

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia de Minas
Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais

Amanda Gabriela Almeida Ribeiro

**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E DETERMINAÇÃO DO GRAU DE LIBERAÇÃO DOS
ITABIRITOS DA MINA CÓRREGO DA ONÇA, BARÃO DE COCAIS, MINAS GERAIS, BRASIL**

Belo Horizonte

2024

Amanda Gabriela Almeida Ribeiro

**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E DETERMINAÇÃO DO GRAU DE LIBERAÇÃO DOS
ITABIRITOS DA MINA CÓRREGO DA ONÇA, BARÃO DE COCAIS, MINAS GERAIS, BRASIL**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia de Recursos Minerais.

Orientadora: Profa. Dra. Andréia Bicalho Henriques

Belo Horizonte

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MINAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MONOGRAFIA/ARTIGO

Aos vinte e três dias do mês de novembro do ano de dois mil e vinte e quatro, de 08h:00min às 11h:15min, a estudante Amanda Gabriela Almeida Ribeiro, matrícula 2023662338, defendeu o Trabalho intitulado “**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E DETERMINAÇÃO DO GRAU DE LIBERAÇÃO DOS ITABIRITOS DA MINA CÓRREGO DA ONÇA, BARÃO DE COCAIS, MINAS GERAIS, BRASIL**”.

Participaram da banca examinadora os professores abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar, assinam eletronicamente a presente ata.

Nota: 95

Situação: Aprovada

Orientadora: Professora Andreia Bicalho Henriques

Examinadora: Professora Risia Magriotis Papini

Examinador: Professor Gilberto Rodrigues da Silva



Documento assinado eletronicamente por **Andreia Bicalho Henriques, Professora do Magistério Superior**, em 15/01/2025, às 16:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gilberto Rodrigues da Silva, Professor do Magistério Superior**, em 15/01/2025, às 19:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Risia Magriotis Papini, Usuária Externa**, em 06/02/2025, às 08:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3777012** e o código CRC **2834B63D**.

INSTRUÇÕES

Este documento deve ser editado apenas pelo Orientador e deve ser assinado eletronicamente por todos os membros da banca.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que colaboraram para a realização deste trabalho, especialmente à minha família e meus colegas, pelo incentivo, à Profa. Dra. Andréia Bicalho Henriques, pela orientação, aos professores Dra. Rísia Magriotis Papini e Dr. Gilberto Rodrigues da Silva, que compuseram a banca avaliadora e à secretária Aurea Domingos, pela assessoria e gentileza ao longo de toda a trajetória. Ao Grupo Avante pelo apoio financeiro e pela confiança, em especial aos geólogos Marcelo Weber e Daniel Rossi, meus gestores, pelo encorajamento, e aos engenheiros Fernando Panta e Noel Quites, pela sinergia e companheirismo, à Fundação Gorceix, em especial à geóloga Yanne Queiroz e o engenheiro Fernando José Gomes, por todo o suporte técnico e científico que tornaram o desenvolvimento do projeto possível. Agradeço também os auxiliares de campo Daniel Ribeiro e John Martins, que atuaram comigo na fase de amostragem na Fazenda dos Búfalos, e, à época estagiária, hoje engenheira, Jéssica Castro, pelo apoio na documentação. Obrigada também ao meu primeiro orientador, o prof. Dr. Paulo Brandão (*in memoriam*), que nos deixou no fim do ano passado.

Dedico este trabalho a todos aqueles que buscam alternativas
para existir em consonância com este planeta.

„Die Natur hat sich so viel Freiheit vorbehalten, daß wir mit Wissen und Wissenschaft ihr nicht durchgängig beikommen oder sie in die Enge treiben können.“

“A natureza reservou para si tanta liberdade que não a podemos nunca penetrar completamente com o nosso saber e a nossa ciência.”

– Johann Wolfgang von Goethe

RESUMO

Um depósito mineral reflete os fatores geológicos, físico-químicos e estruturais de sua gênese e evolução no espaço e no tempo geológico. A compreensão do potencial de uma jazida não apenas facilita a escolha de técnicas adequadas para a concentração dos metais de interesse, mas também ajuda a garantir a eficiência do processo, reduzindo custos operacionais e impactos ambientais. Este trabalho constitui um orientativo para o projeto de ampliação da usina de tratamento de minérios da GSM Mineração, cuja pesquisa averiguou a distribuição granulométrica, a composição química e a associação mineralógica dos itabiritos da Mina Córrego da Onça, localizada em Barão de Cocais, Minas Gerais, com foco na concentração de minérios de ferro. Para tanto, foi realizada uma análise exploratória da base de dados de sondagem geológica com o propósito de mapear alvos de interesse para testes em laboratório. Os agrupamentos hierárquicos classificados por técnicas numéricas de análise multivariada auxiliaram na preparação de três amostras de quartzo itabiritos e três de itabiritos anfibolíticos representativas do recurso mineral. As amostras foram geradas pela combinação de intervalos de dezesseis testemunhos e foram submetidas a ensaios de granulometria, geoquímica e microscopia óptica de luz refletida. Para ambos os litotipos, os teores de Fe^T são típicos de itabiritos pobres do Quadrilátero Ferrífero, cujos maiores contaminantes são Si, Al, Mn e P. Os principais minerais de ferro são hematita, martita, magnetita e goethita, que ocorrem em diferentes formas, hábitos e proporções. O grau de alteração e a porosidade são elevados e a granulometria das partículas variada. O mineral de ganga predominante em todas as amostras é o quartzo, que ocorre tanto na forma livre quanto em agregados com outros silicatos, óxidos e hidróxidos. As associações mineralógicas sugerem que a origem da jazida deve estar atribuída a intercalações de formações ferríferas das fácies silicato, óxido-silicato e anfibólio. Os itabiritos anfibolíticos apontaram a presença majoritária de goethita terrosa com baixo potencial para recuperação do ferro. Contudo, os quartzo itabiritos apresentaram um percentual significativo de magnetita, acenando positivamente para processos de separação magnética. A flotação também pode ser avaliada, visto que as tipologias não apresentaram restrições com relação a deletérios como Ca, Mg e K. Em síntese, os resultados consolidaram a perspectiva de geração de produtos comerciais e servirão de base para ensaios de bancada e planta-piloto. Uma vez que as variedades faciológicas coexistem de forma intrínseca na jazida, o cenário de aproveitamento econômico mais pragmático visando a otimização da reserva e o aumento da vida útil do empreendimento é a lavra conjunta a céu aberto, com blendagem das tipologias para composição da alimentação da usina de concentração em proporções apropriadas, de modo que o desempenho da rota dos quartzo itabiritos não seja comprometida.

Palavras-chave: Dados Geológicos Multivariados; Análise Estatística; Agrupamentos Hierárquicos; Caracterização Mineralógica; Grau de Liberação; Concentração Mineral; Minério de Ferro.

ABSTRACT

A mineral deposit reflects the geological, physical-chemical and structural factors of its genesis and evolution in space and geological time. Understanding the potential of a deposit not only facilitates the selection of the most appropriate techniques to concentrate the metals of interest but also helps to ensure the efficiency of the process, reducing operating costs and environmental impacts. This work provides technical guidance for the GSM Mineração ore treatment plant expansion project, which research investigated the chemical composition and mineral associations present in itabirites from Córrego da Onça Mine, located in Barão de Cocais, Minas Gerais, focusing on the concentration of iron ore. For this purpose, an exploratory analysis of the geological drill core database was performed to map targets of interest for laboratory tests. Hierarchical clusters classified according to numerical multivariate analysis helped preparing three samples of quartz itabirites and other three of amphibolitic ones, which are representative of the mineral resource. The samples were composed by combining selected intervals of sixteen drill cores and were subjected to granulometry, geochemistry and reflected-light optical microscopy tests. For both lithotypes Fe^{T} contents are typical of poor itabirites from the Iron Quadrangle (Quadrilátero Ferrífero), with Si, Al, P and Mn as the main contaminants. The major iron minerals identified are hematite, martite, magnetite and goethite, which occur in different forms, habits and proportions. The degree of alteration and porosity are considered high, and the particle size is quite varied. The predominant gangue mineral in all samples is quartz, which occurs both freely and/or in aggregates with other silicates and iron and aluminium oxides and hydroxides. Mineral associations suggest that the origin of the deposit may be attributed to intercalations of iron formations of the silicate, oxide-silicate and amphibole facies. The amphibolitic itabirites indicated the majority presence of earthy goethite with low potential for iron recovery. However, the quartz itabirites presented a significant percentage of magnetite, indicating a positive sign for magnetic separation processes. Flotation can also be evaluated, since the typologies showed no restrictions regarding deleterious elements such as Ca, Mg and K. In summary, the results consolidate the prospect of generating commercial products and will serve as a basis for guiding bench and pilot plant tests. Since the facies coexist intrinsically in the deposit, the most pragmatic economic scenario aimed at optimizing the mineral reserve and increasing the useful life of the project is joint open-pit mining, with blending of the two types to compose the feed for the concentration plant in appropriate proportions, so that the performance of the quartz itabirite route is not compromised.

Keywords: Multivariate Geological Data; Statistical Analysis; Hierarchical Clustering; Mineralogical Characterization; Mineral Liberation Degree; Mineral Concentration; Iron Ore.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localização das principais instalações da GSM Mineração em Barão de Cocais, Minas Gerais. Modificado de OpenStretMaps.....	17
Figura 2. Mapa geológico simplificado do QF no contexto das Províncias Mineraias de Minas Gerais e a localização das principais minas de ferro, dentre elas, a Mina CDO em preto. Modificado de Dorr (1969) <i>apud</i> Caxito & Dias (2018).	19
Figura 3. Coluna Estratigráfica do QF. As unidades identificadas na área da Mina CDO estão destacadas pelas setas e os retângulos em vermelho. Modificado de Endo <i>et al.</i> (2019b) <i>apud</i> Castro <i>et al.</i> (2020).....	19
Figura 4. Localização do Sinclinal Gandarela no QF (QFe). Modificado de Dorr (1969) <i>apud</i> Oliveira <i>et al.</i> (2005).	21
Figura 5. Mapa geológico simplificado do QF, com destaque para o Sinclinal Gandarela (Modificado de Cavalcanti <i>et al.</i> , 2015). A Mina CDO está localizada no interior do quadrado amarelo no mapa à direita, cuja área é discretizada na Figura 6.....	23
Figura 6. Mapa geológico simplificado da Mina CDO. Elaborado pela autora.....	24
Figura 7. Ocorrência na Mina CDO dos litotipos estudados: A) Frente de lavra dos itabiritos (sobretudo quartzosos); B) Quartzito itabiritos bandados em detalhe na parede de um talude da mina; C) Contato transicional entre as fácies quartzosa e anfibolítica (linha tracejada em laranja) e zona enriquecida (linha tracejada em rosa) com canga e laterita ferruginosas no topo (linha tracejada em verde), em talude final da mina; D) Itabirito anfibolítico mostrado em detalhe em afloramento localizado na área operacional da mina; E) Intercalação das fácies quartzosa e anfibolíticas compactas em afloramento na área operacional da mina. Imagens da autora.	25
Figura 8. Fluxo de trabalho com as atividades do plano de pesquisa. Elaborado pela autora.....	26
Figura 9. Localização das amostras disponíveis no contexto das áreas operacionais da UTM Barão de Cocais. Os polígonos em amarelo correspondem aos limites da ADA da GSM Mineração. A posição da seção gráfica da Figura 10 é indicada em vermelho.	28
Figura 10. Seção gráfica de direção sudoeste-nordeste sobre a Cava da Ilha, ilustrando a posição das amostras presentes na base de dados e o <i>cluster</i> ao qual pertencem, além do traçado dos sólidos modelados tridimensionalmente. Os pontos amostrados no âmbito deste trabalho estão sinalizados com a palavra “SIM”.....	28
Figura 11. A) Caixas de testemunhos de sondagem alocadas no interior os containers; B) e C) Localização dos furos pré-selecionados para amostragem e marcação das caixas de interesse de acordo com os <i>clusters</i> . Imagens da autora.	30
Figura 12. A), B) e C) Amostragem de $\frac{1}{4}$ dos intervalos dos testemunhos selecionados, por intervalo; D) Amostra de um intervalo completo; E) e F) Separação da amostra de um intervalo completo em três alíquotas iguais; G) Confecção das etiquetas; H) Pesagem das alíquotas individualmente. Imagens da autora.....	30

Figura 13. Preparação física das amostras na Fundação Gorceix: A) Homogeneização; B) Peneiramento e classificação; C) Quarteamento manual e D) Quarteamento automatizado. Imagens da autora.....	31
Figura 14. Fluxograma de preparação física das amostras. Fonte das informações: Grupo Avante GSM Mineração.	31
Figura 15. Composição das amostras de cada <i>cluster</i> a partir das alíquotas individuais por furo. Fonte das imagens: Fundação Gorceix.....	32
Figura 16. Preparação das amostras do <i>Cluster</i> 06: A) Formação da pilha para homogeneização e quarteamento do ROM global tal qual; B) Fração >16,0mm natural originada do peneiramento do ROM global tal qual; C) Fração <16,0mm natural originada do peneiramento do ROM global tal qual; D) Fração >16,0mm natural britado em 100% abaixo de 16,0mm; E) Blend global <16,0mm (+16,0mm britado e -16,0mm natural). Fonte das imagens: Fundação Gorceix.....	32
Figura 17. Chave de classificação litoquímica da Mina CDO. Fonte: Grupo Avante. GSM Mineração.....	35
Figura 18. Dendrograma de agrupamento hierárquico Modo R, ilustrando a interrelação entre as variáveis.....	36
Figura 19. Dendrograma de agrupamento hierárquico Modo Q, ilustrando os clusters formados a partir da similaridade entre as amostras. A linha em vermelha demarca o nível do corte.....	37
Figura 20. Histograma de distribuição das amostras em <i>clusters</i>	38
Figura 21. Correlação entre as variáveis Fe global e SiO ₂ global.....	38
Figura 22. Correlação entre as variáveis Fe global e a fração G1.....	38
Figura 23. Correlação entre as variáveis Al ₂ O ₃ global e LOI global.....	39
Figura 24. Modelo geológico de agrupamentos, vista A) em planta e B) em perspectiva.....	41
Figura 25. Seção gráfica de direção sudoeste-nordeste (Cava da Ilha) sobre o modelo geológico de agrupamentos. Os círculos indicam a posição das amostras e a linha branca corresponde à silhueta da topografia. A paleta de cores é a mesma para os sólidos modelados, posição das amostras e número dos clusters.....	42
Figura 26. Seções gráficas de direção sudoeste-nordeste representativas das três áreas amostradas (Cava da Ilha, Cava Abóboras e Entre Cavas).....	44
Figura 27. Comparação da análise química global esperada versus obtida para as amostras finais. Modificado de SOLID (2024).	45
Figura 28. Distribuição granulométrica dos itabiritos anfíbolíticos (IAN). Fonte dos dados: Fundação Gorceix.	47
Figura 29. Distribuição granulométrica dos quartzo itabiritos (ITF). Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	47
Figura 30. A) Teor de Fe global e B) Distribuição do Fe global por faixa granulométrica dos itabiritos anfíbolíticos (IAN) - amostras britadas em 16,00mm. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	48

Figura 31. A) Teor de Fe global e B) Distribuição do Fe global por faixa granulométrica dos quartzo itabiritos (ITF) - amostras britadas em 16,00mm. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	49
Figura 32. Texturas de minerais-minério e gangas presentes no <i>Cluster</i> 05 – IAN: A) Partículas mistas de hematita granular com quartzo; B) Partícula de goethita cristalina mista com silicatos (provavelmente quartzo); C) Partícula mista de goethita terrosa com martita agregadas com minerais de manganês; D) Partícula livre de martita e partícula de goethita terrosa mista com silicato (não identificado). Fonte das imagens: Fundação Gorceix.....	50
Figura 33. Minerografia quantitativa do <i>Cluster</i> 05. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	51
Figura 34. Minerografia quantitativa do <i>Cluster</i> 06. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	51
Figura 35. Minerografia quantitativa do <i>Cluster</i> 06. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	51
Figura 36. Minerografia quantitativa do <i>Cluster</i> 13. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	51
Figura 37. Minerografia quantitativa do <i>Cluster</i> 15. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	52
Figura 38. Minerografia quantitativa do <i>Cluster</i> 17. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	52
Figura 39. Fotomicrografias das amostras do <i>Cluster</i> 05. A escala é indicada nas fotos. Os nomes dos principais minerais estão indicados em amarelo. Fonte das imagens: Fundação Gorceix.....	53
Figura 40. Fotomicrografias das amostras do <i>Cluster</i> 06. A escala é indicada nas fotos. Os nomes dos principais minerais estão indicados em amarelo. Fonte das imagens: Fundação Gorceix.....	54
Figura 41. Fotomicrografias das amostras do <i>Cluster</i> 07. A escala é indicada nas fotos. Os nomes dos principais minerais estão indicados em amarelo. Fonte das imagens: Fundação Gorceix.....	55
Figura 42. Fotomicrografias das amostras do <i>Cluster</i> 13. A escala é indicada nas fotos. Os nomes dos principais minerais estão indicados em amarelo. Fonte das imagens: Fundação Gorceix.....	56
Figura 43. Fotomicrografias das amostras do <i>Cluster</i> 15. A escala é indicada nas fotos. Os nomes dos principais minerais estão indicados em amarelo. Fonte das imagens: Fundação Gorceix.....	57
Figura 44. Fotomicrografias das amostras do <i>Cluster</i> 17. A escala é indicada nas fotos. Os nomes dos principais minerais estão indicados em amarelo. Fonte das imagens: Fundação Gorceix.....	58
Figura 45. Grau de liberação das partículas minerais do <i>Cluster</i> 05. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	59
Figura 46. Grau de liberação das partículas minerais do <i>Cluster</i> 06. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	59
Figura 47. Grau de liberação das partículas minerais do <i>Cluster</i> 07. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	59
Figura 48. Grau de liberação das partículas minerais do <i>Cluster</i> 13. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	60
Figura 49. Grau de liberação das partículas minerais do <i>Cluster</i> 15. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	60
Figura 50. Grau de liberação das partículas minerais do <i>Cluster</i> 17. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	60

Figura 51. <i>Boxplot</i> das variáveis analisadas para o <i>Cluster 01</i>	66
Figura 52. <i>Boxplot</i> das variáveis analisadas para o <i>Cluster 03</i>	66
Figura 53. <i>Boxplot</i> das variáveis analisadas para o <i>Cluster 02</i>	66
Figura 54. <i>Boxplot</i> das variáveis analisadas para o <i>Cluster 04</i>	66
Figura 55. <i>Boxplot</i> das variáveis analisadas para o <i>Cluster 05</i>	67
Figura 56. <i>Boxplot</i> das variáveis analisadas para o <i>Cluster 07</i>	67
Figura 57. <i>Boxplot</i> das variáveis analisadas para o <i>Cluster 06</i>	67
Figura 58. <i>Boxplot</i> das variáveis analisadas para o <i>Cluster 08</i>	67
Figura 59. <i>Boxplot</i> das variáveis analisadas para o <i>Cluster 09</i>	68
Figura 60. <i>Boxplot</i> das variáveis analisadas para o <i>Cluster 11</i>	68
Figura 61. <i>Boxplot</i> das variáveis analisadas para o <i>Cluster 10</i>	68
Figura 62. <i>Boxplot</i> das variáveis analisadas para o <i>Cluster 12</i>	68
Figura 63. <i>Boxplot</i> das variáveis analisadas para o <i>Cluster 13</i>	69
Figura 64. <i>Boxplot</i> das variáveis analisadas para o <i>Cluster 15</i>	69
Figura 65. <i>Boxplot</i> das variáveis analisadas para o <i>Cluster 14</i>	69
Figura 66. <i>Boxplot</i> das variáveis analisadas para o <i>Cluster 16</i>	69
Figura 67. <i>Boxplot</i> das variáveis analisadas para o <i>Cluster 17</i>	70
Figura 68. Distribuição granulométrica do <i>Cluster 05</i> . Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	71
Figura 69. Distribuição granulométrica do <i>Cluster 06</i> . Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	72
Figura 70. Distribuição granulométrica do <i>Cluster 07</i> . Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	73
Figura 71. Distribuição granulométrica do <i>Cluster 13</i> . Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	74
Figura 72. Distribuição granulométrica do <i>Cluster 15</i> . Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	75
Figura 73. Distribuição granulométrica do <i>Cluster 17</i> . Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	76

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros de modelagem dos agrupamentos.....	27
Tabela 2. Parâmetros para estimação do recurso.	27
Tabela 3. Plano de amostragem de testemunhos de sondagem. Fonte dos dados: Grupo Avante GSM Mineração.	29
Tabela 4. Associação dos agrupamentos aos litotipos segundo a chave de classificação litoquímica da Mina CDO.	40
Tabela 5. Cubagem resumida do recurso mineral da Mina CDO, considerando-se apenas os <i>clusters</i> de interesse.	43
Tabela 6. Participação de cada agrupamento no recurso mineral.....	43
Tabela 7. Análises químicas amostra global. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	46
Tabela 8. Análises granuloquímicas do <i>Cluster</i> 05. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	77
Tabela 9. Análises granuloquímicas do <i>Cluster</i> 06. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	78
Tabela 10. Análises granuloquímicas do <i>Cluster</i> 07. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	79
Tabela 11. Análises granuloquímicas do <i>Cluster</i> 13. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	80
Tabela 12. Análises granuloquímicas do <i>Cluster</i> 15. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	81
Tabela 13. Análises granuloquímicas do <i>Cluster</i> 17. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.....	82
Tabela 14. Composição mineralógica dos agrupamentos. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.	83

LISTA DE ABREVIATURAS

ADA	Área Diretamente Afetada
BIF	Banded Iron Formation (inglês)
BR	Rodovia Federal (brasileira)
CDO	Córrego da Onça
CEERMIN	Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais
CLI	Classificação Interpretada
CLM	Classificação Matemática
CLV	Classificação Visual
DEMIN	Departamento de Engenharia de Minas da UFMG
DETEMM	Departamento de Tratamento de Minérios da Fundação Gorceix
EFVM	Estrada de Ferro Vitória a Minas
IAN	Itabirito Anfibolítico
IPD	Inverso da Potência das Distâncias
ITF	Quartzo Itabirito Friável
MG	Minas Gerais
QF	Quadrilátero Ferrífero
SGE	Supergrupo Espinhaço
SGER	Supergrupo Estrada Real
SGM	Supergrupo Minas
SGRV	Supergrupo Rio das Velhas
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. OBJETIVOS	16
1.2. RELEVÂNCIA	17
1.3. LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO	17
1.4. CONTEXTO GEOLÓGICO	18
1.4.1. GEOLOGIA REGIONAL E ESTRATIGRAFIA	18
1.4.2. GEOLOGIA ESTRUTURAL	20
1.4.3. GEOLOGIA LOCAL	22
2. METODOLOGIA	26
2.1. ANÁLISE EXPLORATÓRIA DE DADOS GEOLÓGICOS MULTIVARIADOS	26
2.2. MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DOS AGRUPAMENTOS	27
2.3. ESTIMATIVA E CLASIFICAÇÃO DE RECURSOS MINERAIS	27
2.4. SELEÇÃO DE INTERVALOS PARA AMOSTRAGEM	28
2.5. AMOSTRAGEM DE TESTEMUNHOS DE SONDAGEM	30
2.6. PREPARAÇÃO FÍSICA	31
2.7. ENSAIOS GRANULOMÉTRICOS	32
2.8. GEOQUÍMICA	33
2.9. ENSAIOS GRANULOMÉTRICOS	33
2.10. MICROSCOPIA ÓPTICA DE LUZ REFLETIDA	33
2.10.1. MINERALOGIA	34
2.10.2. GRAU DE LIBERAÇÃO	34
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
3.1. CHAVE DE CLASSIFICAÇÃO LITOQUÍMICA	35
3.2. ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS	36
3.3. MODELO GEOLÓGICO DOS AGRUPAMENTOS	41
3.4. CUBAGEM DOS RECURSOS MINERAIS	43
3.5. VALIDAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS	45
3.6. ANÁLISE QUÍMICA GLOBAL	46

3.7.	ENSAIOS GRANULOMÉTRICOS.....	46
3.8.	ANÁLISES GRANULOQUÍMICAS.....	48
3.9.	ANÁLISES MINERALÓGICAS.....	49
3.9.1.	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA.....	49
3.9.2.	DETERMINAÇÃO DO GRAU DE LIBERAÇÃO.....	59
4.	CONCLUSÕES.....	61
5.	RECOMENDAÇÕES.....	63
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
	ANEXO I – ESTATÍSTICA.....	66
	ANEXO II – GRANULOMETRIA	71
	ANEXO III – GRANULOQUÍMICA.....	77
	ANEXO IV – MINERALOGIA	83

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho constitui-se um estudo de caracterização mineralógica e determinação do grau de liberação dos principais óxidos de ferro e minerais de ganga presentes nos itabiritos da jazida de minério de ferro da Mina Córrego da Onça (CDO), pertencente à GSM Mineração, uma empresa privada do Grupo Avante, localizada nas imediações do município de Barão de Cocais, Minas Gerais. As operações minerárias da GSM se concentram na exploração e no beneficiamento de BIFs (do inglês *Banded Iron Formation*), como são conhecidas as formações ferríferas bandadas, e depósitos lateríticos e coluvionares ferruginosos fanerozoicos oriundos da Formação Cauê, de idade paleoproterozoica. O método de lavra praticado é à céu aberto, com bancadas desenvolvidas de forma descendente e cuja extração é realizada de forma mecanizada (sem o auxílio de explosivos). A usina de processamento compreende etapas de britagem e classificação a seco, com licença de operação para alimentar até 1,5Mtpa de minério bruto oriundo sobretudo das cavas Abóboras, Ilha e ocasionalmente, Meio, resultando numa produção variável de Lump Ore (+19mm), Hematitinha (-19mm +16mm) e Sinter Feed (-16mm +6,3mm).

Os trabalhos de pesquisa e desenvolvimento realizados até o momento atestaram a complexidade geológica, estrutural e geoquímica do depósito. A existência comprovada de materiais empobrecidos em profundidade, distintos daqueles previstos na fase de viabilidade inicial do projeto, sinalizam para a necessidade de uma investigação minuciosa, de maneira a contribuir para a evolução do conhecimento geológico da jazida e planejar sua exploração de forma sustentável, garantindo a longevidade da mina. Como parte dos estudos iniciais voltados à expansão do empreendimento, uma série de estudos foi conduzida na Fundação Gorceix, com o objetivo de traçar estratégias para a definição de novas rotas de concentração do minério. A pesquisa envolveu o estudo de seis amostras representativas do recurso mineral, a partir de a análise exploratória da base de dados, a seleção e preparação de amostras, análises granuloquímicas, caracterização mineralógica e a definição do grau de liberação das principais fases dos minerais de interesse em diferentes frações.

1.1. OBJETIVOS

Foram objetivos deste trabalho:

- A realização de uma análise exploratória da base de dados de sondagem geológica e de um tratamento estatístico dos domínios mineralizados com maior potencial para aproveitamento econômico na próxima fase de operação da usina de tratamento de minérios (concentração de finos);
- A delimitação de domínios e a seleção de intervalos para composição de amostras representativas da jazida mineral para a realização de estudos de caracterização de minérios de ferro;
- Determinação da composição química, mineralógica e do grau de liberação dos subgrupos de minérios com maior ocorrência na jazida mineral.

1.2. RELEVÂNCIA

As amostras de itabiritos oriundos da jazida da Mina CDO foram estudadas individualmente sob aspectos da sua composição química e mineralógica, visando identificar o seu potencial para concentração de ferro. A metodologia de trabalho consistiu na definição de uma estratégia para mapear domínios litoquímicos e compor amostras representativas da jazida, considerando-se a ocorrência e a morfologia dos corpos mineralizados e a disponibilidade de testemunhos de sondagem diamantada para a composição de amostras, visando a realização de ensaios em laboratório, que culminaram na caracterização mineralógica e na determinação do grau de liberação dos minerais-minério de ferro e de ganga, sendo considerado um dos trabalhos pioneiros para nortear a amostragem de campo para os ensaios exploratórios de bancada, que serão a base para a determinação da(s) rota(s) de processo para concentração do ferro e o dimensionamento da usina de tratamento de minérios a úmido da GSM Mineração.

1.3. LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A Mina CDO, bem como outras estruturas operacionais da GSM Mineração, está localizada na zona rural do município de Barão de Cocais, porção central do estado de Minas Gerais, região sudeste do Brasil (Figura 1). As principais vias de acesso à cidade são a Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) (Estação Dois Irmãos) e a rodovia federal BR-262, que interliga os estados do Espírito Santo, Minas Gerais, São Paulo e Mato Grosso do Sul. O complexo minerário pode ser acessado facilmente pela via municipal Córrego da Onça e estradas vicinais.

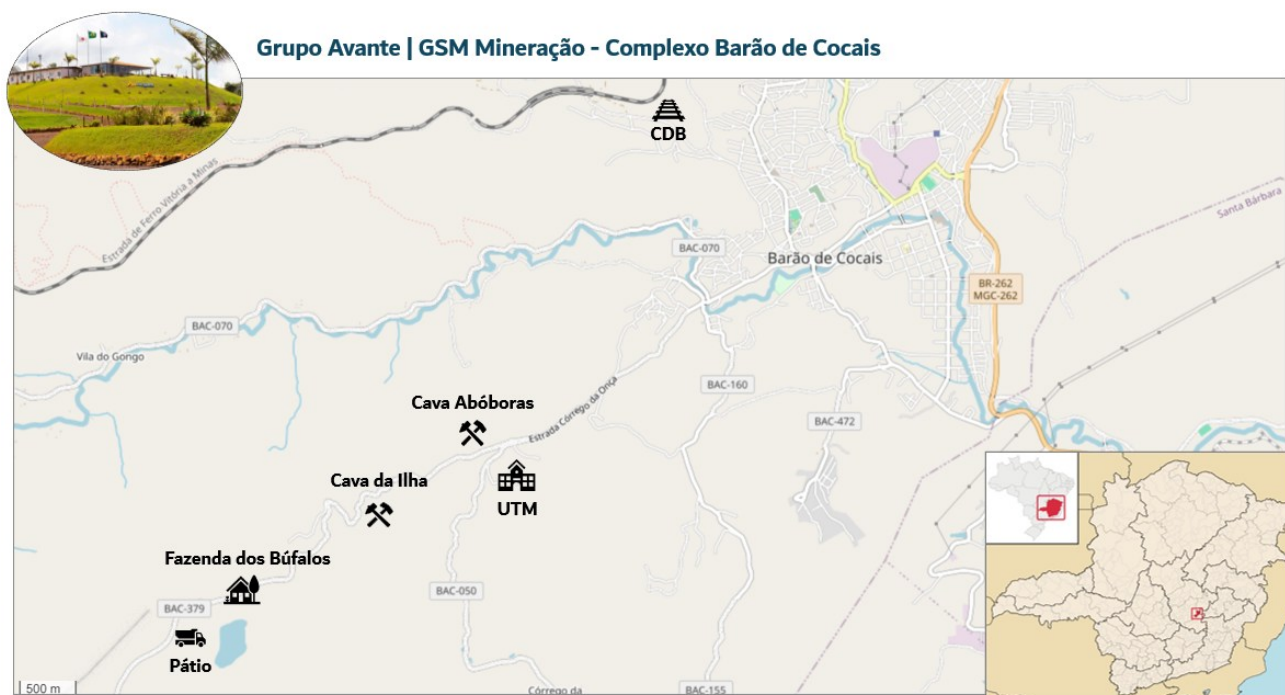


Figura 1. Localização das principais instalações da GSM Mineração em Barão de Cocais, Minas Gerais. Modificado de OpenStretMaps.

1.4. CONTEXTO GEOLÓGICO

1.4.1. GEOLOGIA REGIONAL E ESTRATIGRAFIA

A Mina CDO está situada na porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero (QF), uma província mineral polimetálica localizada na extremidade sul do Cráton São Francisco (Almeida, 1977) e formada por três grandes conjuntos de rochas: um complexo metamórfico basal representado por domos granito-gnáissicos de idade arqueana a paleoproterozoica; as sequências metavulcanossedimentares arqueanas do tipo *greenstone belt* que compõem o Supergrupo Rio das Velhas (SGRV); e as sequências metassedimentares de idade paleo- a mesoproterozoica arranjadas em megassinclinais interconectados, representadas pelos supergrupos Minas (SGM), Espinhaço (SGE) e Estrada Real (SGER) (Figura 2). Esta estratigrafia é ilustrada na Figura 3. Os complexos metamórficos de rochas cristalinas (Belo Horizonte, Bação, Bonfim, Caeté e Santa Bárbara) afloram em grande extensão como domos de gnaisses polideformados de composição tonalítica a granítica, com granitos, granodioritos, anfibolitos e metaultramafitos subordinados. O SGRV abrange rochas supracrustais numa típica sucessão *greenstone belt* composta de komatiitos, basaltos, vulcanoclásticas e metassedimentos carbonáticos e terrígenos e formações ferríferas bandadas, deformadas e metamorfizadas. O Grupo Nova Lima (Dorr, 1969) compõe a unidade basal, sendo representado por uma sequência metavulcanossedimentar calcialcalina com filitos, filitos grafitosos, clorita-xistos, sericita-xistos, metagrauvacas, rochas máficas e ultramáficas, formações ferríferas do tipo Algoma, metacherts e metadolomitos. O Grupo Maquiné (Dorr, 1969) é a unidade de topo, com ocorrência restrita à porção centro-leste. É reconhecido como uma associação metassedimentar clástica não-marinha, com uma fácies litorânea e fluvial. O SGM sobrepõe-se aos complexos metamórficos e o SGRV em contato tectônico, sendo composto pelos Grupos: Tamanduá, Caraça, Itabira, que tem como camada-guia as formações ferríferas do tipo Lago Superior, e Piracicaba (Dorr, 1969). O Grupo Caraça apresenta as Formações Moeda e Batatal, com a primeira constituída por quartzitos com intercalações de filito e níveis conglomeráticos, e a segunda por filitos sericíticos carbonosos ou ferruginosos. O Grupo Itabira é constituído por uma sequência de metassedimentos químicos iniciada pela Formação Cauê, formada por itabirito, itabirito dolomítico, dolomito ferruginoso e filito, seguida da Formação Gandarela, formada por dolomitos, filito dolomítico e dolomito silicoso. O Grupo Piracicaba engloba as formações Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro, caracterizadas pela alternância de quartzitos e filitos, frequentemente ferruginosos, filitos, filitos dolomíticos e lentes de dolomito, ortoquartzitos e filitos grafitosos. O SGER é composto pelos grupos Sabará e Itacolomi (Teixeira da Costa, 1961). O primeiro é constituído por clorita xistos e filitos, metagrauvacas, metaconglomerados, quartzitos e raras formações ferríferas, e o segundo de quartzitos, quartzitos conglomeráticos e lentes de conglomerado com seixos de itabirito, filito, quartzito e quartzo de veio em discordância sobre todas as demais unidades (Alkmim, 2004). O SGE indiviso abrange diversos quartzitos.

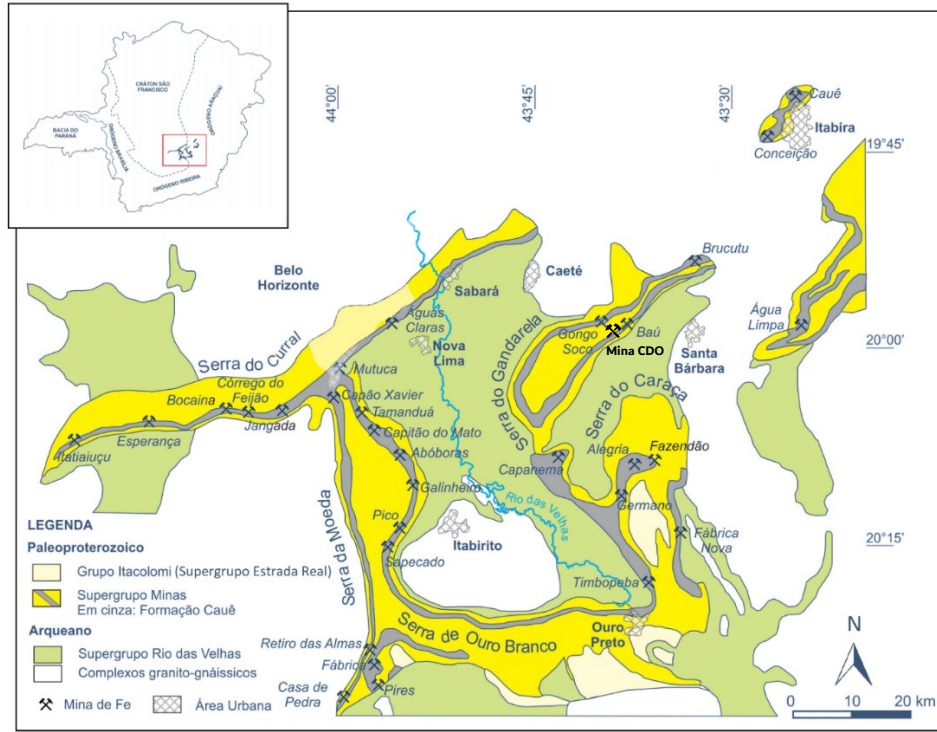
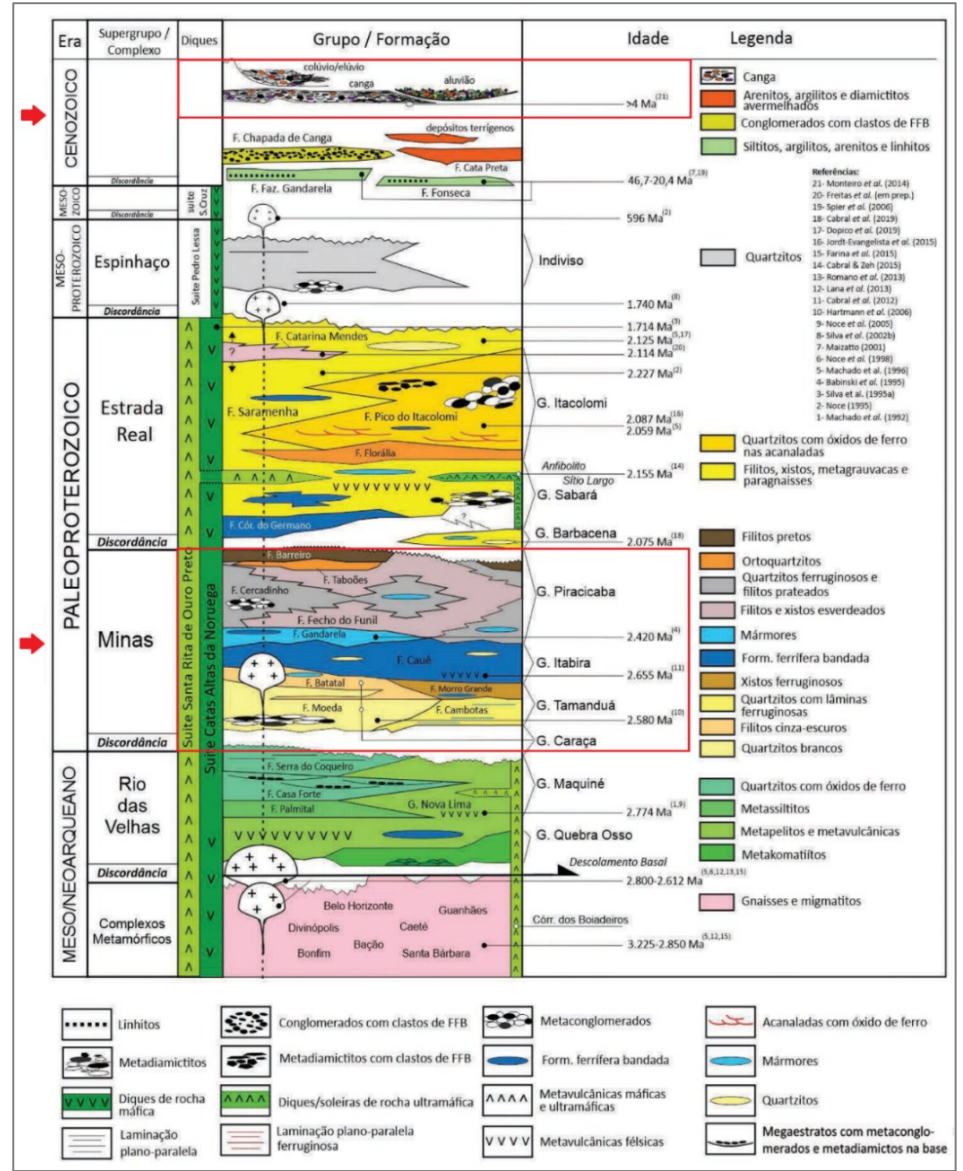


Figura 2. Mapa geológico simplificado do QF no contexto das Províncias Minerais de Minas Gerais e a localização das principais minas de ferro, dentre elas, a Mina CDO em preto. Modificado de Dorr (1969) *apud* Caxito & Dias (2018).

Figura 3. Coluna Estratigráfica do QF. As unidades identificadas na área da Mina CDO estão destacadas pelas setas e os retângulos em vermelho. Modificado de Endo *et al.* (2019b) *apud* Castro *et al.* (2020).



1.4.2. GEOLOGIA ESTRUTURAL

O embasamento cristalino do QF é constituído por rochas do SGRV de idade meso a neoarqueanas, afetadas por quatro eventos deformativos e metamorfismo de baixo a médio grau (Vieira & Oliveira, 1988), dos quais resultaram dos dois primeiros eventos megadobras isoclinais e xistosidade plano-axial, e dos dois últimos dobras suaves e clivagem de crenulação. Disposto sobre discordância, o SGM constitui-se de uma sucessão continental-marinha de pelo menos 3.424m de espessura (Dorr 1969), cuja deposição se deu entre $2.584 \pm 10\text{Ma}$ (Hartmann *et al.* 2006) e $2.420 \pm 19\text{Ma}$ (Babinski *et al.* 1995). Segundo Alkmim & Marshak (1998), este pacote representa um dos estágios de evolução de uma bacia de margem passiva (Alkmim & Martins Neto, 2012) com origem entre 2.6 e 2.4Ga, como bacia sílica ou bacia de margens passivas, resultante de um evento distensional sobre os terrenos arqueanos, o que se atesta pelos ambientes deposicionais dos Grupos Caraça e Tamanduá (Renger *et al.*, 1993). Posteriormente, seguiu-se um período de estabilidade tectônica, no qual ocorreu a sedimentação em plataforma dos itabiritos da Formação Cauê e dos dolomitos da Formação Gandarela, não existindo, contudo, uma nítida separação entre elas (Pires, 1995). No período em torno de 2.4Ga, o Grupo Itabira foi recoberto por sedimentos turbidíticos do Grupo Piracicaba, em discordância erosiva, marcando o início de uma fase de expansão oceânica nas regiões ao sul e a leste do QF (Noce, 1995).

Durante o Ciclo Transamazônico, há cerca de 2.1Ga, o QF foi afetado por um evento compressional, no qual desenvolveu-se um cinturão de rochas dobradas com estruturas resultantes vergentes para noroeste, caracterizado por zonas de cisalhamento associadas aos cavalgamentos e pela nucleação de megassinclinais e dobras de segunda ordem. Este ciclo culmina com a subducção da crosta oceânica e colisão ocorrida entre 2.065 e 2.035Ma. Concomitantemente, ocorreu o ciclo sedimentar sin-orogênico vulcanossedimentar do tipo *flysch* do Grupo Sabará, sucedido pela deposição de sedimentos molássicos do Grupo Itacolomi (Dardenne & Schobbenhaus, 2001). A evolução tectônica posterior envolveu uma sucessão de eventos compressionais e extensionais superpostos, destacando-se os eventos associados ao Ciclo Brasileiro, compreendido entre 0.7 e 0.45Ga, com estruturas de caráter compressivo vergentes para oeste, que afetaram com mais intensidade a porção leste da província, resultando em cinturões de cavalgamento e zonas de cisalhamento associadas.

O Sinclinal Gandarela

O Sinclinal Gandarela é uma megadobra localizada na porção norte do QF, formada por metassedimentos do SGM em contato com o Grupo Nova Lima e o Complexo Caeté, sendo considerada como uma região com grandes perspectivas para prospecção de minério de ferro (Endo & Rocha Filho, 2003). Dorr (1969) primeiramente classificou a estrutura como uma dobra com fechamento para sudeste e eixo orientado segundo a direção nordeste-sudoeste. Padilha (1982) caracterizou a geometria do Sinclinal através da inversão não-linear 2D de dados magnetométricos do Projeto Brasil-Alemanha (DNPM, 1974), onde a

Formação Cauê foi utilizada como camada-guia, concluindo que as estruturas tendem a se fechar em profundidade, mergulhando para sudeste. Endo *et al.* (2004) conceberam um modelo para região como um sinclinal antifórmico resultante de três fases deformacionais. A primeira resultou numa dobra recumbente com o SRV no interior da nucleação da dobra, a segunda proporcionou um redobramento do flanco inverso formando o Sinclinal Gandarela e a terceira foi a responsável por ocasionar a geração de uma dobra-falha em geometria cônica, afetando seu segmento oriental. A estrutura resultante adquiriu uma conformação de dobras reclinadas com eixos de direção leste-sudeste e caimento em torno de 35° (Figura 4).

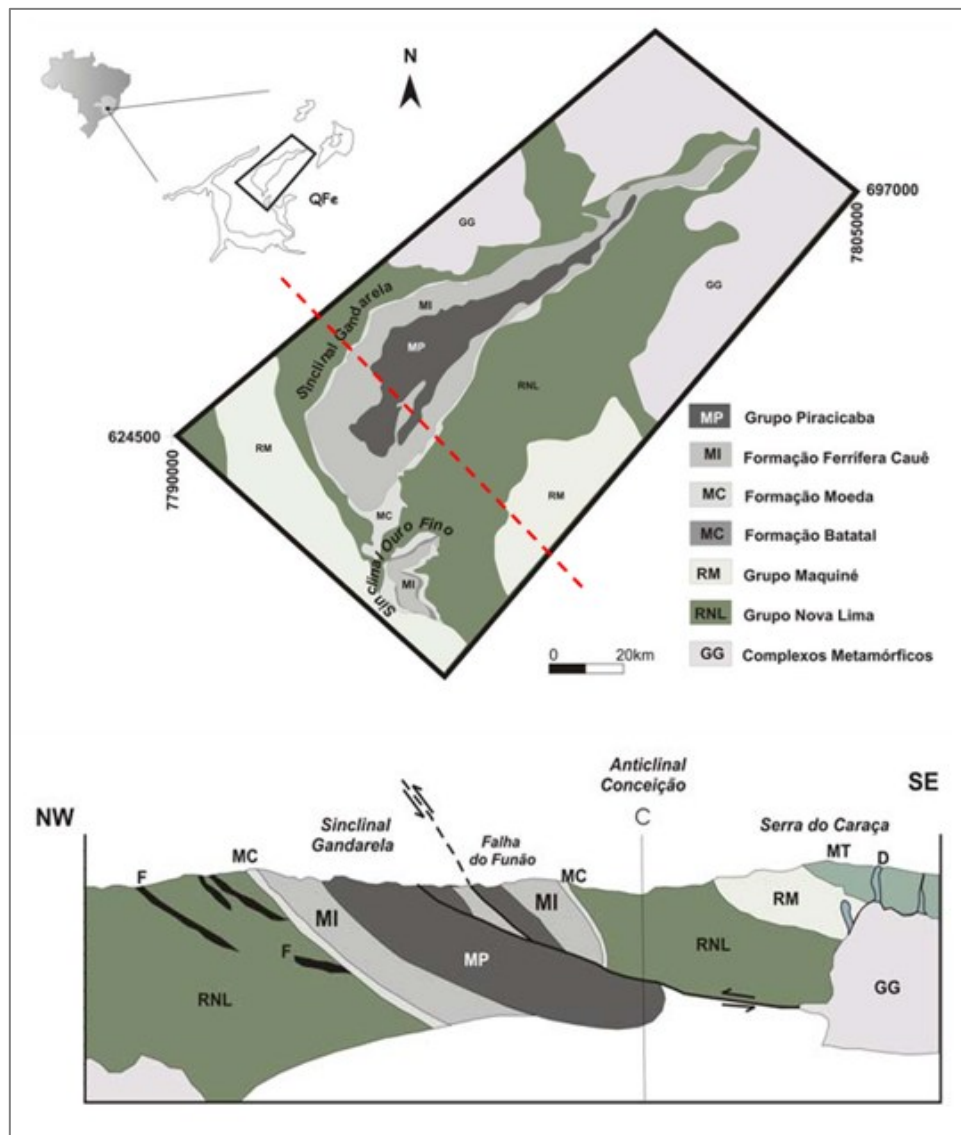


Figura 4. Localização do Sinclinal Gandarela no QF (QFe). Modificado de Dorr (1969) *apud* Oliveira *et al.* (2005).

1.4.3. GEOLOGIA LOCAL

A geologia da região de Barão de Cocais/MG está ligada à evolução da porção nordeste do QF, englobando rochas de idades arqueana e proterozoica cortadas por metabásicas intrusivas e tectonizadas em diversos eventos de dobramento, cisalhamento e falhamento. Hoje, estas rochas se encontram total ou parcialmente encobertas por sedimentos fanerozoicos. A geologia dessa porção está definida no Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero em escala 1:150.000, conforme esquematizado na Figura 5.

A Mina CDO está situada no flanco invertido do Sinclinal Gandarela, integralmente sobre litologias do SM e coberturas detríticas. Em escala local, a área é marcada pela estruturação da serra de direção nordeste-sudoeste, com topografia íngreme e o entorno apresentando relevo ondulado com formas arredondadas, frequentemente coberto por vegetação rasteira e árvores isoladas de pequeno porte a mata fechada, mais alta e densa, sobretudo próximo às drenagens. Cortes de estrada e frentes de lavra exibem rochas dos grupos Caraça, Itabira e Piracicaba. O Grupo Caraça aflora no extremo sudoeste da área, sendo representado essencialmente pelas formações Moeda e Batatal, compostas por quartzitos de cor cinza claro a branco, de granulação média a grossa, e filito prateado, respectivamente. O Grupo Itabira, unidade onde estão hospedados os depósitos de ferro, compõe-se de rochas itabiríticas quartzosas e anfibolíticas, bandadas, laminadas e maciças. A Formação Cauê é representada por quartzo itabiríticos bandados, de cor cinza, muito magnéticos, com frequentes passagens anfibolíticas, em contato gradacional e/ou interdigitada à Formação Gandarela. Esta é representada por itabiríticos dolomíticos, com bandamento bem preservado, localmente dobrado e falhado, nas cores cinza e branco quando frescos, ocre quando degradados, além de dolomitos maciços a laminados, por vezes margosos, em tons de marrom mosqueado de branco, com granulação fina. Na porção norte da área, ocorre o Grupo Piracicaba representado pela Formação Cercadinho, composta por quartzo-sericita filitos laminados e localmente ferruginosos, de cor cinza escuro, normalmente saprolitizados, com foliação bem-marcada e constante, localmente perturbada por fraturas e dobras de segunda ordem. Estes litotipos se encontram parcialmente encobertos por uma carapaça ferruginosa e/ou depósitos sedimentares de idade cenozoica, representados por colúvios, solos e sedimentos inconsolidados, como clastos rolados de itabirito, hematita e quartzo mal selecionados, dispersos ou abundantes em matriz de textura silto-argilosa, mais ou menos magnética. A granulometria é muito variada, sendo comum a intercalação de níveis argilosos com níveis granulados, de tamanho areia a matacão, e espessura centimétrica a métrica, distribuindo-se a partir das cotas mais elevadas em direção à área de operações, a sudoeste. Entre a base dos colúvios e o topo dos itabiríticos é comum a presença de um horizonte marcado por cangas lateríticas. São depósitos estratiformes subparalelos a subverticais, usualmente compactos e porosos, de elevada dureza e coloração amarelo e vermelho. Essas tipologias são apresentadas no mapa (Figura 6) e nas imagens a seguir (Figura 7).

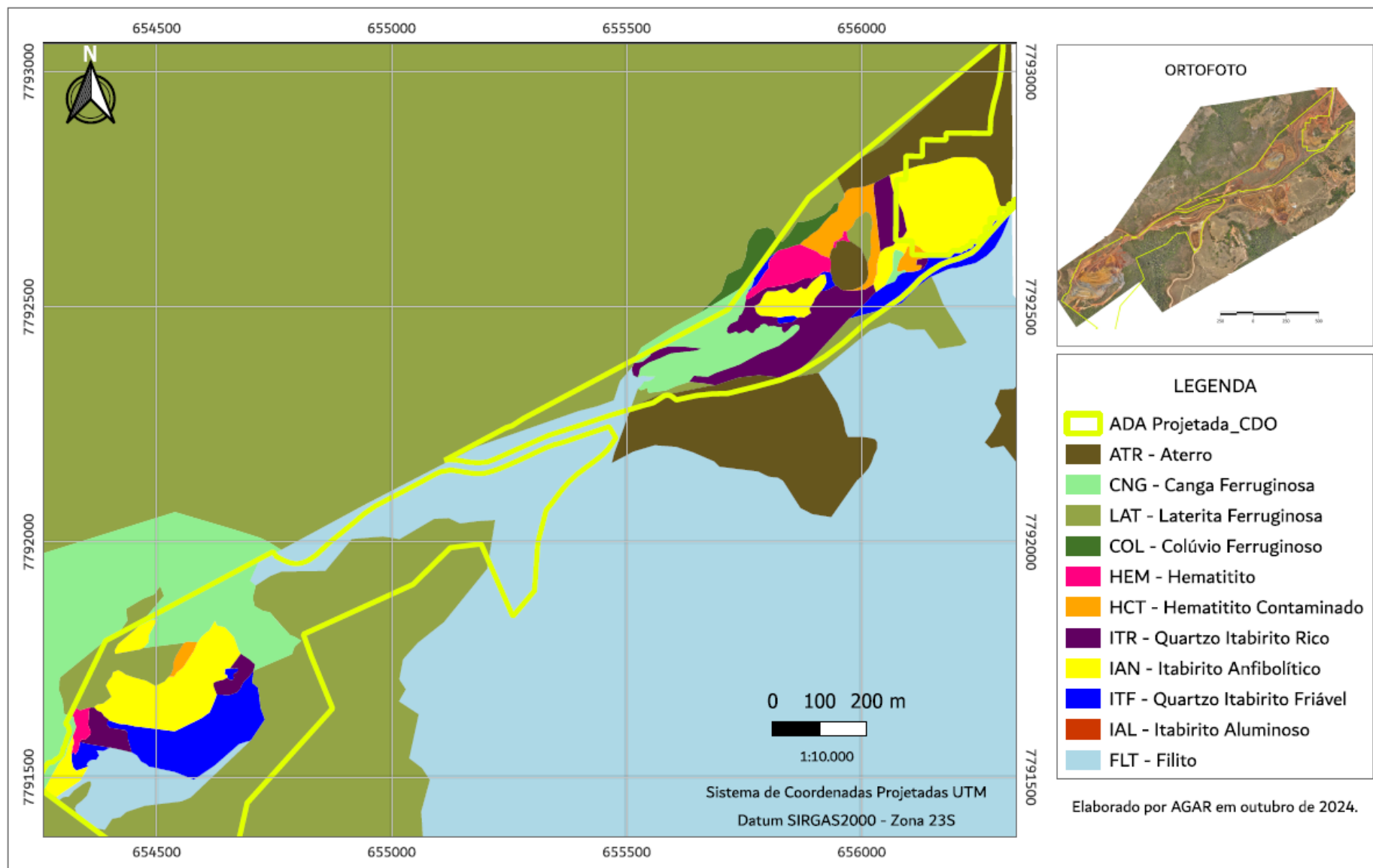


Figura 6. Mapa geológico simplificado da Mina CDO. Elaborado pela autora.

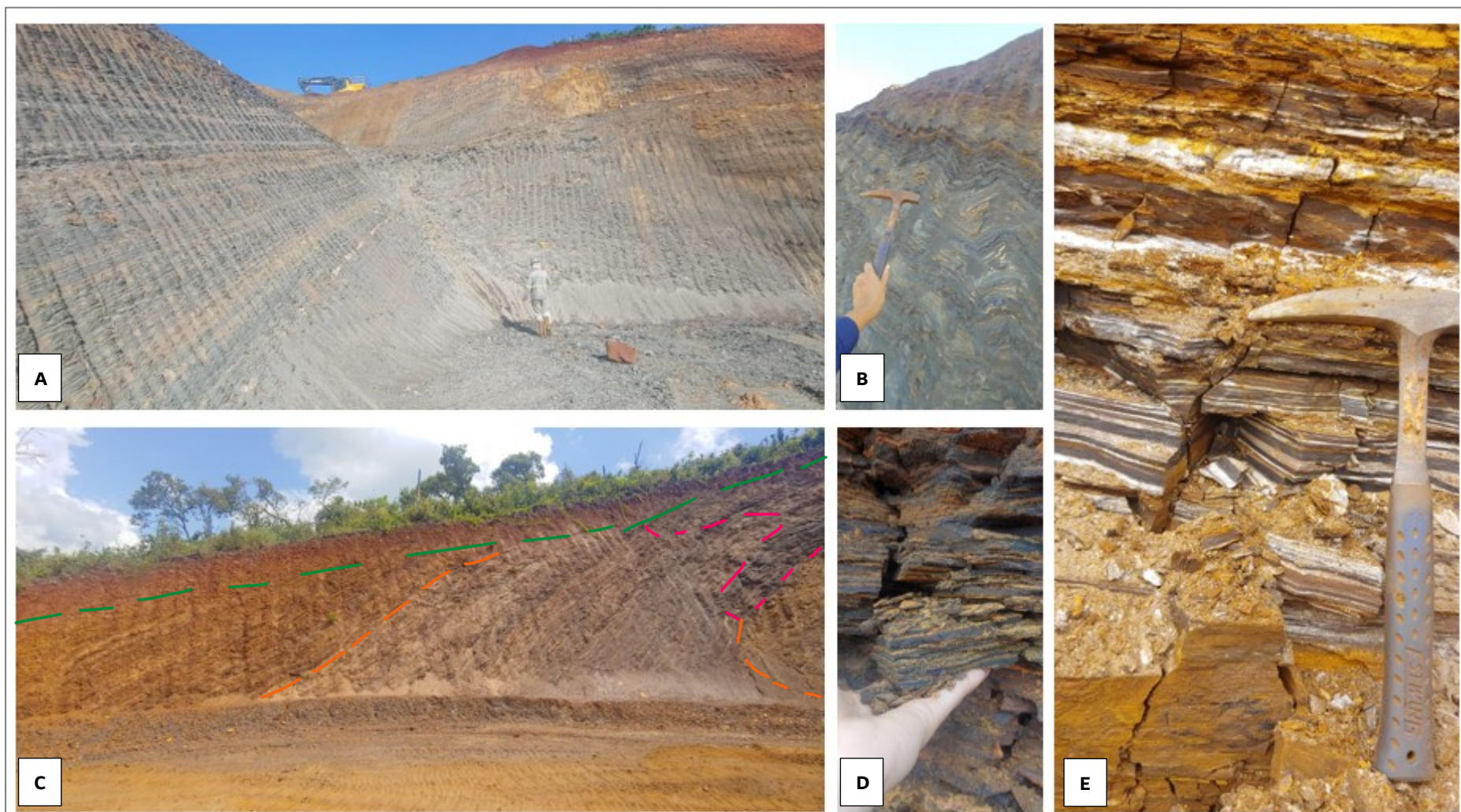


Figura 7. Ocorrência na Mina CDO dos litotipos estudados: **A)** Frente de lavra dos itabiritos (sobretudo quartzosos); **B)** Quartzo itabiritos bandados em detalhe na parede de um talude da mina; **C)** Contato transicional entre as fácies quartzosa e anfibolítica (linha tracejada em laranja) e zona enriquecida (linha tracejada em rosa) com canga e laterita ferruginosas no topo (linha tracejada em verde), em talude final da mina; **D)** Itabirito anfibolítico mostrado em detalhe em afloramento localizado na área operacional da mina; **E)** Intercalação das fácies quartzosa e anfibolíticas compactas em afloramento na área operacional da mina. Imagens da autora.

2. METODOLOGIA

O mapeamento de pontos críticos, a definição da estratégia de trabalho e o planejamento e a amostragem foram realizados na área operacional da GSM, em Barão de Cocais/MG. O fluxo de trabalhos da pesquisa é ilustrado esquematicamente na imagem Figura 8.

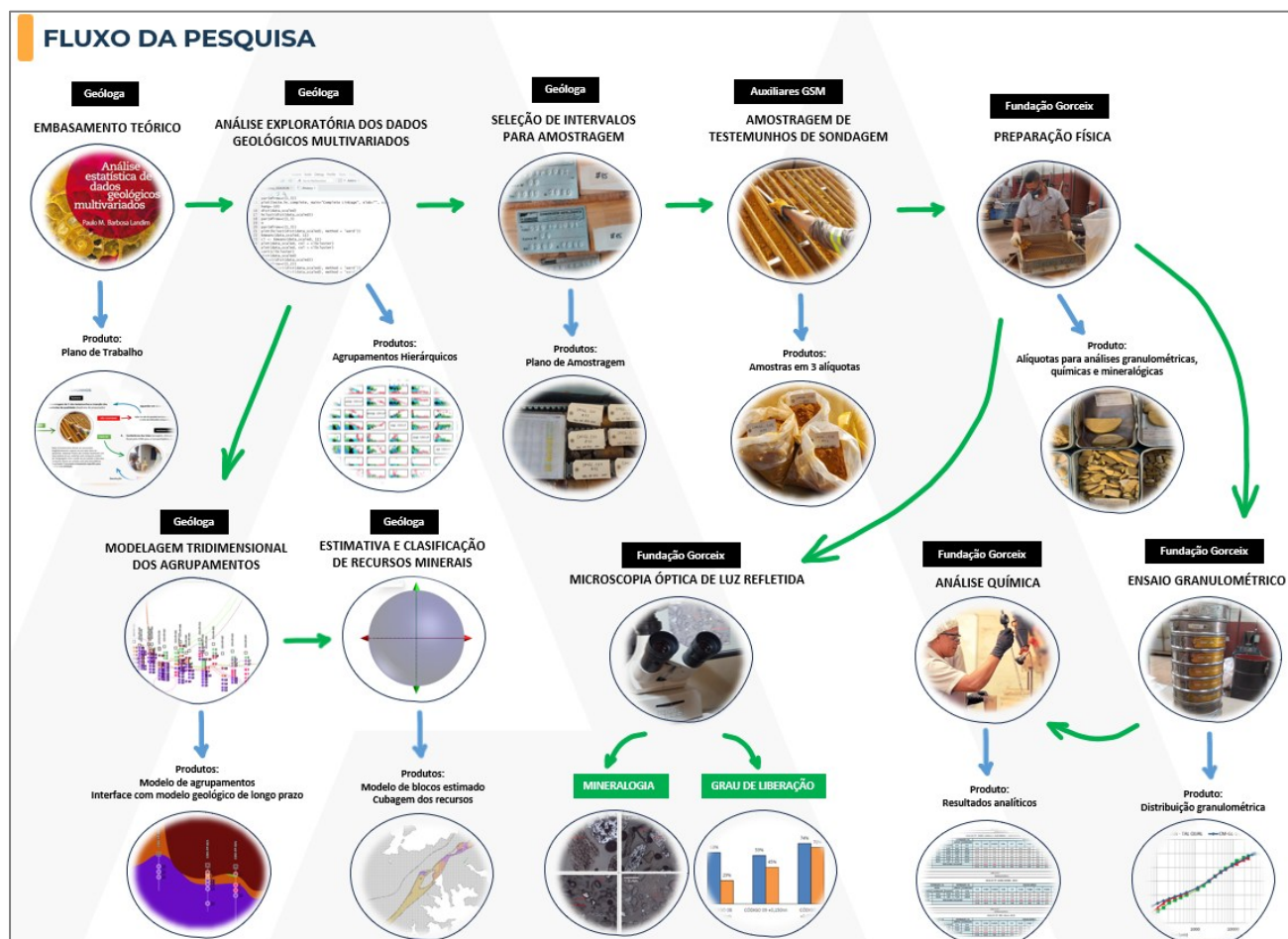


Figura 8. Fluxo de trabalho com as atividades do plano de pesquisa. Elaborado pela autora.

2.1. ANÁLISE EXPLORATÓRIA DE DADOS GEOLÓGICOS MULTIVARIADOS

Uma base de dados composta por 903 (novecentos e três) resultados de ensaios granuloquímicos de 80 (oitenta) furos de sondagem geológica foi filtrada e tratada estatisticamente por meio dos *softwares* Microsoft Excel© e RStudio©, respectivamente, onde buscou-se identificar correlações entre os dados químicos e hierarquizar as amostras em grupos de acordo com a sua similaridade. Estes grupos foram associados aos litotipos geológicos mapeados em escala de frente de lavra e modelados em ambiente tridimensional. Foram analisadas as variáveis Fe, SiO₂, Al₂O₃, Mn, P, MgO, CaO, LOI e FeO na amostra global e porcentagem da fração G1 (soma das frações superiores a 6,3mm), além da umidade relativa da amostra (H₂O).

2.2. MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DOS AGRUPAMENTOS

O modelo tridimensional dos agrupamentos representados pelos 6 (seis) *clusters* de interesse foi realizado em escritório com o *software* Micromine®. Os corpos de minério foram modelados por meio das ferramentas de modelagem implícita, obedecendo-se os parâmetros descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de modelagem dos agrupamentos.

Parâmetros de Modelagem				
Número de Furos	80	Resolução	Dinâmica	
Número de Clusters	6	Ponderação	Isotrópico	
Número de Amostras	903	Datum	SIRGAS2000	
Tipo de Modelagem	Implícita	Extensões do Modelo	Mínimo (m)	Máximo (m)
Padrão de Modelagem	Intrusão	X	652.460,90	656.535,44
Interpolação	Linear Clássico	Y	7.789.548,26	7.793.214,62
Deslocamento	Nenhum	Z	461,09	1.116,35

2.3. ESTIMATIVA E CLASIFICAÇÃO DE RECURSOS MINERAIS

O modelo tridimensional dos agrupamentos foi usado para discretizar os litotipos Itabirito Anfibolítico (IAN) e Itabirito Friável (ITF) anteriormente modelados pela equipe de Planejamento de Mina e Geologia do Grupo Avante. Os corpos de minério foram sobrepostos ao modelo de blocos já existente e a estimativa de recursos foi realizada no *software* Micromine®. O modelo de blocos foi estimado de acordo com o método do Inverso da Potência das Distâncias (IPD), obedecendo-se os parâmetros descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros para estimação do recurso.

Parâmetros para Estimativa						
Método de Estimação	IPD	Variáveis	Rodada	Raio de Busca	Mínimo de Amostras	Classificação do Recurso
Ordem	2	Fe	1	25	3	Medido
Elipsoide de Busca	Geológico	SiO ₂	2	50	2	Indicado
Strike	70	Al ₂ O ₃	3	100	1	Inferido
Díp	40	P	4	200	1	Potencial
Plunge	0	Mn	5	-	-	Estéreis
Fator de Busca	Anisotrópico	LOI	Frações		Dimensões dos Blocos	
X	4.6	CaO	g1	+19mm	X	25m
Y	2.0	MgO	g2	-19+16mm	Y	25m
Z	1.0	FeO	g3	-16mm	Z	10m
						Sub-blocos
						12,5m
						12,5m
						5m

2.4. SELEÇÃO DE INTERVALOS PARA AMOSTRAGEM

Para a composição das amostras representativas do recurso, foram selecionados ao todo 50 (cinquenta) intervalos de 17 (dezessete) furos distintos, distribuídos ao longo das áreas denominadas Cava da Ilha, Cava Abóboras e Entre Cavas (Figura 9). Os critérios para validação dos intervalos foram a continuidade lateral e em profundidade do domínio (pelo menos 10m de continuidade nas direções X, Y e Z do modelo geológico), exemplificadas pelas seções gráficas na Figura 10. O plano de amostragem é apresentado na Tabela 3.

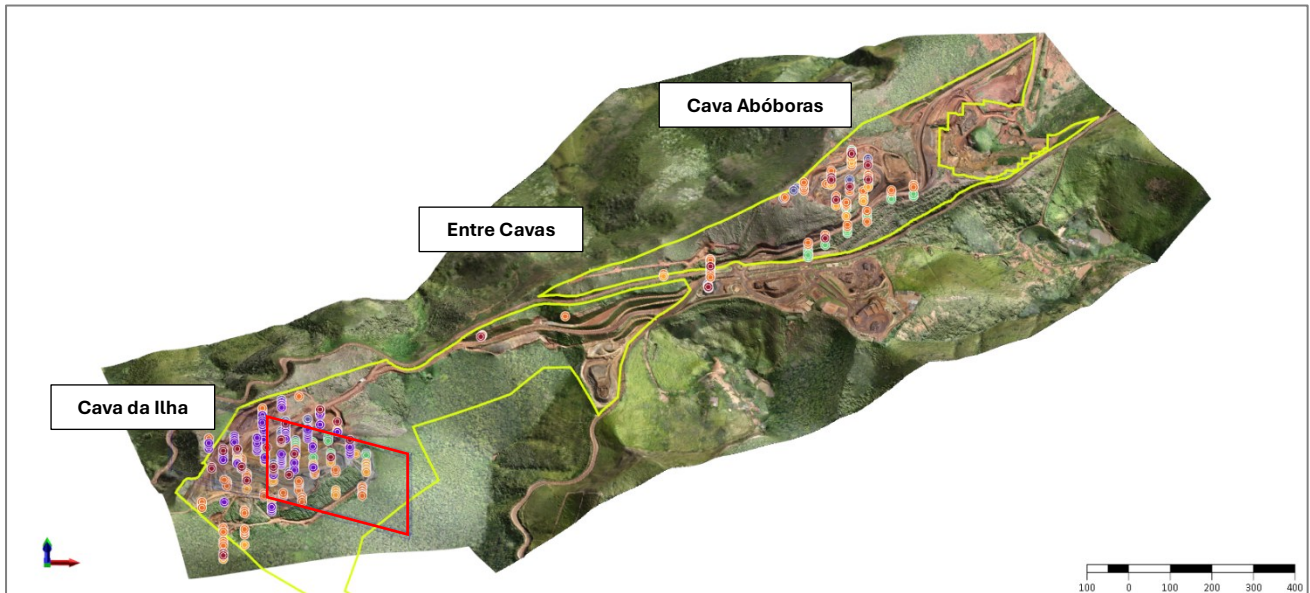


Figura 9. Localização das amostras disponíveis no contexto das áreas operacionais da UTM Barão de Cocais. Os polígonos em amarelo correspondem aos limites da ADA da GSM Mineração. A posição da seção gráfica da Figura 10 é indicada em vermelho.

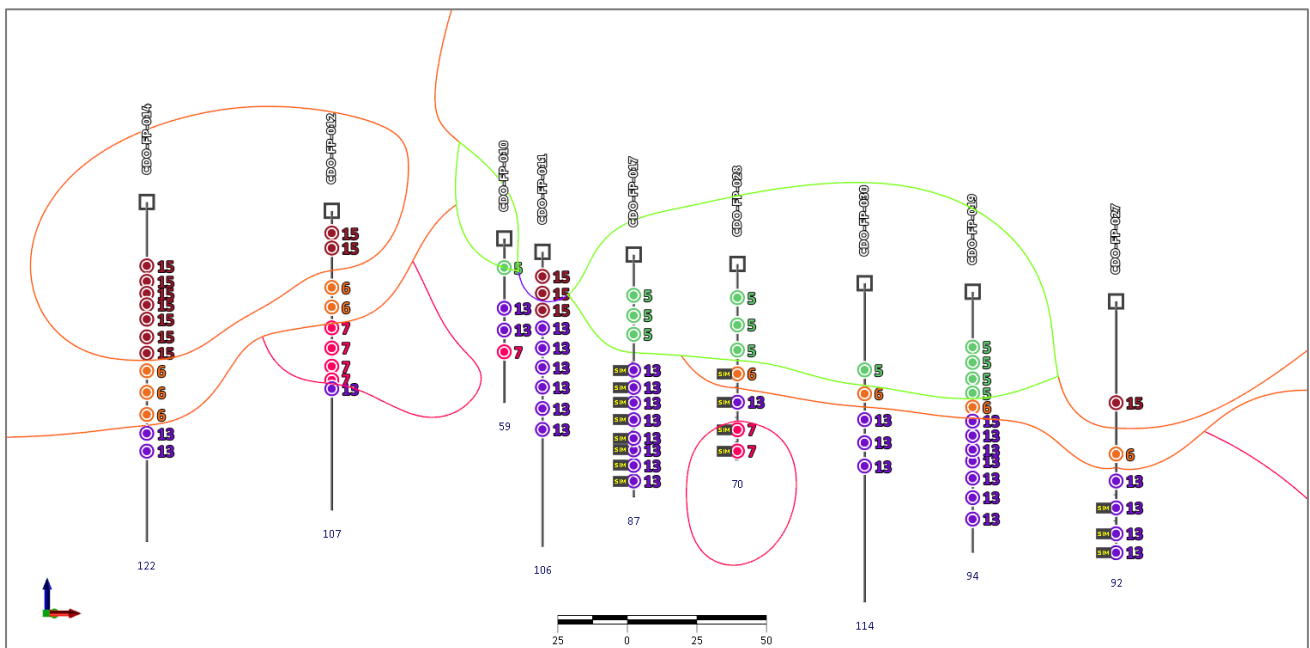


Figura 10. Seção gráfica de direção sudoeste-nordeste sobre a Cava da Ilha, ilustrando a posição das amostras presentes na base de dados e o *cluster* ao qual pertencem, além do traçado dos sólidos modelados tridimensionalmente. Os pontos amostrados no âmbito deste trabalho estão sinalizados com a palavra “SIM”.

Tabela 3. Plano de amostragem de testemunhos de sondagem. Fonte dos dados: Grupo Avante | GSM Mineração.

Plano de Amostragem de Testemunhos de Sondagem															
Cluster	Litotipo	Procedência	Furo	Amostra	De (m)	Até (m)	Comprimento (m)	Cluster	Litotipo	Procedência	Furo	Amostra	De (m)	Até (m)	Comprimento (m)
05	IAN	Cava da Ilha	CDO-FP-028	CDO-FP-028_004	16,65	27,15	10,50	06	ITF	Cava da Ilha	CDO-FP-062	CDO-FP-062_002	9,70	19,75	10,05
				CDO-FP-028_005	27,15	34,65	7,50					CDO-FP-062_003	19,75	27,70	7,95
		Cava Abóboras	CDO-FP-053	CDO-FP-053_005	24,00	34,00	10,00			CDO-FP-062_004	27,70	37,45	9,75		
				CDO-FP-053_006	34,00	43,80	9,80			CDO-FP-075_010	56,70	66,25	9,55		
		Entre Cavas	CDO-FP-056	CDO-FP-056_006	43,55	47,80	4,25			CDO-FP-075_011	66,25	75,00	8,75		
				CDO-FP-056_007	47,80	56,10	8,30			CDO-FP-075_012	75,00	84,10	9,10		
CDO-FP-056_008	56,10	65,00	8,90	CDO-FP-044_005	30,65	37,91	7,26								
15	IAN	Cava da Ilha	CDO-FP-020	CDO-FP-020_006	31,45	37,40	5,95	07	ITF	Cava da Ilha	CDO-FP-044	CDO-FP-044_006	37,91	42,70	4,79
				CDO-FP-020_007	37,40	41,41	4,01					CDO-FP-071_009	48,05	57,65	2,40
				CDO-FP-020_008	41,41	46,41	5,00					CDO-FP-071_010	57,65	67,60	2,49
		Cava da Ilha	CDO-FP-031	CDO-FP-031_004	19,05	28,80	9,75			CDO-FP-071_011	67,60	77,30	2,43		
				CDO-FP-063_005	27,10	37,05	9,95			CDO-FP-077_007	39,95	42,95	3,00		
		Cava Abóboras	CDO-FP-063	CDO-FP-063_006	37,05	47,05	10,00			CDO-FP-077_009	47,17	57,10	9,93		
CDO-FP-069_014	103,35			112,55	9,20	CDO-FP-077_010	57,10	66,38	9,28						
Cava da Ilha	CDO-FP-069	CDO-FP-069_015	112,55	121,60	9,05	CDO-FP-077_011	66,38	73,75	7,37						
		CDO-FP-077_012	73,75	78,22	4,47	CDO-FP-017_007	38,60	44,30	5,70						
17	IAN	Cava da Ilha	CDO-FP-031	CDO-FP-031_006	38,09	47,09	9,00	13	ITF	Cava da Ilha	CDO-FP-017	CDO-FP-017_008	44,30	51,00	6,70
				CDO-FP-031_008	53,72	57,71	3,99					CDO-FP-017_009	51,00	55,30	4,30
		Cava Abóboras	CDO-FP-043	CDO-FP-043_004	24,48	28,51	4,03			CDO-FP-017_010	55,30	63,25	7,95		
				CDO-FP-043_005	28,51	38,41	9,90			CDO-FP-017_011	63,25	68,60	5,35		
		Cava da Ilha	CDO-FP-050	CDO-FP-050_005	26,60	29,95	3,35			CDO-FP-017_012	68,60	71,60	3,00		
				CDO-FP-050_006	29,95	33,15	3,20			CDO-FP-017_013	71,60	79,70	8,10		
		CDO-FP-050_007	33,15	37,30	4,15	CDO-FP-017_014	79,70			82,80	3,10				
		Cava Abóboras	CDO-FP-063	CDO-FP-063_007	47,05	55,85	8,80			CDO-FP-044_007	42,70	52,70	10,00		
CDO-FP-077_004	16,25			23,05	6,80										
Cava da Ilha	CDO-FP-077	CDO-FP-077_005	23,05	32,25	9,20										

2.5. AMOSTRAGEM DE TESTEMUNHOS DE SONDAGEM

A amostragem dos testemunhos de sondagem foi realizada na Fazenda dos Búfalos, em Barão de Cocais/MG. Os intervalos pré-selecionados foram localizados nos *containers* onde ficam alocados os testemunhos (Figura 11) e colocados sobre as bancadas. Após validação, $\frac{1}{4}$ (um quarto) de cada intervalo foi coletado pelos auxiliares de geologia, homogeneizado e dividido em três alíquotas de igual massa. As alíquotas foram etiquetadas, pesadas e seladas (Figura 12). Duas partes foram enviadas à Fundação Gorceix e uma foi mantida para reserva na GSM. A amostra final é constituída pelos incrementos de um mesmo *cluster*. A composição das amostras finais foi realizada no galpão de preparação física da Fundação Gorceix, em Ouro Preto/ MG, por equipe própria.



Figura 11. A) Caixas de testemunhos de sondagem alocadas no interior dos containers; B) e C) Localização dos furos pré-selecionados para amostragem e marcação das caixas de interesse de acordo com os *clusters*. Imagens da autora.



Figura 12. A), B) e C) Amostragem de $\frac{1}{4}$ dos intervalos dos testemunhos selecionados, por intervalo; D) Amostra de um intervalo completo; E) e F) Separação da amostra de um intervalo completo em três alíquotas iguais; G) Confecção das etiquetas; H) Pesagem das alíquotas individualmente. Imagens da autora.

2.6. PREPARAÇÃO FÍSICA

A composição das amostras finais para os testes foi realizada a partir dos intervalos amostrados na Fazenda dos Búfalos. A preparação física foi realizada nos laboratórios do Departamento de Tecnologia em Mineração e Metalurgia (DETEMM) da Fundação Gorceix, em Ouro Preto/MG, com equipe própria sob supervisão de profissionais designados pelo Grupo Avante (Figura 13), de acordo com um fluxograma especificamente elaborado para este fim (Figura 14), seguindo-se os procedimentos operacionais internos.



Figura 13. Preparação física das amostras na Fundação Gorceix: **A)** Homogeneização; **B)** Peneiramento e classificação; **C)** Quarteamento manual e **D)** Quarteamento automatizado. Imagens da autora.

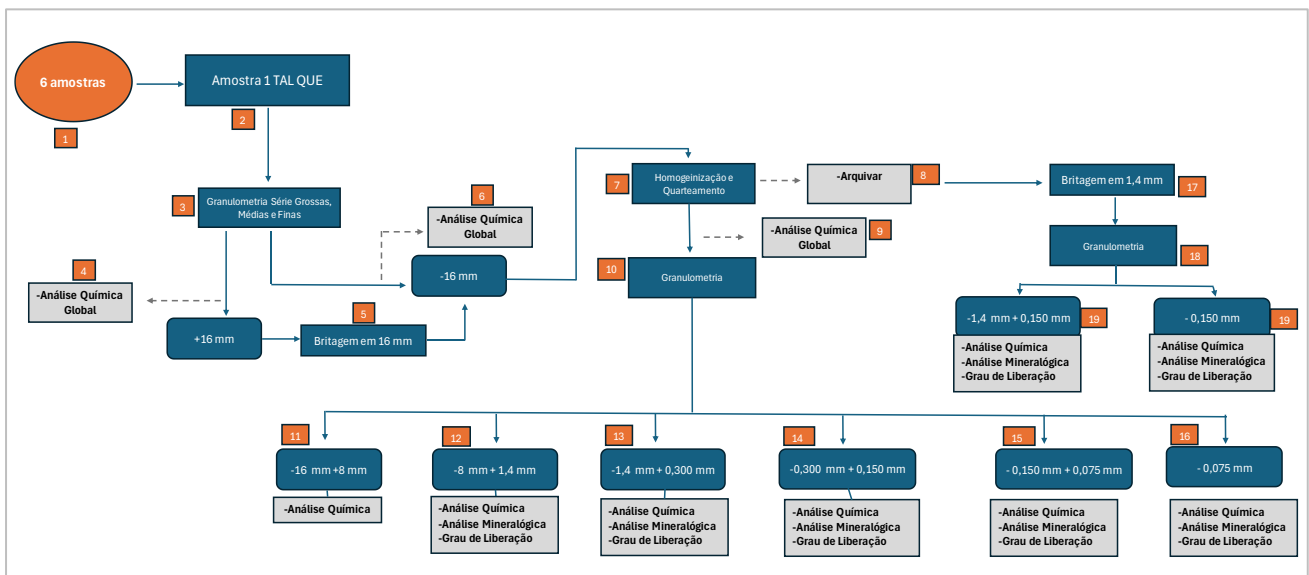


Figura 14. Fluxograma de preparação física das amostras. Fonte das informações: Grupo Avante | GSM Mineração.

2.7. ENSAIOS GRANULOMÉTRICOS

Após a composição (Figura 15), as seis amostras (uma de cada *cluster*) foram homogeneizadas, britadas em 16mm e classificadas nas frações granulométricas: $-16,0\text{mm} + 8,0\text{mm}$; $-8,0\text{mm} + 1,4\text{mm}$; $-1,4\text{mm} + 0,300\text{mm}$; $-0,300\text{mm} + 0,150\text{mm}$; $-0,150\text{mm} + 0,075\text{mm}$ e $0,075\text{mm}$. Para cada fração foi gerada uma alíquota destinada à análise química e outra para confecção da pastilha para a microscopia óptica. Uma fração da amostra britada em 16mm foi britada em 1,4mm, gerando dois produtos adicionais: $-1,4\text{mm} + 0,150\text{mm}$ e $-0,150\text{mm}$, com as quais também foram realizadas as análises granulométricas, química e mineralógica. A Figura 16 ilustra os produtos obtidos nas fases de homogeneização, quarteamento e peneiramento da amostra do *Cluster 06*.

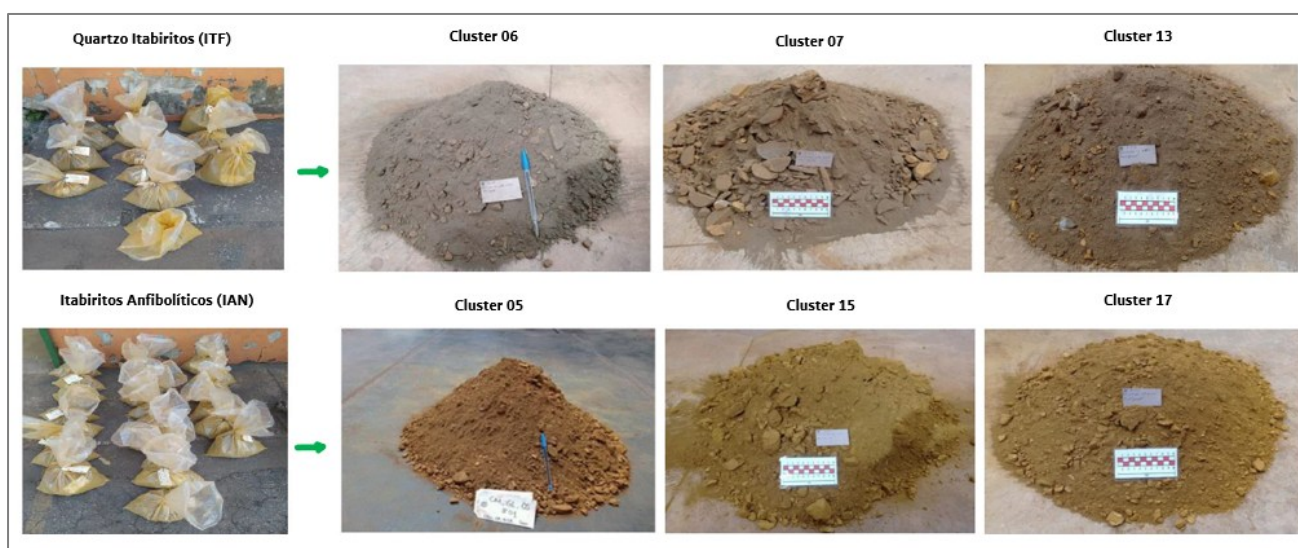


Figura 15. Composição das amostras de cada *cluster* a partir das alíquotas individuais por furo. Fonte das imagens: Fundação Gorceix.



Figura 16. Preparação das amostras do Cluster 06: **A)** Formação da pilha para homogeneização e quarteamento do ROM global tal qual; **B)** Fração $>16,0\text{mm}$ natural originada do peneiramento do ROM global tal qual; **C)** Fração $<16,0\text{mm}$ natural originada do peneiramento do ROM global tal qual; **D)** Fração $>16,0\text{mm}$ natural britado em 100% abaixo de 16,0mm; **E)** Blend global $<16,0\text{mm}$ ($+16,0\text{mm}$ britado e $-16,0\text{mm}$ natural). Fonte das imagens: Fundação Gorceix.

2.8. GEOQUÍMICA

As análises químicas foram realizadas na Fundação Gorceix, em Ouro Preto/MG, via fluorescência de raios-X (com equipamento Panalytical/Zetium), em pastilhas fundidas ao tetraborato de lítio. Foram analisados os elementos Fe, SiO₂, Al₂O₃, Mn, P, CaO, MgO, TiO₂, Na₂O, K₂O e Cr₂O₃, com fechamento estequiométrico aceitável entre 99% e 101%. A determinação da perda por calcinação (LOI) foi realizada conforme as normas ASTM E1621-21 e ISSO 11536:2015.

2.9. ENSAIOS GRANULOMÉTRICOS

Os ensaios granulométricos série grossa e fina foram realizados com peneiradores suspensos com adição de água controlada, sob as seguintes condições:

- Amostra tal qual, classificado em malha de 16,0mm;
- Amostra britada em 1,4 mm, classificado em malha de 0,15mm;
- Amostra britada em 16mm, com peneiramento nas malhas de 8.0mm; 1.4mm; 0.3mm; 0.15mm; 0.075mm e -0.075mm.

2.10. MICROSCOPIA ÓPTICA DE LUZ REFLETIDA

Para cada uma das seis amostra, foram preparadas seis pastilhas ou seções polidas, nas faixas +0,105mm; +0,075mm; + 0,044mm e -0,044mm. A caracterização mineralógica e a determinação do grau de liberação para as trinta e seis pastilhas foram realizadas visualmente por meio de técnicas de identificação e classificação minerais com o auxílio de microscopia óptica de luz refletida. Os trabalhos foram conduzidos nos laboratórios da Fundação Gorceix, em Ouro Preto/MG, por equipe técnica própria. Foi utilizado um microscópio petrográfico polarizante modelo DM750P, fabricante Leica, com câmera acoplada modelo EC3 e *software* LAS V4.13© para processamento das imagens. As lentes objetivas utilizadas na quantificação mineralógica variaram entre os aumentos de 5x, 10x, 20x e 50x, conforme a granulometria da seção. Em cada pastilha foram contados com o auxílio de um ábaco pelo menos 500 (quinhentos) grãos, sendo consideradas partículas livres aquelas em que a proporção entre os minerais-minério de ferro e os minerais de ganga foram iguais ou superiores a 95%.

2.10.1. MINERALOGIA

A análise mineralógica consistiu na determinação da percentagem em área dos minerais-minério (e.g. magnetita, hematita, martita¹ e goethita) e minerais de ganga (e.g. quartzo, gibbsita, argilominerais e/ou minerais terrosos e silicatos diversos) presentes no campo de visão das pastilhas ao microscópio.

2.10.2. GRAU DE LIBERAÇÃO

O estudo do grau de liberação foi realizado por contagem e classificação dos grãos livres, mistos e com inclusões, tendo sido calculado segundo o método formulado de Gaudin (1939):

$$\text{Grau de Liberação} = \frac{\text{Área mineralizada das partículas livres}}{\text{Área mineralizada das partículas livres + mistas}} \times 100$$

Equação 1. Determinação do grau de liberação pelo método convencional (Gaudin, 1936).

¹ Martitização é a transformação (oxidação) de magnetita (Fe₃O₄) em hematita (Fe₂O₃), mantendo a forma externa (pseudomorfismo) octaédrica dos cristais de magnetita em variedade designada de Martita. Fonte: Winge, M. *et al.* 2018. Glossário Geológico Ilustrado. Disponível em: <https://sigep.eco.br/glossario>.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. CHAVE DE CLASSIFICAÇÃO LITOQUÍMICA

A chave de classificação litoquímica foi definida pela equipe de Geologia do Grupo Avante (Figura 17) e levou em consideração critérios visuais (e.g. elúvio *versus* colúvio), fatores de enriquecimento (e.g. teores de corte de ferro total na fração global), presença de contaminantes (e.g. teores de corte dos principais elementos deletérios) e compacidade (e.g. porcentagem de material retido na peneira W1²). Os litotipos são mapeados na mina em escala de detalhe e modelados em ambiente tridimensional de acordo com uma Classificação Visual (CLV). Amostras de frente-de-lavra e testemunhos de sondagem passam pelo crivo dos resultados geoquímicos, produzindo uma Classificação Matemática (CLM). A combinação de ambas culmina na Classificação Interpretada (CLI).

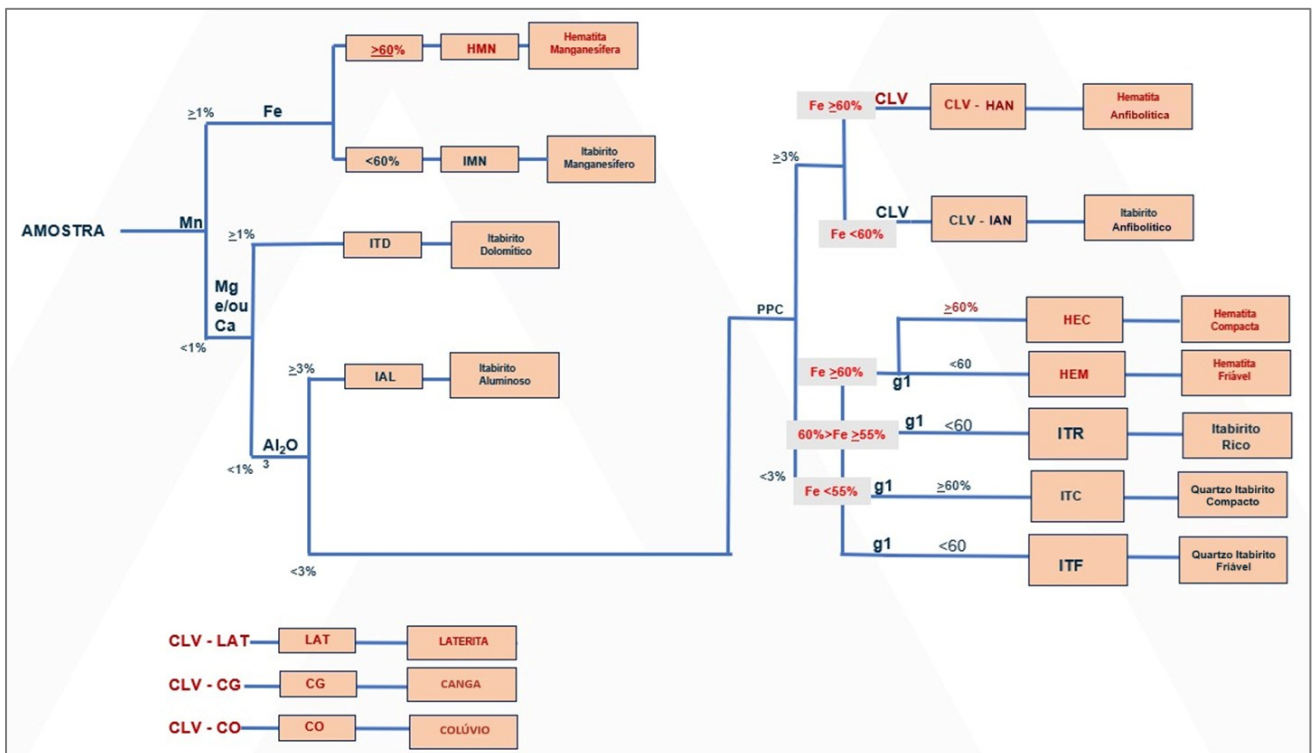


Figura 17. Chave de classificação litoquímica da Mina CDO. Fonte: Grupo Avante. | GSM Mineração.

² O fluxograma de preparação física para ensaio granulométrico a seco mais recente consiste na pesagem da amostra inicial, secagem a 105°C, peneiramento total a seco nas malhas de 19mm (W1), 16 mm (W2), 6,3 mm (W3) e 6,3mm (W4). Para cada uma das frações geradas é realizada a pesagem, britagem de 75% a 3mm, homogeneização e quarteamento tipo Jones, pulverização de 250 a 300g de cada alíquota em moinho de aço de 95% a 150#. SGS GEOSOL, 2024. Proposta Técnica QT-020967/10. Para os resultados gerados a partir de fluxogramas mais antigos, foi realizado um cálculo ponderado para ajuste das frações obsoletas à metodologia atual.

3.2. ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS

A análise exploratória dos dados geológicos multivariados identificou as correlações entre as 10 (dez) variáveis químicas e agrupou as amostras em 17 (dezesete) *clusters* em função da sua similaridade (Figura 20). Os resultados são apresentados nos dendrogramas de agrupamento hierárquico (Figura 18 e Figura 19), onde é possível avaliar a interrelação entre as variáveis em estudo (Modo R), a partir do qual foram definidos 17 (dezesete) grupos, de acordo com o coeficiente de dissimilaridade (Modo Q). As variáveis Fe e SiO₂ apresentaram boa correlação em todos os grupos de itabiritos, sobretudo os quartzosos (Figura 21). As variáveis Al₂O₃ e LOI (Figura 23) apresentaram alta correlação apenas para os quartzo itabiritos (Figura 22). As variáveis Fe e granulometria G1 (>6,3mm) apresentaram alta dispersão em todos os grupos, provavelmente devido à ação do intemperismo, sendo as melhores correlações entre os litotipos estéreis (Fe global <30%).

Cada grupo apresenta uma assinatura geoquímica distinta (ANEXO I – e foi relacionado aos litotipos previamente mapeados na jazida (Tabela 4). A comparação é feita em função do tipo de depósito mineralizado e a presença relativa de elementos contaminantes, servindo como uma validação dos resultados obtidos na análise exploratória. Como esta pesquisa buscou avaliar o potencial de aproveitamento dos minérios contaminados, visando a concentração do ferro, foram considerados apenas os 6 (seis) clusters de maior interesse, sendo eles aqueles relacionáveis aos quartzo itabiritos e itabiritos anfibolíticos friáveis e, em algum nível, semi-compactos, com teores de Fe global entre 30 e 55%.

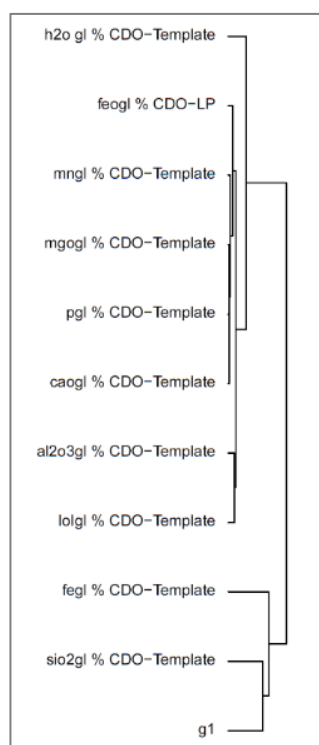


Figura 18. Dendrograma de agrupamento hierárquico Modo R, ilustrando a interrelação entre as variáveis.

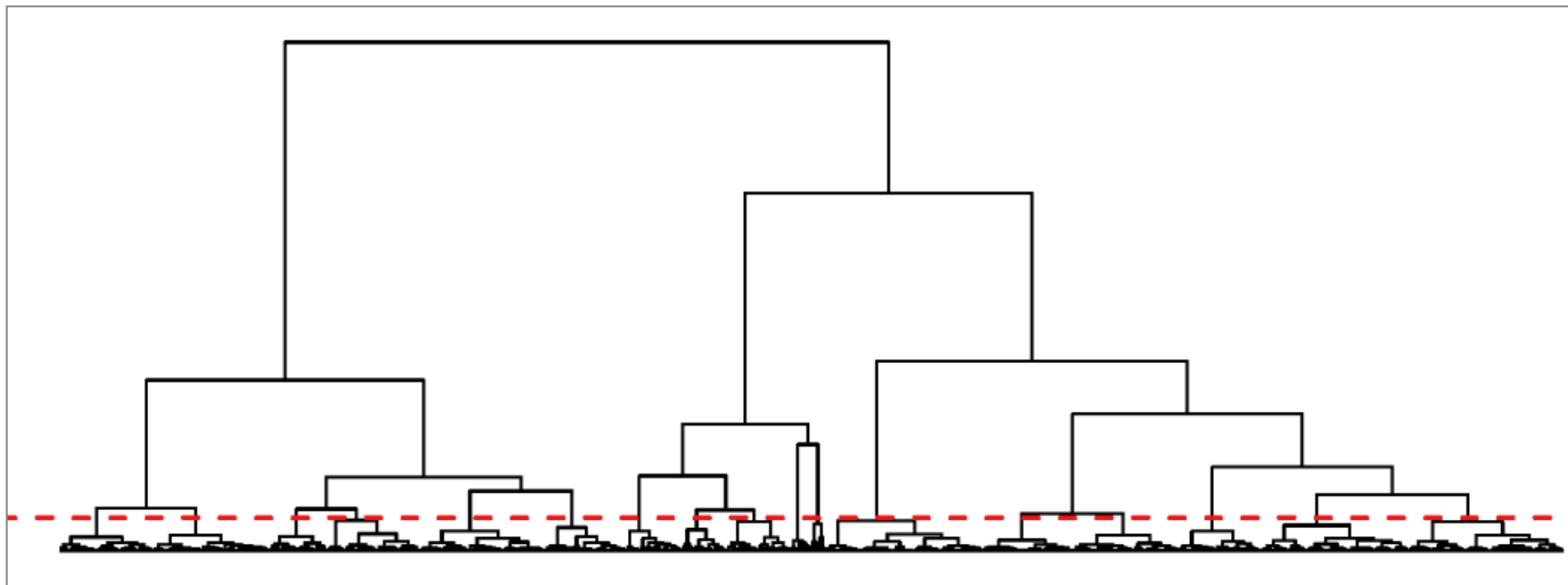


Figura 19. Dendrograma de agrupamento hierárquico Modo Q, ilustrando os *clusters* formados a partir da similaridade entre as amostras. A linha em vermelha demarca o nível do corte.

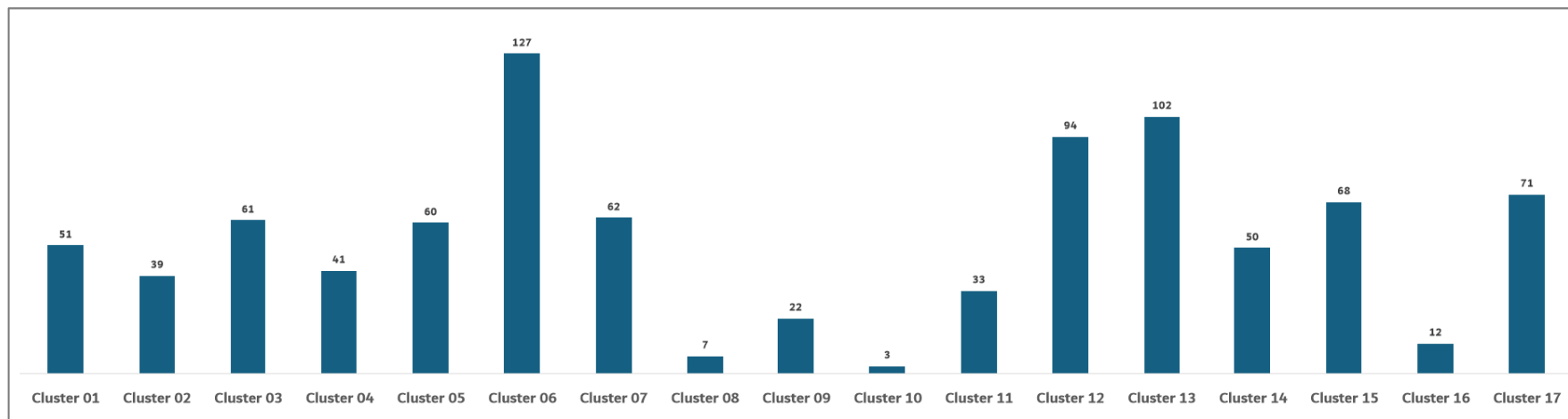


Figura 20. Histograma de distribuição das amostras em *clusters*.

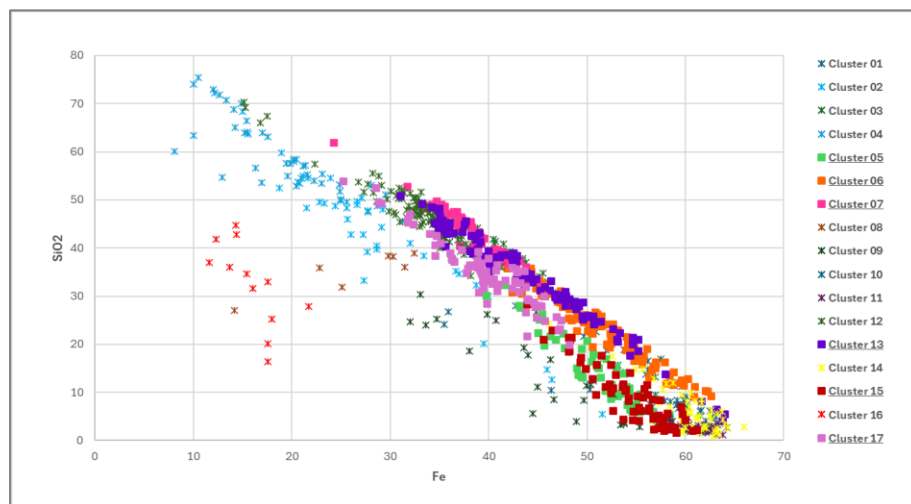


Figura 21. Correlação entre as variáveis Fe global e SiO₂ global.

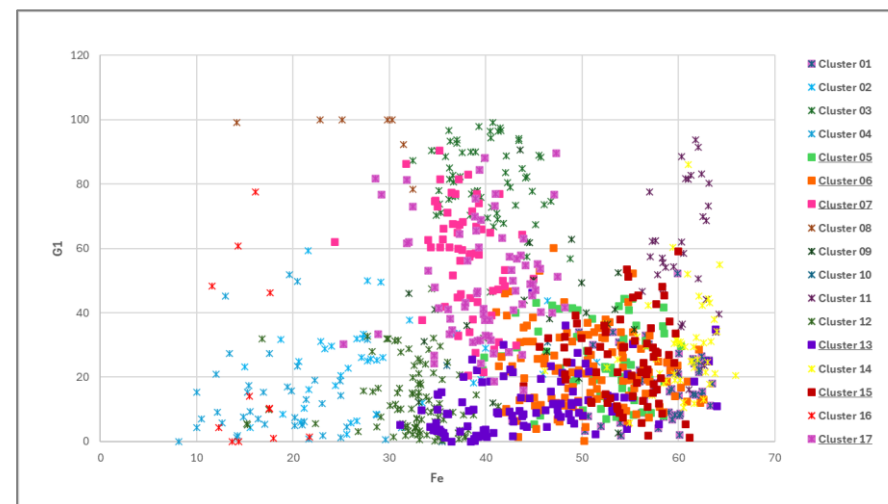


Figura 22. Correlação entre as variáveis Fe global e a fração G1.



Figura 23. Correlação entre as variáveis Al_2O_3 global e LOI global.

Tabela 4. Associação dos agrupamentos aos litotipos segundo a chave de classificação litoquímica da Mina CDO.

Associação dos Agrupamentos aos Litotipos								
Cluster	Natureza do Depósito	Granulação / Granulometria	Mineralização Ferruginosa	Contaminante Majoritário	Contaminante Secundário	Contaminante Terciário	Afinidade	Amostragem
1	Cobertura	Média	Fe Alto	SiO ₂ Média	Mn Alto	P Alto	Colúvio Ferruginoso Rico (COL)	Não
1	Itabirito	Fina	Fe Alto	SiO ₂ Média	Al ₂ O ₃ Baixa	LOI Alto	Quartzo Itabirito Rico (ITR) / Hematitito (HEM)	Não
2	Itabirito	Média	Estéril	Mn Alto	Al ₂ O ₃ Alta	LOI Alto	Itabirito Manganífero (IMN)	Não
3	Itabirito	Grossa	Fe Baixo	SiO ₂ Alta	MgO-CaO Baixo	P Baixo	Quartzo Itabirito Compacto (ITC/ITS)	Não
4	Dolomito	Média	Estéril	Mn Alto	MgO-CaO Alto	LOI Alto	Dolomito Ferruginoso Friável (DOL/FIL)	Não
5	Itabirito	Média	Fe Baixo	SiO ₂ Alta	Al ₂ O ₃ Baixa	LOI Alto	Itabirito Anfíbolítico Semi-Compacto (IAN)	Sim
5	Itabirito	Média	Fe Alto	SiO ₂ Média	Al ₂ O ₃ Alta	LOI Alto	Itabirito Aluminoso (IAL)	Não
6	Itabirito	Média	Fe Baixo	SiO ₂ Média	Al ₂ O ₃ Baixa	LOI Baixo	Quartzo Itabirito Friável (ITF) interdigitado a Itabirito Anfíbolítico (IAN)	Sim
7	Itabirito	Média	Fe Baixo	SiO ₂ Alta	Al ₂ O ₃ Baixa	P Médio	Quartzo Itabirito Friável (ITF)	Sim
8	Itabirito	Grossa	Estéril	MgO-CaO Alto	P Baixo	FeO Alto	Itabirito Dolomítico Compacto (ITD)	Não
9	Cobertura	Fina	Fe Alto	SiO ₂ Baixa	Al ₂ O ₃ Alta	LOI Alto	Laterita Ferruginosa (LAT)	Não
10	Cobertura	Média	Fe Baixo	Mn Alto	Al ₂ O ₃ Alta	P Alto	Colúvio Ferruginoso Pobre (COL)	Não
11	Cobertura	Grossa	Fe Alto	SiO ₂ Baixa	Al ₂ O ₃ Média	P Alto	Canga Ferruginosa (CNG)	Não
12	Itabirito	Fina	Estéril	SiO ₂ Alta	Al ₂ O ₃ Baixa	LOI Baixo	Quartzito Ferruginoso (QTF)	Não
13	Itabirito	Fina	Fe Baixo	SiO ₂ Alta	Al ₂ O ₃ Alta	LOI Baixo	Quartzo Itabirito Friável (ITF)	Sim
14	Cobertura	Grossa	Fe Alto	SiO ₂ Média	Al ₂ O ₃ Alta	LOI Alto	Canga Ferruginosa Rica (CNG)	Não
14	Itabirito	Média	Fe Alto	SiO ₂ Baixa	Al ₂ O ₃ Alta	LOI Alto	Quartzo Itabirito Rico (ITR)/Hematitito (HEM)	Não
15	Cobertura	Média	Fe Alto	SiO ₂ Baixa	P Alto	LOI Alto	Canga Ferruginosa (CNG)	Não
15	Itabirito	Fina	Fe Alto	SiO ₂ Média	Al ₂ O ₃ Baixa	LOI Alto	Itabirito Anfíbolítico Friável (IAN)	Sim
16	Filito	Média	Estéril	SiO ₂ Média	Al ₂ O ₃ Alta	LOI Alto	Filito Ferruginoso (FIL)	Não
17	Itabirito	Média	Fe Baixo	SiO ₂ Alta	Al ₂ O ₃ Baixa	LOI Alto	Itabirito Anfíbolítico Semi-compacto (IAN)	Sim

3.3. MODELO GEOLÓGICO DOS AGRUPAMENTOS

O modelo tridimensional é apresentado em planta e perspectiva a seguir (Figura 25 e Figura 24). A posição das amostras é indicada pelos pontos coloridos, cuja paleta de cores é a mesma para os sólidos modelados.

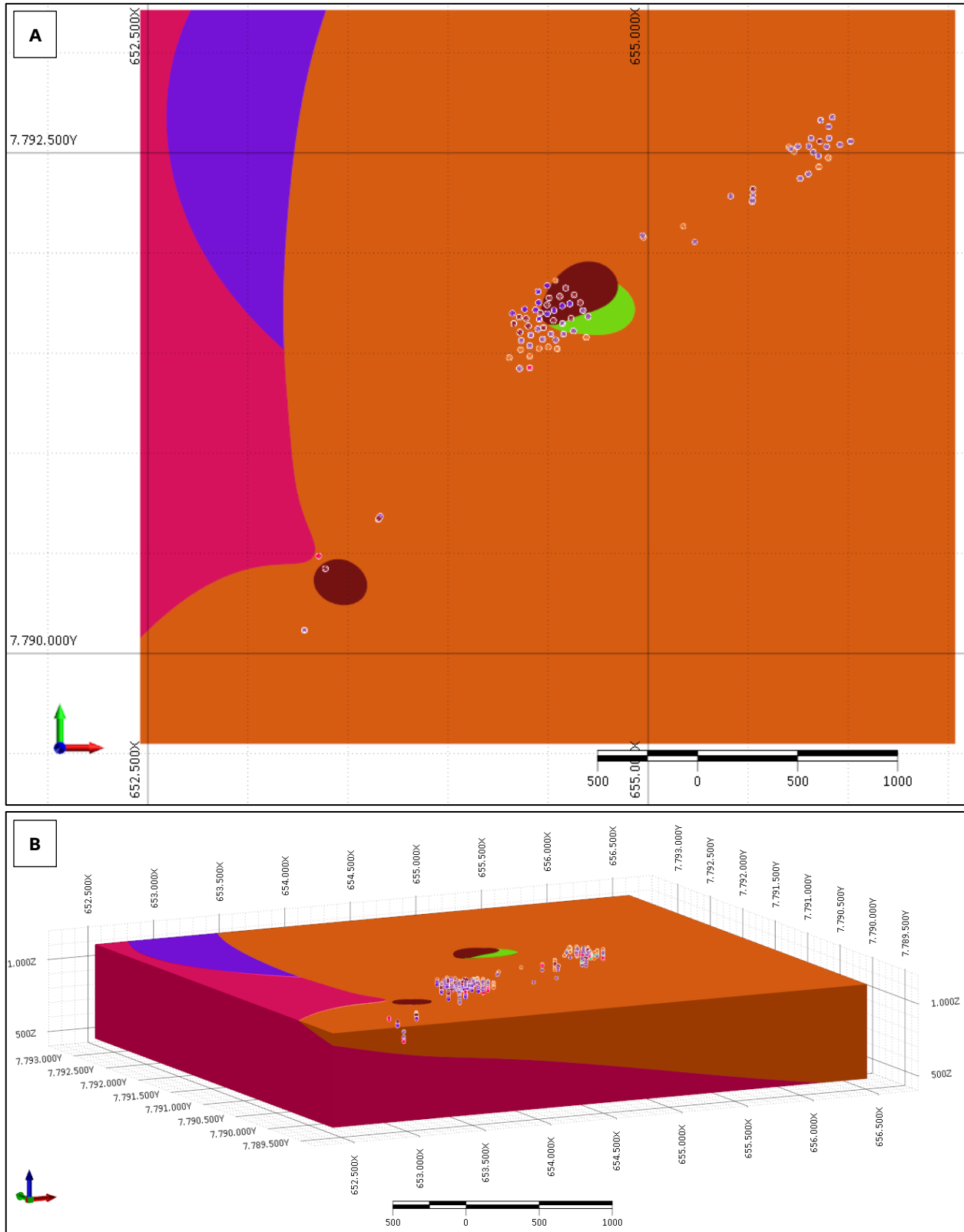


Figura 24. Modelo geológico de agrupamentos, vista A) em planta e B) em perspectiva.

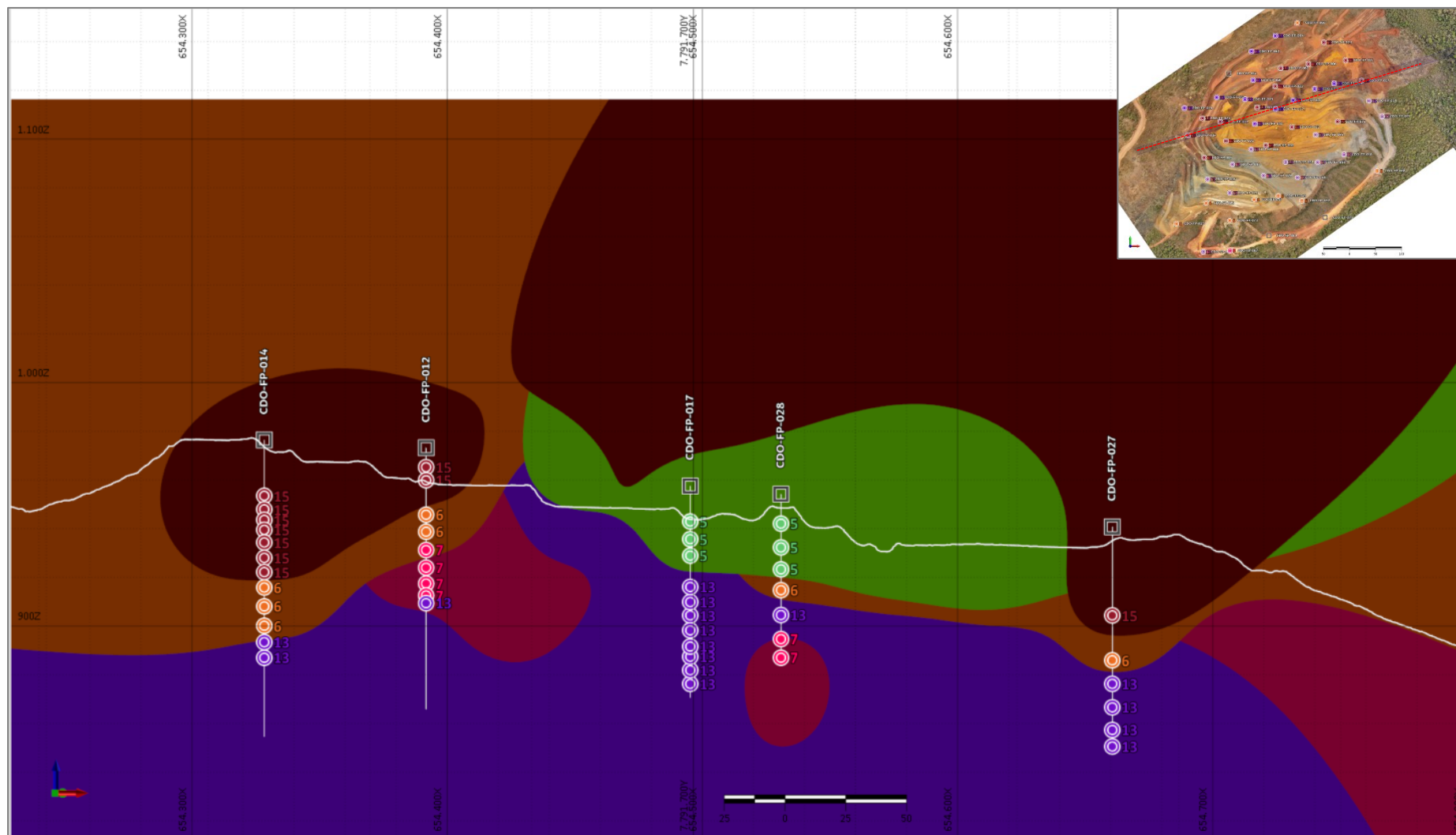


Figura 25. Seção gráfica de direção sudoeste-nordeste (Cava da Ilha) sobre o modelo geológico de agrupamentos. Os círculos indicam a posição das amostras e a linha branca corresponde à silhueta da topografia. A paleta de cores é a mesma para os sólidos modelados, posição das amostras e número dos *clusters*.

3.4. CUBAGEM DOS RECURSOS MINERAIS

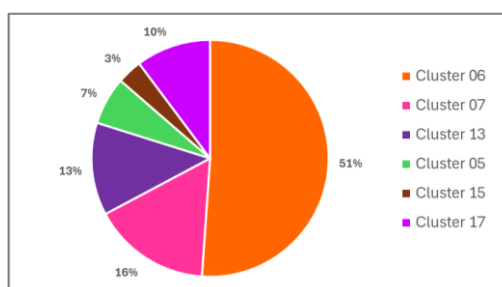
A cubagem dos recursos minerais é apresentada na Tabela 5 em função das partições de cada agrupamento de ITF e IAN, além dos teores de ferro e principais contaminantes na amostra global. Cada agrupamento é discriminado nas classes medido e indicado (recurso), inferido e potencial, sendo considerado recurso mineral as duas primeiras. As seções gráficas representativas dos setores amostrados são ilustradas na Figura 26.

Tabela 5. Cubagem resumida do recurso mineral da Mina CDO, considerando-se apenas os clusters de interesse.

Cubagem do Recurso											
Classe	Cluster	Partição (%)	Fe gl (%)	SiO2 gl (%)	Al2O3 gl (%)	Mn gl (%)	P gl (%)	LOI gl (%)	CaO gl (%)	MgO gl (%)	FeO gl (%)
Medido	05	6%	48,32	21,88	1,39	0,31	0,116	6,71	0,02	0,13	1,07
Medido	06	31%	46,43	27,75	1,12	0,20	0,074	4,35	0,02	0,11	1,95
Medido	07	13%	39,03	39,64	1,39	0,27	0,056	2,49	0,02	0,16	3,71
Medido	13	12%	42,38	35,84	1,18	0,25	0,054	1,66	0,02	0,19	5,74
Medido	15	3%	51,51	16,61	1,43	0,25	0,091	7,75	0,02	0,12	0,89
Medido	17	9%	38,62	39,12	1,33	0,38	0,060	3,74	0,02	0,15	2,13
	Medido	74%	43,82	31,71	1,24	0,26	0,07	3,83	0,02	0,14	2,78
Indicado	05	1%	51,86	14,42	1,60	0,33	0,127	8,11	0,02	0,12	0,56
Indicado	06	20%	48,32	21,77	1,20	0,24	0,098	7,25	0,02	0,12	0,91
Indicado	07	3%	46,79	23,32	1,05	0,16	0,092	7,19	0,02	0,11	0,81
Indicado	13	1%	53,83	11,00	1,10	0,20	0,106	7,85	0,02	0,09	0,99
Indicado	15	1%	55,64	8,70	1,81	0,20	0,119	9,11	0,02	0,11	0,51
Indicado	17	1%	48,33	21,28	1,21	0,28	0,098	7,99	0,02	0,11	0,44
	Indicado	26%	48,57	21,12	1,21	0,24	0,10	7,34	0,02	0,12	0,87
	Recurso	100%	45,04	28,99	1,23	0,25	0,08	4,73	0,02	0,13	2,29
Inferido	05		40,69	37,58	1,46	0,37	0,048	2,06	0,01	0,12	2,97
Inferido	06		45,42	30,62	1,14	0,20	0,061	2,80	0,02	0,12	2,49
Inferido	07		41,90	36,66	0,93	0,14	0,054	2,04	0,01	0,15	3,84
Inferido	13		46,32	28,32	0,89	0,18	0,049	2,78	0,02	0,15	4,61
Inferido	15		39,66	37,17	2,15	0,53	0,049	2,94	0,01	0,11	2,45
Inferido	17		39,43	39,70	1,44	0,31	0,047	1,92	0,01	0,13	2,55
	Inferido		42,66	35,15	1,07	0,19	0,06	2,27	0,02	0,14	3,27
Potencial	05		44,67	32,79	1,00	0,16	0,056	1,88	0,02	0,15	3,99
Potencial	06		43,79	34,40	0,89	0,15	0,049	1,65	0,02	0,15	4,37
Potencial	07		49,43	23,41	0,68	0,15	0,070	3,75	0,02	0,14	4,52
Potencial	13		40,99	37,74	1,34	0,29	0,047	1,75	0,01	0,14	3,56
Potencial	17		43,38	34,78	1,19	0,24	0,051	1,46	0,01	0,17	4,98
	Potencial		43,58	34,62	0,94	0,16	0,05	1,67	0,02	0,15	4,27

Tabela 6. Participação de cada agrupamento no recurso mineral.

Distribuição dos Agrupamentos no Recurso		
Fácies	Cluster	Partição (%)
ITF	06	51%
	07	16%
	13	13%
		80%
IAN	05	7%
	15	3%
	17	10%
		20%
GRANDTOTAL		100%



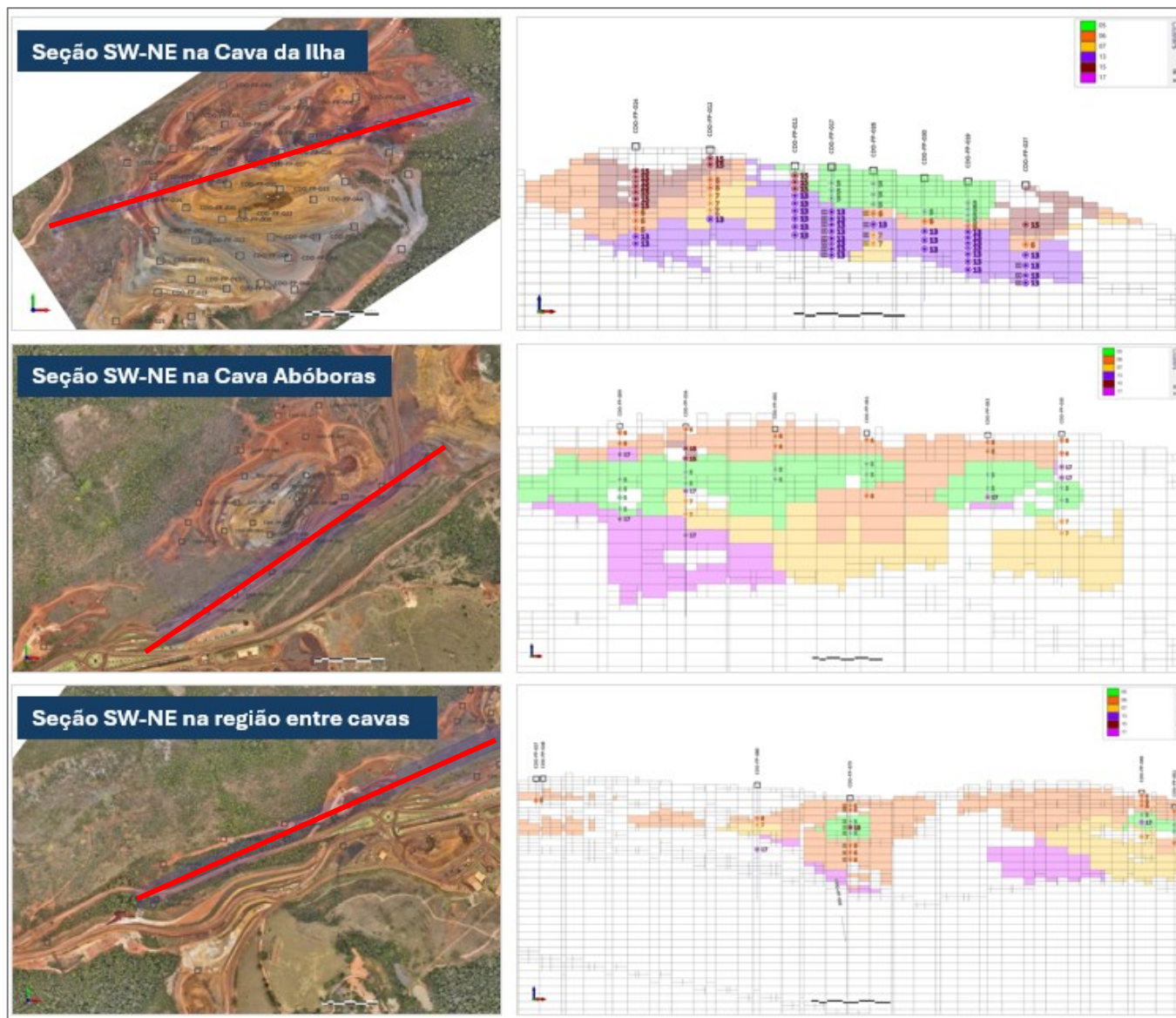


Figura 26. Seções gráficas de direção sudoeste-nordeste representativas das três áreas amostradas (Cava da Ilha, Cava Abóboras e Entre Cavas).

3.5. VALIDAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS

A validação das etapas de seleção de intervalos e amostragem de testemunhos de sondagem foi realizada por consultores técnicos externos (SOLID) mostrou que foram seguidos os passos indicados como boa prática, a saber:

- Definição do objetivo da amostragem,
- Planejamento da amostragem;
- Tamanho da amostra;
- Método de coleta;
- Número de amostras;
- Armazenamento e transporte;
- Registro detalhado;
- Homogeneização.

A Figura 27 apresenta uma comparação entre os teores planejados (obtidos pela média ponderada dos teores das amostras na base de dados e a massa amostrada) e aqueles obtidos nas análises químicas globais das amostras finais. Assim sendo, o objetivo proposto para a geração das amostras finais foi satisfatoriamente alcançado. Os pontos de melhoria são apresentados no capítulo 5.

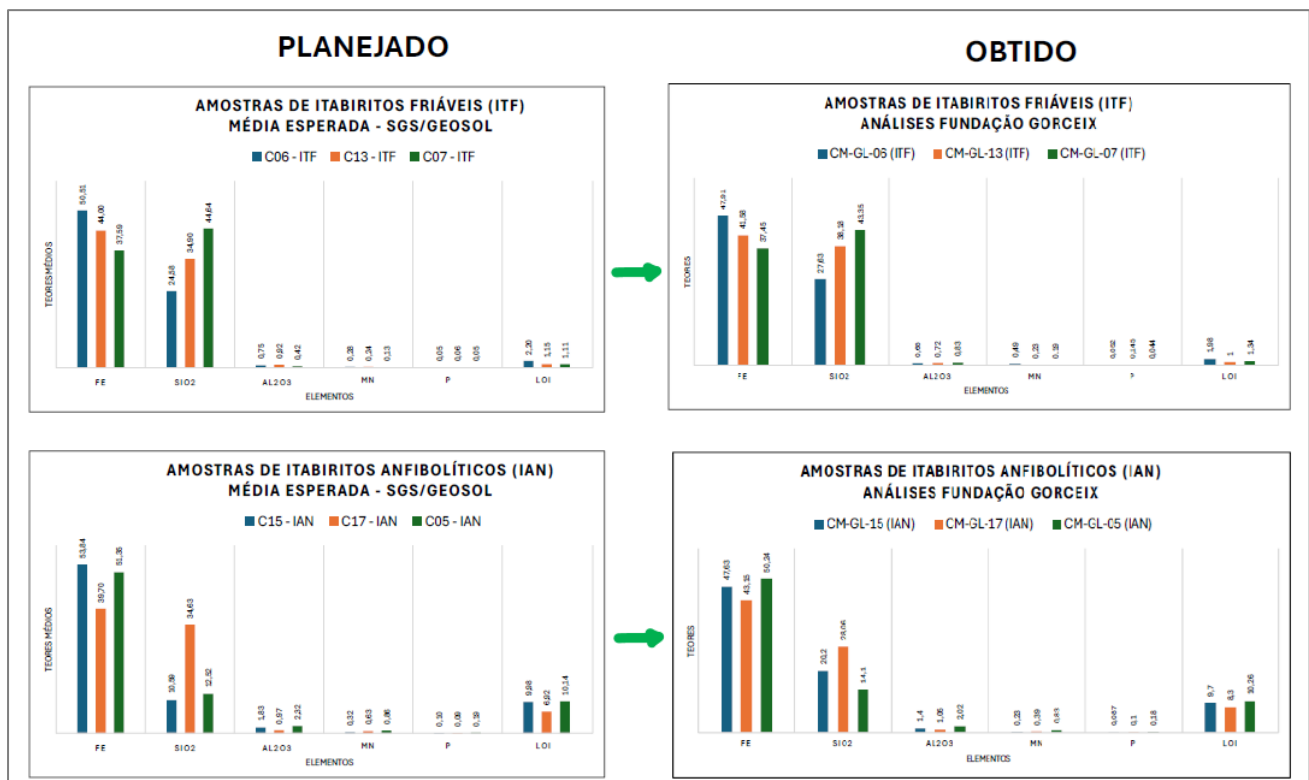


Figura 27. Comparação da análise química global esperada *versus* obtida para as amostras finais. Modificado de SOLID (2024).

3.6. ANÁLISE QUÍMICA GLOBAL

A Tabela 1 apresenta os resultados das análises químicas de cabeça para cada amostra.

Tabela 7. Análises químicas amostra global. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

Amostra	Análises Químicas								
	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Mn (%)	P (%)	CaO (%)	MgO (%)	LOI (%)	TOTAL
CM-GL-05 - IAN <16,00mm	50,24	14,1	2,02	0,83	0,18	<0,01	0,13	10,26	99,95
CM-GL-06 - ITF <16,00mm	47,91	27,63	0,65	0,49	0,052	<0,01	0,04	1,98	99,58
CM-GL-07 - ITF < 16,00mm	36,49	44,13	0,99	0,19	0,048	0,04	0,63	1,63	99,98
CM-GL-13 - ITF <16,00mm	41,58	38,18	0,72	0,23	0,045	0	0,16	1,00	99,99
CM-GL-15 - IAN < 16,00mm	47,63	20,20	1,40	0,23	0,087	<0,01	<0,01	9,70	99,90
CM-GL-17 - IAN < 16,00mm	43,15	28,06	1,05	0,39	0,100	<0,01	0,05	8,30	99,93

Os quartzo itabiritos apresentaram composição química esperada para os itabiritos clássicos, com baixos níveis de Al₂O₃, P e Mn, além de uma boa correlação entre teores de Fe global e SiO₂. O percentual médio de Fe^T de 42% e SiO₂ de 36%, com 54% da massa passante na malha de 1,0mm. Os minerais magnéticos equivalem a cerca de 37% do total, com maior proporção na fração -0,15mm, enquanto o quartzo representa 42%, sendo o percentual da liberação da fração -16,0mm britada entre 0,15mm e 0,3mm em torno de 78%.

Para os itabiritos anfibolíticos, não foi verificada uma correlação entre teores de Fe global e SiO₂ típica dos itabiritos clássicos, ainda que os teores de alcalinos mostre-se relativamente reduzidos. Os teores médios de Fe^T estão na ordem de 47% e 21% de SiO₂, com 51% da massa passante na malha de 1,0mm. Os minerais magnéticos correspondem a cerca de 7% do total, com maior proporção na fração -0,15mm. O quartzo representa 22% do total, sendo o percentual da liberação da fração -16,0mm britada em -0,075mm de 71%.

3.7. ENSAIOS GRANULOMÉTRICOS

Os gráficos a seguir ilustram a distribuição granulométrica dos itabiritos anfibolíticos (Figura 28) e quartzo itabiritos (Figura 29). Em ambos, observa-se um padrão relativamente uniforme de variação dos teores de ferro por faixa granulométrica, sem elevações expressivas em nenhuma das malhas. Nota-se, contudo, a concentração preferencial do ferro nas malhas mais finas (sobretudo -0,075mm), possivelmente devido à obtenção de maiores volumes de material nestas faixas. Os resultados de cada *cluster* são apresentados individualmente em maior detalhe no ANEXO II – GRANULOMETRIA (Figura 68 a Figura 73).

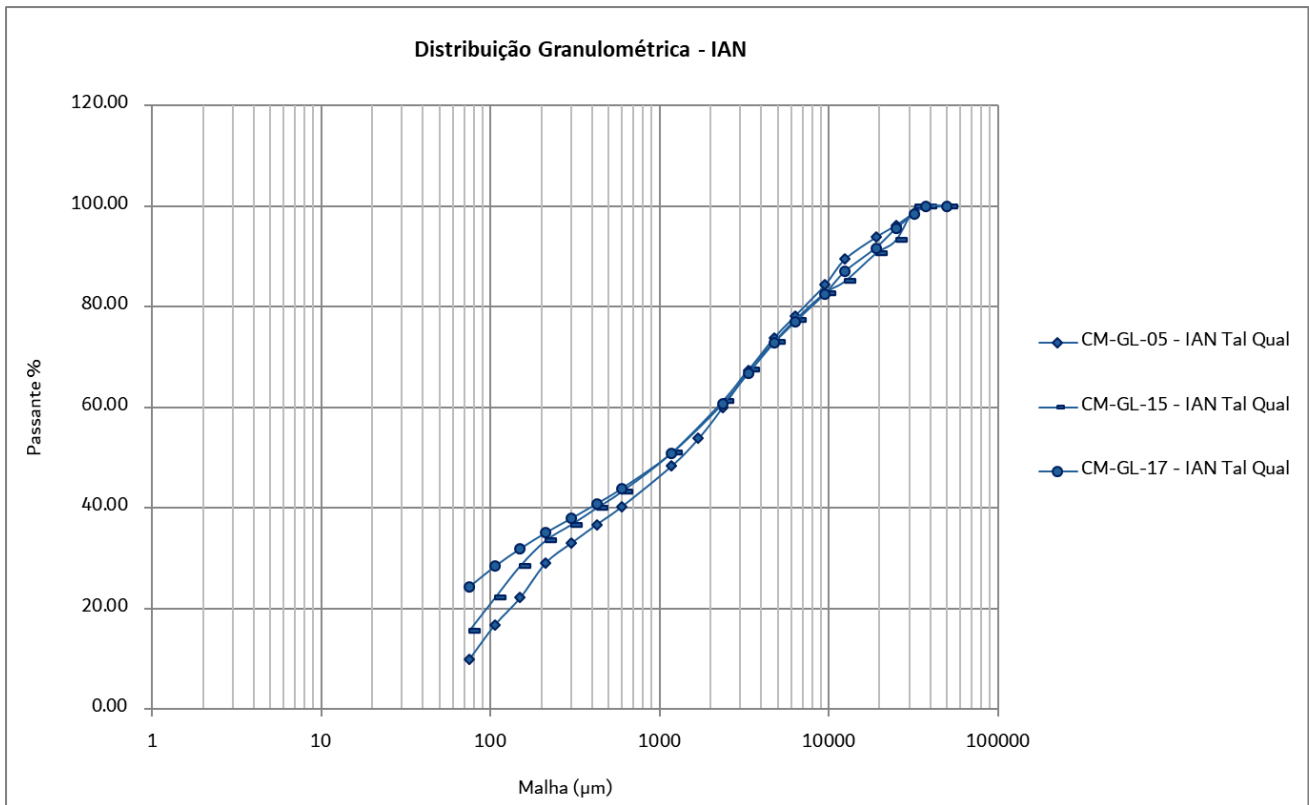


Figura 28. Distribuição granulométrica dos itabiritos anfibólitos (IAN). Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

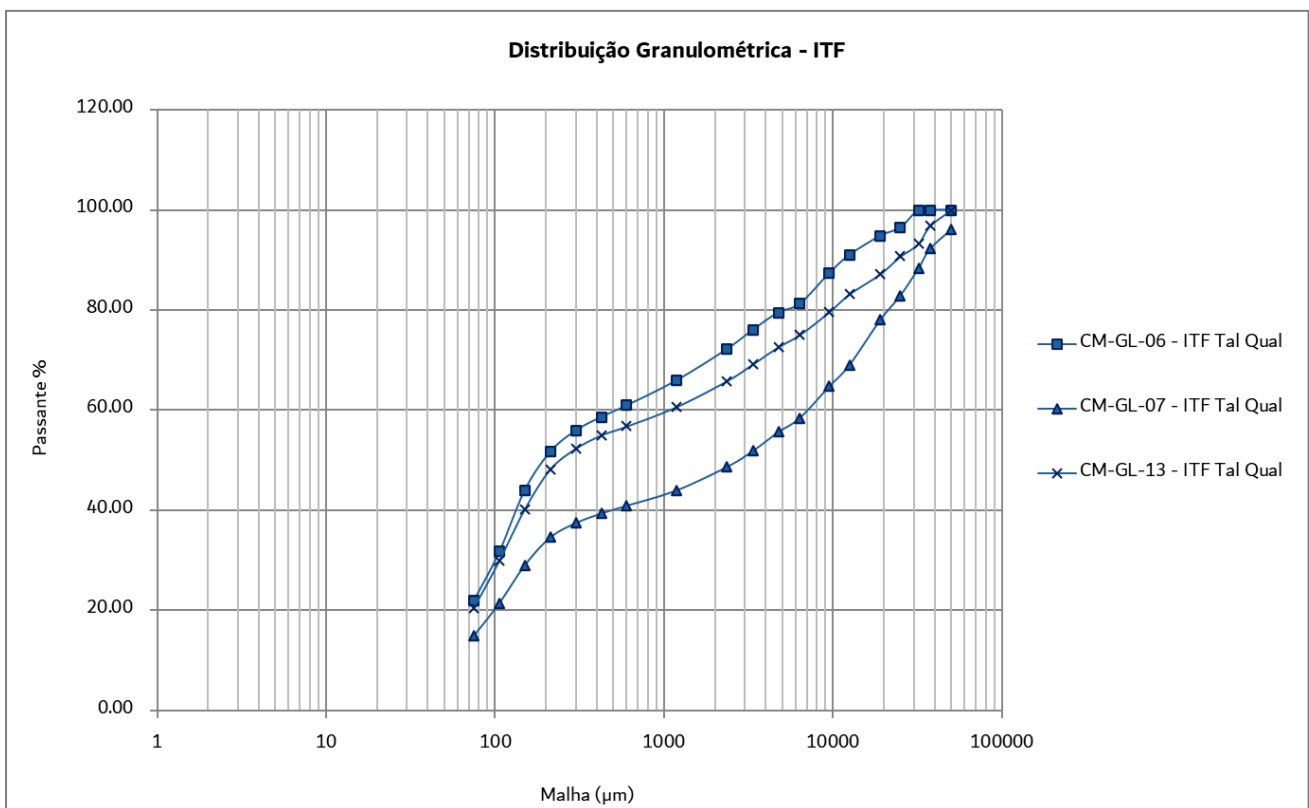


Figura 29. Distribuição granulométrica dos quartzos itabiritos (ITF). Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

3.8. ANÁLISES GRANULOQUÍMICAS

Foram realizadas as análises químicas de todas as amostras britadas a 1,40mm e 100% passante na malha de 16,00mm. Os resultados são apresentados nos gráficos a seguir (Figura 30 e Figura 31). Os itabiritos anfibolíticos apresentam um padrão relativamente uniforme de variação dos teores de ferro por faixa granulométrica, sem elevações expressivas. Contudo, observa-se a concentração preferencial de ferro na malha mais fina (<0,075mm), em função da maior concentração de massas nestas faixas. Nos quartzos itabiritos os teores de ferro se distribuem preferencialmente nas frações mais grossas (8,00 e 1,40mm). A maior recuperações do ferro ocorrem, portanto, nas malhas mais grossas e mais fina (<0,075mm), onde os teores de ferro são mais elevados. Estes dados indicam que não há perspectiva de geração de produtos granulados, se realizada somente a classificação das amostras nas malhas estudadas, sendo necessário, portanto, a utilização de processos para a concentração mineral do ferro. Os resultados são apresentados na íntegra no ANEXO III – GRANULOQUÍMICA (Tabela 8 a

Tabela 13).

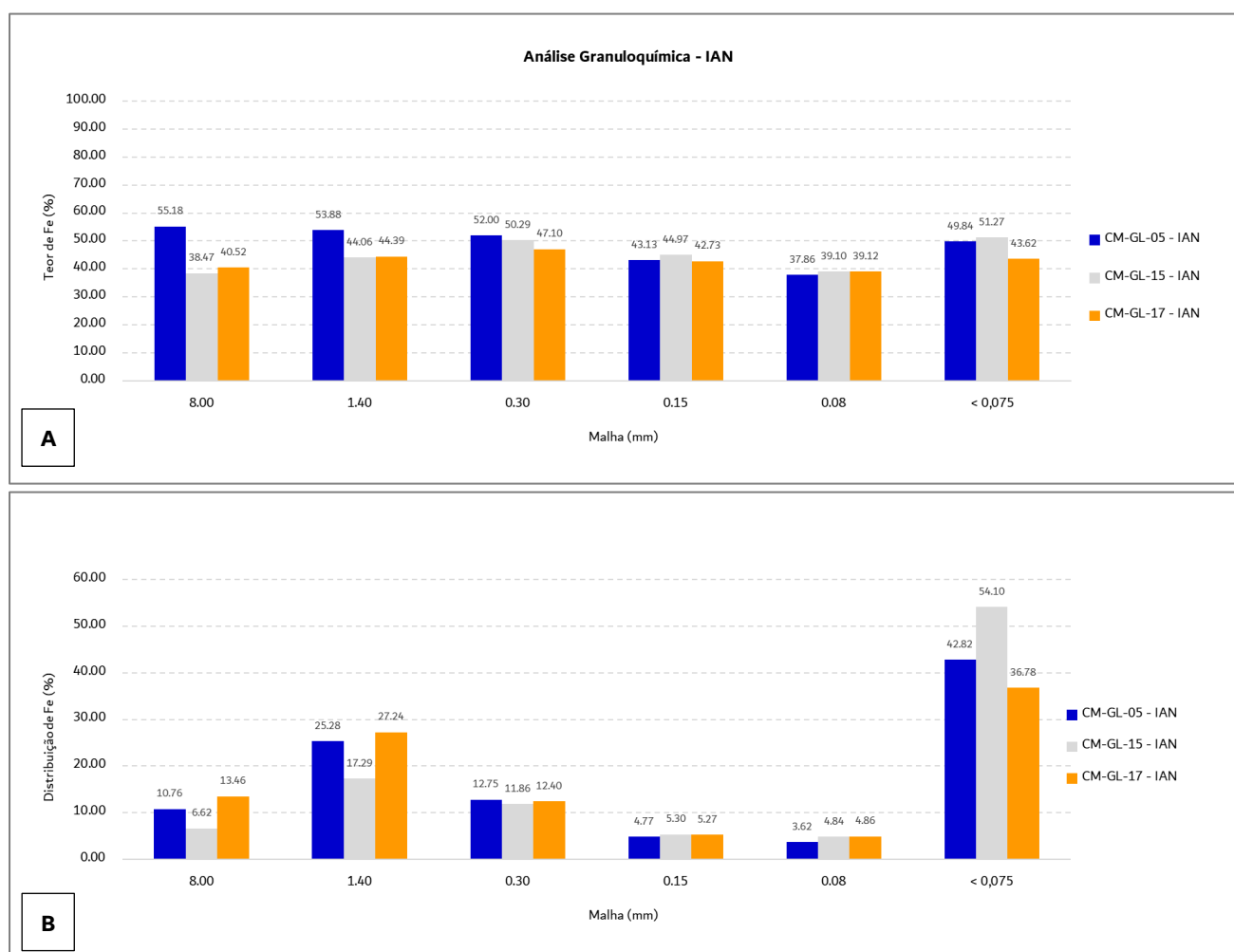


Figura 30. A) Teor de Fe global e B) Distribuição do Fe global por faixa granulométrica dos itabiritos anfibolíticos (IAN) - amostras britadas em 16,00mm. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

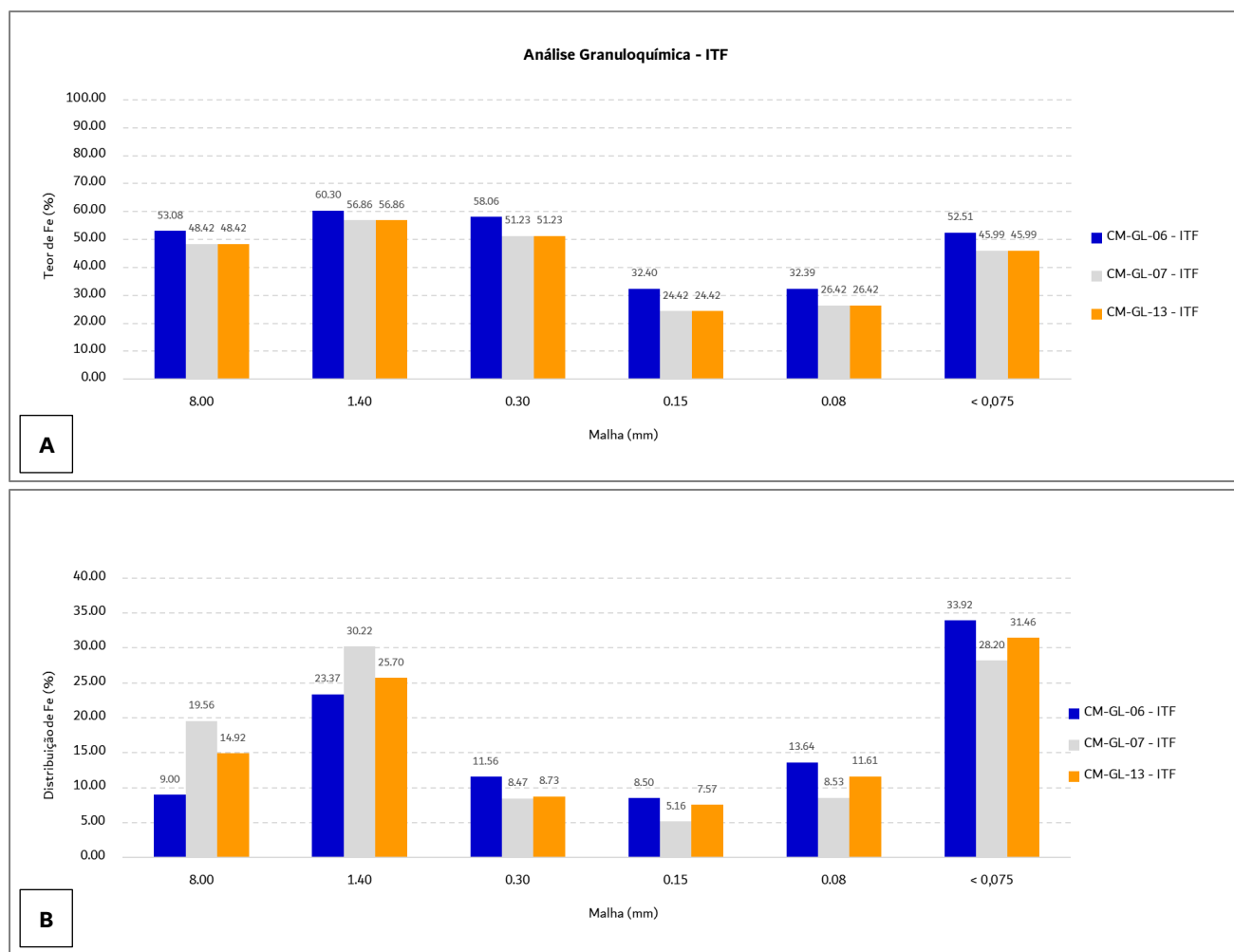


Figura 31. A) Teor de Fe global e **B)** Distribuição do Fe global por faixa granulométrica dos quartzos itabiritos (ITF) - amostras britadas em 16,00mm. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

3.9. ANÁLISES MINERALÓGICAS

3.9.1. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

A minerografia quantitativa para cada cluster é apresentada nos gráficos (Figura 33 a Figura 38) e nas imagens (Figura 39 a Figura 44) a seguir. Os dados são apresentados em maior detalhe no ANEXO IV – MINERALOGIA (Tabela 14). Os grupos correspondentes ao IAN (*clusters* 05, 15 e 17) são caracterizados pela presença majoritária de goethita (sobretudo terrosa e cristalina), um mineral refratário à ação do campo magnético, o que limita o seu aproveitamento via rotas magnéticas (Figura 32). A concentração via flotação também não deve ser promissora, pois a moagem e a deslamagem promoveriam a perda de grande parte do ferro, contidos em grande parte nestes minerais, para as lamas. As amostras de ITF (*clusters* 06, 07 e 13), contudo, apresentam grande participação de hematita lobular, martita e magnetita, minerais com boa susceptibilidade magnética, acenando para as rotas de separação magnética. A presença de outros minerais paramagnéticos ocorre em proporções variáveis, prevendo-se

uma recuperação mássica muito reduzida. Por se tratar de minerais de ganga, não foi dada ênfase na classificação dos minerais do Grupo do Anfibólio³ e seus derivados (produtos de alteração).

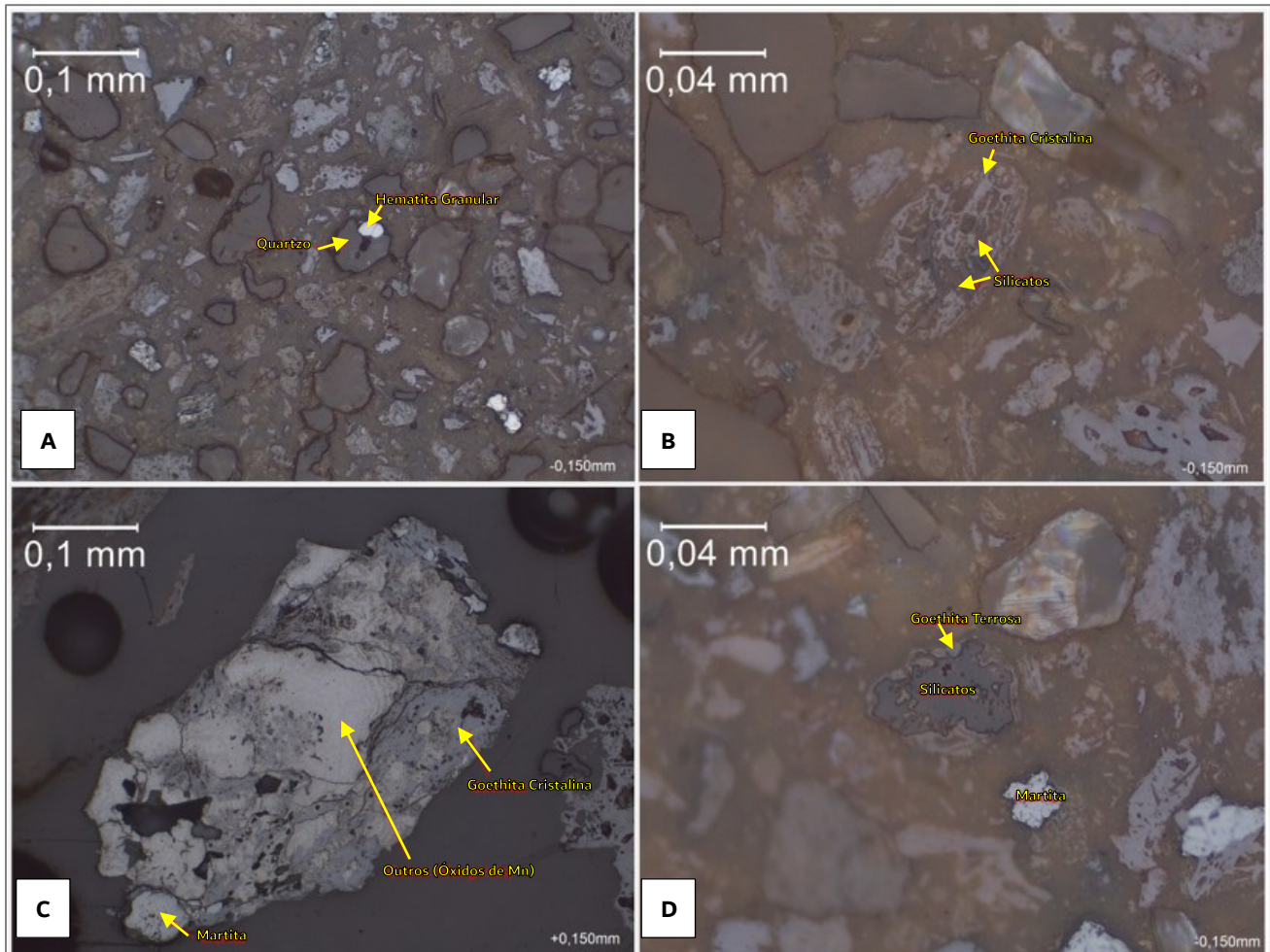


Figura 32. Texturas de minerais-minério e gangas presentes no Cluster 05 – IAN: **A)** Partículas mistas de hematita granular com quartzo; **B)** Partícula de goethita cristalina mista com silicatos (provavelmente quartzo); **C)** Partícula mista de goethita terrosa com martita agregadas com minerais de manganês; **D)** Partícula livre de martita e partícula de goethita terrosa mista com silicato (não identificado). Fonte das imagens: Fundação Gorceix.

³ Os anfibólios são o grupo de inossilicatos hidratados constituídos por cadeias duplas de tetraedros de sílica. Os minerais mais comuns da família cristalizam-se nos sistemas ortorrômbico e monoclinico. O grupo apresenta alto paralelismo com o grupo dos piroxênios, em relação à composição. Os anfibólios tem como fórmula geral $W_{0-1}X_2Y_5Z_8O_{22}(OH,F)_2$, e sua estrutura pode ser imaginada como se fosse constituída de cadeias duplas infinitas e paralelas de silício-oxigênio, estendendo-se na direção do eixo c, unidas por ligações iônicas através dos cátions presentes. A alternância de ligações dos tetraedros de sílica entre as duas cadeias que formam a cadeia dupla, é o que gera a estrutura fundamental dos anfibólios. As principais variedades são: a antofilita $((Mg,Fe)_7(Si_8O_{22})(OH)_2)$; a serie da tremolita $(Ca_2Mg_5(Si_8O_{22})(OH)_2)$ onde o Fe^{2+} pode substituir o magnésio em até 2% (na actinolita); a serie da cummingtonita $((Mg,Fe)_7(Si_8O_{22})(OH)_2)$ e $Fe_7(Si_8O_{22})(OH)_2$; o grupo dos anfibólios de sódio $(Na_2Mg_3Al_2Si_8O_{22}(OH)_2)$ e $Na_2Fe_3^{2+}Fe_2^{3+}Si_8O_{22}(OH)_2$; e a hornblenda $((Ca,Na)^{2-3}(Mg,Fe,Al)_5Si_6(Si,Al)_2O_{22}(OH)_2)$. Fonte: Instituto de Geociências – USP, 2024. Seção de Materiais Didáticos.

Disponível em <https://didatico.igc.usp.br/minerais/silicatos/inossilicatos/anfibolios/>.

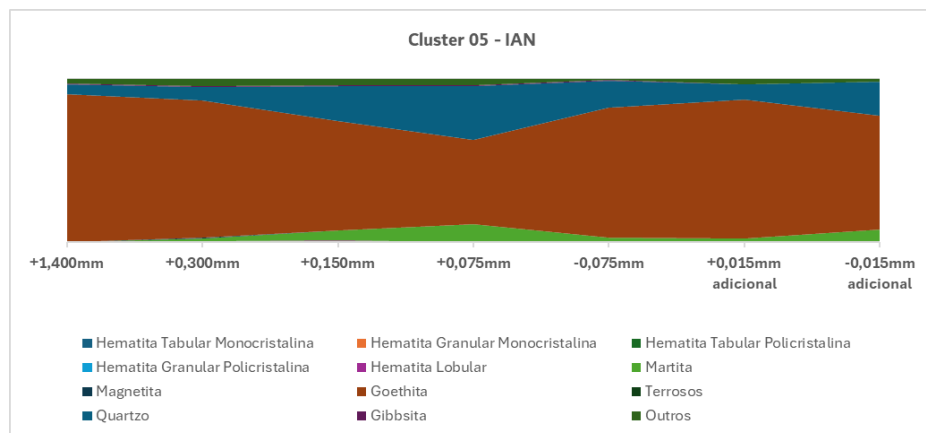


Figura 33. Minerografia quantitativa do *Cluster* 05. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

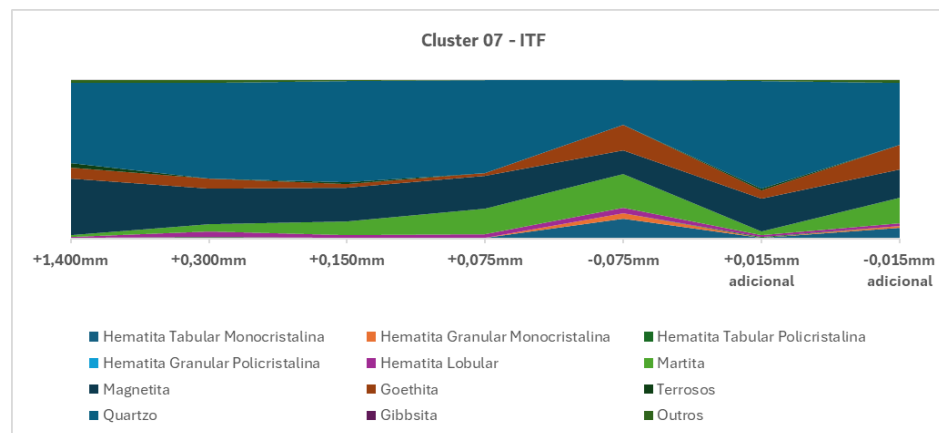


Figura 34. Minerografia quantitativa do *Cluster* 06. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

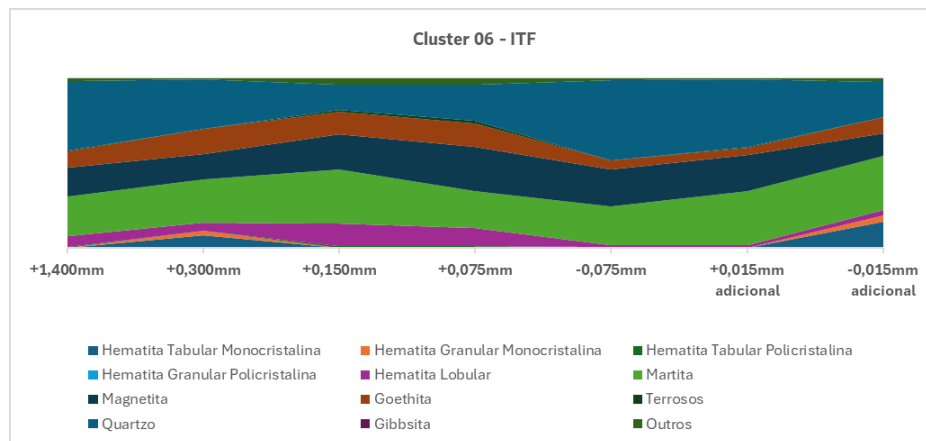


Figura 35. Minerografia quantitativa do *Cluster* 06. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

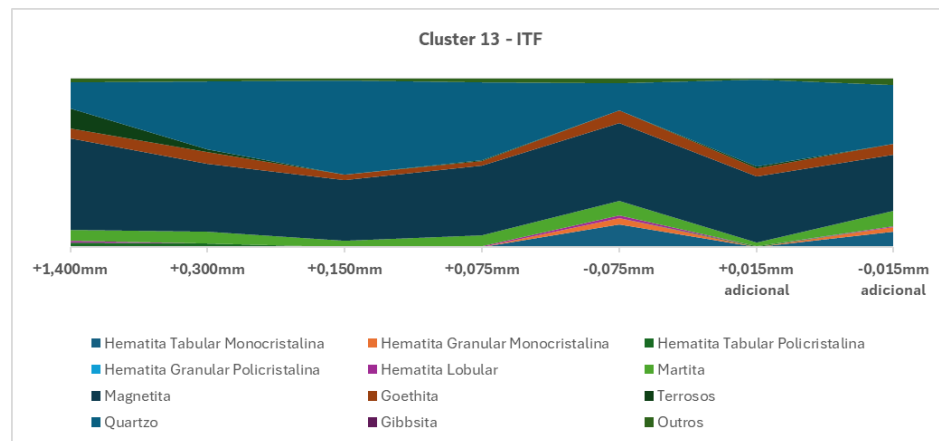


Figura 36. Minerografia quantitativa do *Cluster* 13. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

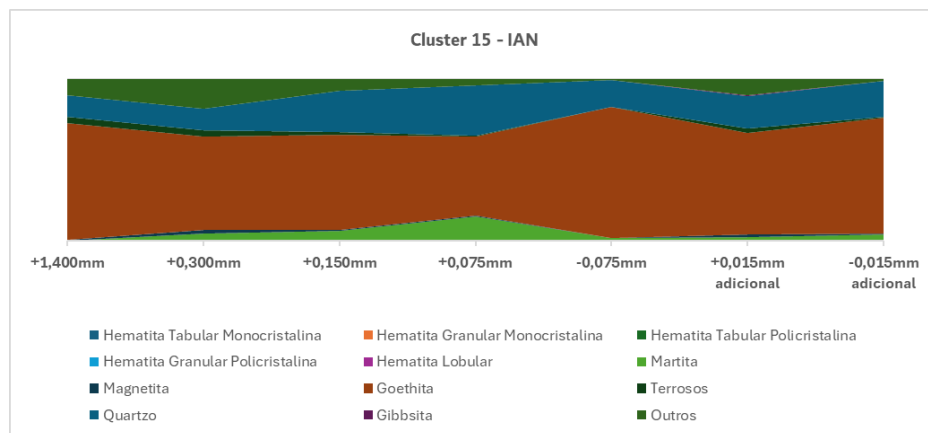


Figura 37. Minerografia quantitativa do *Cluster 15*. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

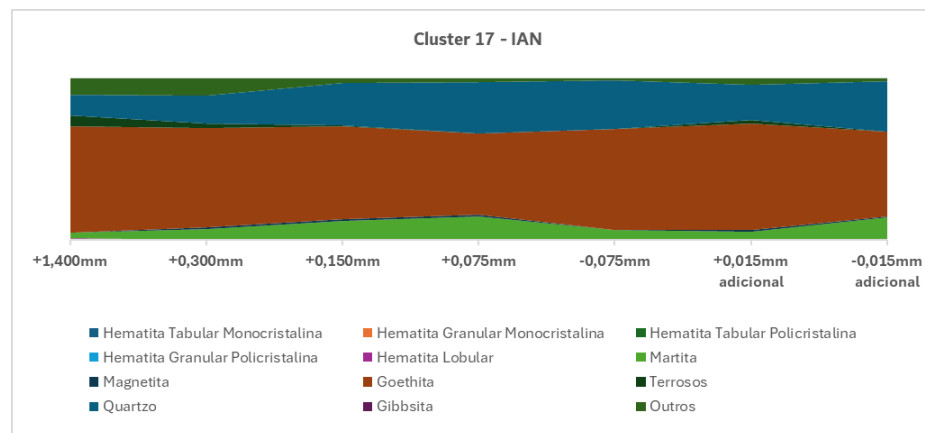


Figura 38. Minerografia quantitativa do *Cluster 17*. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

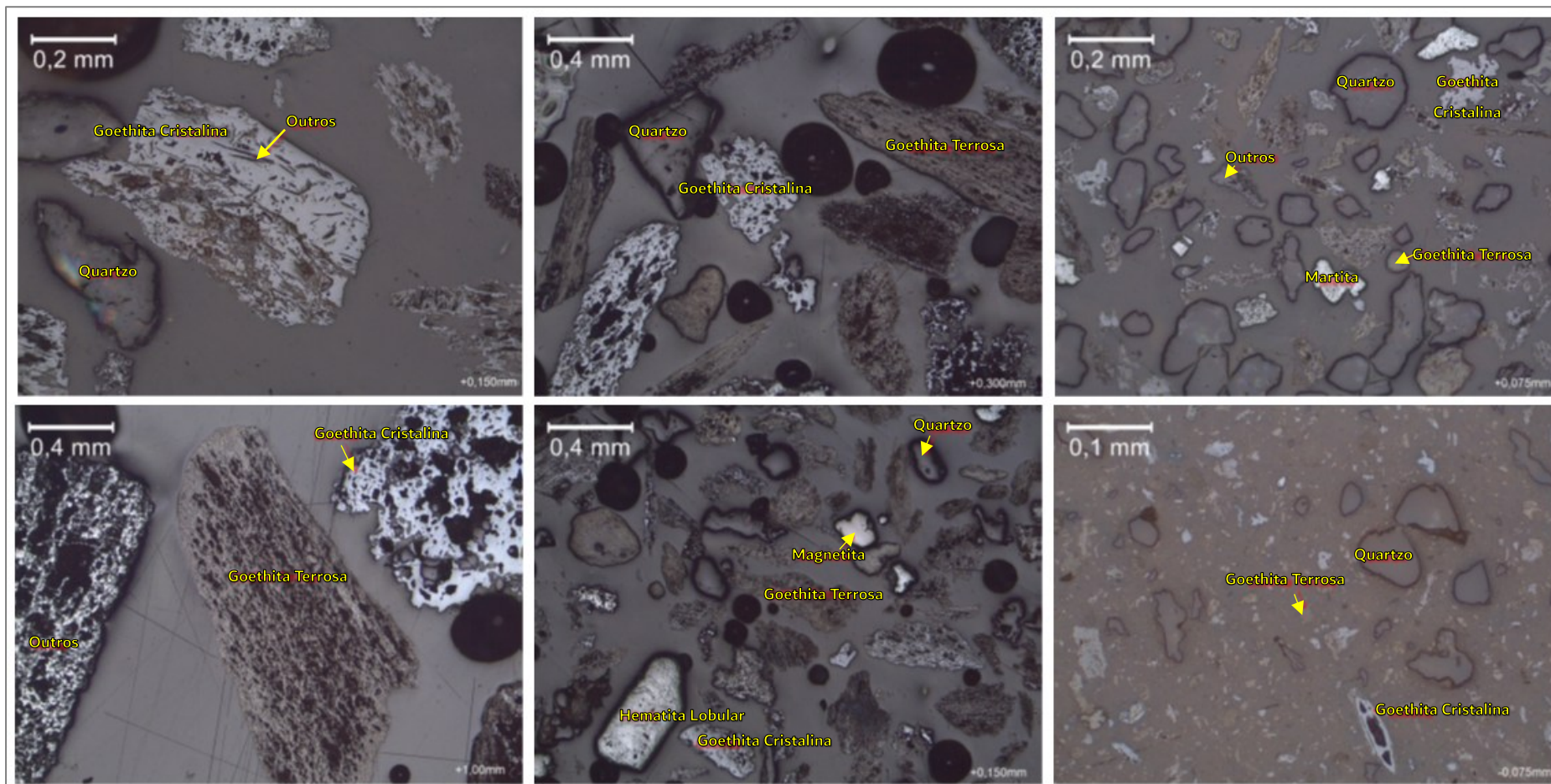


Figura 39. Fotomicrografias das amostras do *Cluster 05*. A escala é indicada nas fotos. Os nomes dos principais minerais estão indicados em amarelo. Fonte das imagens: Fundação Gorceix.

O principal mineral-minério de ferro em todas as frações é a goethita (compacta e, sobretudo, terrosa), apresentando os maiores volumes na fração +1,4mm. Os minerais magnéticos (predominantemente martita) equivalem a 11% da faixa retida em 0,075mm. Dentre os classificados como outros, foram identificados óxidos e hidróxidos de manganês e silicatos. O quartzo apresenta granulometria muito variável, sendo predominante na fração mais grossa, com 9% e 20% em massa nas frações +0,150mm e -0,150mm, respectivamente. O percentual da liberação de quartzo + outros é de 62% na faixa passante em 0,150mm.

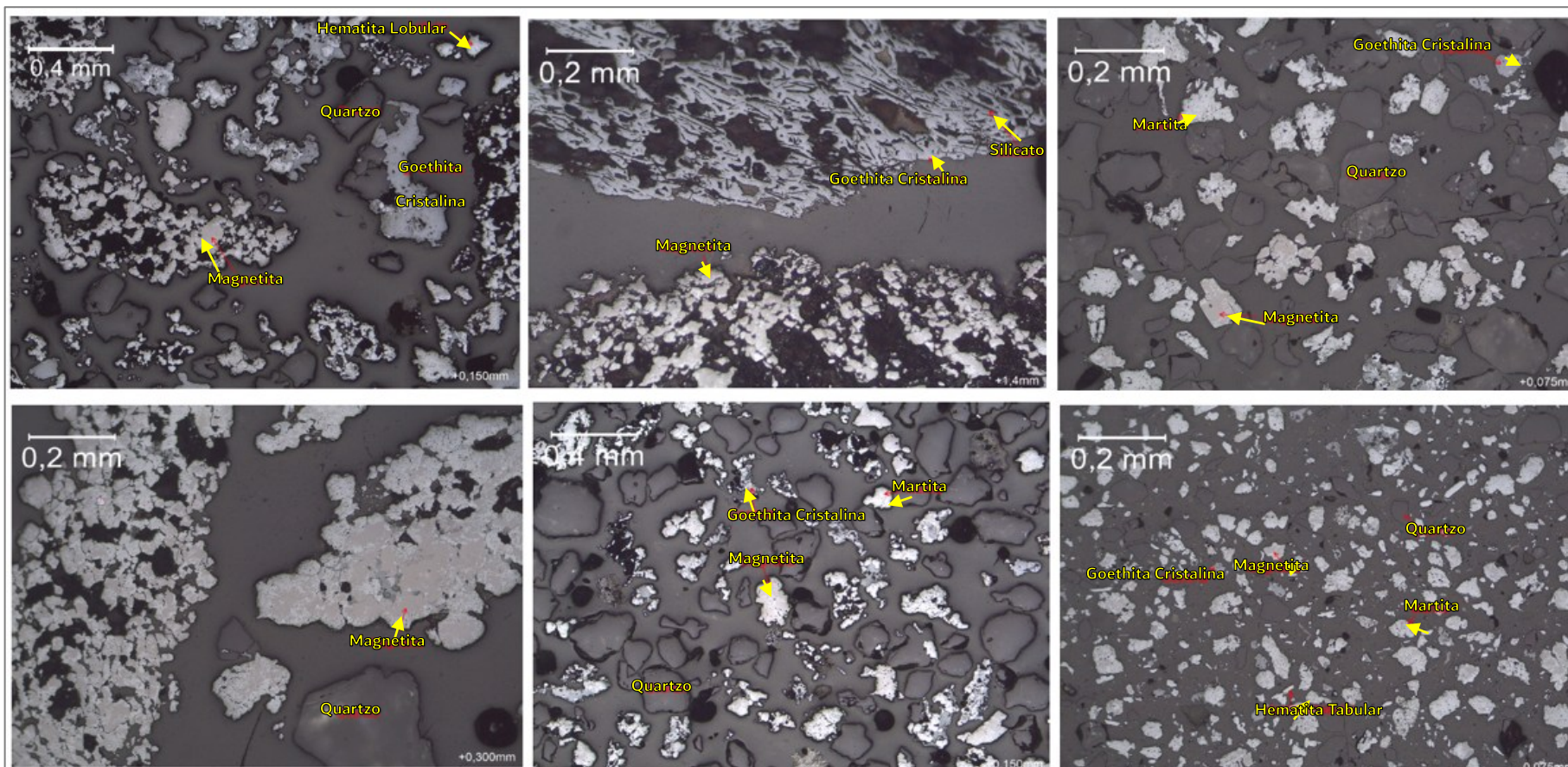


Figura 40. Fotomicrografias das amostras do *Cluster 06*. A escala é indicada nas fotos. Os nomes dos principais minerais estão indicados em amarelo. Fonte das imagens: Fundação Gorceix.

O principal mineral-minério de ferro em todas as frações é a martita, apresentando os maiores volumes na fração +1,4mm, seguida por magnetita e goethita. Os minerais magnéticos (principalmente a magnetita) equivalem a 65% da faixa retida em +1,4mm, 47% da faixa retida em 0,150mm e 45% na faixa passante. A goethita se concentra sobretudo na fração +0,300mm. As partículas de quartzo diminuem com a diminuição da granulometria, enquanto as de martita e goethita aumentam. Dentre os minerais classificados como outros, foram identificados óxidos e hidróxidos de manganês e silicatos. O quartzo é predominante na faixa de +0,150mm, onde representa 41% em massa. O percentual da liberação de quartzo + outros de 90% na faixa passante em 0,150mm.

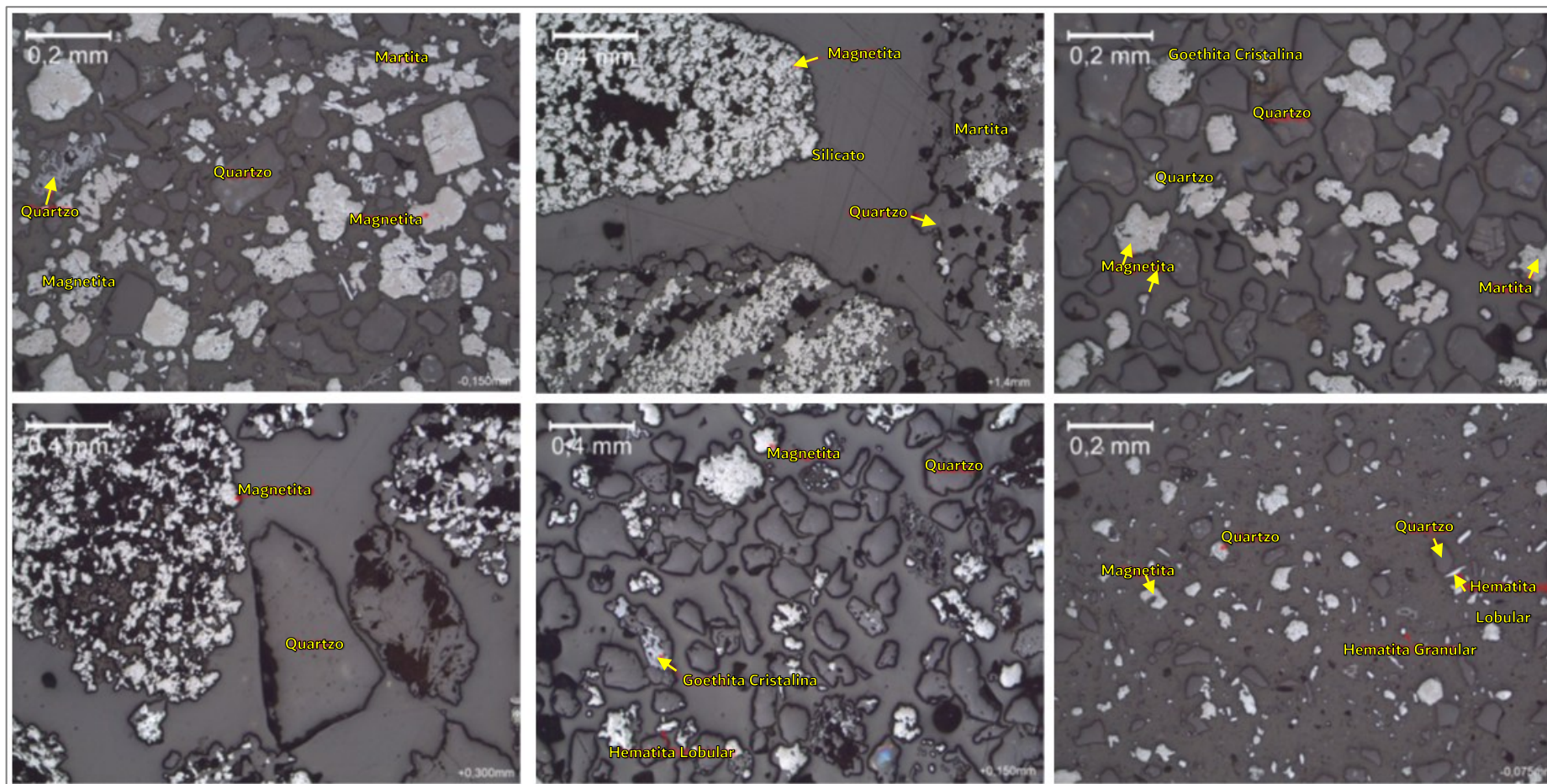


Figura 41. Fotomicrografias das amostras do *Cluster 07*. A escala é indicada nas fotos. Os nomes dos principais minerais estão indicados em amarelo. Fonte das imagens: Fundação Gorceix.

O principal mineral-minério de ferro em todas as frações, exceto +0,150mm e -0,150mm, é a magnetita. O quartzo é predominante na faixa de +0,075mm, onde responde por 67% em massa. A goethita se apresenta em maior volume nas frações passante em 0,075mm e retido em 1,4mm. Os minerais magnéticos equivalem a 39% da faixa retida e passante em 0,075mm e 35% na faixa passante em 0,150mm, sendo esta predominante de martita. Dentre os classificados como outros, foram identificados óxidos e hidróxidos de manganês e silicatos. O percentual da liberação da ganga é de 82% na faixa passante em 0,150mm.

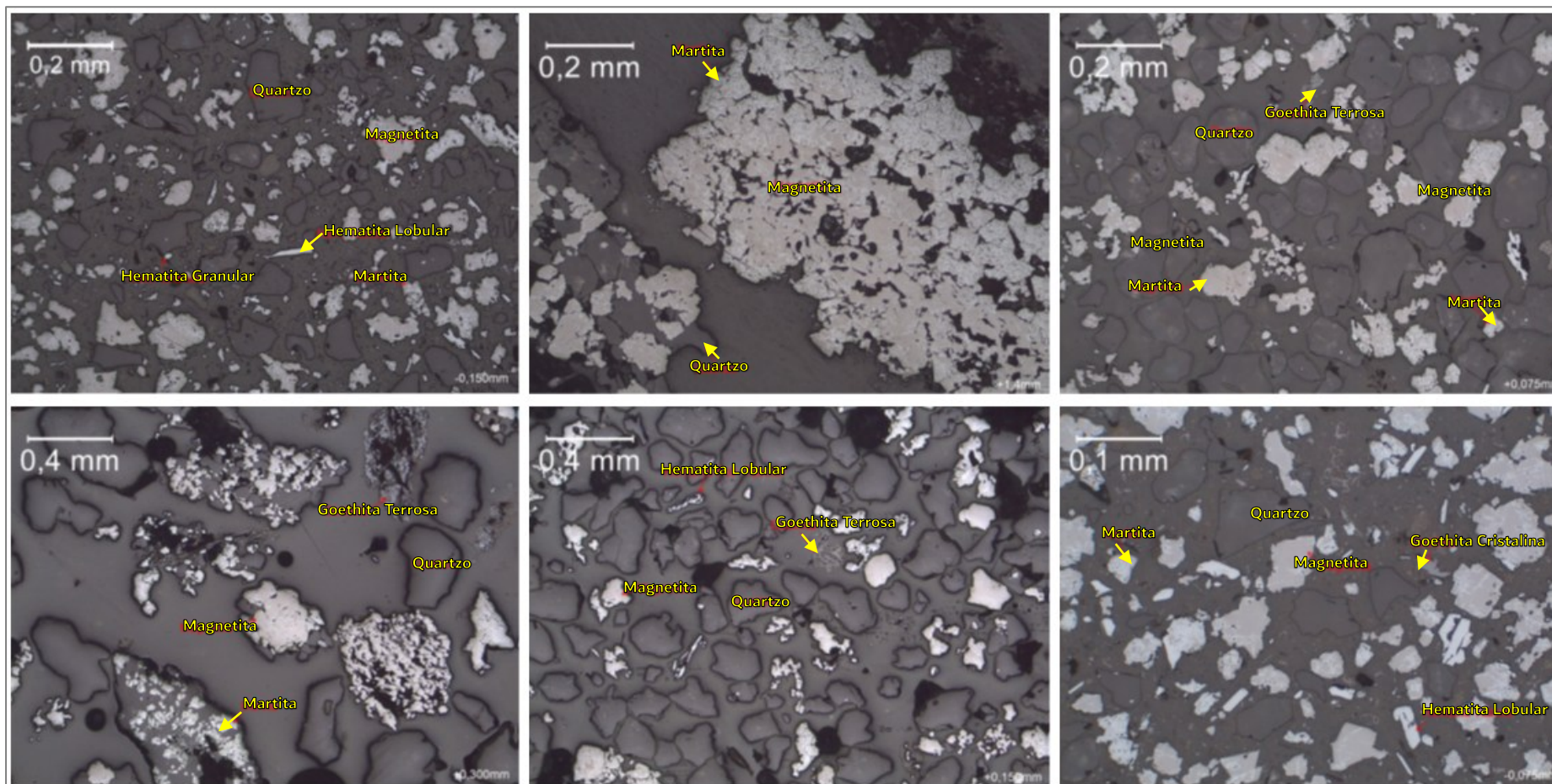


Figura 42. Fotomicrografias das amostras do *Cluster 13*. A escala é indicada nas fotos. Os nomes dos principais minerais estão indicados em amarelo. Fonte das imagens: Fundação Gorceix.

O principal mineral-minério de ferro em todas as frações é a magnetita. A goethita apresenta maiores volumes na fração -0,075mm. Os minerais magnéticos (sobretudo magnetita) equivalem a 61% da faixa retida em +1,4mm, 41% da faixa retida em 0,150mm e 42% na faixa passante. O quartzo é predominante nas faixas +0,150mm e +0,75mm, representando 51% na primeira. O percentual da liberação de quartzo + outros de 91% na faixa passante em 0,150mm. Dentre os minerais classificados como outros, foram identificados óxidos e hidróxidos de manganês e silicatos.

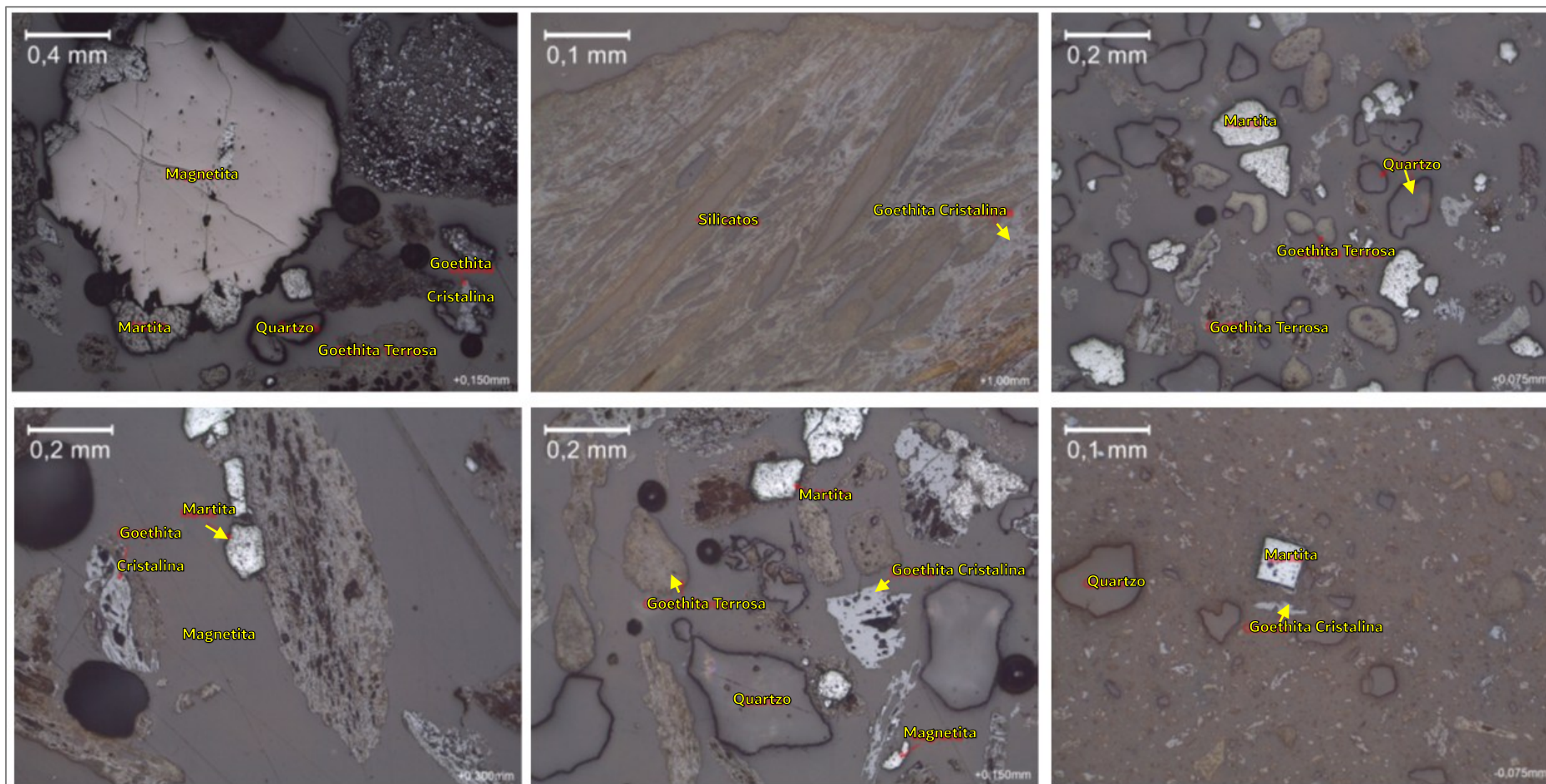


Figura 43. Fotomicrografias das amostras do *Cluster 15*. A escala é indicada nas fotos. Os nomes dos principais minerais estão indicados em amarelo. Fonte das imagens: Fundação Gorceix.

O principal mineral minério de ferro em todas as frações é a goethita (compacta e, sobretudo, terrosa), apresentando os maiores volumes nas frações passante em 0,075mm e retido em 1,4mm. O quartzo é muito variável em granulometria, sendo predominante na faixa +0,075mm. Os minerais magnéticos (predominantemente a martita) equivalem a 16% da faixa retida em 0,075mm. Dentre os classificados como outros, foram identificados óxidos e hidróxidos de manganês e silicatos.

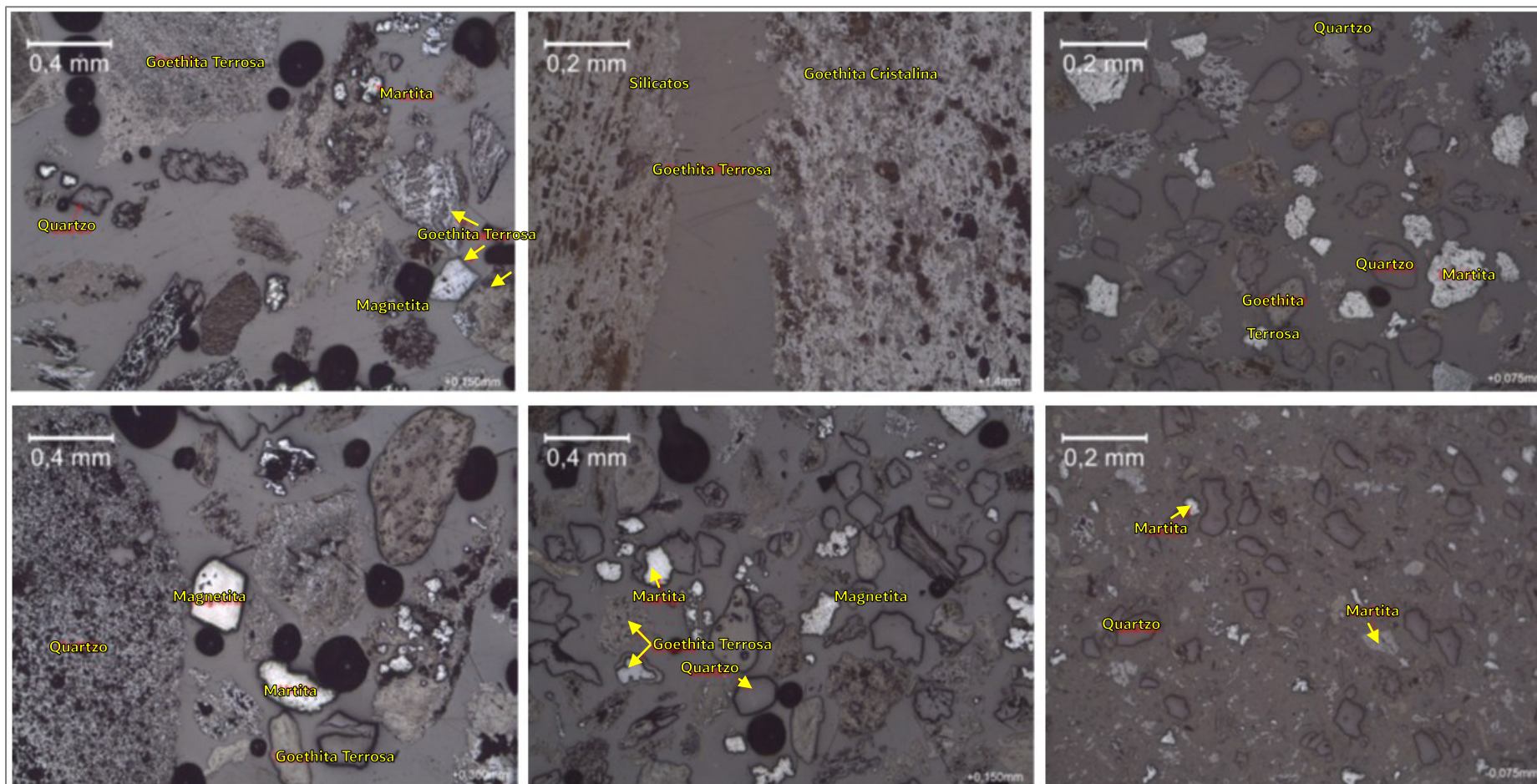


Figura 44. Fotomicrografias das amostras do *Cluster 17*. A escala é indicada nas fotos. Os nomes dos principais minerais estão indicados em amarelo. Fonte das imagens: Fundação Gorceix.

O principal mineral minério de ferro em todas as frações é a goethita (compacta e, sobretudo, terrosa), apresentando os maiores volumes na fração +1,4mm. O quartzo é muito variável em granulometria, sendo predominante na faixa +0,075mm. Os minerais magnéticos (predominantemente martita) equivalem a 15% da faixa retida em 0,075mm. Dentre os classificados como outros, foram identificados óxidos e hidróxidos de manganês e silicatos.

3.9.2. DETERMINAÇÃO DO GRAU DE LIBERAÇÃO

O grau de liberação dos principais minerais-minério de ferro e ganga é apresentado para cada agrupamento nos gráficos da Figura 45 a Figura 50. A liberação do ferro para as amostras de IAN (*clusters* 05, 15 e 17) ocorre numa condição de moagem fina, -0,075mm. Nesta malha tem-se ainda uma liberação de ferro limitada, na ordem máxima de 75%. Para as amostras de ITF (*clusters* 06, 07 e 13), os minerais de ferro apresentam boa liberação na fração +0,075mm, na ordem de 95%, com exceção da goethita terrosa, que deve ser naturalmente eliminada nas lamas em decorrência da moagem fina, -0,075mm, exigida para o atendimento de um grau de liberação superior a 90%. Assim sendo, o cenário de lavra e beneficiamento ideal seria a blendagem do IAN e do ITF para composição da alimentação da usina de tratamento de minérios em proporções tais que o desempenho da rota preferencial de concentração sugerida para o ITF não seja comprometido.

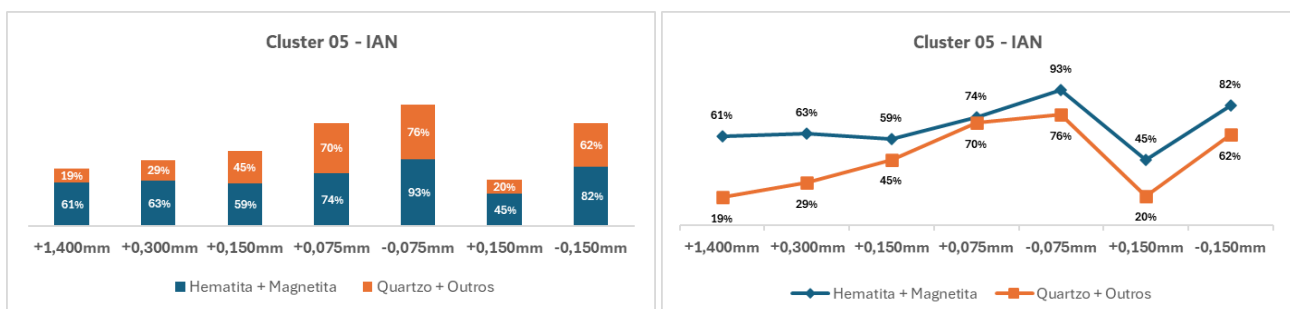


Figura 45. Grau de liberação das partículas minerais do *Cluster* 05. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

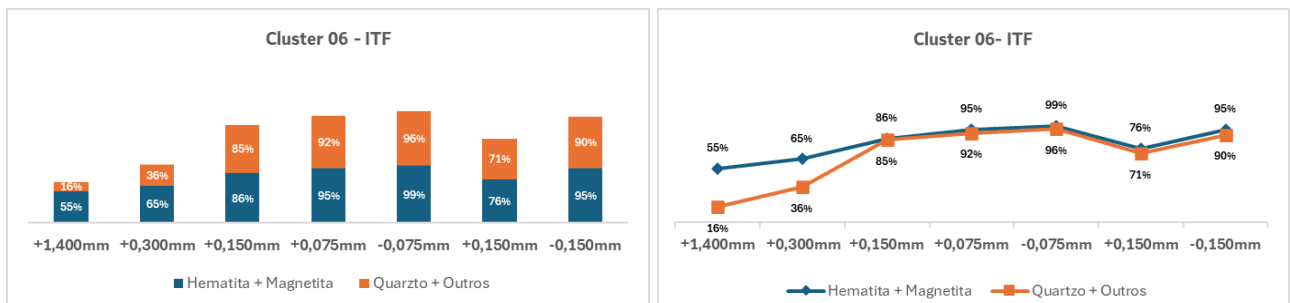


Figura 46. Grau de liberação das partículas minerais do *Cluster* 06. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

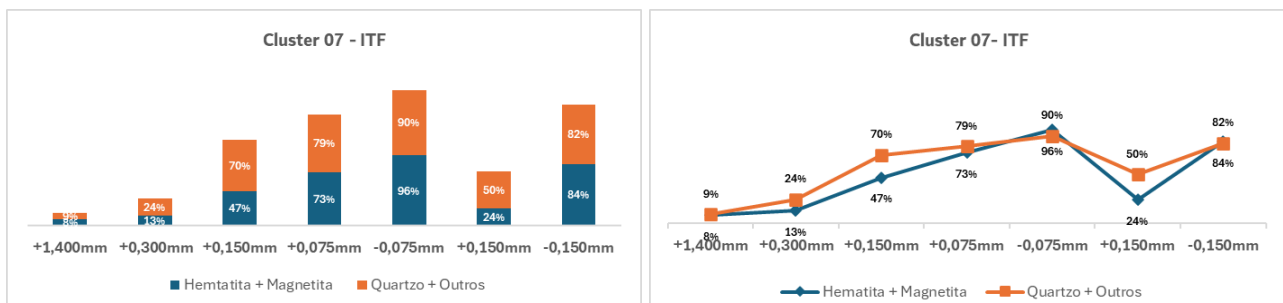


Figura 47. Grau de liberação das partículas minerais do *Cluster* 07. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

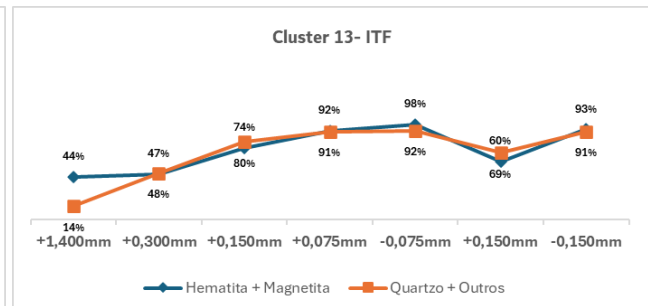
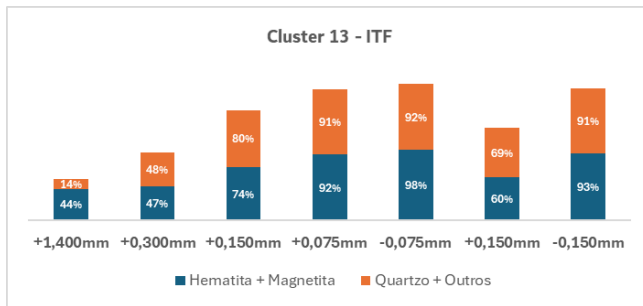


Figura 48. Grau de liberação das partículas minerais do Cluster 13. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

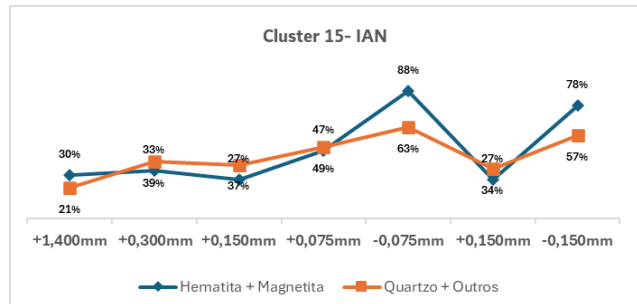
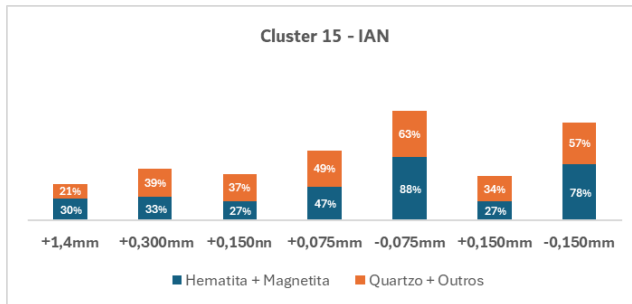


Figura 49. Grau de liberação das partículas minerais do Cluster 15. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

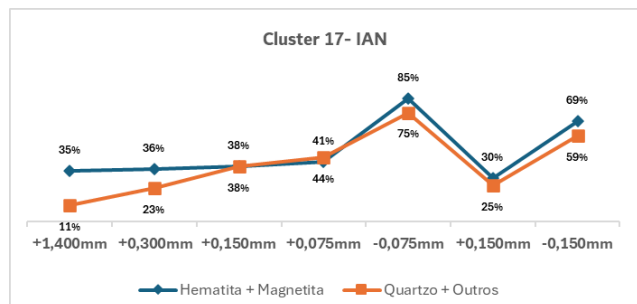
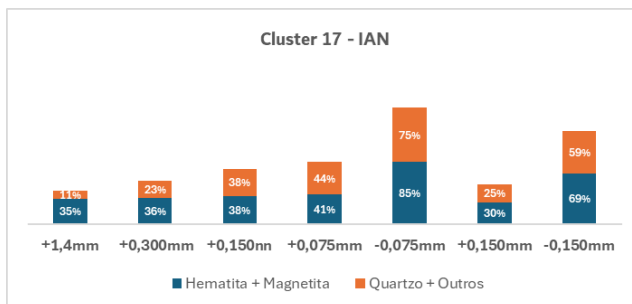


Figura 50. Grau de liberação das partículas minerais do Cluster 17. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

4. CONCLUSÕES

- O grau de liberação das partículas é um parâmetro de grande importância nas operações de tratamento de minérios, uma vez que afeta diretamente a eficiência das etapas de beneficiamento mineral;
- A metodologia de estudo visou a caracterização dos litotipos mineralizados mais abundantes da jazida da Mina CDO, cujo recurso é constituído por cerca de 80% de quartzo itabiritos e 20% de itabiritos anfibolíticos;
- Os principais objetivos foram identificar diferentes domínios composicionais, compor amostras representativas a partir de intervalos de testemunhos de sondagem geológica e avaliar as características granulométricas, químicas e mineralógicas dos itabiritos, buscando prever seu comportamento perante o processo de concentração do ferro;
- Por meio da análise exploratória multivariada dos dados de sondagem geológica, foram identificados e mapeados seis grupos de interesse e geradas seis amostras representativas, sendo três de quartzo itabiritos e outras três de itabiritos anfibolíticos;
- As amostras foram construídas a partir de incrementos oriundos de diferentes testemunhos de sondagem e foram submetidas à preparação física (classificação, britagem, homogeneização, quarteamento e peneiramento na série de Tyler), análises granuloquímicas e microscopia óptica de luz refletida;
- Todas as amostras estudadas são friáveis (semi-compactas em pouquíssima proporção) e apresentam potencial para concentração de ferro com geração de produtos comerciais.;
- Os principais minerais de ferro identificados foram hematita, magnetita, martita (um polimorfo com composição química e mineralógica de hematita e estrutura cristalina de magnetita) e goethita, que ocorrem em diferentes formas, hábitos e proporções;
- O grau de alteração e a porosidade de todas as amostras é elevado e a granulometria das partículas muito variada dentro de uma mesma tipologia;
- O mineral de ganga mais expressivo em todas as amostras é o quartzo, que ocorre tanto na forma livre quanto em agregados com outros silicatos e/ou óxidos e hidróxidos de ferro, alumínio e manganês;
- Os grupos anfibolíticos apontaram a presença majoritária de goethita como mineral-minério de ferro, sobretudo na variedade terrosa, o que pode estar associado a um baixo potencial de recuperação do ferro;
- Os domínios quartzosos apresentaram presença significativa de magnetita como principal mineral-minério, acenando positivamente para processos de separação magnética;
- Os quartzo itabiritos apresentaram percentual médio de Fe^T de 42% e SiO_2 de 36%, com 54% de massa passante na malha de 1,0mm, além disto, os minerais magnéticos equivalem a cerca de 37% do total, com maior proporção na fração -0,15mm, enquanto o quartzo representa 42%, sendo o percentual da liberação da fração -16,0mm britada entre 0,15mm e 0,3mm em torno de 78%;

- Para os itabiritos anfibolíticos, os teores médios de Fe^{T} estão na ordem de 47% e 21% de SiO_2 , com 51% da massa passante na malha de 1,0mm, sendo que os minerais magnéticos equivalem a cerca de 7% do total, com maior proporção na fração -0,15mm. O quartzo representa 22%, sendo o percentual da liberação da fração -16,0mm britada em -0,075mm de 71%;
- As associações mineralógicas observadas sugerem que a origem da jazida esteja atribuída a intercalações de formações ferríferas das fácies silicato, óxido-silicato e anfibólio;
- Uma vez que ambas as tipologias estudadas, coexistem de forma intrínseca na jazida, o cenário mais provável, no presente e no futuro, é a sua lavra conjunta com blendagem para composição da alimentação da usina em porções tais que a eficiência da rota dos quartzo itabiritos não seja afetada pela presença em menor proporção dos itabiritos anfibolíticos.

5. RECOMENDAÇÕES

As recomendações a seguir baseiam-se em sugestões dos consultores externos que acompanharam o desenvolvimento do projeto:

- A escolha dos furos de sondagem para amostragem visando a realização de testes deve seguir o modelo geológico e contemplar os teores comuns do depósito. A escolha de furos dentro de uma mesma seção geológica garante que as amostras possuam variabilidades próximas, ou seja, pertencendo ao mesmo grupo geológico com as mesmas características mineralógicas;
- A utilização de 1/2 (metade) do testemunho para garantir tanto massa quanto representatividade da amostra, além da mineralogia e da granulometria, evitando o aumento do erro fundamental da amostragem. Para viabilizar este procedimento, deve-se adotar boas práticas, como o registro fotográfico do testemunho completo antes do corte para a amostragem primária e o registro documental da amostragem;
- Se a decisão for utilizar amostras reservas, é possível adequar o fluxograma de preparação física para separar uma reserva do *top size* para compor amostras de maior volume para testes de caracterização;
- Criação de um protocolo exclusivo para garantir o melhor aproveitamento destes furos;
- Na escolha dos intervalos para amostragem, dar preferência àqueles de mesmo suporte amostral, evitando incrementos maiores ou menores que a média do suporte (amostragem equiprobabilística);
- Abandonar procedimentos de amostragem que não estejam de acordo com os conceitos da teoria moderna da amostragem, como a homogeneização de amostras dentro de sacos plásticos por agitação.

A exemplo da abordagem realizada na amostragem de testemunhos, para a fase de amostragem de campo, a autora recomenda que seja feita a setorização do depósito (Cava Ilha, Abóboras, Entre Cavas) e a coleta de material para composição ao longo de perfis perpendiculares ao eixo de desenvolvimento dos corpos mineralizados. Para a realização dos estudos de concentração em escala de bancada, recomenda-se utilizar amostras blendadas de acordo com a composição litológica prevista no sequenciamento de lavra anual.

Com relação ao desenvolvimento de trabalhos técnico-científicos futuros, sugere-se uma abordagem focada na origem dos principais tipos de rochas ferríferas presentes na jazida e nos minérios de ferro a elas associados, averiguando-se as transformações sofridas durante as fases de mineralização. Os estudos metalogenéticos permitem conhecer melhor a gênese dos depósitos minerais, investigando-se o papel dos processos magmáticos, metamórficos e hidrotermais na sua formação por meio de metodologias voltadas para a petrografia, estudos de inclusões fluidas, MEV e microquímica, por exemplo. De posse dessas informações, é possível elaborar modelos de prospecção mineral com muito mais assertividade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmim, F.F. 2004. O que faz de um cráton um cráton? O Cráton do São Francisco e as revelações Almeidianas ao delimitá-lo. In: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli A.; Carneiro, C.D.R.; Brito-Neves B.B. Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, p.17-35.
- Alkmim, F.F. & Marshak, S. 1998. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90: 29-58.
- Alkmim, F. & Martins-Neto, M. 2012. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 33(1).
- Almeida, F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7(4): 349-364.
- ASTM. 2024. Standard Guide for Elemental Analysis by Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry.
- Babinski, M.; Chemale Jr., F.; Van Schmus, W.R. 1995. The Pb/Pb age of the Minas Supergroup carbonate rocks, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Precambrian Research* 72, 235-245.
- Cavalcanti, J.A.D.; Araújo, J.C.S.; Ferreira, R.C.R.; Santos, L.D.; Freitas, F.M.; Silva, M.A. 2015. Projeto ARIM Carta Geológica da Porção Central do Supergrupo Rio das Velhas – Quadrilátero Ferrífero. Belo Horizonte: CPRM, Mapa colorido, Escala 1:100.000.
- Caxito, F. & Dias, T.G. 2018. Ferro. In: Recursos Minerais de Minas Gerais On Line: síntese do conhecimento sobre as riquezas minerais, história geológica, e meio ambiente e mineração em Minas Gerais. Pedrosa-Soares, A.C.; Voll, E.; Cunha, E.C. Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (CODEMGE).
- Dardenne, M.A. & Schobbenhaus, C. 2001. Metalogênese do Brasil. Serviço Geológico do Brasil – CPRM. Brasília: Editora UnB, 392p.
- DNPM. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. 1974. Retrospectivas das atividades de convênio Brasil-Alemanha e trabalhos do Centro de Geofísica Aplicada. Brasília, DNPM, Boletim das Minas e Energia.
- Dorr, J.V.N.II. 1969. Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: U. S. Geological Survey Professional Paper, 641-A, 110p.
- Endo, I.; Delgado, C.E.R.; Oliveira, M.M.F. de; Zapparoli, A. de C.; Carlos, D.U.; Galbiatti, H.F.; Castro, P. de T.A.; Suita, M.T. de F.; Barbosa, M.S.C.; Lana, C.E.; Moura, L.G.B. de. 2019b. Estratigrafia e Arcabouço Estrutural do Quadrilátero Ferrífero: Nota Explicativa do Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000. Ouro Preto, Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero.

- Endo, I. & Rocha Filho, O.G. 2003. Estratigrafia, arcabouço estrutural e controle da mineralização ferrífera da mina de Gongo Soco, MG. 48p.
- Fundação Gorceix. 2024. Relatório GSM – 24.017 Rev01: Estudos De Caracterização Granuloquímica E Mineralógica - 06 Amostras GSM. Ouro Preto. Outubro de 2024. 37p.
- Landim, P.M.B. 2011. Análise estatística de dados geológicos multivariados. São Paulo: Oficina de textos.
- Gaudin, A.M. 1936. Principles of mineral dressing. London: McGraw-Hill, 1939 *apud* Wills, B.A. Wills. Mineral Processing Technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. 7th. ed. Oxford: Elsevier, 2006. 444p.
- Hartmann, L.A.; Endo, I.; Suita, M.T.F.; Santos, J.O.S.; Frantz, J.C.; Carneiro, M.A.; Naughton, N.J.; Barley, M.E. 2006. Provenance and age delimitation of Quadrilátero Ferrífero sandstones based on zircon U-Pb isotopes. Journal of South Am. Earth Sci., 20, 273-285.
- ISO – International Organization for Standardization. 2015. ISO 11536:2015: Iron ores — Determination of loss on ignition — Gravimetric method.
- Noce, C.M. 1995. Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 128p.
- Pires, F.R.M. 1995. Textural and mineralogical variations during metamorphism of the Proterozoic Itabira Iron Formation in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil, Anais da Academia Brasileira de Ciências, 67(1):77-105.
- Renger, F.E.; Suckau, V.E.; Silva, R.M.P. 1993. Sedimentologia e análise de bacia da Formação Moeda, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. 7º Simpósio de Geologia de Minas Gerais, Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo de Minas Gerais, Anais, p. 41-45.
- SOLID – Consultoria Geológica Ltda. 2024. Relatório Técnico 001: Validação da Amostragem para Caracterização Tecnológica dos Minérios da Mina Córrego da Onça, Barão de Cocais/MG. Outubro de 2024. 44p.
- Teixeira da Costa, M. 1961. Sedimentação e orogênese da Série de Minas: Ouro Preto, SICEG. Soc. Interc. Cult. e Est. Geol., nº. 1, p. 55-61.
- Vieira, F.W.R. & Oliveira, G.A.I. 1988. Geologia do Distrito Aurífero de Nova Lima, Minas Gerais. In: Schobbenhaus, C. & Coelho, C.E.S. (coord.) Principais Depósitos Minerais do Brasil. Brasília: DNPM/CVRD. v.3, p. 377-391.

ANEXO I – ESTATÍSTICA

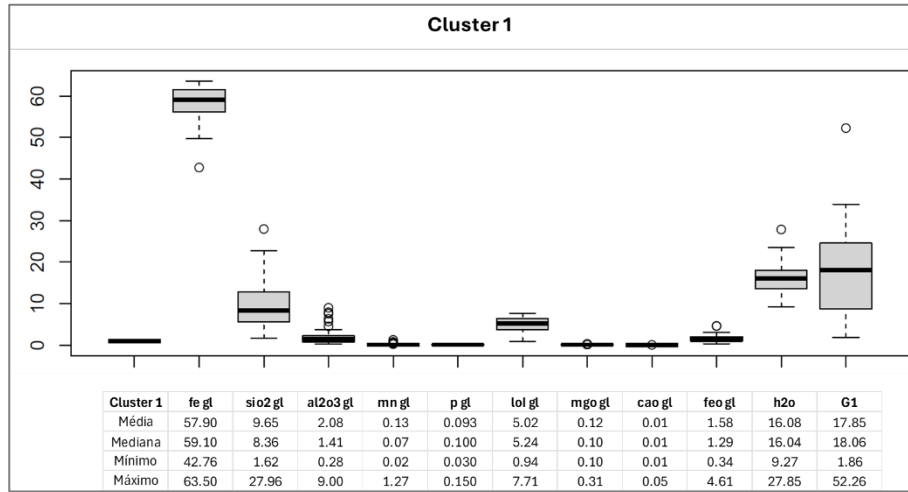


Figura 51. Boxplot das variáveis analisadas para o Cluster 01.

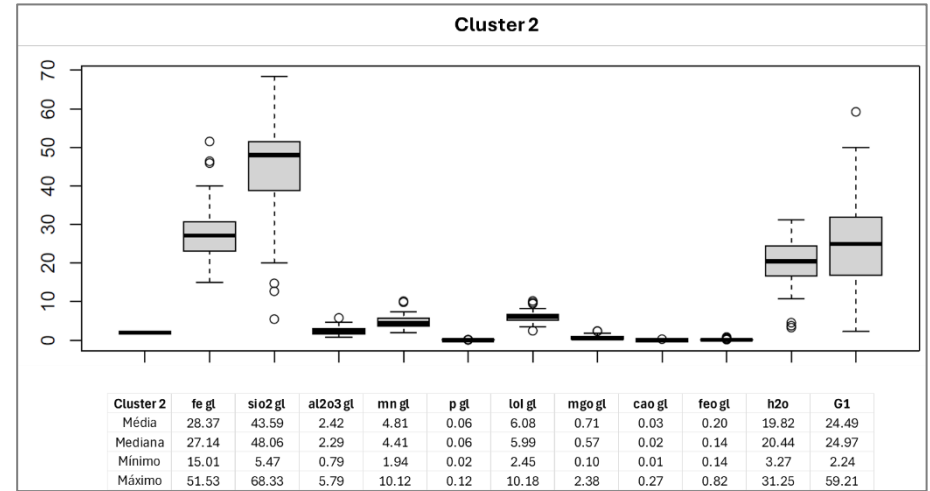


Figura 53. Boxplot das variáveis analisadas para o Cluster 02.

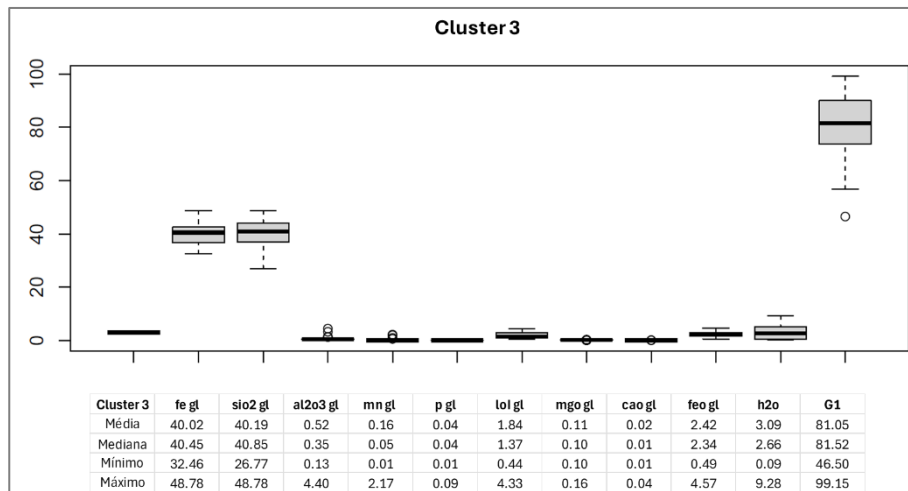


Figura 52. Boxplot das variáveis analisadas para o Cluster 03.

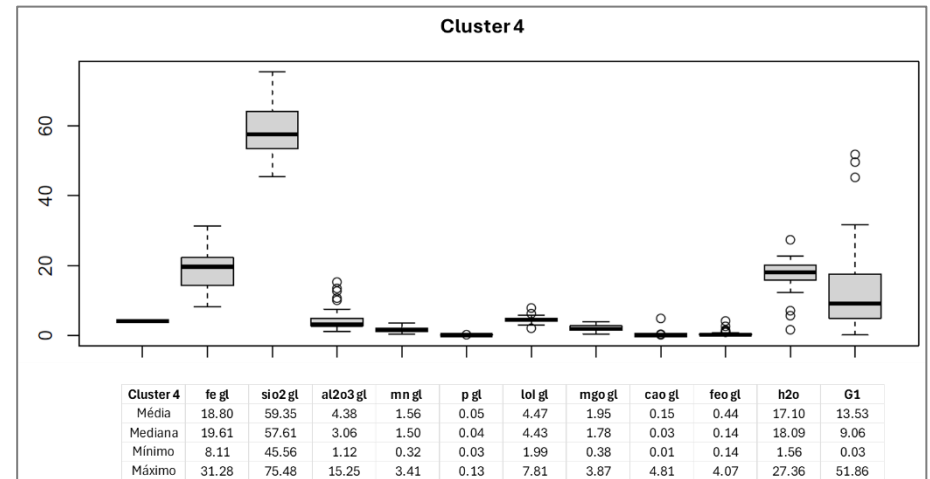


Figura 54. Boxplot das variáveis analisadas para o Cluster 04.

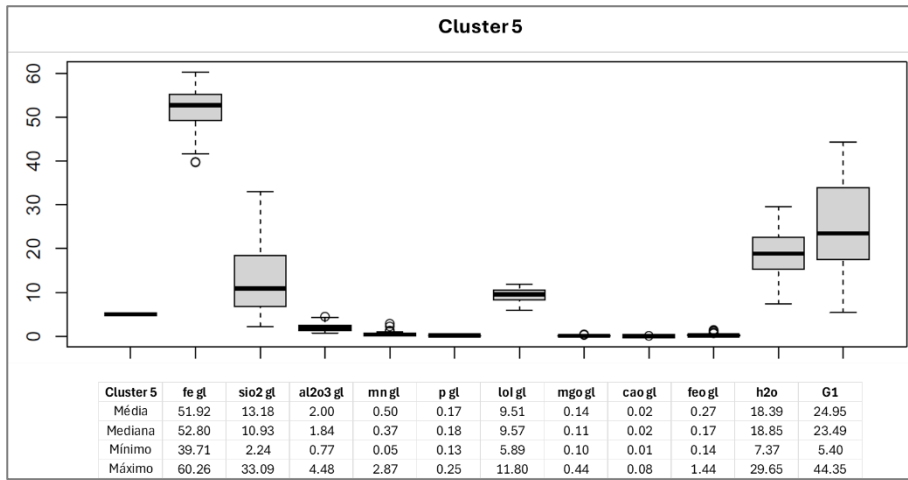


Figura 55. Boxplot das variáveis analisadas para o Cluster 05.

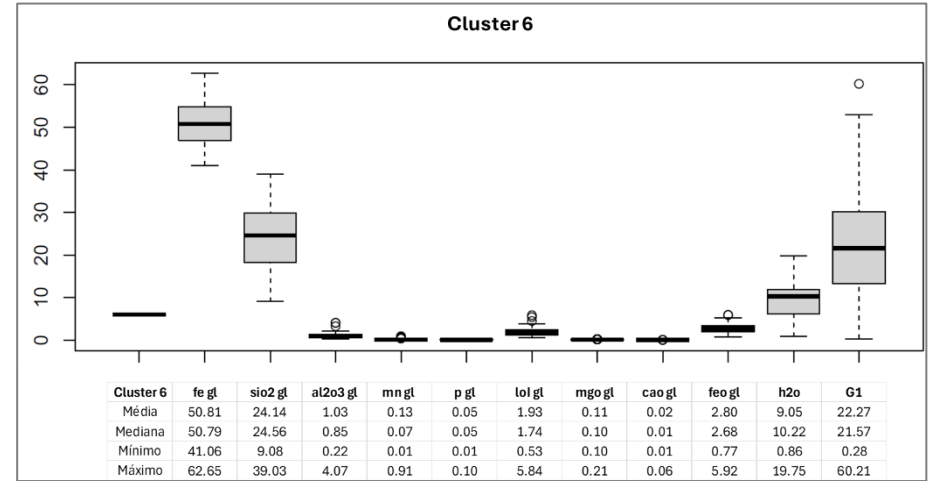


Figura 57. Boxplot das variáveis analisadas para o Cluster 06.

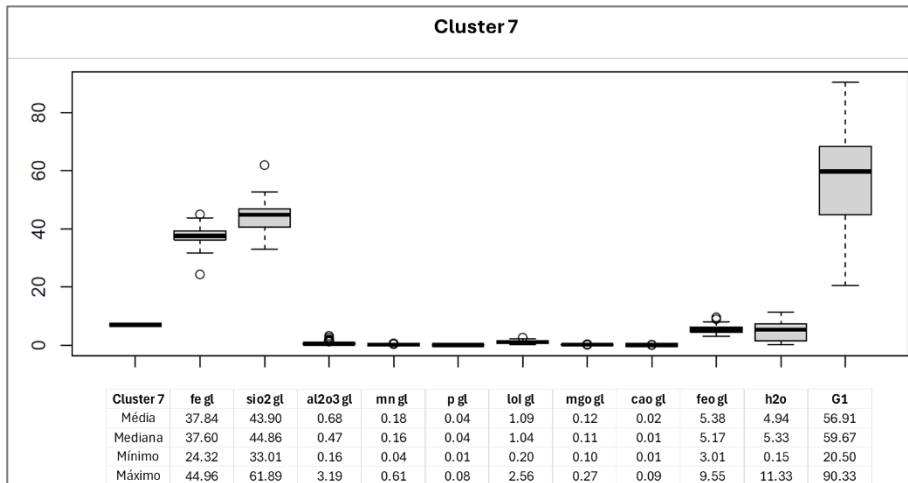


Figura 56. Boxplot das variáveis analisadas para o Cluster 07.

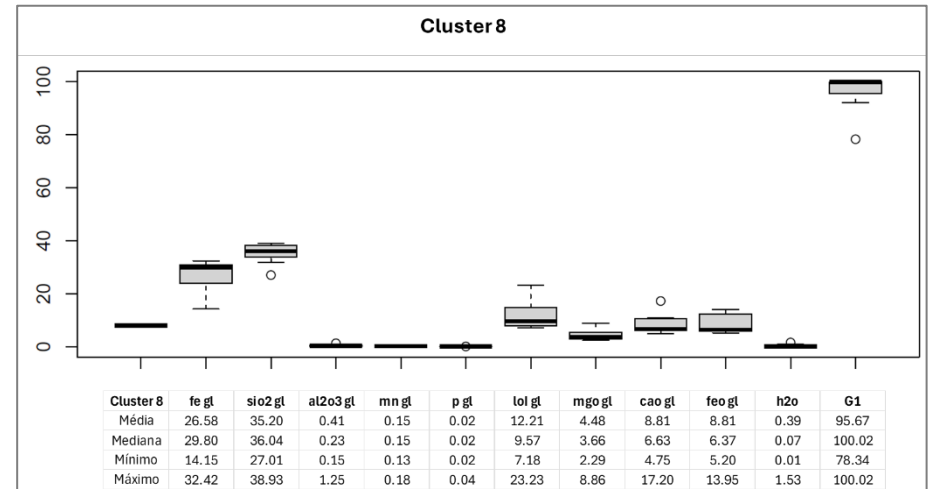


Figura 58. Boxplot das variáveis analisadas para o Cluster 08.

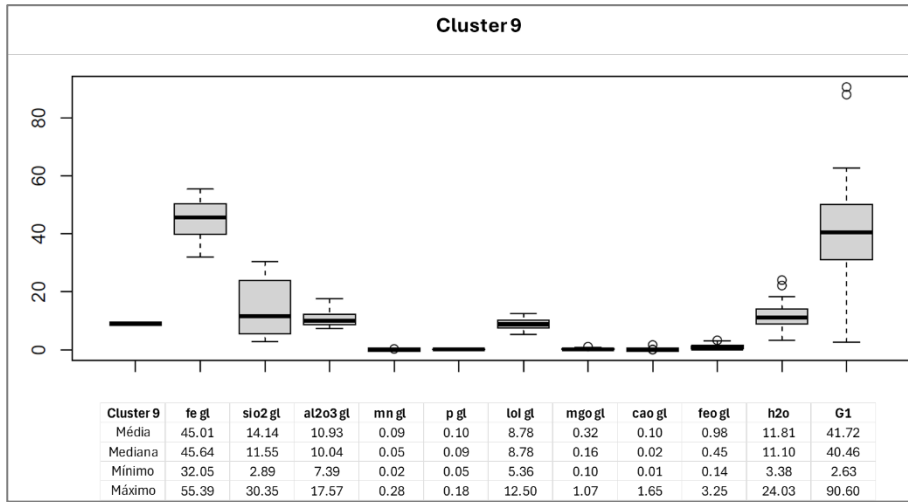


Figura 59. Boxplot das variáveis analisadas para o Cluster 09.

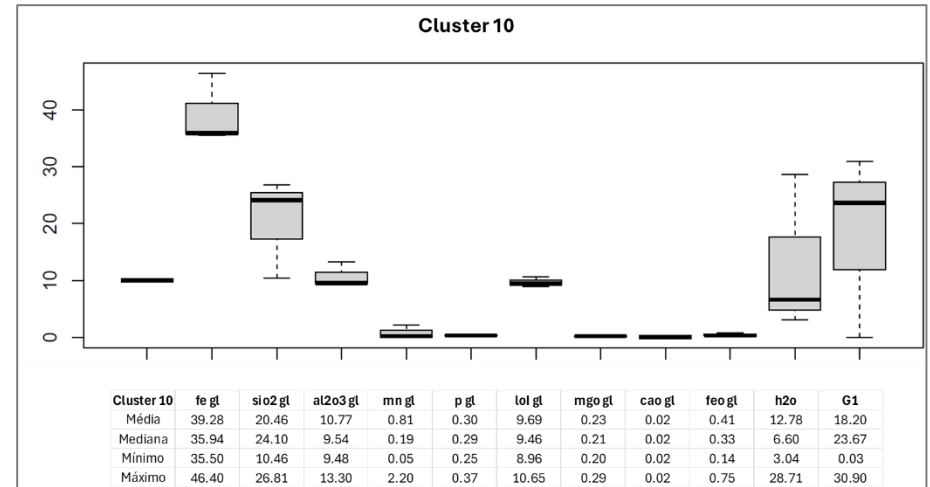


Figura 61. Boxplot das variáveis analisadas para o Cluster 10.

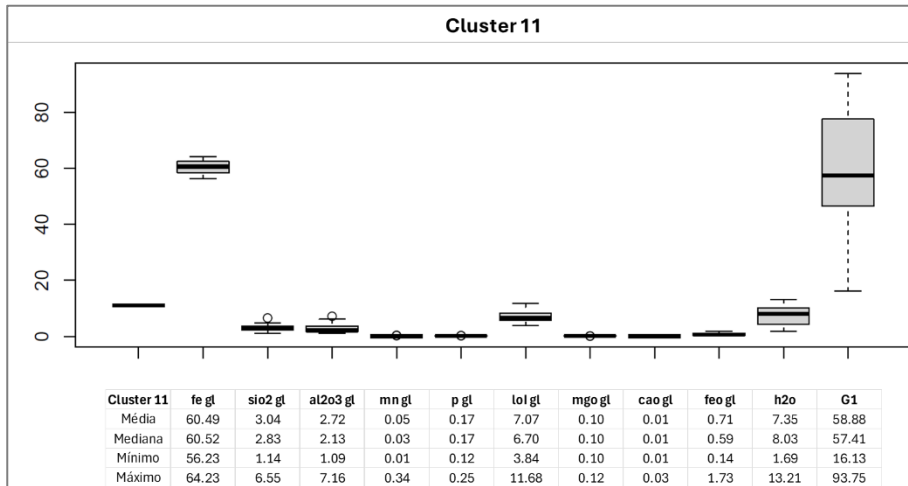


Figura 60. Boxplot das variáveis analisadas para o Cluster 11.

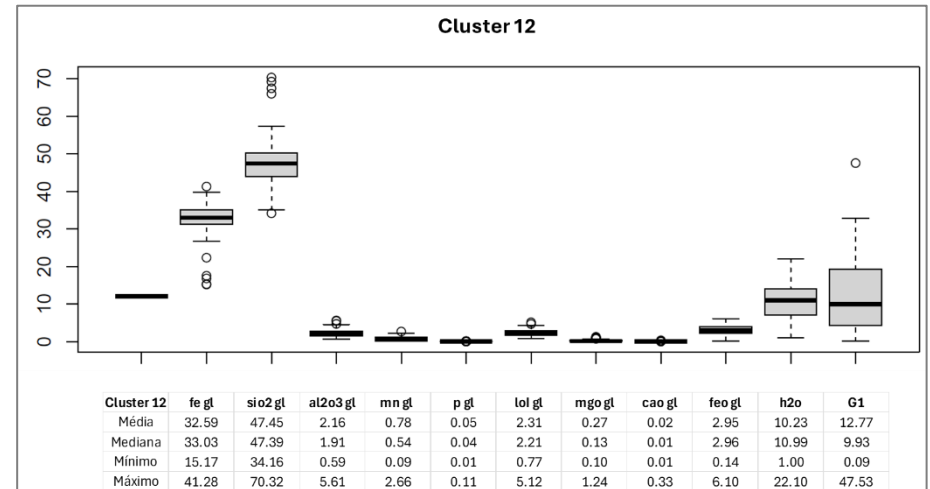


Figura 62. Boxplot das variáveis analisadas para o Cluster 12.

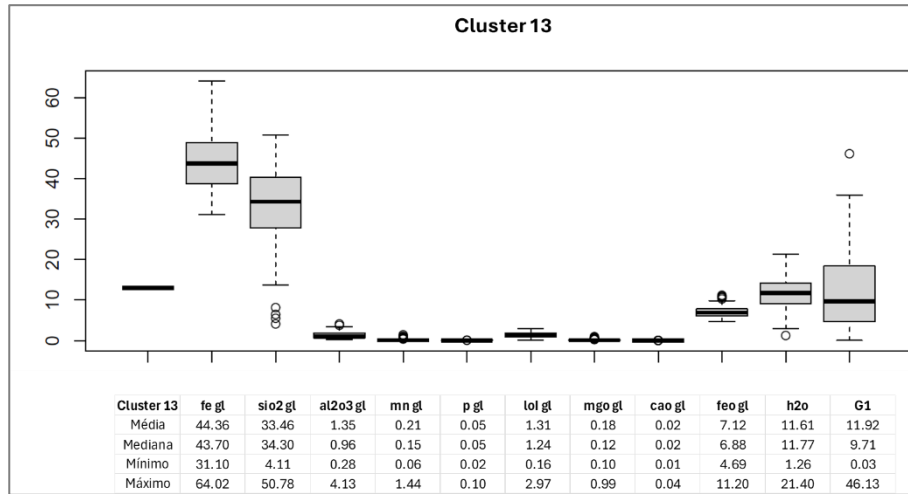


Figura 63. Boxplot das variáveis analisadas para o Cluster 13.

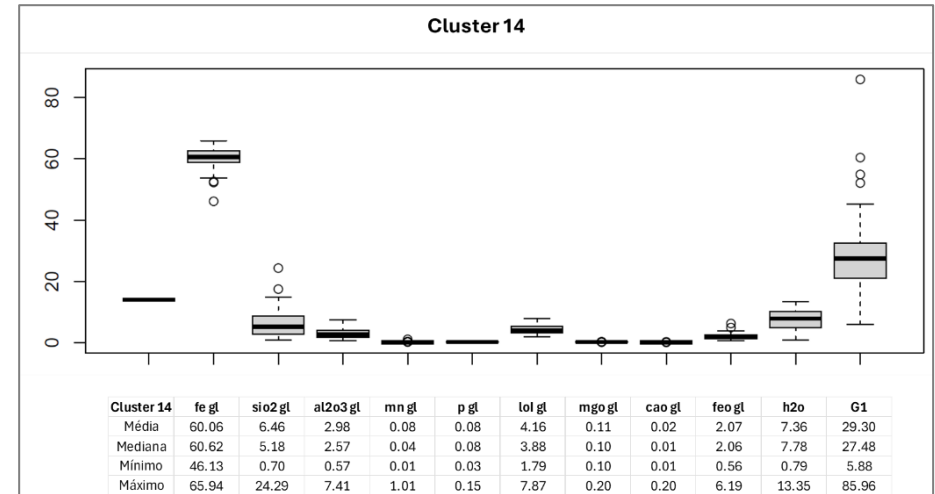


Figura 65. Boxplot das variáveis analisadas para o Cluster 14.

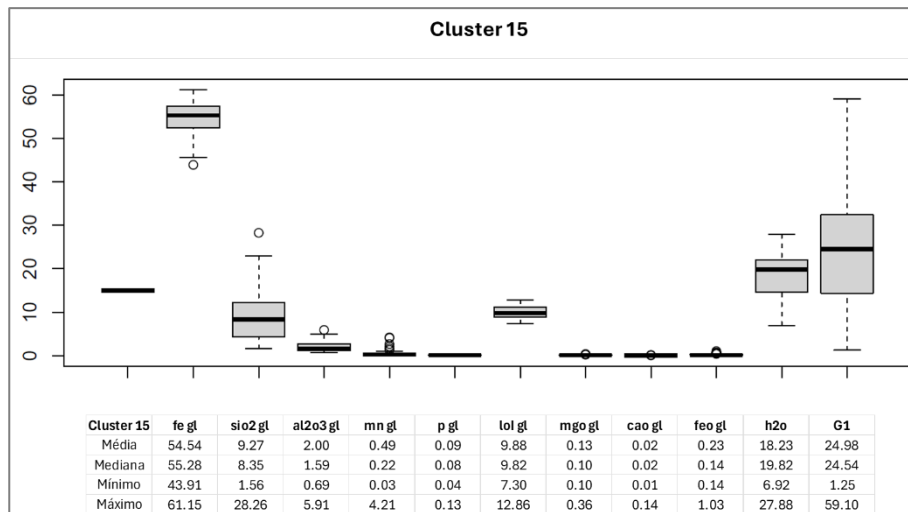


Figura 64. Boxplot das variáveis analisadas para o Cluster 15.

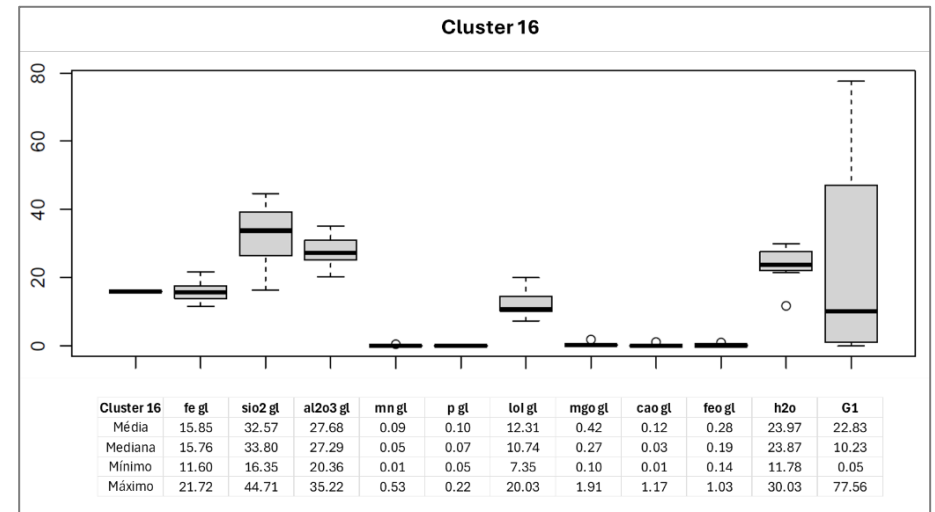


Figura 66. Boxplot das variáveis analisadas para o Cluster 16.

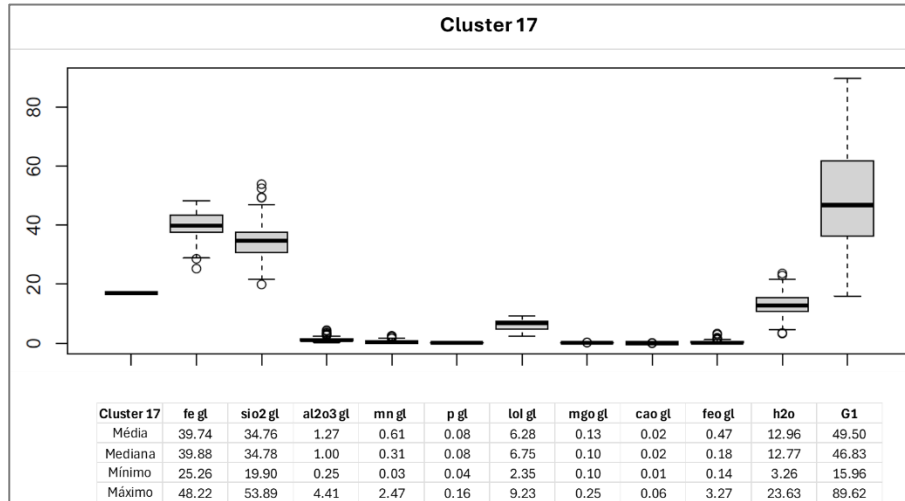


Figura 67. *Boxplot* das variáveis analisadas para o *Cluster 17*.

ANEXO II – GRANULOMETRIA

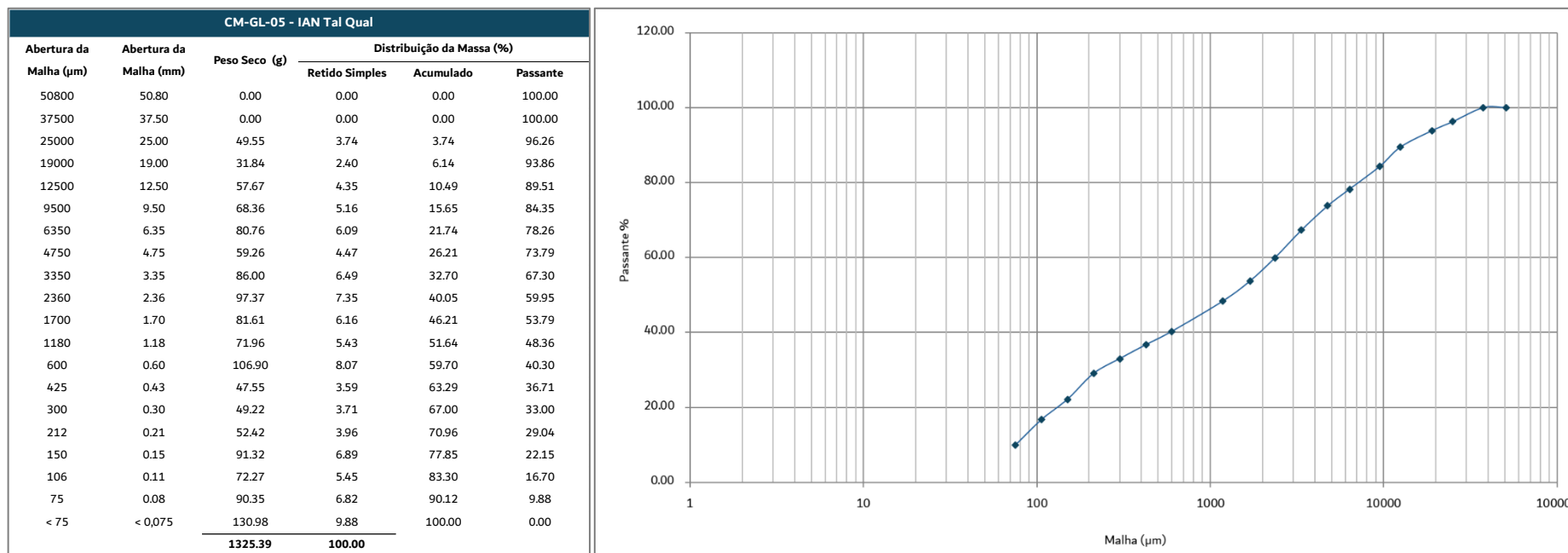


Figura 68. Distribuição granulométrica do *Cluster* 05. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

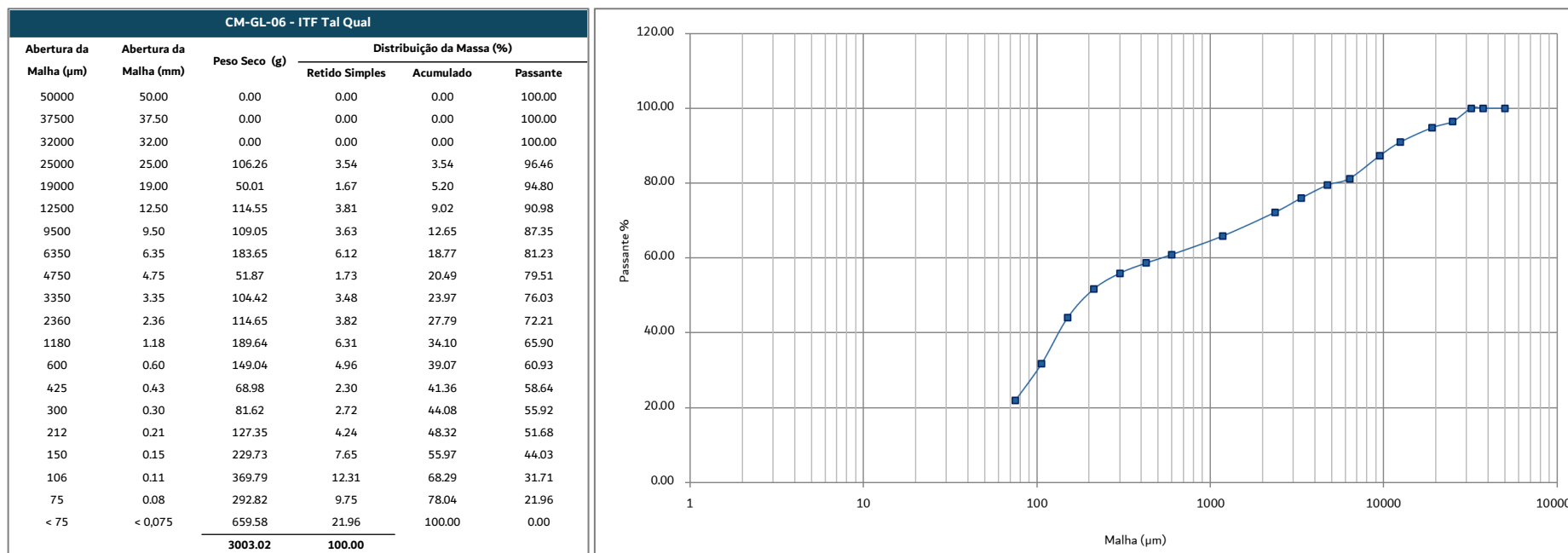


Figura 69. Distribuição granulométrica do *Cluster* 06. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

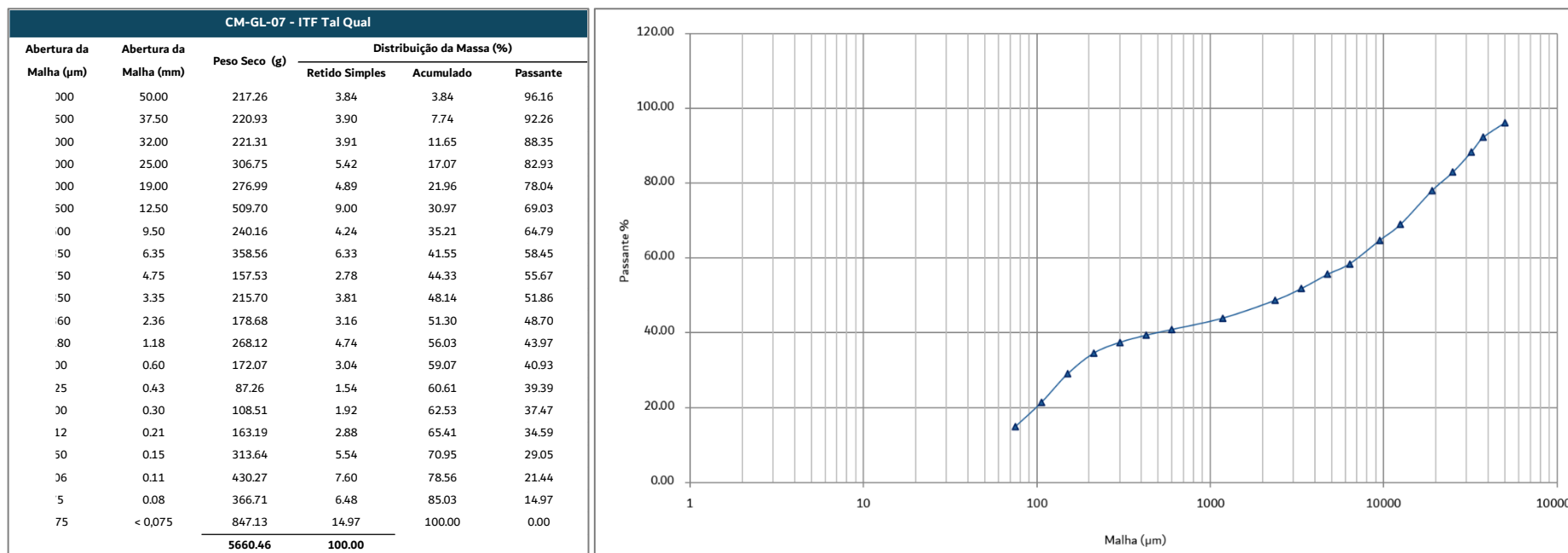


Figura 70. Distribuição granulométrica do *Cluster 07*. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

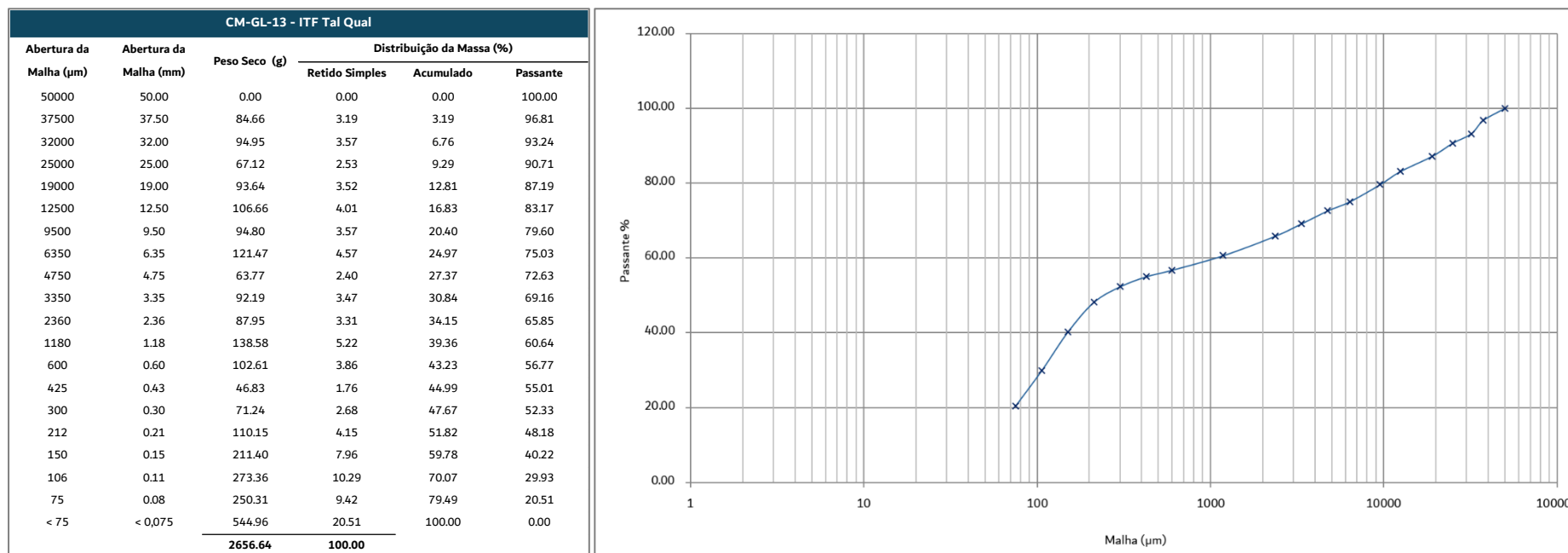


Figura 71. Distribuição granulométrica do *Cluster* 13. Fonte dos dados: Fundação Gorceix

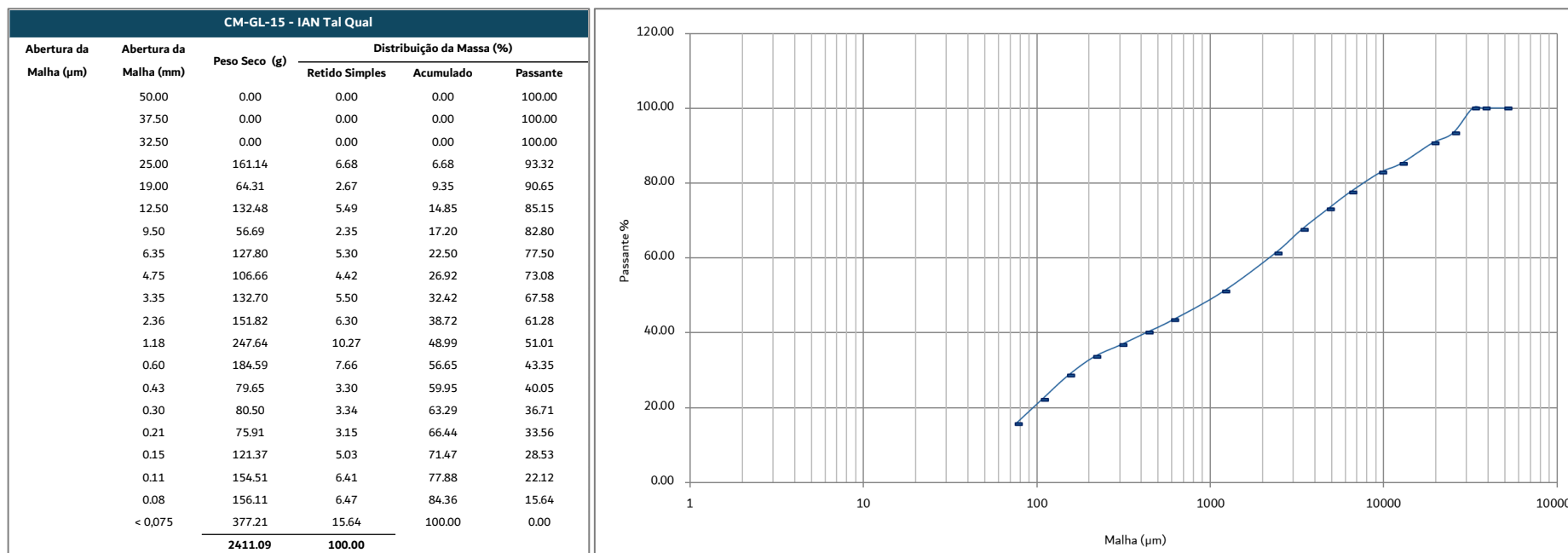


Figura 72. Distribuição granulométrica do Cluster 15. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

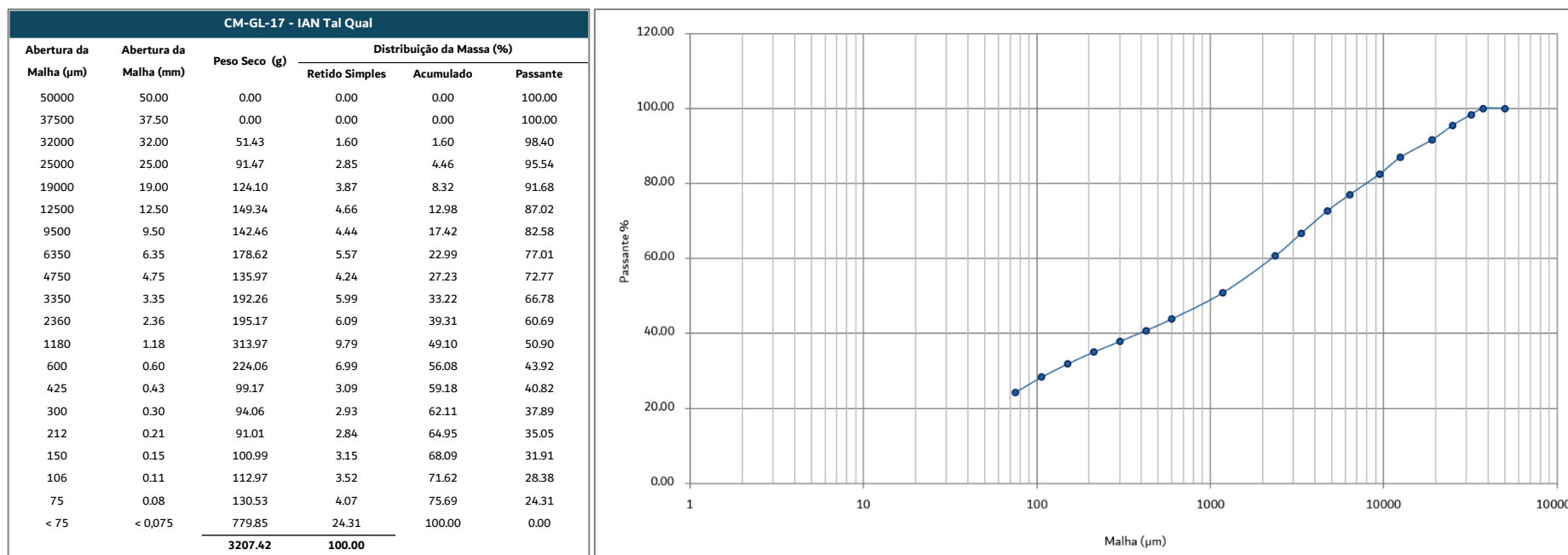


Figura 73. Distribuição granulométrica do *Cluster 17*. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

ANEXO III – GRANULOQUÍMICA

Tabela 8. Análises granuloquímicas do *Cluster 05*. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

CM-GL-05 - IAN - Britada a 1,40mm																
Abertura da Malha (µm)	Abertura da Malha (mm)	Peso Seco (g)	Distribuição da Massa (%)			Distribuição (%)		Análise Química								
			Retido	Acumulado	Passante	Simple	Acumulado	Fe (%)	Fe (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Mn (%)	P (%)	CaO (%)	MgO (%)
150,00	0,15	120,43	40,32	40,32	59,68	41,31	41,31	52,15	11,51	1,61	0,91	0,175	<0,01	0,07	10,52	99,91
< 150	< 0,150	178,28	59,68	100,00	0,00	58,69	100,00	50,05	15,07	2,03	0,50	0,175	<0,01	0,12	10,00	99,90
Massa Total (g)		298,71	100,00			Teor Global Calculado (%)		50,90	13,63	1,86	0,67	0,175	0,00	0,10	10,21	99,90
						Teor Global Analisado (%)		50,24	14,10	2,02	0,83	0,180	<0,01	0,13	10,26	99,95
CM-GL-05 - IAN - Blend < 16,00mm (> 16,00 Gerado + < 16,00 Natural)																
Abertura da Malha (µm)	Abertura da Malha (mm)	Peso Seco (g)	Distribuição da Massa (%)			Distribuição (%)		Análise Química								
			Retido	Acumulado	Passante	Simple	Acumulado	Fe (%)	Fe (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Mn (%)	P (%)	CaO (%)	MgO (%)
8000,00	8,00	310,00	9,87	9,87	90,13	10,76	10,76	55,18	6,51	1,82	1,23	0,175	<0,01	0,10	10,51	99,93
1400,00	1,40	746,00	23,76	33,63	66,37	25,28	36,04	53,88	9,25	1,45	0,56	0,190	<0,01	0,05	10,94	99,95
300,00	0,30	390,00	12,42	46,05	53,95	12,75	48,79	52,00	11,36	1,74	0,92	0,189	<0,01	0,08	10,76	99,98
150,00	0,15	176,00	5,61	51,66	48,34	4,77	53,56	43,13	26,80	1,69	0,85	0,144	<0,01	0,10	8,22	99,99
75,00	0,08	152,00	4,84	56,50	43,50	3,62	57,18	37,86	35,74	1,80	0,62	0,113	0,01	0,17	6,94	99,95
< 75	< 0,075	1366,00	43,50	100,00	0,00	42,82	100,00	49,84	14,74	2,41	0,37	0,183	<0,01	0,12	10,04	99,56
Massa Total (g)		3140,00	100,00			Teor Global Calculado (%)		50,64	13,90	1,97	0,61	0,179	0,00	0,10	10,14	99,78
						Teor Global Analisado (%)		50,24	14,10	2,02	0,83	0,180	<0,01	0,13	10,26	99,95

Tabela 9. Análises granuloquímicas do Cluster 06. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

CM-GL-06 - ITF - Britada a 1,40mm																	
Abertura da Malha (µm)	Abertura da Malha (mm)	Peso Seco (g)	Distribuição da Massa (%)			Distribuição (%)		Análise Química									Total (%)
			Retido	Acumulado	Passante	Simple	Acumulado	Fe (%)	Fe (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Mn (%)	P (%)	CaO (%)	MgO (%)	
150,00	0,15	103,24	34,39	34,39	65,61	38,08	38,08	53,91	19,86	0,32	0,60	0,052	<0,01	<0,01	1,68	99,91	
< 150	< 0,150	196,94	65,61	100,00	0,00	61,92	100,00	45,96	30,63	0,77	0,29	0,044	<0,01	<0,01	1,85	99,53	
Massa Total (g)		300,18	100,00			Teor Global Calculado (%)		48,69	26,93	0,62	0,40	0,047	0,00	0,00	1,79	99,66	
						Teor Global Analisado (%)		47,91	27,63	0,65	0,49	0,052	<0,01	<0,01	1,98	99,58	
CM-GL-06 - ITF - Blend < 16,00mm (> 16,00 Gerado + < 16,00 Natural)																	
Abertura da Malha (µm)	Abertura da Malha (mm)	Peso Seco (g)	Distribuição da Massa (%)			Distribuição (%)		Análise Química									Total (%)
			Retido	Acumulado	Passante	Simple	Acumulado	Fe (%)	Fe (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Mn (%)	P (%)	CaO (%)	MgO (%)	
8000,00	8,00	252,00	8,13	8,13	91,87	9,00	9,00	53,08	20,65	0,52	0,28	0,065	<0,01	<0,01	1,93	99,56	
1400,00	1,40	576,00	18,58	26,71	73,29	23,37	32,37	60,30	10,63	0,35	0,38	0,059	<0,01	<0,01	2,03	99,93	
300,00	0,30	296,00	9,55	36,26	63,74	11,56	43,94	58,06	13,31	0,36	0,91	0,048	<0,01	<0,01	1,78	99,82	
150,00	0,15	390,00	12,58	48,84	51,16	8,50	52,44	32,40	52,19	0,24	0,26	0,021	<0,01	<0,01	0,72	99,90	
75,00	0,08	626,00	20,19	69,03	30,97	13,64	66,08	32,39	52,20	0,40	0,15	0,019	<0,01	<0,01	0,58	99,78	
< 75	< 0,075	960,00	30,97	100,00	0,00	33,92	100,00	52,51	19,58	1,40	0,42	0,061	<0,01	<0,01	2,81	99,70	
Massa Total (g)		3100,00	100,00			Teor Global Calculado (%)		47,94	28,10	0,69	0,37	0,046	0,00	0,00	1,78	99,78	
						Teor Global Analisado (%)		47,91	27,63	0,65	0,49	0,052	<0,01	<0,01	1,98	99,58	

Tabela 10. Análises granulométricas do *Cluster 07*. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

CM-GL-07 - ITF - Britada a 1,40mm																
Abertura da Malha (µm)	Abertura da Malha (mm)	Peso Seco (g)	Distribuição da Massa (%)			Distribuição (%)		Análise Química								
			Retido	Acumulado	Passante	Simplex Fe (%)	Acumulado Fe (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Mn (%)	P (%)	CaO (%)	MgO (%)	LOI (%)	Total (%)
150,00	0,15	127,86	42,95	42,95	57,05	45,04	45,04	39,69	41,83	0,28	0,12	0,026	<0,01	<0,01	0,47	99,58
< 150	< 0,150	169,81	57,05	100,00	0,00	54,96	100,00	36,46	43,84	1,06	0,22	0,065	<0,01	<0,01	2,11	99,73
Massa Total (g)		297,67	100,00			Teor Global Calculado (%)		37,85	42,98	0,72	0,18	0,048	0,00	0,00	1,41	99,67
						Teor Global Analisado (%)		36,49	44,13	0,99	0,19	0,048	0,04	<0,01	1,63	99,98
CM-GL-07 - ITF - Blend < 16,00mm (> 16,00 Gerado + < 16,00 Natural)																
Abertura da Malha (µm)	Abertura da Malha (mm)	Peso Seco (g)	Distribuição da Massa (%)			Distribuição (%)		Análise Química								
			Retido	Acumulado	Passante	Simplex Fe (%)	Acumulado Fe (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Mn (%)	P (%)	CaO (%)	MgO (%)	LOI (%)	Total (%)
8000,00	8,00	473,69	18,71	18,71	81,29	19,56	19,56	39,57	41,00	0,20	0,12	0,026	<0,01	<0,01	0,50	99,96
1400,00	1,40	657,29	25,96	44,67	55,33	30,22	49,78	44,06	35,03	0,18	0,14	0,031	<0,01	<0,01	0,87	99,81
300,00	0,30	188,75	7,45	52,12	47,88	8,47	58,25	42,99	36,80	0,36	0,23	0,031	<0,01	<0,01	0,58	99,69
150,00	0,15	235,48	9,30	61,42	38,58	5,16	63,41	21,02	69,34	0,19	0,10	0,013	<0,01	<0,01	0,07	99,84
75,00	0,08	372,53	14,71	76,13	23,87	8,53	71,94	21,95	67,85	0,14	0,08	0,013	<0,01	<0,01	0,03	99,59
< 75	< 0,075	604,36	23,87	100,00	0,00	28,20	100,14	44,71	27,98	2,57	0,37	0,118	<0,01	<0,01	3,98	99,49
Massa Total (g)		2532,10	100,00			Teor Global Calculado (%)		37,90	42,62	0,76	0,19	0,047	0,00	0,00	1,32	99,72
						Teor Global Analisado (%)		36,49	44,13	0,99	0,19	0,048	0,04	<0,01	1,63	99,98

Tabela 11. Análises granulométricas do *Cluster* 13. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

CM-GL-13 - ITF - Britada a 1,40mm																
Abertura da Malha (µm)	Abertura da Malha (mm)	Peso Seco (g)	Distribuição da Massa (%)			Distribuição (%)			Análise Química							
			Retido	Acumulado	Passante	Simple	Acumulado	Fe (%)	Fe (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Mn (%)	P (%)	CaO (%)	MgO (%)
150,00	0,15	101,36	38,97	38,97	61,03	39,67	39,67	42,24	37,91	0,72	0,17	0,026	0,01	0,12	0,29	99,80
< 150	< 0,150	158,76	61,03	100,00	0,00	60,33	100,00	41,02	37,25	1,21	0,29	0,065	0,01	0,22	1,61	99,53
Massa Total (g)		260,12	100,00			Teor Global Calculado (%)		41,50	37,51	1,02	0,24	0,050	0,01	0,18	1,10	99,64
						Teor Global Analisado (%)		41,58	38,18	0,72	0,23	0,045	0,00	0,16	1,00	99,99
CM-GL-13 - ITF - Blend < 16,00mm (> 16,00 Gerado + < 16,00 Natural)																
Abertura da Malha (µm)	Abertura da Malha (mm)	Peso Seco (g)	Distribuição da Massa (%)			Distribuição (%)			Análise Química							
			Retido	Acumulado	Passante	Simple	Acumulado	Fe (%)	Fe (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Mn (%)	P (%)	CaO (%)	MgO (%)
8000,00	8,00	300,00	13,03	13,03	86,97	14,92	14,92	48,42	30,06	0,43	0,09	0,021	<0,01	0,04	-0,07	99,89
1400,00	1,40	440,00	19,11	32,15	67,85	25,70	40,62	56,86	17,42	0,65	0,15	0,033	<0,01	0,04	0,14	99,86
300,00	0,30	166,00	7,21	39,36	60,64	8,73	49,35	51,23	24,86	0,63	0,33	0,037	<0,01	0,11	0,50	99,93
150,00	0,15	302,00	13,12	52,48	47,52	7,57	56,93	24,42	63,99	0,38	0,12	0,011	<0,01	0,11	-0,15	99,46
75,00	0,08	428,00	18,59	71,07	28,93	11,61	68,54	26,42	61,51	0,44	0,09	0,010	<0,01	0,11	-0,30	99,71
< 75	< 0,075	666,00	28,93	100,00	0,00	31,46	100,00	45,99	26,57	2,23	0,47	0,111	<0,01	0,33	3,71	99,58
Massa Total (g)		2302,00	100,00			Teor Global Calculado (%)		42,29	36,56	1,00	0,23	0,047	0,00	0,15	1,05	99,71
						Teor Global Analisado (%)		41,58	38,18	0,72	0,23	0,045	0,00	0,16	1,00	99,99

Tabela 12. Análises granulométricas do *Cluster* 15. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

CM-GL-15 - IAN - Britada a 1,40mm																
Abertura da Malha (µm)	Abertura da Malha (mm)	Peso Seco (g)	Distribuição da Massa (%)			Distribuição (%)		Análise Química								
			Retido	Acumulado	Passante	Simple	Acumulado	Fe (%)	Fe (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Mn (%)	P (%)	CaO (%)	MgO (%)
150,00	0,15	90,24	30,78	30,78	69,22	29,66	29,66	45,20	25,04	1,24	0,29	0,072	<0,01	<0,01	8,20	99,82
< 150	< 0,150	202,97	69,22	100,00	0,00	70,34	100,00	47,66	19,64	1,51	0,19	0,086	0,01	<0,01	10,03	99,99
Massa Total (g)		293,21	100,00			Teor Global Calculado (%)		46,90	21,30	1,43	0,22	0,082	0,01	0,00	9,47	99,94
						Teor Global Analisado (%)		47,63	20,20	1,40	0,23	0,087	<0,01	<0,01	9,70	99,90
CM-GL-15 - IAN - Blend < 16,00mm (> 16,00 Gerado + < 16,00 Natural)																
Abertura da Malha (µm)	Abertura da Malha (mm)	Peso Seco (g)	Distribuição da Massa (%)			Distribuição (%)		Análise Química								
			Retido	Acumulado	Passante	Simple	Acumulado	Fe (%)	Fe (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Mn (%)	P (%)	CaO (%)	MgO (%)
8000,00	8,00	178,00	8,20	8,20	91,80	6,62	6,62	38,47	35,30	1,70	0,15	<0,004	<0,01	<0,01	7,40	99,90
1400,00	1,40	406,00	18,71	26,91	73,09	17,29	23,90	44,06	25,40	1,50	0,23	0,087	<0,01	<0,01	9,40	99,90
300,00	0,30	244,00	11,24	38,16	61,84	11,86	35,76	50,29	16,30	1,30	0,15	0,087	<0,01	<0,01	9,80	99,80
150,00	0,15	122,00	5,62	43,78	56,22	5,30	41,06	44,97	26,00	1,30	0,31	0,044	<0,01	<0,01	7,50	99,80
75,00	0,08	128,00	5,90	49,68	50,32	4,84	45,90	39,10	36,00	1,20	0,15	0,087	<0,01	<0,01	6,30	99,90
< 75	< 0,075	1092,00	50,32	100,00	0,00	54,10	100,00	51,27	14,40	1,50	0,15	0,044	<0,01	<0,01	10,20	99,90
Massa Total (g)		2170,00	100,00			Teor Global Calculado (%)		47,69	20,31	1,46	0,17	0,056	0,00	0,00	9,39	99,88
						Teor Global Analisado (%)		47,63	20,20	1,40	0,23	0,087	<0,01	<0,01	9,70	99,90

Tabela 13. Análises granulométricas do *Cluster 17*. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

CM-GL-17 - IAN - Britada a 1,40mm																
Abertura da Malha (µm)	Abertura da Malha (mm)	Peso Seco (g)	Distribuição da Massa (%)			Distribuição (%)		Análise Química								
			Retido	Acumulado	Passante	Simple	Acumulado	Fe (%)	Fe (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Mn (%)	P (%)	CaO (%)	MgO (%)
150,00	0,15	128,29	36,56	36,56	63,44	36,93	36,93	43,68	27,33	0,79	0,74	0,087	<0,01	<0,01	8,15	99,98
< 150	< 0,150	222,64	63,44	100,00	0,00	63,07	100,00	42,98	28,17	1,16	0,34	0,100	<0,01	<0,01	8,36	99,95
Massa Total (g)		350,93	100,00			Teor Global Calculado (%)		43,24	27,86	1,02	0,49	0,095	0,00	0,00	8,28	99,96
						Teor Global Analisado (%)		43,15	28,06	1,05	0,39	0,100	<0,01	<0,01	8,30	99,93
CM-GL-17 - IAN - Blend < 16,00mm (> 16,00 Gerado + < 16,00 Natural)																
Abertura da Malha (µm)	Abertura da Malha (mm)	Peso Seco (g)	Distribuição da Massa (%)			Distribuição (%)		Análise Química								
			Retido	Acumulado	Passante	Simple	Acumulado	Fe (%)	Fe (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Mn (%)	P (%)	CaO (%)	MgO (%)
8000,00	8,00	354,49	14,44	14,44	85,56	13,46	13,46	40,52	33,43	0,54	0,360	0,070	<0,01	<0,01	7,33	99,90
1400,00	1,40	655,03	26,68	41,13	58,87	27,24	40,70	44,39	26,17	0,95	0,340	0,100	<0,01	<0,01	8,60	99,93
300,00	0,30	280,98	11,45	52,57	47,43	12,40	53,09	47,10	21,90	0,81	0,520	0,061	<0,01	<0,01	9,03	99,98
150,00	0,15	131,59	5,36	57,93	42,07	5,27	58,36	42,73	30,35	0,62	0,530	0,083	<0,01	<0,01	6,93	99,97
75,00	0,08	132,66	5,40	63,34	36,66	4,86	63,22	39,12	36,09	0,87	0,370	0,074	<0,01	<0,01	6,26	99,93
< 75	< 0,075	900,00	36,66	100,00	0,00	36,78	100,00	43,62	27,04	1,04	0,280	0,070	<0,01	<0,01	8,89	99,99
Massa Total (g)		2454,75	100,00			Teor Global Calculado (%)		43,49	27,81	0,89	0,353	0,078	0,00	0,00	8,36	99,96
						Teor Global Analisado (%)		43,15	28,06	1,05	0,390	0,100	<0,01	<0,01	8,30	99,93

ANEXO IV – MINERALOGIA

Tabela 14. Composição mineralógica dos agrupamentos. Fonte dos dados: Fundação Gorceix.

Minerografia							
Cluster 05							
Mineral	+1,400mm (%)	+0,300mm (%)	+0,150mm (%)	+0,075mm (%)	-0,075mm (%)	+0,0150mm adicional (%)	-0,0150mm adicional (%)
Hematita Tabular Monocristalina	0,00	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00
Hematita Granular Monocristalina	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hematita Tabular Policristalina	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00
Hematita Granular Policristalina	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hematita Lobular	0,00	0,38	0,55	0,00	0,19	0,30	0,36
Martita	0,00	1,92	6,03	10,88	2,24	1,68	7,17
Magnetita	0,00	0,19	0,18	0,19	0,00	0,20	0,18
Goethita	90,71	84,23	67,46	51,78	80,04	85,04	69,71
Terrosos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Quartzo	6,26	8,46	21,21	32,83	16,60	9,33	20,79
Gibbsita	0,20	0,38	0,91	0,38	0,37	0,30	0,18
Outros	2,83	4,42	3,47	3,94	0,56	3,11	1,61
	100,00	99,98	99,99	100,00	100,00	100,01	100,00
Cluster 07							
Mineral	+1,400mm (%)	+0,300mm (%)	+0,150mm (%)	+0,075mm (%)	-0,075mm (%)	+0,0150mm adicional (%)	-0,0150mm adicional (%)
Hematita Tabular Monocristalina	0,00	0,00	0,00	0,19	12,62	0,19	6,84
Hematita Granular Monocristalina	0,00	0,00	0,00	0,00	3,11	0,00	1,20
Hematita Tabular Policristalina	0,58	0,98	0,38	0,19	0,00	0,94	0,00
Hematita Granular Policristalina	0,00	0,00	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00
Hematita Lobular	0,39	3,54	1,54	2,50	3,88	0,94	1,44
Martita	0,97	4,72	8,83	15,77	20,97	2,07	16,02
Magnetita	35,85	22,05	21,31	20,77	14,95	21,05	18,20
Goethita	6,59	6,30	1,92	1,54	15,92	5,08	15,22
Terrosos	3,10	0,39	1,34	0,38	0,39	1,32	0,06
Quartzo	50,58	60,43	63,92	58,65	28,16	67,67	39,41
Gibbsita	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Outros	1,94	1,57	0,58	0,00	0,00	0,75	1,62
	100,00	99,98	100,01	99,99	100,00	100,01	100,01
Cluster 15							
Mineral	+1,400mm (%)	+0,300mm (%)	+0,150mm (%)	+0,075mm (%)	-0,075mm (%)	+0,0150mm adicional (%)	-0,0150mm adicional (%)
Hematita Tabular Monocristalina	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hematita Granular Monocristalina	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hematita Tabular Policristalina	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hematita Granular Policristalina	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hematita Lobular	0,00	0,20	0,00	0,19	0,00	0,00	0,00
Martita	0,43	4,49	6,48	14,91	1,91	2,29	4,01
Magnetita	0,64	1,95	0,57	0,96	0,00	1,91	0,52
Goethita	71,67	57,81	58,48	48,37	81,07	62,52	71,95
Terrosos	3,86	4,10	1,90	0,96	0,19	2,68	0,17
Quartzo	13,52	13,48	25,33	30,78	16,25	19,89	22,30
Gibbsita	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,57	0,00
Outros	9,87	17,97	7,24	3,82	0,57	10,13	1,05
	99,99	100,00	100,00	99,99	99,99	99,99	100,00

Minerografia							
Cluster 06							
Mineral	+1,400mm	+0,300mm	+0,150mm	+0,075mm	-0,075mm	+0,0150mm	-0,0150mm
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	adicional (%)	adicional (%)
Hematita Tabular Monocristalina	0,00	7,28	0,00	0,00	0,20	0,00	15,34
Hematita Granular Monocristalina	0,00	2,93	0,00	0,00	0,00	0,00	3,88
Hematita Tabular Policristalina	0,38	0,10	1,13	0,96	0,20	0,00	0,00
Hematita Granular Policristalina	0,00	0,00	0,00	0,19	0,00	0,00	0,00
Hematita Lobular	6,48	4,50	13,18	10,56	0,98	1,33	2,96
Martita	23,43	25,74	31,83	22,07	22,99	32,19	32,35
Magnetita	17,14	14,99	20,90	26,10	22,00	21,14	13,12
Goethita	9,52	14,85	13,56	13,82	5,11	4,57	9,61
Terrosos	0,38	0,12	1,13	1,54	0,20	0,38	0,00
Quartzo	41,33	29,03	14,50	21,31	47,15	40,00	20,52
Gibbsita	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Outros	1,33	0,39	3,77	3,45	1,18	0,38	2,22
	99,99	100,00	100,00	100,00	100,01	99,99	100,00
Cluster 13							
Mineral	+1,400mm	+0,300mm	+0,150mm	+0,075mm	-0,075mm	+0,0150mm	-0,0150mm
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	adicional (%)	adicional (%)
Hematita Tabular Monocristalina	0,00	0,20	0,00	0,18	13,65	0,00	9,56
Hematita Granular Monocristalina	0,00	0,00	0,00	0,00	3,51	0,19	2,25
Hematita Tabular Policristalina	3,09	1,95	0,37	0,18	0,18	0,38	0,31
Hematita Granular Policristalina	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	0,00	0,00
Hematita Lobular	1,16	0,20	0,00	0,18	1,29	0,00	0,22
Martita	6,37	7,03	3,51	6,47	8,67	2,45	9,55
Magnetita	54,05	40,23	35,98	41,37	46,31	39,17	33,18
Goethita	5,98	6,84	3,32	3,06	7,38	4,71	6,15
Terrosos	11,39	1,76	0,18	0,36	0,00	1,13	0,04
Quartzo	16,02	40,43	55,35	46,22	15,87	51,22	34,77
Gibbsita	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21
Outros	1,93	1,37	1,29	1,98	2,95	0,75	3,75
	99,99	100,01	100,00	100,00	99,99	100,00	99,99
Cluster 17							
Mineral	+1,400mm	+0,300mm	+0,150mm	+0,075mm	-0,075mm	+0,0150mm	-0,0150mm
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	adicional (%)	adicional (%)
Hematita Tabular Monocristalina	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16
Hematita Granular Monocristalina	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hematita Tabular Policristalina	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hematita Granular Policristalina	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hematita Lobular	0,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Martita	3,52	6,76	11,62	14,57	5,86	5,01	13,41
Magnetita	0,20	0,97	0,95	1,18	0,00	1,11	0,63
Goethita	65,95	61,39	57,90	50,00	62,95	66,05	52,68
Terrosos	6,65	3,28	0,76	0,39	0,00	2,23	0,00
Quartzo	13,11	17,18	26,29	31,89	30,06	21,89	31,70
Gibbsita	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Outros	9,78	10,42	2,48	1,97	1,13	3,71	1,42
	99,99	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00