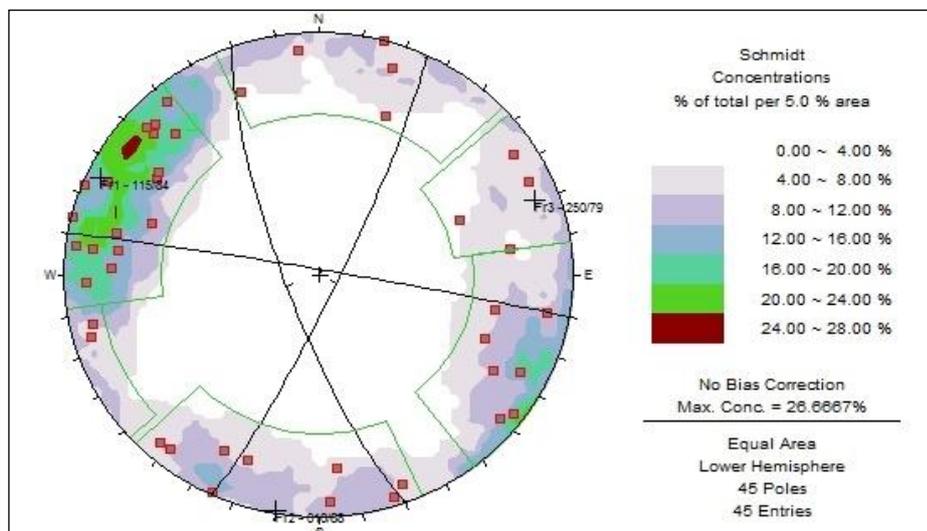
Fonte: a autora.

### 5.1.1.5 Estruturas Geológicas

As principais estruturas geológicas observadas nas áreas de estudo foram fraturas, bandamento reliquiar, superfícies de cisalhamento e juntas.

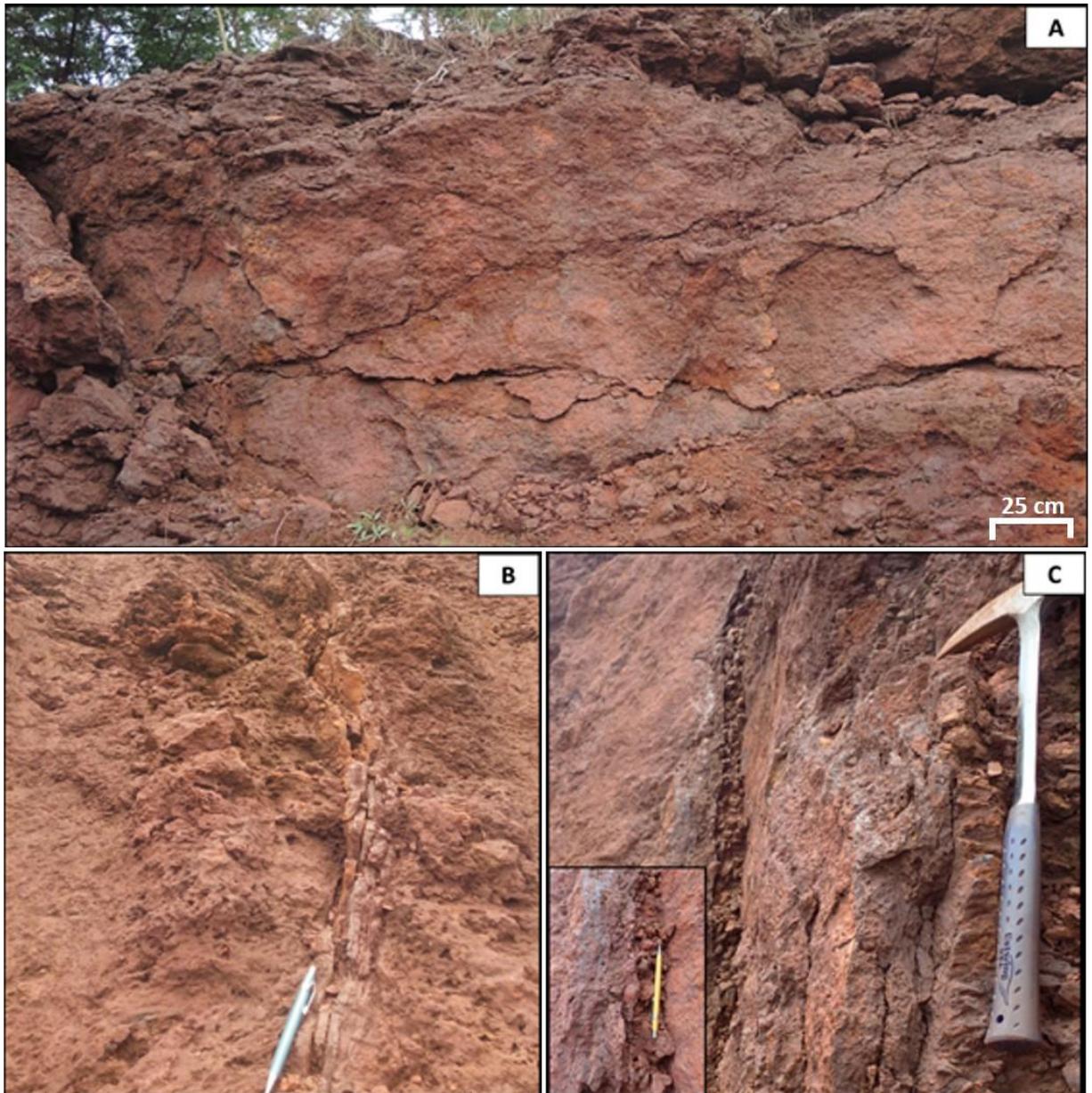
No domínio de rochas máficas predominam três famílias de fraturas subverticais de direção NNE-SSW (115/84), WNW-ESE (010/88) e NNW-SSE (250/79) (Figura 47). As fraturas são em geral onduladas, com elevada persistência, variando de 3 a 10 m. Apresentam aberturas de 1 mm a 5 mm, com paredes alteradas, aspecto rugoso, em geral preenchidas por lâminas milimétricas a centimétricas de óxido de ferro, de coloração cinza-fosca, intercaladas com lâminas avermelhadas e/ou amareladas de hidróxidos de ferro; e/ou preenchidas por fragmentos e grânulos de óxido/hidróxido de ferro, subangulosos a sub-arredondados, imersos em matriz areno-argilosa marrom-avermelhada. O espaçamento, em geral métrico, dessas fraturas imprime no maciço rochoso grau de fraturamento F1 a F2, embora sejam observados núcleos mais fraturados (Figuras 48A, B e C).

Figura 47 - Estereograma das fraturas no domínio da rocha máfica – N4E-01. (Máximos em 115/84, 010/88 e 250/79).



Fonte: a autora.

Figura 48 - Padrão de fraturamento presente no domínio de rochas máficas. (A) Fratura paralela à face do talude; (B) Padrão de fraturamento com preenchimento plano-paralelo típico da área; (C) Preenchimento de material detrítico em fratura subparalela ao afloramento.

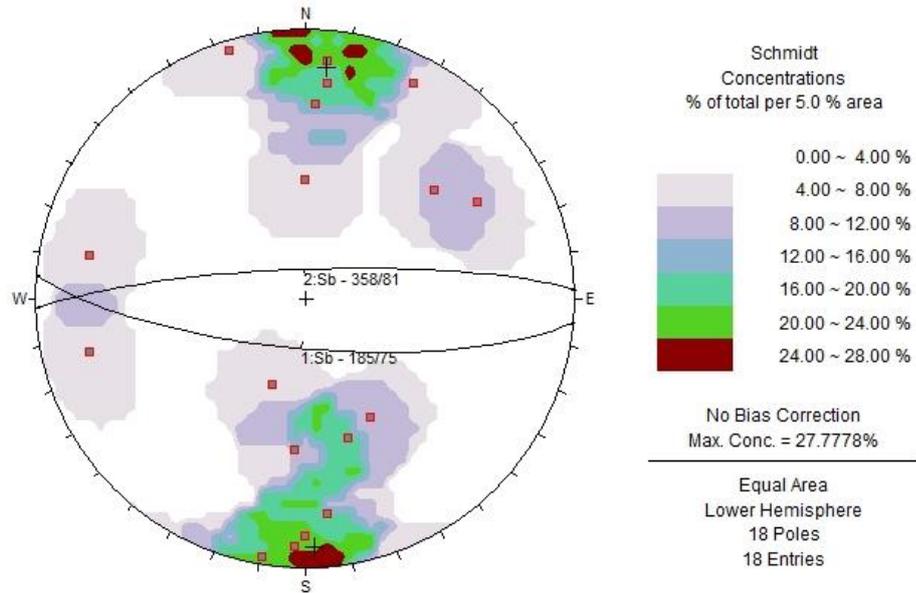


Fonte: a autora.

O domínio de formação ferrífera é marcado por apresentar bandamento composicional fortemente basculado, com direção preferencial E-W e mergulho subverticalizado a moderado para norte e sul. Subordinadamente, se observa direção NS e NW-SE (Figura 49). Duas famílias de fraturas principais apresentam elevada dispersão de medidas, com mergulho subverticalizado e direção principal NNE-SSW (107/75) e ESE-WNW (010/88) (Figura 50). Estas fraturas interceptam o bandamento composicional oblíqua a subortogonalmente, delimitando fragmentos losangulares centimétricos a decimétricos. Superfícies de cisalhamento

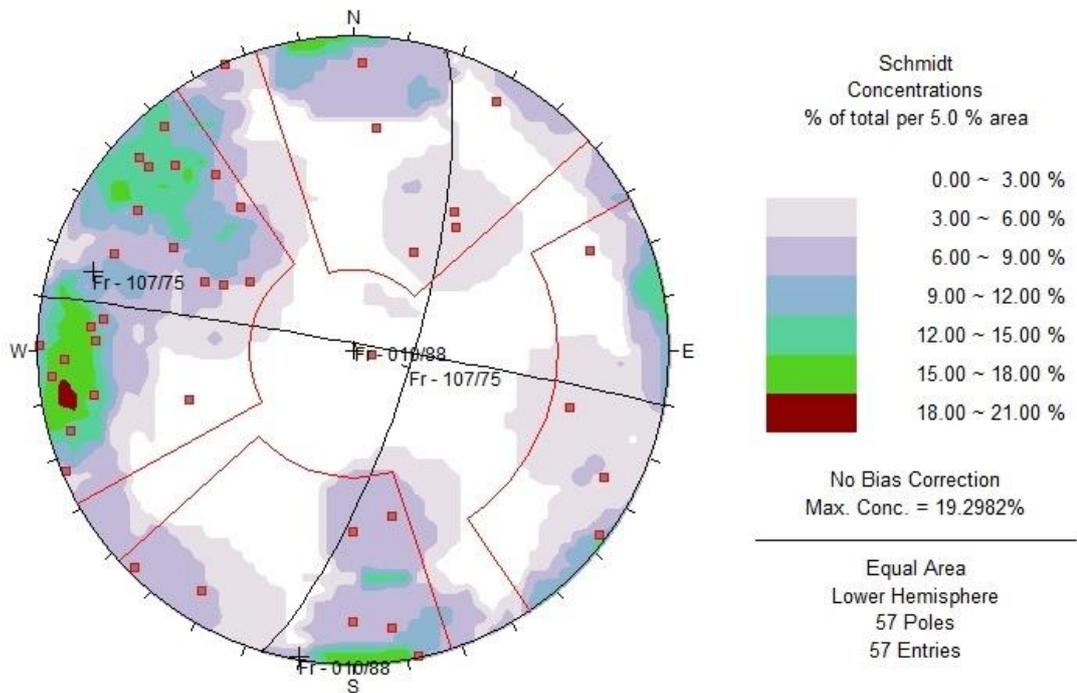
também interceptam o bandamento e apresentam direção NNE-SSW (115/73) (Figuras 51A, B e C).

Figura 49 - Estereograma do bandamento no domínio das formações ferríferas – (Máximos em 358/81 e 185/75).



Fonte: a autora.

Figura 50 - Estereograma das fraturas no domínio das formações ferríferas (Máximos em 107/75 e 010/88).



Fonte: a autora.

Figura 51- Padrão de estruturação das formações ferríferas. (A) Superfícies de cisalhamento; (B e C) Destaque para o bandamento e fraturas.



Fonte: a autora.

### 5.1.2 CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA

São apresentados a seguir os resultados obtidos dos trabalhos de caracterização e classificação geomecânica dos litotipos e estruturas presentes nas áreas estudadas. Os histogramas obtidos (Figuras 52 a 57) mostram a estatística geral dos principais parâmetros geomecânicos e constituem uma representação geomecânica estimada para os diferentes litotipos presentes na área. Esses histogramas incluem dados obtidos a partir dos pontos de mapeamento / janelas de representação. A classificação utilizada foi a classificação foi a RMR (*Rock Mass Rating*) de Bieniawski (1989).

#### 5.1.2.1 Crosta Laterítica Detrítica (CLD)

A CLD apresenta grau de alteração variando de A4 a A6 (rocha alterada a completamente alterada) e resistência ao golpe do martelo variando principalmente entre R2 e R3, predominando R2 (rocha branda). Apresenta grau de faturamento predominante F5 (extremamente fraturado), localmente F2, e o RQD predomina entre 0-25%. Este litotipo se

enquadra principalmente na classe III (Regular), com ocorrências localizadas de maciços classe IV (Ruim) e II (Bom), de acordo com a classificação RMR.

#### 5.1.2.2 Crosta Laterítica Ferro-aluminosa (CLFA)

A CLFA apresenta grau de alteração variando de A3 a A4 (rocha medianamente a muito alterada) e resistência ao golpe do martelo variando principalmente entre R3 e R4 (rocha medianamente resistente a resistente). O grau de faturamento varia entre F1 e F2 (pouco fraturado a maciço) e o RQD varia entre 91-100%. Este litotipo se enquadra principalmente na classe II (Bom), de acordo com a classificação RMR..

#### 5.1.2.3 Crosta Laterítica Ferruginosa (CLF)

A CLF apresenta grau de alteração predominando entre A3 e A4 (rocha medianamente alterada a muito alterada) e resistência ao golpe do martelo entre R4 e R5 (rocha resistente a muito resistente). O grau de faturamento varia entre F1 e F2, predominando F2 (pouco fraturado) e o RQD predomina entre 91-100%. Este litotipo se enquadra principalmente na classe II (Bom) com ocorrência de maciço classe I (Muito Bom), de acordo com a classificação RMR.

#### 5.1.2.4 Laterita Ferro-aluminosa (LFA)

A LFA apresenta grau de alteração variando de A3 a A5 (rocha medianamente a completamente alterada) e resistência ao golpe do martelo variando principalmente entre R2 e R4, predominando R3 (rocha medianamente resistente). O grau de faturamento varia entre F1 e F5, predominando F2/F1 (pouco fraturado a maciço) e o RQD predomina entre 91-100%. Este litotipo se enquadra principalmente na classe II (Bom) com ocorrência de maciços classe III e IV (Regular e Ruim), de acordo com a classificação RMR. Importante ressaltar que esta classificação tem grande influência do grau de fraturamento (descontinuidades em geral muito espaçadas), o que eleva significativamente o índice do maciço.

#### 5.1.2.5 Formação Ferrífera Laterítica (FFL)

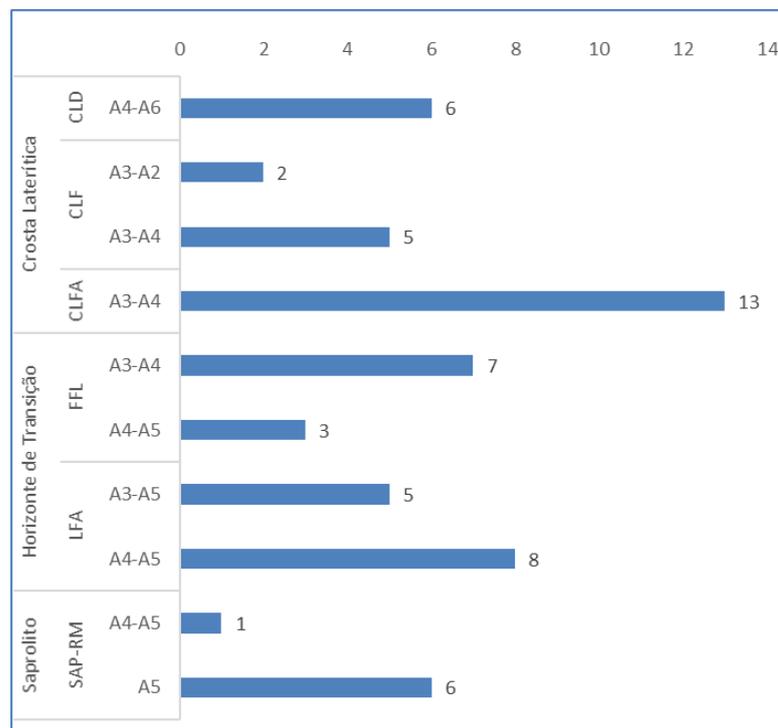
As FFL apresentam grau de alteração variando de A3 a A5 (rocha medianamente a completamente alterada) e resistência ao golpe do martelo variando entre R2 e R5,

predominando R3 (rocha medianamente resistente). O grau de faturamento varia principalmente entre F3 e F5, predominando F4 (muito fraturado) e o RQD predomina entre 26-50%. Este litotipo se enquadra principalmente na classe geomecânica III (Regular), com ocorrências de maciços classe II (Bom) e IV (Ruim), de acordo com classificação RMR.

#### 5.1.2.6 Sapolito de Rocha Máfica (SAP)

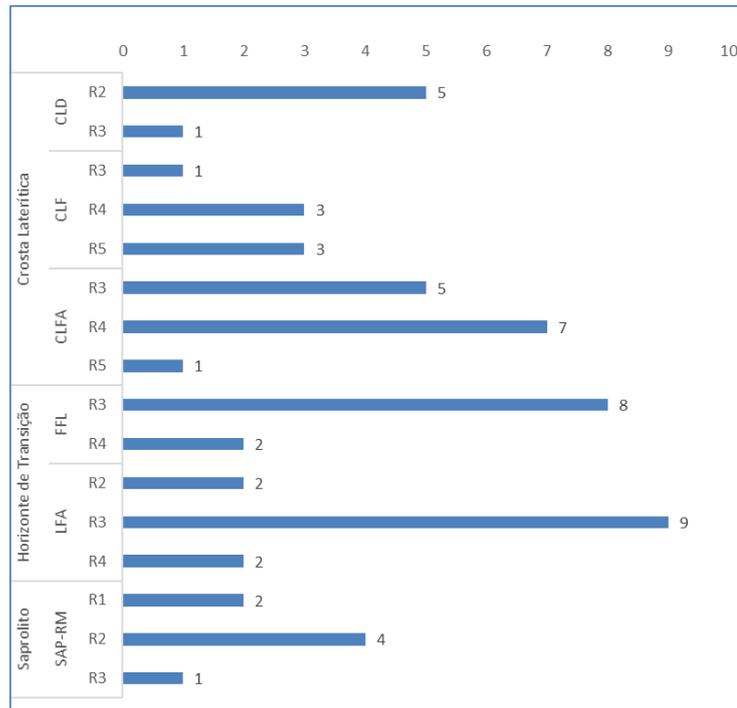
De modo geral o horizonte saprolítico (SAP) apresenta elevado grau de alteração (rocha completamente alterada - A5), com presença pontual de rocha alterada (A4) e algumas ocorrências de solo saprolítico (A6). A resistência ao golpe do martelo varia entre R1 e R3 (rocha muito branda a medianamente resistente), predominando R2 (rocha branda). Apresenta grau de faturamento em geral F5 e RQD 0-25%. Se enquadra principalmente na classe geomecânica IV (Ruim), de acordo com a classificação RMR.

Figura 52 - Variação do grau de alteração dos litotipos. Os valores numéricos representam o número de registros obtidos no levantamento.



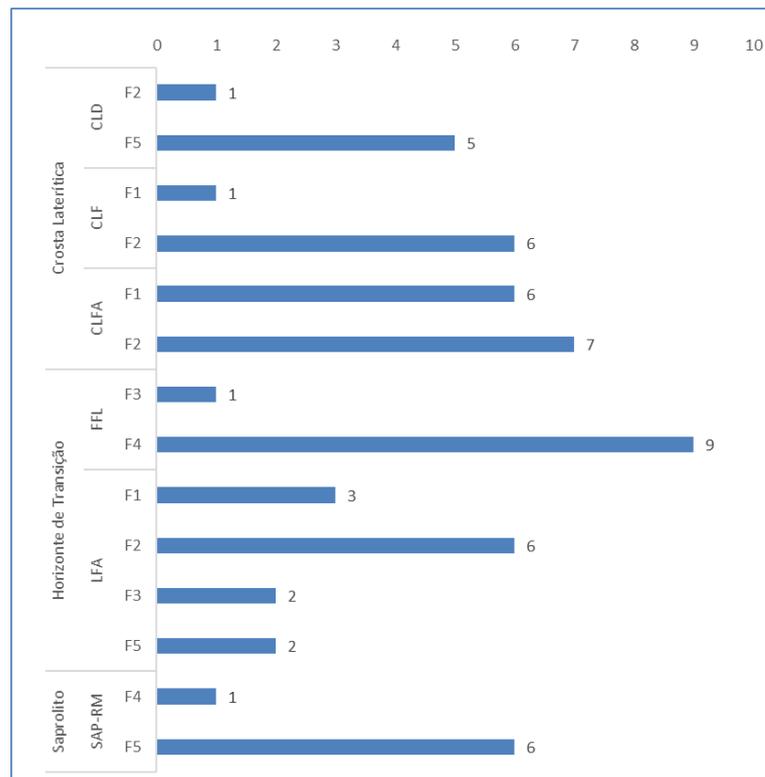
Fonte: a autora.

Figura 53 - Variação da resistência ao golpe de martelo dos litotipos. Os valores numéricos representam o número de registros obtidos no levantamento.



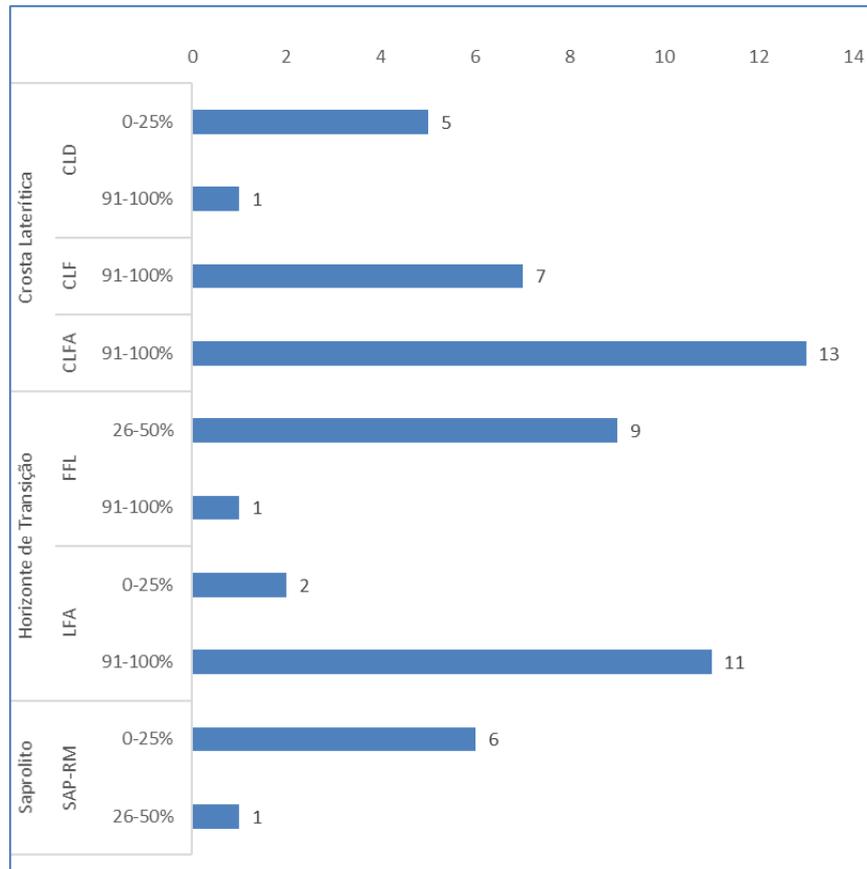
Fonte: a autora.

Figura 54 - Variação do grau de fraturamento dos litotipos. Os valores numéricos representam o número de registros obtidos no levantamento.



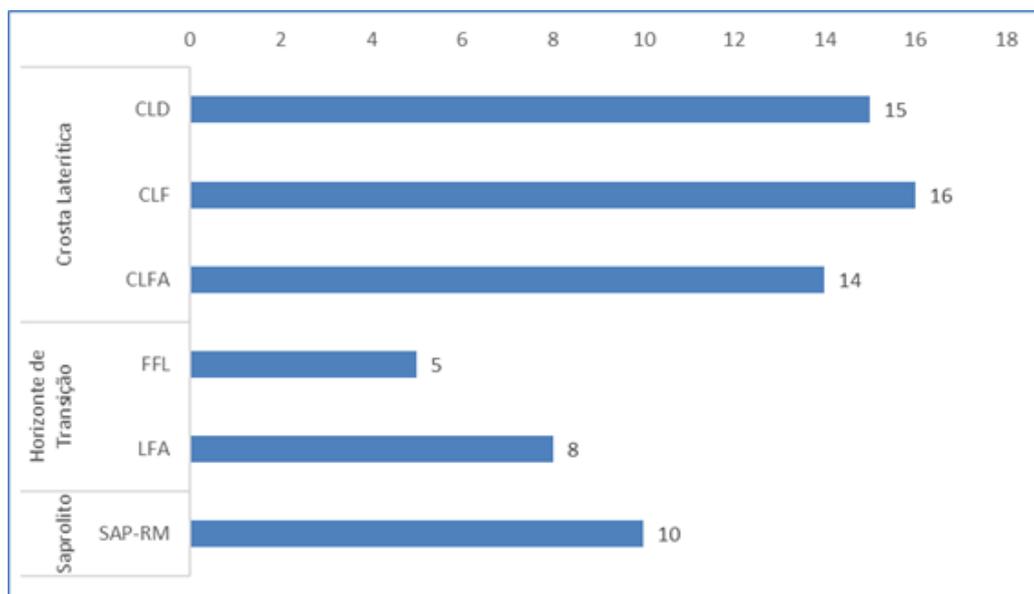
Fonte: a autora.

Figura 55 - Variação do RQD dos litotipos. Os valores numéricos representam o número de registros obtidos no levantamento.



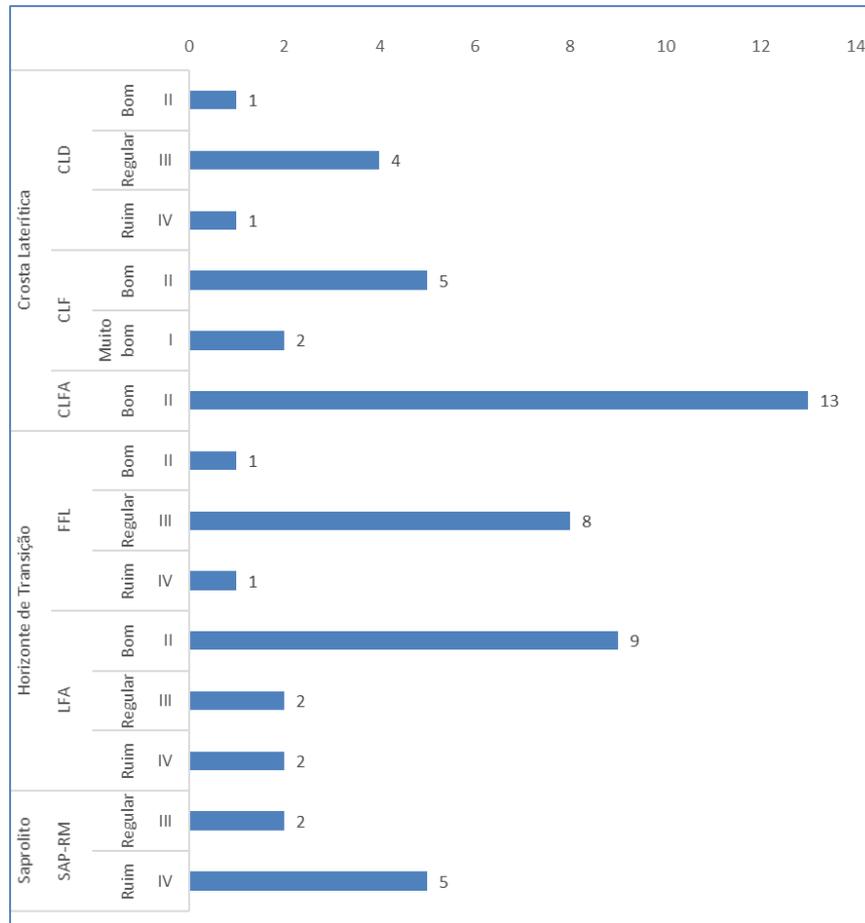
Fonte: a autora.

Figura 56 - Variação da condição de juntas dos litotipos (os valores correspondem ao somatório dos pesos obtidos para persistência, rugosidade, abertura, alteração da parede e preenchimento).



Fonte: a autora.

Figura 57 - Classificação geomecânica dos litotipos. Os valores numéricos representam o número de registros obtidos no levantamento.



Fonte: a autora.

## 5.2 INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICO- GEOTÉCNICAS

Além dos trabalhos da caracterização geológico-geotécnica em campo, o presente estudo abrangeu a realização de ensaios de campo (testes esclerométricos) e de laboratório (testes esclerométricos, ensaios de carga pontual, resistência à compressão uniaxial, ensaios de velocidade de propagação de ondas), e a determinação da densidade. Devido a sua ocorrência localizada e baixa expressividade nas áreas estudadas, a crosta laterítica detrítica (CLD) não foi alvo de ensaios de laboratório.

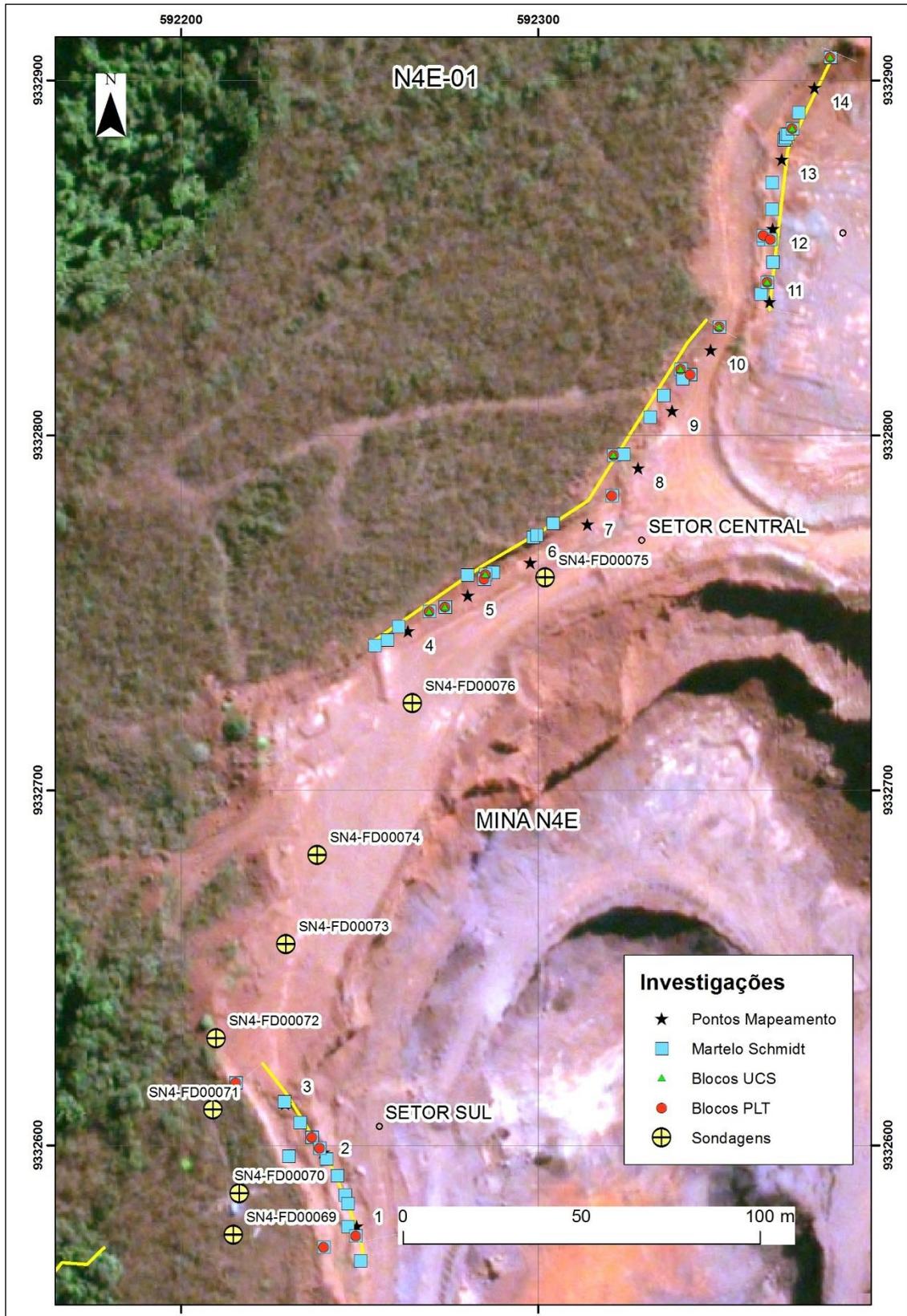
A Tabela 9 a seguir apresenta o quantitativo geral das investigações realizadas por litotipo, englobando as duas seções de estudo, incluindo os dados de campo e laboratório. As Figuras 58 e 59 apresentam a localização das investigações em planta.

Tabela 9 - Quantitativo geral das investigações geológico-geotécnicas.

HORIZONTE DE INTEMPERISMO	LITOTIPO	ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO (ESCLER. DE SCHMIDT TIPO L) (CAMPO)	ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO (ESCLER. DE SCHMIDT TIPO L) (LAB)	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO UNIAXIAL (UCS)	ÍNDICE DE CARGA PONTUAL ( <i>POINT LOAD TEST</i> (PLT))	VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS (Vp)	DENSIDADE SECA (d)
		núm. Ensaios (núm. Testes)	núm. Blocos (núm corpos de prova)	núm. Blocos (núm corpos de prova)	núm. Blocos (núm corpos de prova)	núm. Blocos (núm corpos de prova)	núm. Blocos (núm corpos de prova)
CROSTA LATERÍTICA	Crosta Laterítica Detrítica (CLD)	9 (180)	-	-	-	-	-
	Crosta Laterítica Ferruginosa (CLF)	12 (240)	6 (120)	2 (12)	7 (126)	7 (157)	9 (203)
	Crosta laterítica Ferro-Aluminosa (CLFA)	21 (420)	7 (140)	1 (7)	6 (110)	6 (122)	7 (174)
HORIZONTE DE TRANSISÇÃO	Laterita Ferro-Aluminosa (LFA)	17 (340)	7 (140)	3 (17)	8 (131)	8 (169)	11 (221)
	Formação Ferrífera Laterítica (FFL)	24 (480)	5 (100)	1 (6)	4 (65)	4 (89)	5 (114)
SAPRÓLITO	Saprólito de rocha máfica (SAP- RM)	3 (60)	4 (80)	1 (5)	4 (75)	4 (82)	5 (106)

Fonte: a autora.

Figura 58 - Localização das investigações em planta - Seção N4E-01.



Fonte: a autora.

Figura 59 - Localização das investigações em planta - Seção N4E-02.



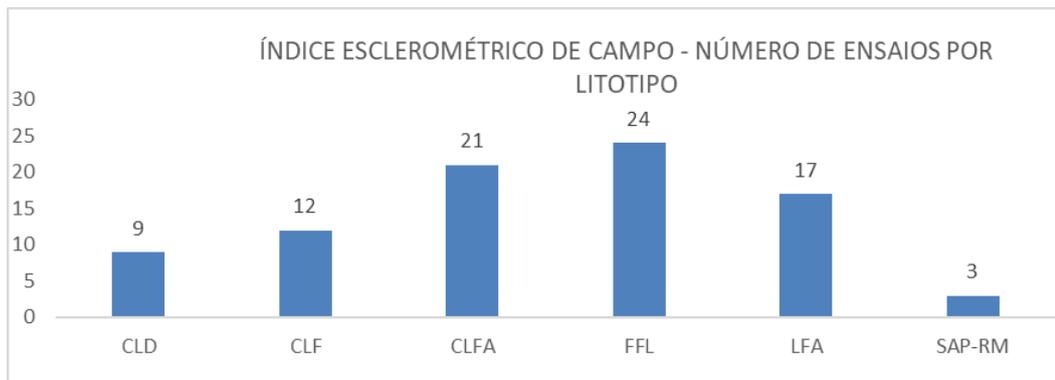
Fonte: a autora.

A seguir são apresentados os histogramas que mostram os resultados obtidos das investigações realizadas em campo e em laboratório. Ao final deste ítem, a Tabela 11 apresenta a compilação dos resultados.

### 5.2.1 ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO (IE)

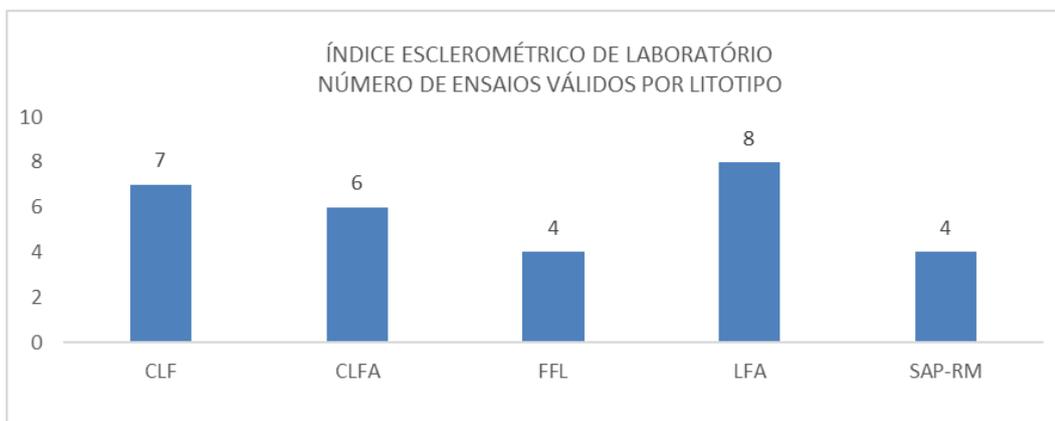
Foram realizados ensaios de campo e laboratório para cada litotipo identificado nos horizontes de intemperismo. As figuras a seguir mostram os histogramas obtidos a partir dos resultados dos ensaios esclerométricos. As Figuras 60 e 61 apresentam os quantitativos dos ensaios esclerométricos realizados e as Figuras 62 e 63 apresentam o Índice Esclerométrico (IE) médio obtido para cada litotipo.

Figura 60 - Quantitativo de ensaios esclerométricos realizados em campo, por litotipo (cada ensaio composto de 20 testes).



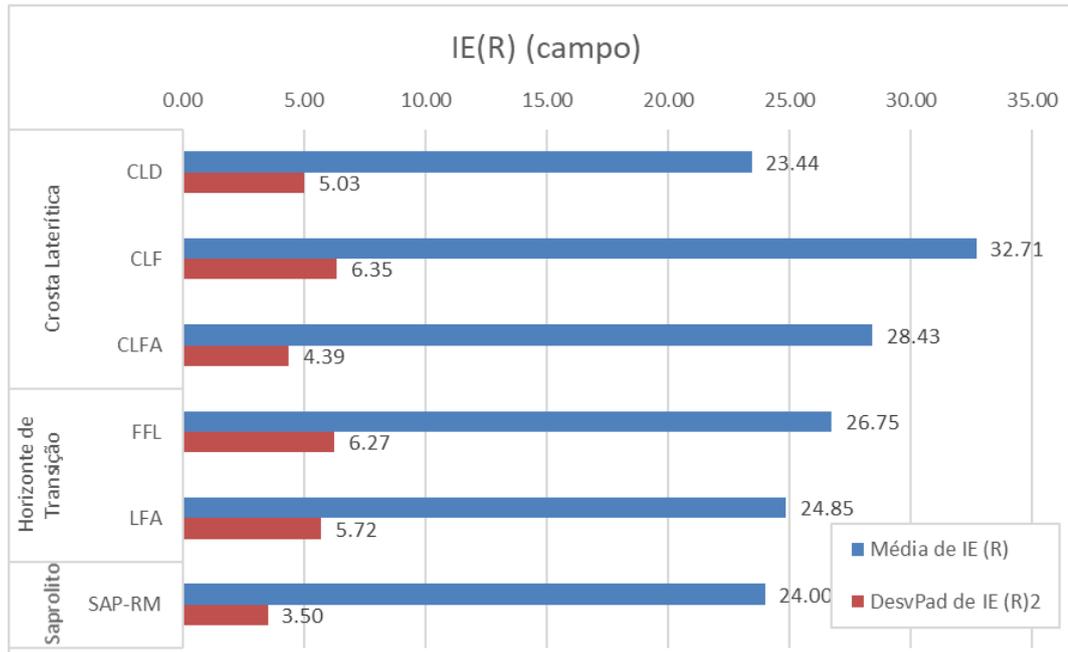
Fonte: a autora.

Figura 61- Quantitativo de ensaios esclerométricos realizados em laboratório, por litotipo (20 testes para cada ensaio).



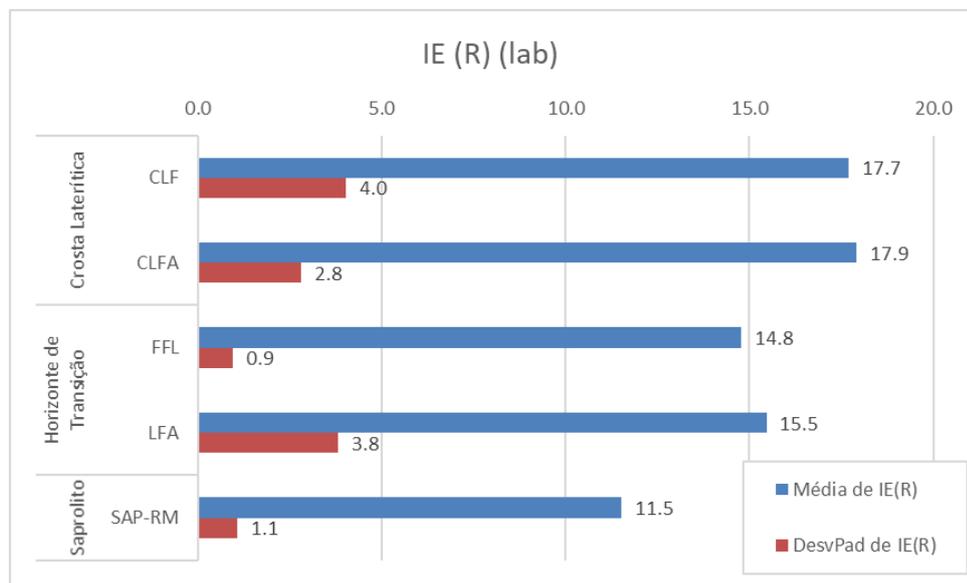
Fonte: a autora.

Figura 62 - IE médio obtido em campo, para cada litotipo.



Fonte: a autora.

Figura 63 - IE médio obtido em laboratório (corpos de prova), para cada litotipo.



Fonte: a autora.

Com relação a estes ensaios, observou-se que:

- (i) Alguns testes esclerométricos (de campo e laboratório) não apresentaram resposta, sugerindo-se que seja, em geral, devido à baixa resistência do material e/ou à irregularidade das superfícies;

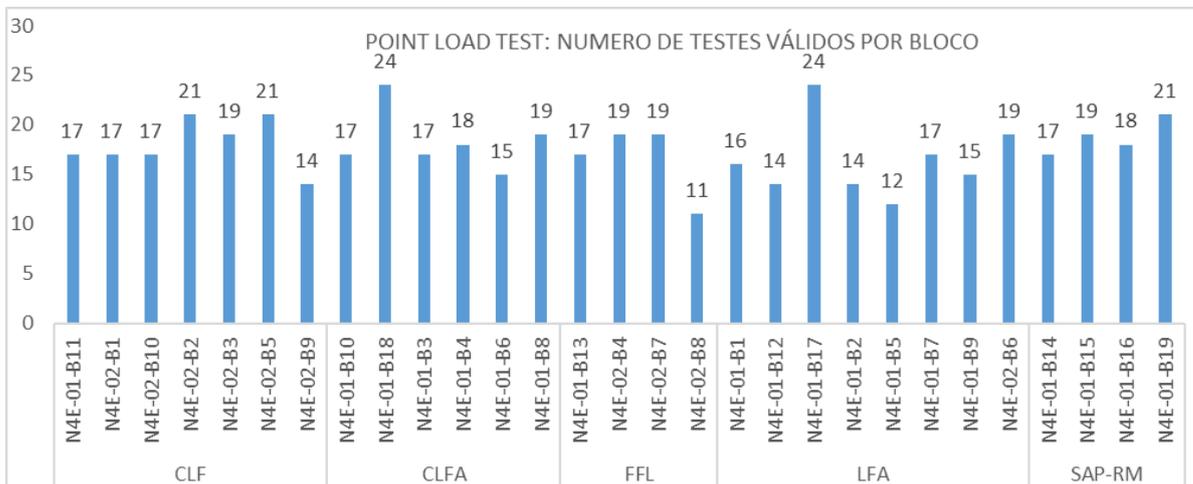
- (ii) Os valores do IE obtidos em campo são em geral significativamente maiores do que os de laboratório, o que pode estar relacionado a uma série de fatores, como: (i) o efeito do tamanho da amostra; (ii) o efeito do confinamento lateral no caso dos testes em campo e a não fixação dos corpos de prova, no caso do laboratório; (iii) irregularidade e heterogeneidade das superfícies de teste; (iv) redução da resistência dos corpos de prova devido aos processos de coleta, modelagem (corte com serra tipo maquina), transporte, entre outros, que podem ter provocado, por exemplo, abertura de fissuras e redução da coesão da matriz rochosa;
- (iii) Os valores médios do IE são relativamente próximos, variando de 24,0 a 32,7 (para ensaios de campo e 11,0 a 17,9 para ensaios nos corpos de prova). Uma vez que a reação da superfície da rocha ao impacto do esclerômetro é proporcional à sua dureza (quanto maior a resistência da superfície ensaiada, menor a deformação e maior o número de rebotes), os litotipos que apresentaram superfícies mais resistentes foram, portanto, a CLF, seguida da CLFA e FFL. Os demais litotipos (LFA e SAP-RM) mostraram valores mais baixos, o que corrobora com as análises tátil-visuais. Dentre as principais características e propriedades dos materiais que influenciam nesses resultados, pode-se destacar as proporções entre os constituintes minerais (especialmente entre óxidos e hidróxidos de ferro), o grau de litificação (relação matriz/cimento), o grau de alteração/laterização, a consistência da matriz, a densidade e a porosidade;
- (iv) A dispersão dos dados obtidos em campo também é próxima entre os litotipos, sendo as maiores atribuídas aos litotipos CLF e FFL. No caso dos testes nos corpos de prova, maior dispersão é observada nos litotipos CLF e LFA e menor nos litotipos FFL e SAP-RM. Nos dois casos, a baixa dispersão observada para o SAP-RM (e FFL nos ensaios de laboratório) pode estar relacionada ao menor número de ensaios.

### 5.2.2 ÍNDICE DE RESISTÊNCIA À CARGA PONTUAL (*Point Load Test*)

Os resultados relacionados aos ensaios de carga pontual (PLT) são apresentados em histogramas obtidos a partir de dados dos ensaios de carga pontual realizados em corpos de prova cúbicos. As Figuras 64 a 66 apresentam os quantitativos dos ensaios realizados para cada bloco ensaiado (Figura 64), por litotipo (Figura 65) e por litotipo considerando-se a anisotropia

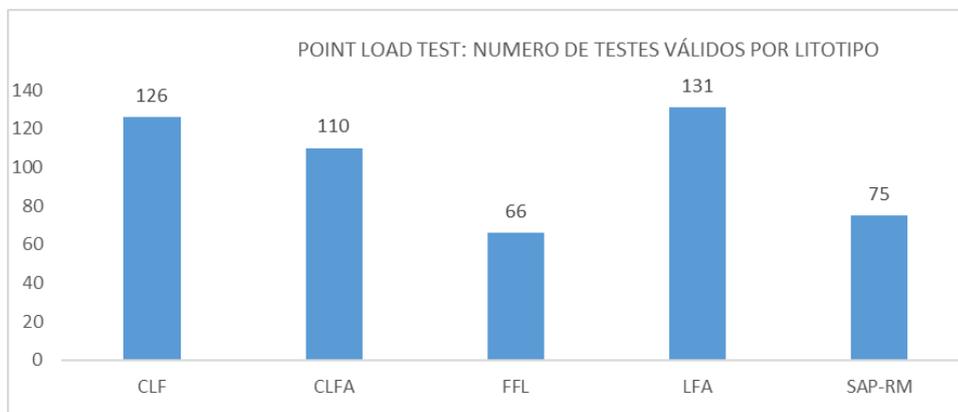
(Figura 66). As Figuras 67 a 68 apresentam os histogramas obtidos para cada litotipo, sendo que na Figura 68 é considerada a direção do ensaio em relação à anisotropia da amostra.

Figura 64 - Quantitativo dos testes de carga pontual válidos (número de amostras por bloco).



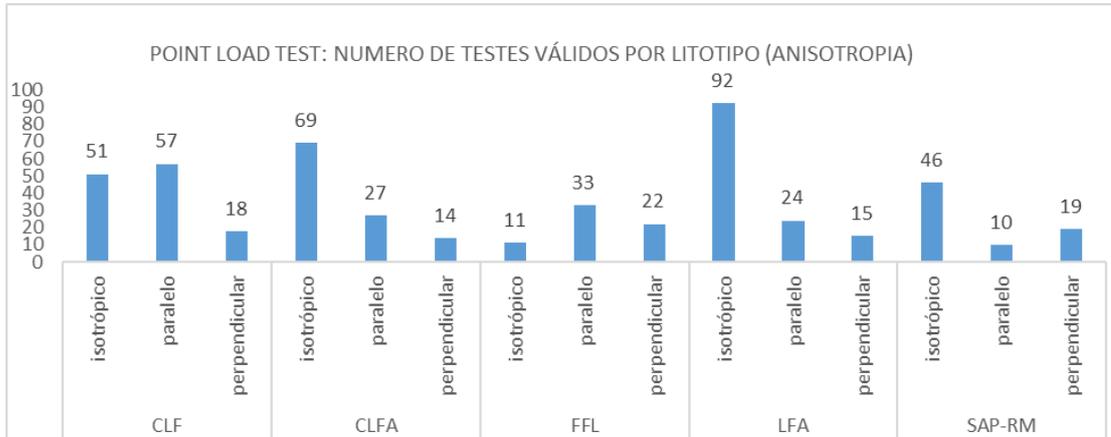
Fonte: a autora.

Figura 65 - Quantitativo dos testes de carga pontual válidos (número de amostras por litotipo, nas respectivas seções).



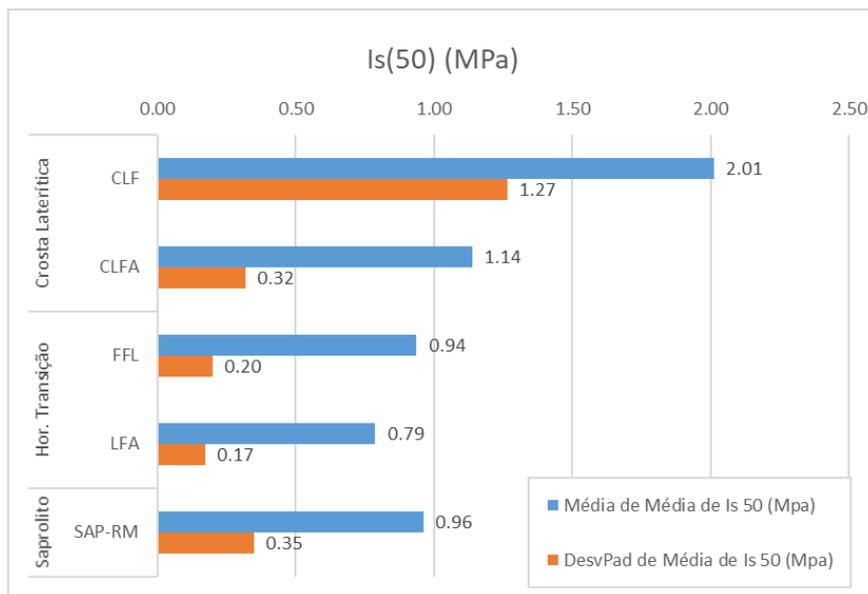
Fonte: a autora.

Figura 66 - Quantitativo dos testes de carga pontual válidos (número de amostras, por litotipo, considerando a anisotropia).



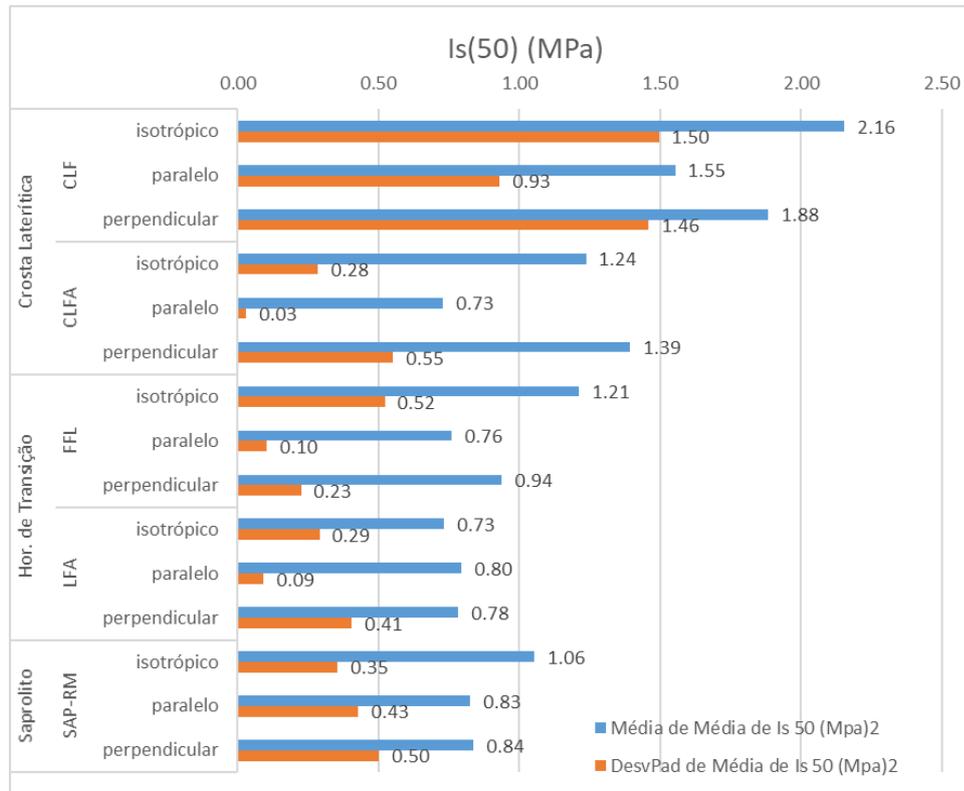
Fonte: a autora.

Figura 67 - Índice de carga pontual ( $I_s(50)$ ) médio e desvio padrão obtido para cada litotipo.



Fonte: a autora.

Figura 68- Índice de resistência pontual  $Is(50)$  médio e desvio padrão para os litotipos considerando a direção do ensaio em relação à anisotropia.



Fonte: a autora.

De acordo com os resultados dos ensaios, observou-se que:

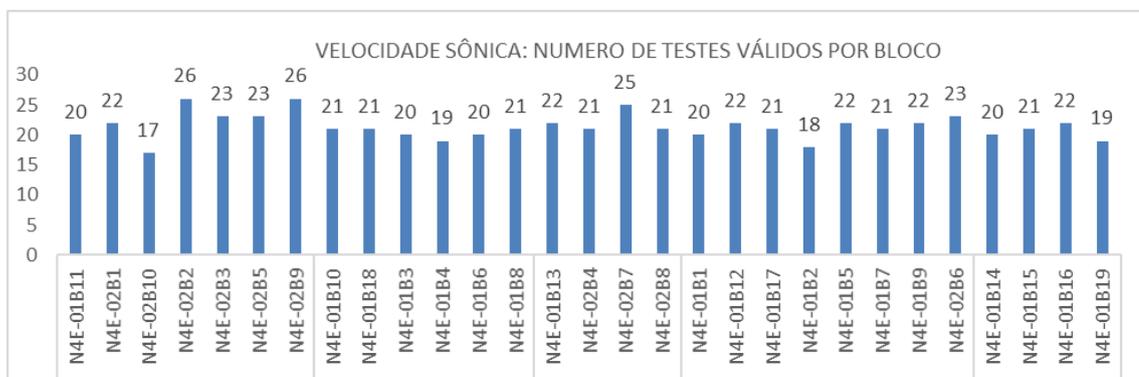
- (i) Os valores médios do  $Is(50)$  são relativamente próximos, porém o litotipo CLF se destaca apresentando a maior resistência à carga pontual (2,01 Mpa), seguida da CLFA (1,14 MPa). Quando considera-se, para efeito de comparação, a relação  $Is(50)$  e  $R_c$  – resistência a compressão simples ( $R_c \sim 25 \times Is$ ), estes valores correspondem às faixas R3-R4 pra a CLF e R3 para a CLFA, um pouco abaixo do estimado em campo (predominantemente R4-R5 para a CLF e R4-R3 para a CLFA). Os demais valores de  $Is(50)$  foram abaixo de 1,0 MPa, também abaixo do esperado quando comparado ao estimado em campo. Nesse sentido, é importante se considerar, por um lado, a subjetividade inerente às análises tátil-visuais e testes com martelo de geólogo, e por outro lado a possibilidade de as amostras terem sofrido impacto com os processos já mencionados e, principalmente, com o efeito dos testes esclerométricos (perda de material e abertura de trincas/fissuras), que podem ter afetado de forma a reduzir a resistência das amostras.

- (ii) Ocorre um comportamento predominantemente isotrópico (proximidade dos valores nas condições paralela e perpendicular) no caso dos litotipos LFA e SAP-RM. Para os demais litotipos se observa menores valores na condição paralela e, para as condições perpendicular e isotrópica os valores se mostram muito próximos;
- (iii) Destaca-se a dispersão elevada no caso da CLF em relação aos demais litotipos.

### 5.2.3 VELOCIDADE SÔNICA ( $V_p$ )

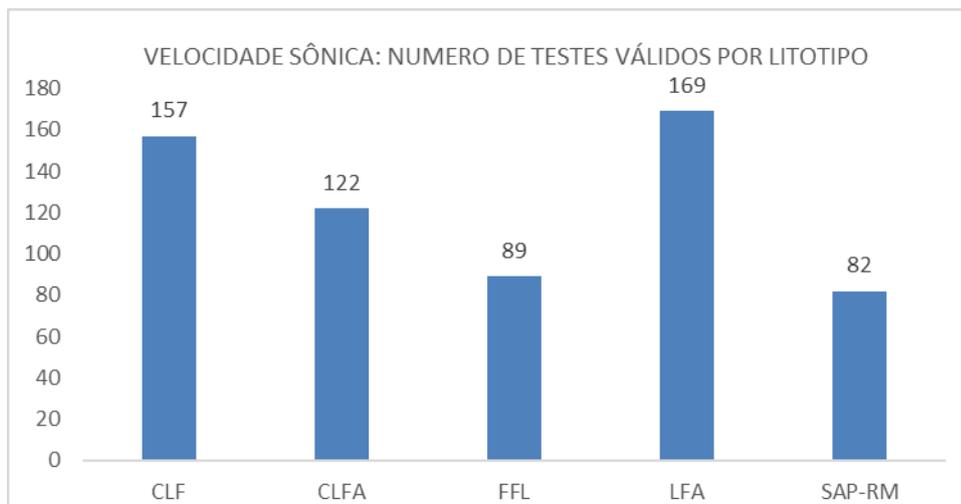
A partir dos resultados dos ensaios de velocidade de propagação de ondas longitudinais (velocidade sônica  $V_p$ ) realizados nos corpos de prova, foram obtidos os dados consolidados nas Figuras 69 a 71, que apresentam, respectivamente, os quantitativos dos ensaios realizados para cada bloco ensaiado (Figura 69), por litotipo (Figura 70) e por litotipo considerando-se a anisotropia (Figura 71). As Figuras 72 apresenta o histograma obtido para cada litotipo e a Figura 73 mostra a distribuição dos dados considerando-se a direção do ensaio em relação à anisotropia das amostras.

Figura 69 - Quantitativo dos testes de velocidade sônica válidos (por bloco).



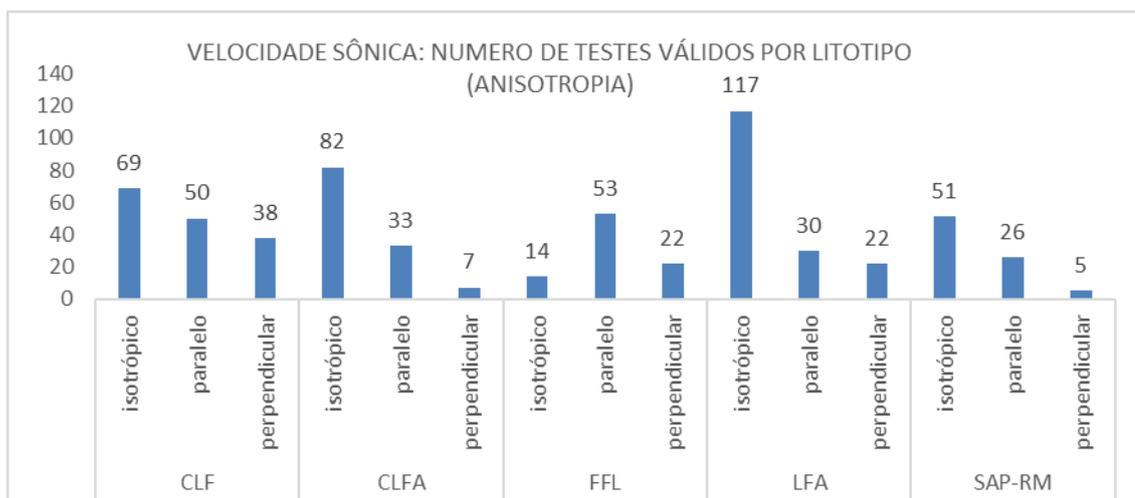
Fonte: a autora.

Figura 70 - Quantitativo dos testes de velocidade sônica válidos (por litotipo).



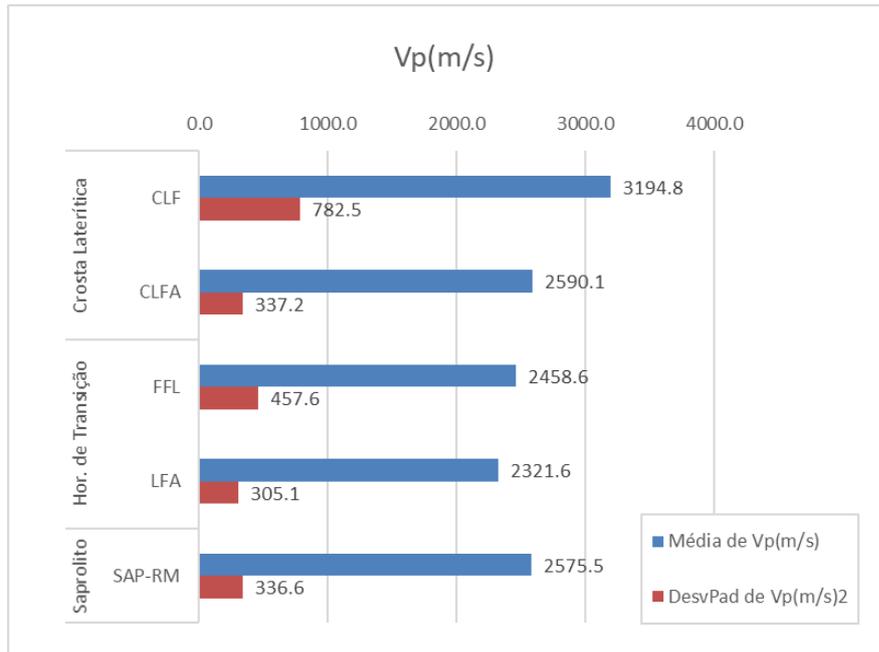
Fonte: a autora.

Figura 71 - Quantitativo dos testes de velocidade sônica válidos (por litotipo, considerando a anisotropia).



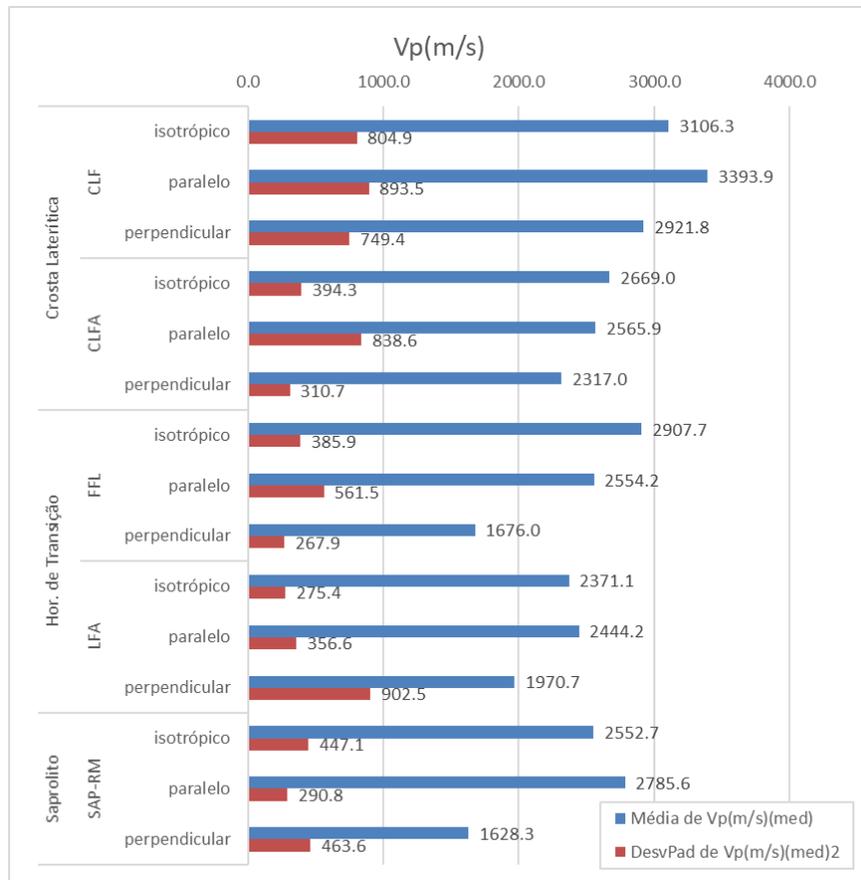
Fonte: a autora.

Figura 72 - Velocidade sônica média ( $V_p$ ) e desvio padrão obtidos para cada litotipo.



Fonte: a autora.

Figura 73 - Velocidade sônica média ( $V_p$ ) e desvio padrão obtidos para cada litotipo, considerando a direção do ensaio em relação à anisotropia das amostras.



Fonte: a autora.

Conforme os resultados dos ensaios, observou-se que:

- (i) O litotipo CLF apresenta o maior valor de  $V_p$  médio ( $>3000,0$  m/s). Os demais litotipos apresentaram valores muito próximos, e entre 2300,0 e 2600,0 m/s. Esse resultado mostra a influência de algumas características típicas da CLF, observadas em campo, diferentemente dos demais litotipos, destacando-se: menor porosidade, maior grau de cimentação (arcabouço em geral mais fechado e mais contínuo), menor grau de alteração, predominância de óxidos de ferro (principalmente hematita) em relação aos hidróxidos, entre outros;
- (ii) Com relação a anisotropia, nota-se que os menores valores correspondem à direção perpendicular. Isso corrobora com o esperado, em função da dissipação (e redução da velocidade) da onda nessa direção, especialmente pela presença de materiais heterogêneos, vazios e descontinuidades. Por outro lado, a presença de bandas, níveis ou materiais contínuos, homogêneos e/ou maciços favorece a propagação da onda em maior velocidade.
- (iv) Destaca-se ainda a dispersão maior no caso da CLF e a proximidade dos desvios-padrão para os demais litotipos;
- (v) De acordo com a tabela 5 (Oliveira e Brito, 1998), que mostra valores típicos de  $V_p$ , os resultados obtidos mostram que os materiais estudados se enquadram nas faixas equivalentes a “*sedimentos consolidados e rochas altamente fraturadas e alteradas*” a “*rochas ígneas e metamórficas fracamente fraturadas e/ou alteradas*”.

Tabela 10 - Exemplos de valores de velocidades de propagação de ondas longitudinais (ondas P).

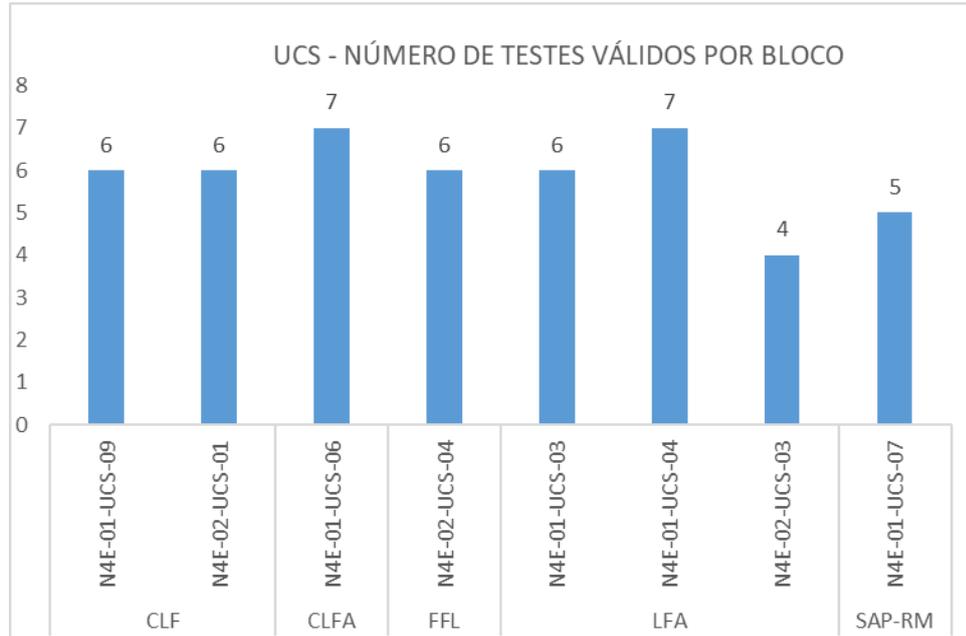
Vp (m/s)	TIPO DE MATERIAL
200-400	Solos, depósitos superficiais de sedimentos não-consolidados
400-1400	Argilas e areais, não consolidadas
1400-1800	Areais saturadas, argilas compactadas, rochas bastante alteradas
1800-2400	Sedimentos consolidados e provavelmente saturados, rochas metamórficas ou ígneas, altamente fraturadas e/ou alteradas, arenitos e folhelhos
2400-3700	Folhelhos, arenitos, rochas ígneas e metamórficas alteradas e/ou fraturadas
3700-4500	Rochas ígneas e metamórficas fracamente alteradas e/ou fraturadas
4500-6000	Rochas ígneas e metamórficas sãs, não fraturadas

Fonte: Oliveira e Brito, 1998.

#### 5.2.4 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO UNIAXIAL (UCS)

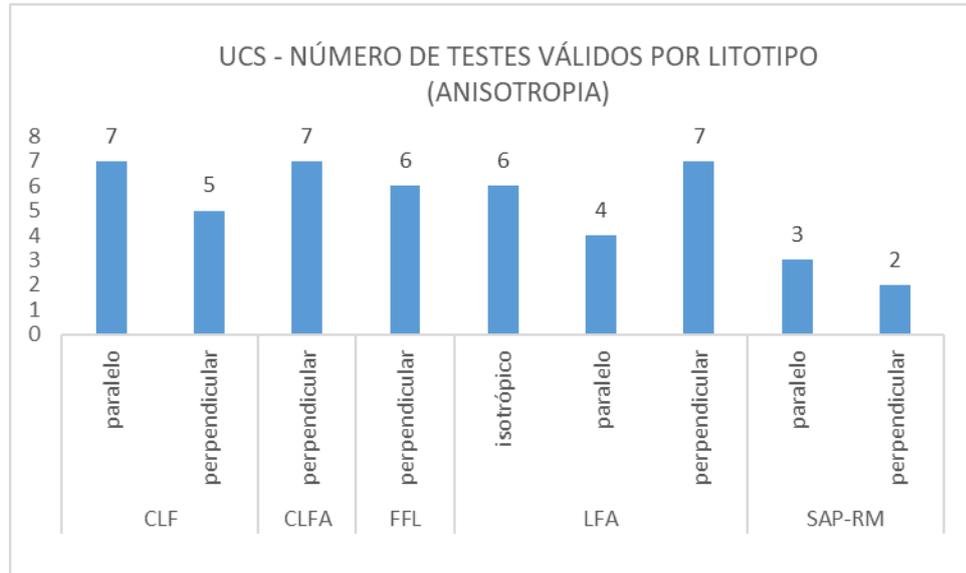
Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão uniaxial (UCS) para os litotipos estudados foram consolidados em gráficos expostos nas figuras a seguir. As Figuras 74 e 75 apresentam os quantitativos dos ensaios realizados, respectivamente, para cada bloco ensaiado, por litotipo (Figura 74) e por litotipo de acordo com a anisotropia (Figura 75). Abaixo são apresentados os histogramas obtidos onde pode-se visualizar os resultados médios e desvio padrão dos ensaios realizados por litotipo (Figura 76), bem como quando considera-se a direção do ensaio em relação à anisotropia da amostra (Figuras 77).

Figura 74 - Quantitativo dos ensaios de compressão uniaxial por litotipo (corpos de prova por bloco).



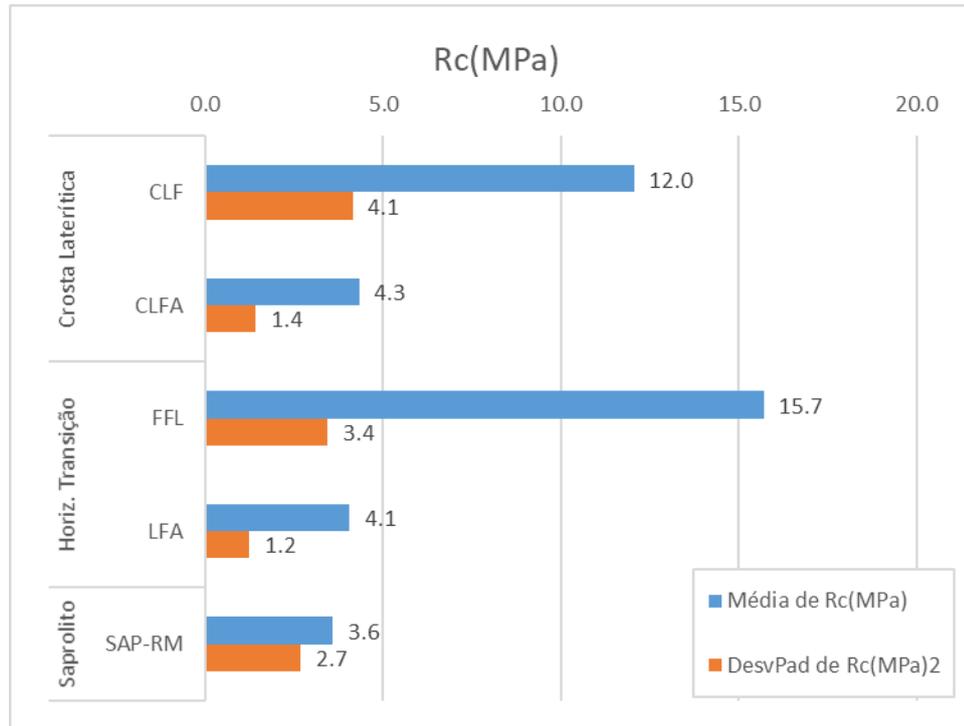
Fonte: a autora.

Figura 75 - Quantitativo dos ensaios de compressão uniaxial (por litotipo, considerando a anisotropia).



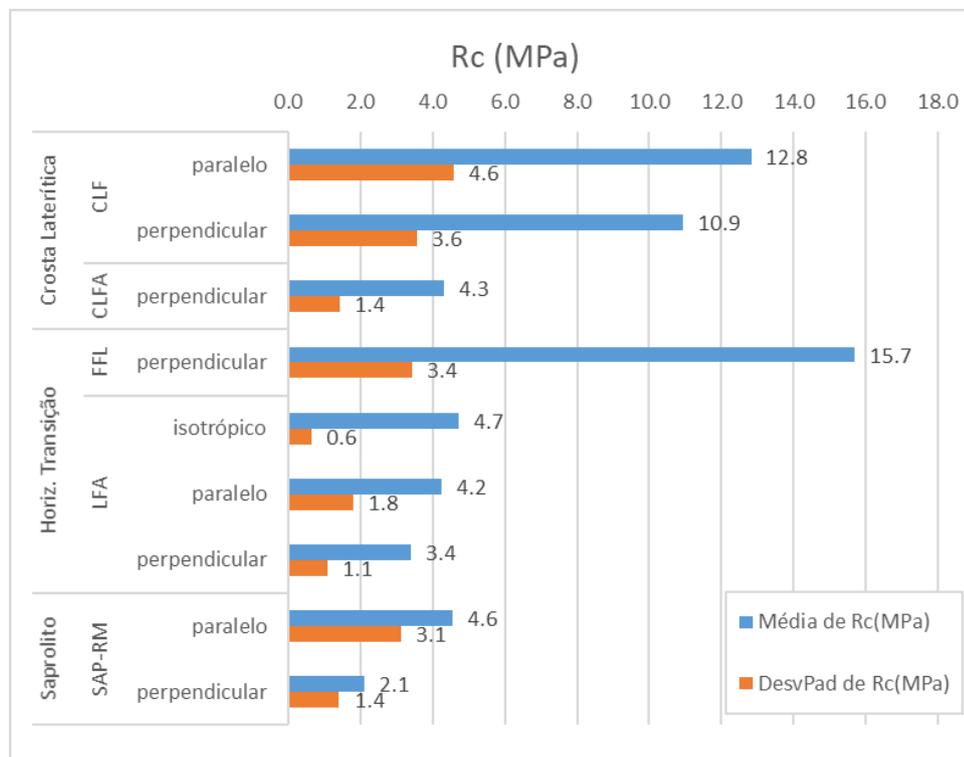
Fonte: a autora.

Figura 76 - Valores médios de resistência e desvio padrão à compressão uniaxial, para cada litotipo.



Fonte: a autora.

Figura 77 - Valores médios de resistência à compressão uniaxial e desvio padrão, para cada litotipo, considerando a anisotropia.



Fonte: a autora.

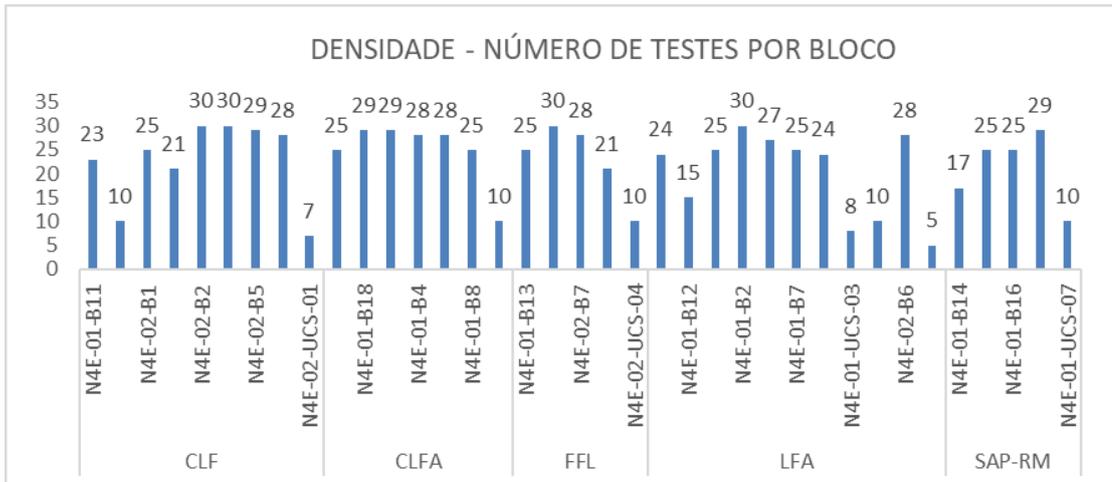
Conforme os dados expostos, observou-se que:

- (i) O quantitativo de ensaios de UCS foi menor em relação aos demais ensaios realizados em decorrência principalmente das dificuldades enfrentadas, (relacionadas principalmente às composições e estruturações dos litotipos estudados), para a realização de tais ensaios;
- (ii) Os litotipos que apresentaram maiores valores de  $R_c$  média foram a FFL (15,7 Mpa) e a CLF (12 Mpa). Os demais litotipos apresentaram valores próximos e abaixo de 5 MPa. Estes valores são considerados, em princípio, abaixo do esperado para os litotipos estudados. Apesar da subjetividade presente em análises tátil-visuais, destaca-se a possível influência nos resultados dos ensaios por fatores como: (i) baixo universo amostral; (ii) limitações do equipamento utilizado (prensa CBR em modo mecânico e não servo-controlado); (iii) questões operacionais, envolvendo a experiência e habilidade do operador da prensa; (iii) forma cúbica das amostras (devido à dificuldade de moldagem dos corpos cilíndricos dos materiais de estudo); (iv) fatores como transporte, moldagem (corte com serra do tipo maquina) e manuseio das amostras; (v) presença nas amostras de defeitos, fissuras, vazios; (vi) efeito escala (tamanho da amostra), entre outros;
- (iii) Nota-se valores ligeiramente inferiores de  $R_c$  no caso de testes realizados na direção perpendicular à anisotropia para os litotipos CLF e SAP-RM, e comportamento isotrópico no caso da LFA. Para os demais litotipos (FFL e CLFA) só foram realizados testes na direção perpendicular à anisotropia.

### 5.2.5 DENSIDADE (Peso Volúmico Seco)

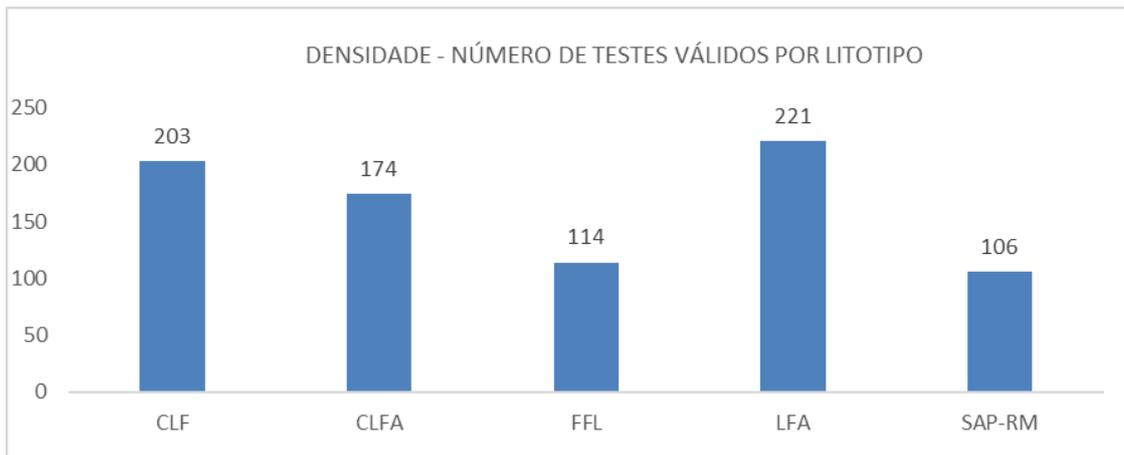
As figuras a seguir apresentam os resultados obtidos dos testes para determinação da densidade seca (peso volúmico seco) para os litotipos estudados. As Figuras 78 e 79 apresentam, respectivamente, os quantitativos dos testes realizados para cada bloco e por litotipo. A Figuras 80 apresenta o histograma obtido a partir dos dados de média e desvio padrão para cada litotipo.

Figura 78 - Quantitativo dos testes (corpos de prova) de densidade (por bloco).



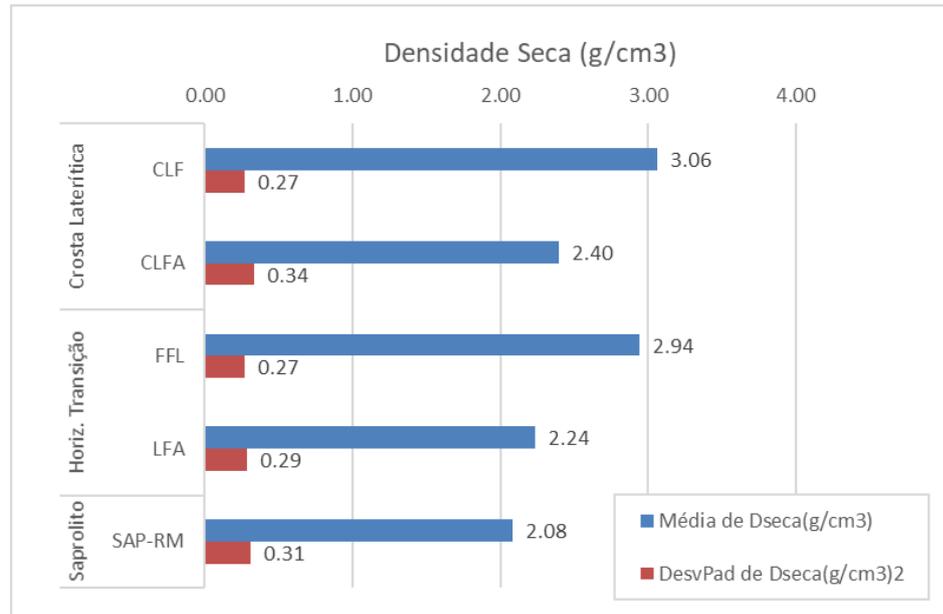
Fonte: a autora.

Figura 79 - Quantitativo dos testes (corpos de prova) de densidade (por litotipo, nas respectivas seções).



Fonte: a autora.

Figura 80 - Densidade média e desvio padrão obtidos para cada litotipo.



Fonte: a autora.

De acordo com os dados apresentados, observou-se que:

- (i) Os valores médios de densidade obtidos são relativamente próximos, sendo o maior valor relacionado à CLF (3,06 g/cm<sup>3</sup>), seguido da FFL (2,94 g/cm<sup>3</sup>). Os demais litotipos mostraram valores mais baixos (<2,5 g/cm<sup>3</sup>), sendo o menor valor relacionado ao SAP-RM (2,08 g/cm<sup>3</sup>);
- (ii) O desvio-padrão similar é entre os litotipos (Figura 88).

Tabela 11 - Relação dos resultados obtidos das investigações geológico-geotécnicas em campo e laboratório para cada litotipo.

HORIZONTE DE INTEMPERISMO	LITOTIPO	CLASSE GEOMECÂNICA (RMR/89)	TESTES DE CAMPO						TESTES DE LABORATÓRIO																								
			RESISTÊNCIA ESTIMADA (ISRM/81)	ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO (ESCLER. DE SCHMIDT TIPO L) (IE)(CAMPO)(R)			ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO (ESCLER. DE SCHMIDT TIPO L) (IE)(LAB)(R)			RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL (UCS) (Rc)					ÍNDICE DE CARGA PONTUAL (POINT LOAD TEST (PLT)) (I <sub>s(50)</sub> )					VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS (Vp)					DENSIDADE SECA (d)								
				geral (predominante)	IE(campo) (med) (R)	Desvio Padrão	num. ensaios / testes	IE(lab) (med) (R)	Desvio Padrão	num. blocos / cp	Rc (med) (MPa) isotrópico	Rc (med) (MPa) paralelo	Rc (med) (MPa) perpend.	Rc (med) (MPa) total	Desvio Padrão	num. blocos / cp	I <sub>s(50)</sub> (med) (MPa) isotrópico	I <sub>s(50)</sub> (med) (MPa) paralelo	I <sub>s(50)</sub> (med) (MPa) perpend.	I <sub>s(50)</sub> (med) (MPa) total	Desvio Padrão	num. blocos / cp's	Vp (med) (m/s) isotrópico	Vp (med) (m/s) paralelo	Vp (med) (m/s) perpend.	Vp (med) (m/s) total	Desvio Padrão	num. blocos / cp's	d(med) (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio Padrão	num. blocos / cp's		
CROSTA LATERÍTICA	Crosta Laterítica Detrítica (CLD)	II-IV (III)	R1-R4 (R2)	23,4	5,0	9 / 180	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Crosta Laterítica Ferruginosa (CLF)	I-II (II)	R3-R5 (R4/R5)	32,7	6,4	12 / 240	18,3	4,0	6 / 120	-	12,8	10,9	12,0	4,1	2 / 12	2,16	1,55	1,88	2,01	1,27	7 / 126	3106,3	3393,9	2928,8	3194,8	782,5	7 / 157	3,06	0,27	9 / 203			
	Crosta Laterítica Ferro-aluminosa (CLFA)	II	R3-R5 (R4/R3)	28,4	4,4	21 / 420	17,4	2,8	7 / 140	-	-	4,3	4,3	1,4	1 / 7	1,24	0,73	1,39	1,14	0,32	6 / 110	2669,0	2565,9	2317,0	2590,1	337,2	6 / 122	2,42	0,34	7 / 174			
HORIZONTE DE TRANSIÇÃO	Laterita Ferro-aluminosa (LFA)	II-IV (II)	R2-R4 (R3)	24,8	5,7	17 / 340	15,9	3,8	7 / 140	4,7	4,2	3,4	4,1	1,2	3 / 17	0,73	0,80	0,78	0,79	0,17	8 / 131	2371,1	2444,2	1970,7	2321,6	305,1	8 / 169	2,24	0,29	11 / 221			
	Formação Ferrífera Laterítica	III-IV (III)	R2-R5 (R3)	26,7	6,3	24 / 480	14,3	0,9	5 / 100	-	-	15,7	15,7	3,4	1 / 6	1,21	0,76	0,94	0,94	0,20	4 / 65	2907,7	2554,2	1676,0	2458,6	457,6	4 / 89	2,94	0,27	5 / 114			
SAPROLITO	Saprolito de Rocha Máfica (SAP-RM)	III-IV (IV)	R1-R3 (R2)	24,0	3,5	3 / 60	11,5	1,1	4 / 80	-	4,55	2,11	3,6	2,7	1 / 5	1,06	0,83	0,84	0,96	0,35	4 / 75	2552,7	2785,6	1628,3	2575,5	336,6	4 / 82	2,08	0,31	5 / 106			

Fonte: a autora.

### 5.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS, CORRELAÇÕES E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DAS INVESTIGAÇÕES DE CAMPO E LABORATÓRIO

A partir dos resultados obtidos, avaliou-se a possibilidade de obtenção de curvas de correlação entre as propriedades geomecânicas representativas dos litotipos que foram obtidas a partir dos ensaios Índice Esclerométrico de campo e laboratório, Densidade, Velocidade Sônica e Índice de Carga Pontual. Os ensaios UCS foram desconsiderados devido à limitação relacionada ao pequeno universo amostral.

A análise estatística baseou-se em estatística descritiva tradicional e em “*Machine Learning*” (Aprendizagem de Máquina). Foram feitas análises para avaliar a normalidade das variáveis, a existência de correlações lineares e não-lineares e, por fim, a Aprendizagem de Máquina.

Essas análises foram feitas para os seguintes conjunto de dados:

- ✓ Conjunto Geral de dados coletados;
- ✓ Unidade litológica.

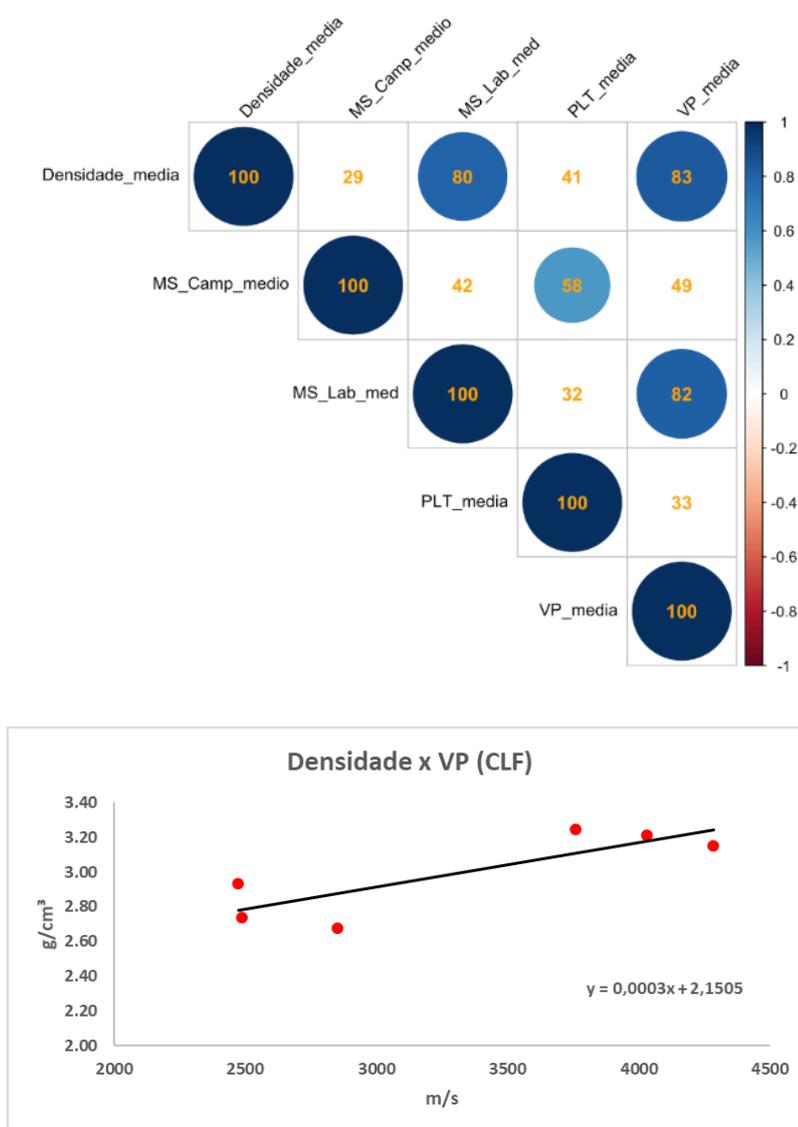
São apresentados a seguir os diagramas de correlação linear (não foram obtidos resultados satisfatórios para correlações não lineares), assim como as curvas de correlação obtidas, para cada litotipo.

De acordo com estes resultados, nota-se que vários pares de variáveis apresentam correlação linear positiva significativa, indicando uma relação direta das variáveis. Para os grupos de dados com correlações acima de 0,80 foram extraídas equações de regressão. De acordo com os autores do trabalho, estas equações são, entretanto, não conclusivas, sendo necessário o incremento de dados (maior número de ensaios) para que se atinja significância estatística.

### 5.3.1 CROSTA LATERÍTICA FERRUGINOSA (CLF)

Apresenta-se a seguir a matriz de correlação linear (não foram obtidos resultados para correlações não lineares) e a principal equação de regressão obtida para a CLF (Figura 81).

Figura 81 - Diagrama de correlação linear e principal equação de regressão para CLF.

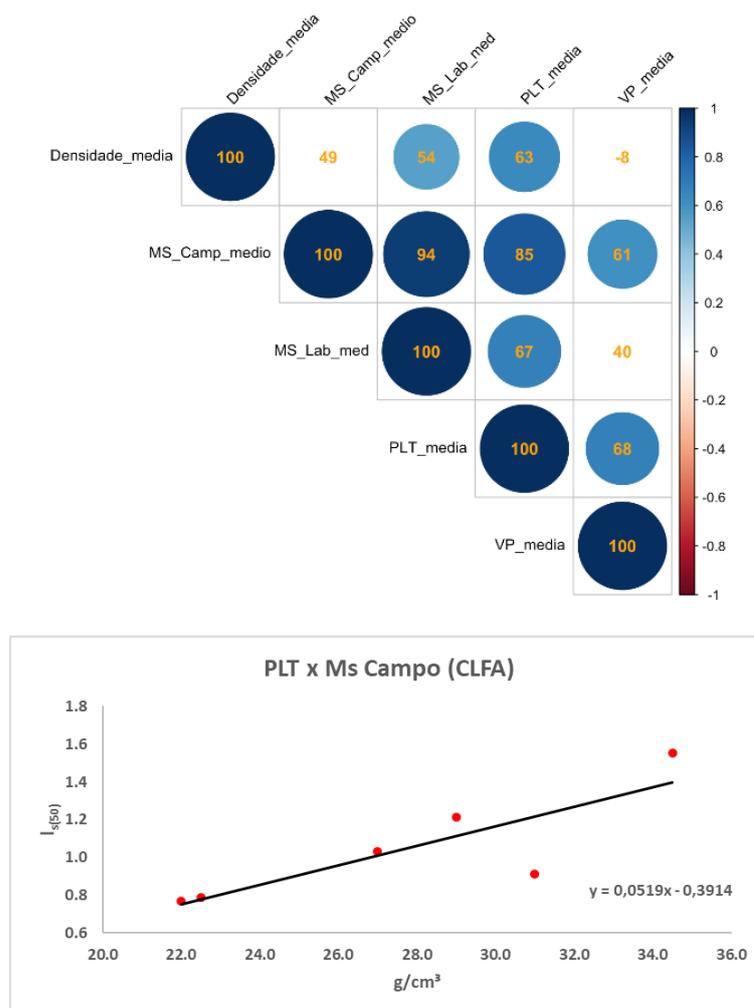


Fonte: a autora.

### 5.3.2 CROSTA LATERÍTICA FERRO-ALUMINOSA (CLFA)

A seguir é apresentada a matriz de correlação linear (não foram obtidos resultados para correlações não lineares) e a principal equação de regressão obtidas para a CLFA (Figura 82).

Figura 82 - Diagrama de correlação linear e a principal equação de regressão para CLFA.

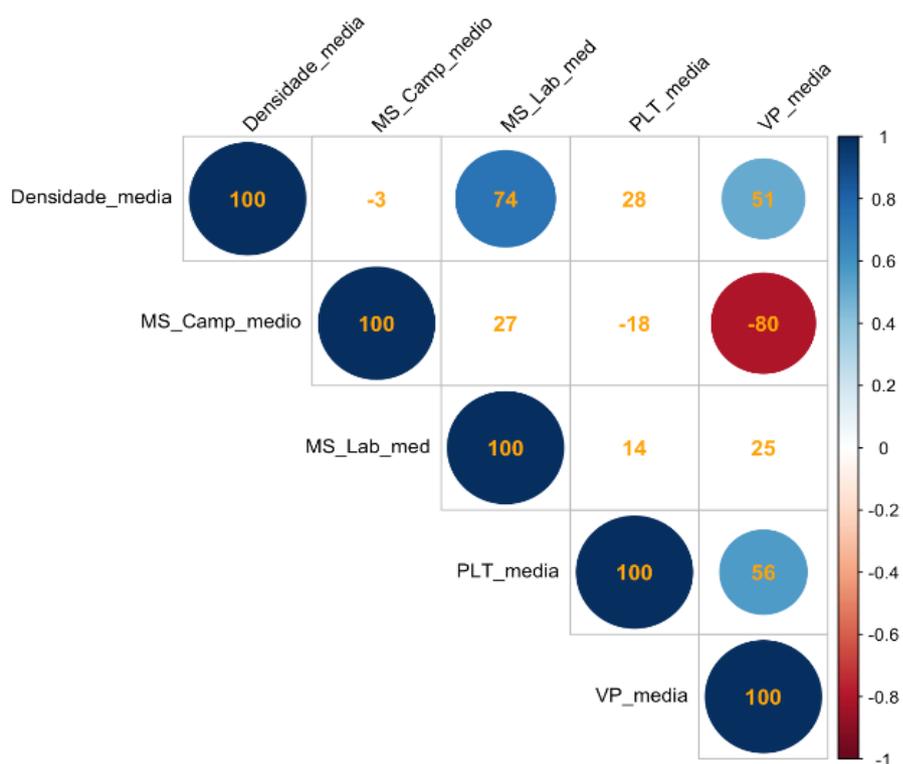


Fonte: a autora.

### 5.3.3 LATERITA FERRO-ALUMINOSA (LFA)

Apresenta-se a seguir a matriz de correlação linear para a LFA (Figura 83). Neste caso, não foi obtida uma correlação consistente entre os parâmetros.

Figura 83 - Diagrama de correlação linear para LFA.

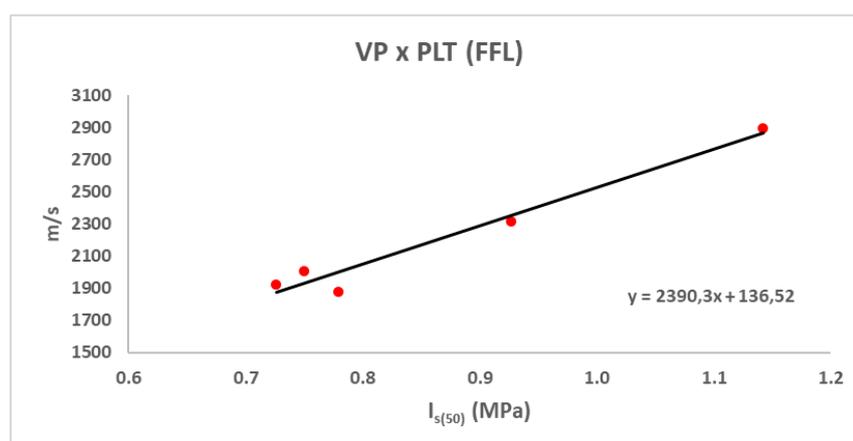
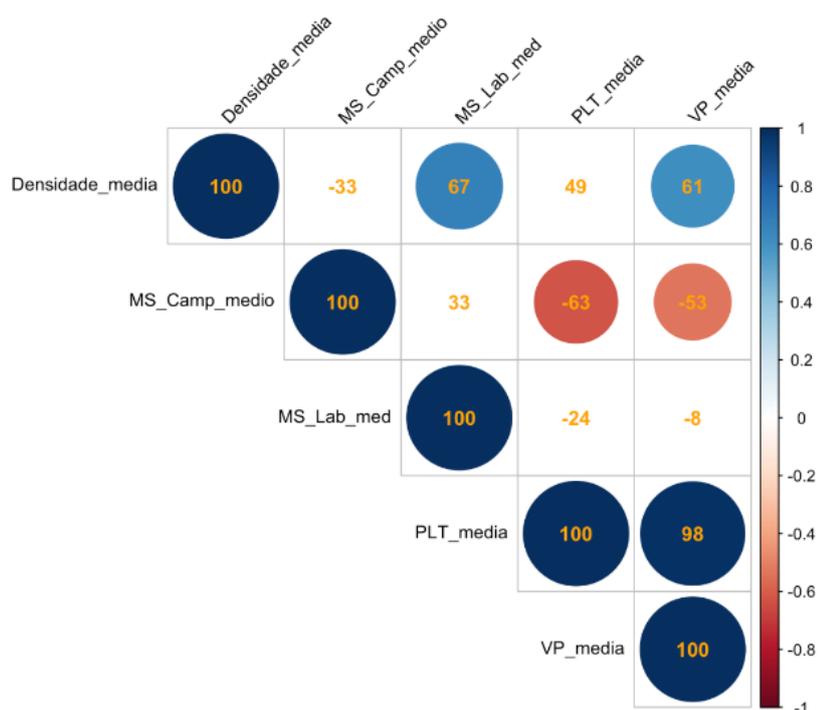


Fonte: a autora.

### 5.3.4 FORMAÇÃO FERRÍFERA LATERÍTICA (FFL)

Apresenta-se a seguir a matriz de correlação linear e a equação de regressão obtida para a FFL (Figura 84).

Figura 84 - Diagrama de correlação linear e equação de regressão para FFL.

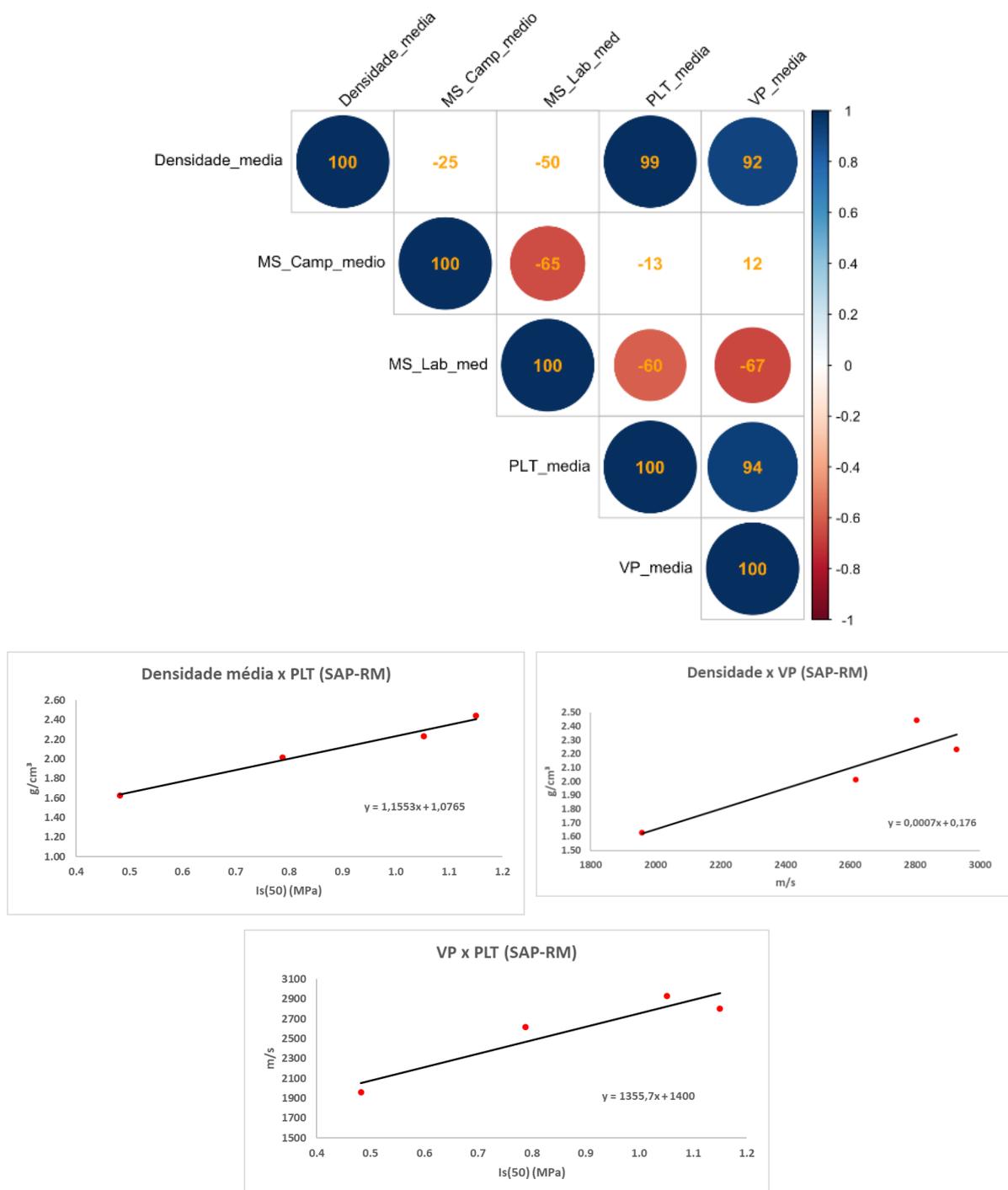


Fonte: a autora.

### 5.3.5 SAPROLITO DE ROCHA MÁFICA (SAP-RM)

Apresenta-se a seguir a matriz de correlação linear e as principais equações de regressão obtidas para o SAP-RM (Figura 85).

Figura 85 - Correlação linear e equações de regressão para SAP-RM.



Fonte: a autora.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A seguir são destacadas algumas considerações e recomendações pertinentes relacionadas ao presente trabalho:

As áreas estudadas localizam-se em uma região de contato interdigitado entre formações ferríferas da Formação Carajás e rochas máficas da Formação Igarapé Cigarra, na porção Norte do platô N4E. Nestas áreas, ocorreu o desenvolvimento de perfis de intemperismo sobre as rochas já citadas, originando horizontes de intemperismo, mostrando avançado estágio de laterização. Os contatos interdigitados, aparentemente, são controlados por superfícies de cisalhamento subverticalizadas de direção NNE-SSW a N-S; A área de N4E-01 localiza-se em domínio geológico, com predominância de rochas máficas, enquanto na área de N4E-02 predominam rochas ferríferas. De acordo com seu estágio de intemperismo/laterização e suas características texturais e composicionais, foram caracterizados três horizontes de intemperismo, do topo para a base: (i) Crosta Laterítica; (ii) Horizonte de Transição e (iii) Horizonte Saprolito, sendo que este último só foi possível ser observado no domínio de rochas máficas. Os litotipos que estão relacionadas a estes horizontes foram informalmente denominados de (i) Crosta laterítica ferro-aluminosa (CLFA); (ii) Laterita ferro-aluminosa (LFA) e (iii) Saprolito (SAP-RM) no domínio de rochas máficas. No domínio das rochas ferríferas, os litotipos identificados foram denominados de (i) Crosta laterítica ferruginosa (CLF) e (ii) Formação ferrífera laterítica (FFL).

- Os litotipos pertencentes à Crosta Laterítica correspondem aos Lateritos ou lateritas endurecidas conforme definição de Bigarella (1996). Mostram-se menos espessos e mais endurecidos do que os horizontes subjacentes. Apresentam ainda maior proporção de goethita (neoformações) preenchendo ou contornando vazios e descontinuidades e em geral, menor proporção de matriz silto-argilosa. As texturas observadas em geral variam principalmente de porosa a microcavernosa, onde os vazios aparentam, em geral menor interconexão entre si (menor porosidade efetiva). A anisotropia varia de incipiente a marcante, definida pelo aspecto laminado e descontínuo, por vezes anastomosado, na CLFA, e pelo bandamento reliquiar na CLF. Neste litotipo predominam os óxidos de ferro (hematita) ao passo que na CLFA predominam os hidróxidos de ferro (goethita). Pequenos pontos brancos de brilho vítreo podem indicar presença de gibbsita (hidróxido de alumínio), o que deve ser confirmado com análises químico-mineralógicas. Variações do grau de intemperismo/laterização, das proporções entre os constituintes mineralógicos, do arranjo estrutural e da porosidade são os principais fatores que definem significativa heterogeneidade para estes litotipos;

- A formação ferrífera laterítica (FFL) constitui o horizonte subjacente à CLF, e apresenta a típica estruturação das formações ferríferas dessilicificadas, caracterizada pelo bandamento reliquiar e fraturas em arranjo subortogonal a oblíquo, embora estas estruturas se mostrem em geral mascaradas pelo efeito do intemperismo/laterização. Apresenta textura muito variável, desde porosa a cavernosa (abrigo localmente uma cavidade (N4E-0026) com quatro entradas de dimensões métricas. Os vazios são em geral controlados pelos planos do bandamento e interseção do bandamento com fraturas. Apresentam anisotropia conferida pelo bandamento reliquiar, e sua heterogeneidade é relacionada principalmente à variação do grau de intemperismo/laterização, da proporção entre óxidos e hidróxidos de ferro e dos vazios. Fraturas, em geral pouco espaçadas, constituem as principais descontinuidades deste litotipo;
- A laterita ferro-aluminosa (LFA) constitui o pacote de transição entre os saprolitos e a CLFA, exibindo feições típicas dos dois horizontes. Apresentam-se em geral isotrópicos ou com fraca anisotropia, a não ser em núcleos mais endurecidos e goethíticos, marcada pela orientação/alongamento sub-horizontal de vazios. Em geral, a proporção da matriz silto-argilosa, endurecida ou não, é mais expressiva do que a dos minerais neoformados (cimento goethítico). As texturas variam desde maciço-porosa a mesocavernosa, sendo observados, não raramente, vazios que representam típicas miniaturas de cavidades, contendo espeleotemas e depósitos de sedimentos, com 5 a 60 cm de diâmetro de abertura. Alguns vazios apresentam controle estrutural por planos de fraturas subverticais;
- O saprolito de rocha máfica (SAP-RM), subjacente à LFA, mostra-se parcialmente laterizado, engloba núcleos menos e mais alterados (rocha semi-decomposta e solos residuais). Apresenta foliação reliquiar (por vezes milonítica), além de fraturas. Apresenta anisotropia marcante (definida pela foliação) a incipiente, quando esta se mostra obliterada pelo processo inicial de laterização ou nas porções mais alteradas (solos residuais). Constitui o horizonte de menor permeabilidade e sua textura varia de maciça a porosa e, mais raramente, vesicular;
- Destaca-se, no domínio de rochas máficas, a presença de fraturas subverticais abertas, de espaçamento e persistência métricos localmente preenchidas por material detrítico. Essas fraturas podem exercer importante papel na drenagem / escoamento subterrâneos de águas pluviais, e, conseqüentemente, na gênese e evolução de cavidades. Apesar de não ter sido objetivo específico deste trabalho, o estudo detalhado da origem e desenvolvimento das fraturas subverticais abertas, considera-se importante a realização de estudos direcionados de geologia estrutural, englobando áreas mais abrangente, com enfoque neste tipo de estrutura;

- Com relação aos resultados dos ensaios geomecânicos, é importante ressaltar que:
- a. Os resultados em geral, mostraram grande dispersão, evidenciando a elevada heterogeneidade desses materiais, o que confirma o padrão observado em análises tátil-visuais, onde variações em determinadas características são notadas mesmo em escala de amostras de mão;
  - b. Apesar da dispersão, nota-se proximidade dos valores médios da maioria dos parâmetros entre os litotipos estudados;
  - c. Estima-se que as principais características das rochas que influenciam na variação dos resultados são, dentre outros, o grau de litificação/intemperismo, as proporções relativas entre os minerais constituintes (principalmente entre óxidos de ferro e hidróxidos de ferro e/ou alumínio, a relação matriz-cimento, os vazios (porosidade) e ainda o efeito escala (tamanho do corpo de prova);
  - d. A CLF destaca-se com os maiores valores médios dos índices esclerométrico e de carga pontual, de densidade e de velocidade sônica, o que está relacionado principalmente à sua constituição mineralógica (predominância de oxi-hidróxidos de ferro), características texturais (arcabouço mais fechado e menos poroso), maior incidência de neoneofomações goethíticas, menor grau de intemperismo, maior resistência mecânica, entre outros. Os materiais mais alterados, com menor proporção de óxidos de ferro e de menor densidade (SAP-RM e LFA) e/ou mais porosos (LFA) mostraram menores índices de resistência (esclerométrico, carga pontual) e menor velocidade sônica. Os litotipos CLFA e FFL apresentaram valores intermediários entre os grupos anteriores citados;
  - e. Comportamento anisotrópico foi evidenciado principalmente nos litotipos CLF, FFL e CLFA para o índice de carga pontual ( $I_s(50)$ ) e em todos litotipos para a velocidade sônica ( $V_p$ ). No primeiro caso, os menores valores do  $I_s(50)$  estão associados à condição de ensaio paralelo à anisotropia e, no segundo caso, os menores valores de  $V_p$  estão associados à condição de ensaio perpendicular;
  - f. Destaca-se o efeito da anisotropia, avaliada nos ensaios de PLT e velocidade sônica. Os maiores valores de  $I_s(50)$  estão relacionados, em geral, aos corpos isotrópicos (ou de anisotropia considerada incipiente) e/ou em direção perpendicular (e menores na direção paralela) para os litotipos CLF, CLFA e FFL. Os demais litotipos mostraram

comportamento isotrópico para essa variável. Para os ensaios de  $V_p$ , nota-se os maiores valores relacionados aos corpos isotrópicos e/ou na direção paralela à anisotropia (e menores na direção perpendicular) para todos os litotipos, o que já era esperado, considerando maior dissipação da onda ao percorrer materiais heterogêneos intercalados.

- Com relação a particularidades da execução dos ensaios, é importante ressaltar que:
  - a. Com relação à diferença significativa entre os resultados dos testes esclerométricos de campo e laboratório, infere-se como principais causas: (i) o efeito do tamanho da amostra; (ii) o efeito do confinamento lateral no caso dos testes em campo e a não fixação dos corpos de prova, no caso dos testes de laboratório; e (iii) irregularidade e heterogeneidade típica das superfícies de teste; (iv) redução da resistência dos corpos de prova devido aos processos de coleta, modelagem (corte com serra tipo maquina), transporte, entre outros, que pode ter provocado, por exemplo, abertura de fissuras e redução da coesão da matriz rochosa;
  - b. Alguns testes esclerométricos (de campo e laboratório) não apresentaram resposta, em geral devido à baixa resistência do material e/ou à irregularidade das superfícies;
  - c. A textura da maioria dos materiais estudados confere às amostras uma superfície em geral irregular e heterogênea, o que pode ter influenciado, principalmente, nos ensaios de velocidade sônica, PLT e esclerometria, que requerem superfícies mais lisas para um melhor resultado;
  - d. Muitos testes de PLT foram invalidados (e não utilizados) em função do tipo de ruptura (fragmentação do corpo de prova em 3 ou mais pedaços) e ruptura em tempo menor do que o mínimo recomendado (10 s);
  - e. Os testes de PLT foram executados em amostras após submetidas a ensaio esclerométrico. Estima-se que isso possa ter influenciado nos resultados uma vez que, apesar de considerado não destrutivo, observou-se impacto destes testes nos corpos de prova (perda de material e fissuração em algumas amostras). Além deste fator, que pode ter provocado redução da resistência das amostras, tem-se outras variáveis como transporte, moldagem (corte com serra do tipo maquina) e manuseio das amostras;
  - f. Os ensaios de UCS devem, a princípio, ser considerados com cautela principalmente por terem apresentado resultados abaixo do esperado, quando se considera as análises

táctil-visuais e os demais ensaios. Além da presença de características típicas das amostras (porosidade, fissuras, etc), estes resultados podem ter sido influenciados por fatores, como: (i) pequeno universo amostral; (ii) limitações do equipamento utilizado (prensa CBR em modo mecânico e não servo-controlado); (iii) questões operacionais, envolvendo a experiência e habilidade do operador da prensa; (iii) forma cúbica das amostras (devido à dificuldade de moldagem dos corpos cilíndricos dos materiais de estudo); (iv) fatores como transporte, moldagem (corte com serra do tipo maquina) e manuseio das amostras;

- g. De acordo com os resultados das análises estatísticas, o volume de dados estudado, mesmo obedecendo-se às normas da ISRM quanto aos quantitativos dos ensaios, não possibilitou a obtenção de correlações entre os parâmetros geomecânicos estatisticamente satisfatórias ou conclusivas. As equações de regressão obtidas representam apenas um indicativo de tendência preliminar de comportamento, sendo necessário um maior número de ensaios para que se atinja significância estatística e resultados conclusivos.

- O presente trabalho apresenta importantes informações do ponto de vista geológico-geotécnico de materiais que compõem perfis lateríticos típicos de Serra Norte, Carajás. Recomenda-se, entretanto, a continuidade dos estudos para efeito de complementação e aprimoramento dessas informações, contemplando, por exemplo:

- a. O aumento do universo amostral no caso dos ensaios já efetuados, especialmente os de compressão simples;
- b. Levantamento de parâmetros não contemplados nesta fase, como porosidade, permeabilidade e Velocidade Sônica Transversal ( $V_s$ );
- c. Melhor detalhamento das descrições petrográficas e testes de difração de raios X, para efeito de elucidação e aprimoramento dos aspectos químico-mineralógicos;
- d. Mapeamento geológico de detalhe em área mais abrangente, com especial atenção a esses horizontes e às estruturas regionais (especialmente falhas, fraturas, zonas de cisalhamento e contatos);
- e. Possibilidade de aplicação destes métodos em outras áreas de Serra Norte em que ocorra uma maior predominância da CLD para que possa ser melhor avaliada e detalhada.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA F.F.M. DE, HASUI Y., BRITO-NEVES B.B DE, FUCK R. A. Brazilian Structural Provinces: an introduction. **Earth-Sci. Rev.**, v. 17, p. 1-29, 1981.
- ARAÚJO, O.J.B., MAIA, R.G.N. **Serra dos Carajás – Folha SB.22-Z-A, Estado do Pará. Texto explicativo.** Brasília: DNPM/CPRM, 1991.164 p.
- BARTON, N. R.; LUNDE, J.; LIEN, R. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. **Rock Mechanics**, v. 6:4, 1974a.
- BARTON, N. R.; LUNDE, J.; LIEN, R. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. **Rock Mechanics**, v. 6:4, 1974b.
- BASU A, AYDIN A. A method for normalization of Schmidt hammer rebound values. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences** v. 41, p. 1211–1214, 2004.
- BASU, A. e AYDIN, A. Predicting uniaxial compressive strength by point load test: Significance of cone penetration. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2005.
- BIENIAWSKI, Z. T. **Engineering Rock Mass Classification.** New York: John Wiley & Sons, 1989. 251 p.
- BIENIAWSKI, Z. **Rock mechanics design in mining and tunneling.** Rotterdam: Holanda, 1984.
- BIENIAWSKI, Z. Engineering classification of jointed masses. **The civil engineer in South Africa**, South African Institution Of Civil Engineering (SAICE), 1973.
- BIGARELLA, J. J.; BECKER, D. R.; PASSOS, E. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais.** Florianópolis, p. 566-612, 1996.
- BROWN, E. T. **Rock Characterization Testing and Monitoring. ISRM Suggested Methods.** Pergamon Press, 1981. 211 p.
- CARTER, T. G. Prediction and uncertainties in geological engineering and rock mass characterization assessments. Previsioni e riscontri nella meccanica e nell'ingegneria delle rocce. **Anais ... In: QUARTO CICLO DI CONFERENZE DI MECCANICA E INGEGNERIA DELLE ROCCE.** Torino - Italia: 27/11 1992.

- CHITOMBO, G. P. Cave mining: 16 years after Laubscher's 1994 paper "Cave mining - state of the art". **Mining Technology**, v. 119, 2010.
- CHRISTOFOLLETTI, C. **Correlação entre as classificações geomecânicas RMR e Q e sua relevância geológica**. Tese (Doutorado) São Paulo: Universidade de São Paulo, 2014.
- CORDANI U. G. , SATO K. Crustal evolution of the South American Platform, **based on Nd isotopic systematics on granitoid rocks**. *Episodes* v. 22, p. 167-173, 1999.
- COSTA, M.L. 1991. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 21, n.12, p. 146-160, 1991.
- DARDENNE, M. A.; SCHOBENHAUS, C. **Metalogênese do Brasil**. Brasília, DF, 2001.
- DEERE, D. U.; MILLER, R. P. **Engineering classification and index properties for intact rock**. Urbana/IL – USA, 1966.
- DOCEGEO. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35. **Anais ... SBG**. p. 10-54, 1988.
- FEIO, G. R. L., R. DALL'AGNOL, E. L. DANTAS, M. J. B. MACAMBIRA, J. O. S. SANTOS, F. J. ALTHOFF & J. E. B. SOARES. Archean granitoid magmatism in the Canaã dos Carajás area: implications for crustal evolution of the Carajás province, Amazonian craton, Brazil. **Precambrian Research** v. 227, p. 157-185, 2013.
- GIBBS, A.G.; WIRTH, K. R.; HIRATA, W. K.; OLSZEWSKI, W. J. Age and composition of the Grão-Pará Group volcanics, Serra dos Carajás. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 16, p. 201-211, 1986.
- GIBBS A.K., WIRTH K. R. **Geologic Setting of the Serra dos Carajás Iron deposits, Brazil – Ancient Banded Iron Formations**. Theophrastus publications, S.A., Greece, p. 83-102, 1990.
- GOODMAN, Richard E. **Introduction to Rock Mechanics**. 2. ed. John Wiley & Sons, 1989.
- GONÇALVES, D. F., DE PAULA, R.G., BARBOSA, M.R., TELES, C., MAURITY, C. W., MACAMBIRA, J.B. **Lateritic terrains and the evolution of pseudokarstic features – case study in the iron ore mine N4E, Carajás region – Pará, Brasil**. 24th World Mining Congress, Rio de Janeiro, Brasil, 2016.

GUERREIRO, H. J. P. **Exploração Subterrânea de Mármore - Aspectos Geotécnicos**; Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado em Georrecursos - Área de Geotecnia) – Portugal: Universidade Técnica de Lisboa, 2000.

ISRM - Suggested Methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Int. J. Rock Mechanics Min. Sci. Geomech. Abstr.*, vol. 15, p. 319-368, 1978.

ISRM – International Society for Rock Mechanics. The complete ISRM suggested methods for characterization, testing and monitoring: 1974-2006. In: Ulusay, R. & Hudson, J.A. (ed.), **suggested methods prepared by the Commission on Testing Methods**, ISRM. Ankara, Turkey. 2007. 628 p.

JAKUBEC, J.; LAUBSCHER, D. H. The MRMR rock mass rating classification system in mining practice. MassMin 2000 Proceedings. **Anais ...** In: MASSMIN 2000. Brisbane - Australia: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 10-02/11 2000.

JUNIOR, E. S.; OJIMA, L. M. Caracterização e Classificação de Maciços Rochosos. In: **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia: Antonio Manoel dos Santos, Sérgio Nertan Alves de Brito, 1998.

KATZ, O., RECHES, Z., ROEGIERS, J.C. Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt hammer. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences** v. 37 , n.4, p. 723 e 728, 2000.

KOTSCHOUBEY, B.; TRUCKENBROADT, W.; HIERONYMUS, B.; ALVES, C. A. **Preliminary study of aluminous laterites and bauxites from the Serra Norte (Carajás Mineral Province) Northern Brazil**. International Congress Icsoba, 6, Poços de Caldas. 95-103.Travaux ICSOBA, 1989.

KOTSCHOUBEY, B.; LEMOS, V. P. Considerações sobre a origem e gênese das bauxitas da Serra dos Carajás. In Simp. Geol. Amaz., 1, Belém. **Anais ...** Belém: SBG/NO. V. 3, p. 48-61, 1995.

KRYMSKY, R.S, MACAMBIRA, J.B., MACAMBIRA, M.B.J., 2002. Geocronologia U-Pb em zircão de rochas vulcânicas da Formação Carajás, Estado do Pará. In: Simpósio sobre Vulcanismo e Ambientes Associados, 2, Belém, **Anais ...** SBG-NO, p.41. 2002.

LAUBSCHER, D. H. A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design. **Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy**, out. 1990.

MACAMBIRA J.B., RAMOS J.F.F., ASSIS J.F.P., FIGUEIRAS A.J.M. Projeto Serra Norte, Projeto Pojuca: **Relatório Final**. Belém: UFPA, DOCEGEO, SEPLAN, DNPM, p. 150, 1990.

MACAMBIRA J.B. **O ambiente deposicional da Formação Carajás e uma proposta de modelo evolutivo para a Bacia Grão Pará**. Tese (Doutorado) Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. 2003. 217 p.

MAURITY, C. W.; KOTSCHOUBEY, B. Evolução Recente da Cobertura de Alteração no Platô NI – Serra dos Carajás – PA. Belém: **Bol. Mus. Paraense Emílio Goeldi, série ciências da Terra**. p. 331-362, 1995.

NOGUEIRA, A.C.R., TRUCKENBRODT, W., PINHEIRO, R.V.L. Formação Águas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás, redescrição e redefinição litoestratigráfica. Belém: **Bol. Mus. Paraense Emílio Goeldi, série Ciências da Terra**, 7, p. 177-197, 1995.

OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A (ed.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. 576 p.

PILÓ, L. B.; AULER, A. Geoespeleologia das cavernas em rochas ferríferas da Região de Carajás, PA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 30, 2009, Montes Claros. **Anais ...** Montes Claros, MG: SBE/Grucav/Unimontes, 2009.

PINHEIRO, R. V. L.; HOLDSWORTH, R. E. Reactivation of Archaean strike-slip fault systems, Amazon region, Brazil. **Journal Geological Society**. London, v. 154, p. 99-103, 1997.

PRIEST, S. D.; HUDSON, J. A. Discontinuity spacings in rock. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, v. 13, n. 5, maio 1976.

SILVA J.L. Mina de manganês do Azul. In: SBG, 35º CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA. PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS - Litoestratigrafia e principais depósitos minerais, Belém. **Anexo aos Anais**. p. 73-94, 1988.

SOUZA, C. I. J. **Estudo da cobertura laterítica ferro-aluminosa da aba norte da Serra dos Carajás (Pará)**. Belém, Universidade Federal do Pará. Tese (Mestrado em Geociências) Centro de Geociências. 1993. 152 p.

SOUZA, C. I. J. & KOTSCHOUBEY, B. Alguns aspectos micromorfológicos e gênese da cobertura residual sobre as rochas sedimentares da Serra dos Carajás-PA. Simpósio de Geologia da Amazônia, 3, **Anais ...** Belém: SBG/NN. 1: 569-583, 1991.

TRENDALL, A. F., BASEI M.A.S., LAETER J.R., NELSON D.R. Ion microprobe zircon U-Pb results from the Carajás area of the Amazon Craton. **Journal of South American Earth Sciences**, 11, p. 265-277, 1998.

VASQUEZ L.V., ROSA-COSTA L.R., SILVA C.G., RICCI P.F., BARBOSA J.O., KLEIN E.L., LOPES E.S., MACAMBIRA E.B., CHAVES C.L., CARVALHO J.M., OLIVEIRA J.G., ANJOS G.C., SILVA H.R. 2008. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – 53 SIG: **Texto Explicativo dos Mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará**, 1:1.000.000. CPRM, Belém.