

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

ESCOLA DE MINAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL

**CARACTERIZAÇÃO DE ALUMÍNIO E FÓSFORO EM MINÉRIO
DE FERRO**

Autora: Marcela L. Figueiredo Couto

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Magela da Costa

Ouro Preto

Setembro/2009



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia de Minas
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEM



CARACTERIZAÇÃO DE ALUMÍNIO E FÓSFORO EM MINÉRIO DE FERRO

AUTOR: **Marcela L. Figueiredo Couto**

ORIENTADOR: **Prof. Dr. GERALDO MAGELA DA COSTA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Mineral.

Área de concentração: Tratamento de Minérios

Ouro Preto – Setembro de 2009

AGRADECIMENTOS

Á Deus pela inspiração e apoio em todos os momentos.

Mãe pela força e credibilidade em mim empenhadas por todo o meu caminho.

Minha irmã Dany e Simão pelo exemplo de perseverança e conquista e por tudo que contribuíram para o alcance deste objetivo.

Minha família, vó Jandira, tias e primos por toda a acolhida.

Meu irmão de coração, Thiago Pimenta que fez parte de mais esta caminhada vencida.

Ao querido Poldo por sua ternura em minha vida.

A todos os amigos que estiveram presentes e também aos que não puderam estar, meu imenso obrigado.

Aos companheiros do Laboratório de Espectroscopia Mössbauer e DRX da UFOP: Ana Cláudia, pela grande contribuição e apoio ao desenvolvimento deste trabalho, Ana P, Guilherme e Larissa.

Ao Laboratório de Geoquímica Ambiental do Departamento de Geologia da UFOP pelas análises desenvolvidas em ICP-OES.

Ao Laboratório de Tratamentos de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas da UFOP.

Ao Prof. Dr. Geraldo Magela da Costa pela grande oportunidade e confiança.

Ao Msc. Engenheiro da Vale Flávio de Castro Dutra pela contribuição intelectual.

Á Vale pela concessão do auxílio financeiro para a realização deste projeto.

RESUMO

O presente trabalho teve por finalidade determinar as formas de ocorrência de fósforo e alumínio em minérios de ferro proveniente das minas e jazidas de Andrade, Capanema, Conta História, Córrego Feijão, Jangada, Apolo, Urucum e Segredo, todas pertencentes à Vale. O fósforo é um contaminante que pode apresentar difícil remoção, principalmente quando não se conhece o seu modo de ocorrência nos minérios. O alumínio também é indesejável nos minérios de ferro, e sua remoção para níveis aceitáveis poderá tornar economicamente viável a exploração de muitas jazidas. O estudo foi feito através da investigação da forma de associação destes elementos com as fases mineralógicas. A caracterização química e mineralógica foi realizada por análises químicas via úmida e ICP-OES, difração de raios X, microscopia ótica e espectroscopia Mössbauer. Com a finalidade de identificar a qual fase mineralógica o fósforo e alumínio estão associados, foram realizadas extrações seqüenciais que extraem formas específicas de fósforo, além de ensaios de dissolução em HCl concentrado. Na etapa III da extração seqüencial utiliza-se o sistema ditionito-citrato-bicarbonato e a princípio fósforo e alumínio, ligados a óxidos de ferro, são removidos nesta extração. A dissolução em HCl concentrado determinou a associação existente entre fósforo, alumínio e os minerais de ferro a partir da correlação de dissolução de cada um deles. As amostras são compostas basicamente por hematita, goethita, magnetita e quartzo. Para a maioria delas existe uma correlação entre a extração de alumínio e de fósforo, sugerindo que ambos os elementos estão associados aos óxihidróxidos de ferro, mais precisamente à goethita. Entretanto, foi identificada a presença de fosfatos de alumínio em algumas amostras. Os resultados sugerem que a gênese dos minérios têm profunda influência no modo de ocorrência do fósforo e do alumínio, e nenhuma conclusão geral a este respeito pode ser obtida.

ABSTRACT

The purpose of the present work was to determine the forms of occurrence of phosphorus and aluminum in iron ores from the following Vale's mines/deposits: Andrade, Capanema, Conta História, Córrego Feijão, Jangada, Apolo, Urucum and Segredo. The phosphorus is a contaminant that is difficult to remove in some ores, especially when its way of occurrence in these ores is not known. The aluminum is also undesirable in iron ores, and its removal for acceptable levels can make viable many deposits. This study was made through the investigation of the form of association of these elements with the mineralogical phases present in the ores. The chemical and mineralogical characterizations were carried out by wet-methods chemical analyses and ICP-OES, X-ray diffraction, optical microscopy and Mössbauer Spectroscopy. Sequential-extraction methods were used in order to identify to which phases the phosphorus and aluminum were associated. Dissolution in concentrated HCl was also used. In step III of the sequential extractions, the dithionite-citrate-bicarbonate system is used, and in principle, only phosphorus and aluminum bound to the iron-oxides phases are removed. All iron-ore samples are basically composed of hematite, goethite, magnetite and quartz. For the most of the samples, the results suggest that aluminum and phosphorus are associated with the iron oxides/hydroxides, especially with goethite. However, some samples showed the presence of an aluminum phosphate. The results suggest that the genesis of the ores seem to have a deep influence in the way in which these two elements occur in the iron ores, and no general conclusion to this respect can be obtained a priori.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVO	3
3	RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA	4
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
4.1	MINÉRIO DE FERRO	5
4.1.1	<i>Aspectos gerais</i>	5
4.1.2	<i>Caracterização Tecnológica de Minérios</i>	19
4.2	ALUMÍNIO E FÓSFORO.....	20
4.2.1	<i>Aspectos gerais</i>	20
4.2.2	<i>Processos de fixação do fósforo em minério de ferro e solos</i>	22
4.2.3	<i>A influência do fósforo nas propriedades do aço</i>	24
5	METODOLOGIA	26
5.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	26
5.2	CARACTERIZAÇÃO.....	28
5.2.1	<i>Espectroscopia Mössbauer</i>	28
5.2.2	<i>Difração de raios X</i>	29
5.2.3	<i>Microscopia Ótica</i>	29
5.2.4	<i>Análise química quantitativa</i>	29
5.2.5	<i>Extração seletiva para remoção de Fósforo e Alumínio</i>	30
5.2.6	<i>Extração com HCl concentrado</i>	31
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
6.1	ANÁLISE QUÍMICA QUANTITATIVA	32
6.2	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X E MICROSCOPIA ÓTICA	34
6.3	DETERMINAÇÃO DAS FORMAS DE OCORRÊNCIA DE ALUMÍNIO E FÓSFORO	44
6.3.1	<i>Extração seletiva para alumínio e fósforo</i>	44
6.3.2	<i>Dissolução em HCl concentrado</i>	52
6.4	DISCUSSÃO DAS FORMAS DE OCORRÊNCIA DE ALUMÍNIO E FÓSFORO EM CADA AMOSTRA	54
6.4.1	<i>Amostras de Frente de Lavra - Mina de Capanema</i>	55

6.4.2	<i>Amostras de Frente de Lavra – Mina de Andrade</i>	59
6.4.3	<i>Amostras de Frente de Lavra – Mina de Apolo</i>	61
6.4.4	<i>Amostras de Frente de Lavra – Mina de Conta História</i>	65
6.4.5	<i>Mina de Jangada</i>	68
6.4.6	<i>Amostras de Sinter Feed – Mina de Urucum</i>	72
6.4.7	<i>Testemunho Diamantado – Mina de Córrego Feijão</i>	75
6.4.8	<i>Testemunho Diamantado – Mina de Segredo</i>	78
7	CONCLUSÕES	82
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Distribuição percentual de fósforo obtida em análise granulométrica por fluorescência de raios-X.	27
Tabela 2. Relação entre as siglas e os nomes das minas de origem.....	27
Tabela 3. Teores dos principais elementos das amostras originais obtidos via ICP.....	32
Tabela 4. Teores de ferro e fósforo nas amostras originais determinados por diferentes métodos.....	34
Tabela 5. Espécies minerais determinadas por difração de raios-X e microscopia ótica.	43
Tabela 6. Dimensão média de cristalito (Å) calculados por difração de raios X nos principais planos cristalográficos de hematita e goethita.	43
Tabela 7. Remoção de fósforo e alumínio (%) após os ensaios de extração seletiva. ...	44
Tabela 8. Parâmetros experimentais obtidos dos espectros Mössbauer das amostras originais.	49
Tabela 9. Parâmetros experimentais obtidos dos espectros Mössbauer dos resíduos das extrações com DCB da fração 0,045mm	50
Tabela 10. Teores percentuais de hematita, goethita e magnetita antes e após extração com DCB para fração +0,045 mm.	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estrutura cristalina da goethita.	6
Figura 2. Micrografias de goethitas contendo de 0 a 0,167 mol.mol ⁻¹ de alumínio	7
Figura 3. Estrutura cristalina da hematita.	9
Figura 4. Estrutura cristalina da magnetita.	10
Figura 5. Localização das minas estudadas no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais.	16
Figura 6. Localização da mina de Urucum em Corumbá, Mato Grosso do Sul.	17
Figura 7. Comparação entre produção mundial e brasileira de minério de ferro nos últimos anos em milhões de toneladas/ano	18
Figura 8. Principais mercados consumidores de minério de ferro brasileiro	19
Figura 9. Esquema do processo de precipitação de fósforo.....	24
Figura 10. Fluxograma de operações realizadas na preparação das amostras e etapas de caracterização.....	26
Figura 11. Teores (%) de fósforo e alumínio das amostras originais.	33
Figura 12. Difratoogramas de raios-X das amostras de Capanema.....	35
Figura 13. Micrografia ótica de luz refletida de uma amostra típica de Capanema obtida na fração -0,045 mm.	35
Figura 14. Difratoogramas de raios-X das amostras de Andrade.....	36

Figura 15. Micrografia ótica de luz refletida de uma amostra típica de Andrade obtida na fração -0,045 mm.	36
Figura 16. Difratoformas de raios-X das amostras de Apolo.....	37
Figura 17. Micrografia ótica de luz refletida de uma amostra típica de Apolo obtida na fração -0,045 mm.	37
Figura 18. Difratoformas de raios-X das amostras de Conta História.	38
Figura 19. Micrografia ótica de luz refletida de uma amostra típica de Conta História obtida na fração -0,045 mm.	38
Figura 20. Difratoformas de raios-X das amostras de Jangada.....	39
Figura 21. Micrografia ótica de luz refletida de uma amostra típica de Jangada obtida na fração -0,045 mm.	39
Figura 22. Difratoforma de raios-X da amostra de Urucum.	40
Figura 23. Micrografia ótica de luz refletida de uma amostra típica de Urucum obtida na fração -0,045 mm.	40
Figura 24. Difratoformas de raios-X das amostras de Córrego Feijão.....	41
Figura 25. Micrografia ótica de luz refletida de uma amostra típica de Córrego Feijão obtida na fração -0,045 mm.	41
Figura 26. Difratoformas de raios-X das amostras de Segredo.....	42
Figura 27. Micrografia ótica de luz refletida de uma amostra típica de Segredo obtida na fração -0,045 mm.	42
Figura 28. Percentuais de remoção de fósforo e alumínio na etapa III (Tratamento com DCB).	45

Figura 29. Espectros Mössbauer das amostras AFCM e AFGO de +0,045 mm antes e após tratamento com DCB.....	46
Figura 30. Espectros Mössbauer da amostra AGCT +0,045 mm antes e após tratamento com DCB.	46
Figura 31. Espectros Mössbauer das amostras TDCF e TDSP de +0,045 mm antes e após tratamento com DCB.....	47
Figura 32. Espectros Mössbauer das amostras JGD de +0,045 mm e SFUrucum antes e após tratamento com DCB.....	48
Figura 33. Percentual de massa dissolvida das amostras AFCM, AFGO, AFMQ e AGCT versus tempo de exposição ao HCl concentrado.....	53
Figura 34. Percentual de massa dissolvida das amostras JGD, SFUrucum, TDCF e TDSP versus tempo de exposição ao HCl concentrado.....	53
Figura 35. Variação dos teores de fósforo e de ferro nas amostras AFCM +0,150mm e +0,045mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.....	55
Figura 36. Variação dos teores de alumínio e de ferro das amostras AFCM +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.	56
Figura 37. Variação dos teores de alumínio e de fósforo das amostras AFCM +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.	56
Figura 38. Correlação entre os teores de hematita e de fósforo nas amostras AFCM +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.....	57
Figura 39. Correlação entre os teores de goethita e de fósforo nas amostras AFCM +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.....	57
Figura 40. Espectros Mössbauer das amostras AFCM +0,150 mm tratadas em HCl concentrado durante os tempos indicados (minutos).....	58

Figura 41. Espectros Mössbauer das amostras AFCM +0,045mm tratadas em HCl concentrado durante os tempos indicados (minutos).....	58
Figura 42. Variação dos teores de fósforo e de ferro nas amostras AFGO +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.	59
Figura 43. Variação dos teores de alumínio e de ferro das amostras AFGO +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado	60
Figura 44. Variação dos teores de alumínio e de fósforo das amostras AFGO +0,150mm e +0,045mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado	60
Figura 45. Correlação entre os teores de hematita e fósforo nas amostras AFGO +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.	61
Figura 46. Variação dos teores de fósforo e de ferro nas amostras AFMQ +0,150mm e +0,045mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado	62
Figura 47. Variação dos teores de alumínio e de ferro das amostras AFMQ +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado	62
Figura 48. Variação dos teores de alumínio e de fósforo das amostras AFMQ +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado	63
Figura 49. Correlação entre os teores de goethita e fósforo nas amostras AFMQ +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado	63
Figura 50. Espectros Mössbauer da amostra AFMQ +0,150 mm tratada em HCl concentrado durante os tempos indicados (minutos).....	64
Figura 51. Espectros Mössbauer da amostra AFMQ +0,045 mm tratada em HCl concentrado durante os tempos indicados (minutos).....	64
Figura 52. Variação dos teores de fósforo e de ferro nas amostras AGCT +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado	65

Figura 53. Variação dos teores de alumínio e de ferro das amostras AGCT +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado .	66
Figura 54. Variação dos teores de alumínio e de fósforo das amostras AGCT +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado .	66
Figura 55. Correlação entre os teores de goethita e fósforo nas amostras AGCT +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.	67
Figura 56. Espectros Mössbauer da amostra AGCT +0,150 mm tratada em HCl concentrado durante os tempos indicados (minutos).	67
Figura 57. Espectros Mössbauer da amostra AGCT +0,045 mm tratada em HCl concentrado durante os tempos indicados (minutos).	68
Figura 58. Variação dos teores de fósforo e de ferro nas amostras JGD +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.	69
Figura 59. Variação dos teores de alumínio e de ferro das amostras JGD +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado .	69
Figura 60. Variação dos teores de alumínio e de fósforo das amostras JGD +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado .	70
Figura 61. Correlação entre os teores de goethita e fósforo nas amostras JGD +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado .	70
Figura 62. Correlação entre os teores de hematita e fósforo nas amostras JGD +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado .	71
Figura 63. Espectros Mössbauer da amostra JGD +0,150 mm tratada em HCl concentrado durante os tempos indicados (minutos).	71
Figura 64. Espectros Mössbauer da amostra JGD +0,045mm tratada em HCl concentrado durante os tempos indicados (minutos).	72

Figura 65. Variação dos teores de fósforo e de ferro na amostra SFU +0,250 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado	73
Figura 66. Variação dos teores de alumínio e de ferro das amostras SFU +0,250 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.....	73
Figura 67. Variação dos teores de alumínio e de fósforo das amostras SFU +0,250 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.....	74
Figura 68. Correlação entre os teores de hematita e fósforo na amostra SFU +0,250 mm, obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.	74
Figura 69. Variação dos teores de fósforo e de ferro nas amostras TDCF +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.	75
Figura 70. Variação dos teores de alumínio e de ferro das amostras TDCF +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado	76
Figura 71. Variação dos teores de alumínio e de fósforo das amostras TDCF +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado	76
Figura 72. Espectros Mössbauer da amostra TDCF +0,150 mm tratada em HCl concentrado durante os tempos indicados (minutos).....	77
Figura 73. Espectros Mössbauer da amostra TDCF +0,045 mm tratada em HCl concentrado durante os tempos indicados (minutos).....	77
Figura 74. Variação dos teores de fósforo e de ferro nas amostras TDSP +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.	78
Figura 75. Variação dos teores de alumínio e de ferro das amostras TDSP +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado	79
Figura 76. Variação dos teores de alumínio e de fósforo das amostras TDSP +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado	79

Figura 77. Variação dos teores de goethita e fósforo nas amostras TDSP +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado	80
Figura 78. Espectros Mössbauer da amostra TDSP +0,150 mm tratada em HCl concentrado durante os tempos indicados (minutos).....	80
Figura 79. Espectros Mössbauer da amostra TDSP +0,045mm tratada em HCl concentrado durante os tempos indicados (minutos).....	81

GLOSSÁRIO

ICP - Inductively Coupled Plasma

DRX - Difração de Raios-X

DCB - Ditionito Citrato Bicarbonato

Hhf - Campo magnético hiperfino (kOe)

$2\varepsilon Q$ - Deslocamento quadrupolar (mm/s)

$\Delta \varepsilon Q$ - Desdobramento quadrupolar (mm/s)

δ - Desvio isomérico (mm/s)

S - Área Espectral Relativa (%)

DNPM - Departamento Nacional de Pesquisa Mineral

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração

Mgt – Magnetita

1 INTRODUÇÃO

O minério de ferro, um dos bens minerais mais importantes para o país, vem mostrando um elevado aumento em sua procura sendo que, a demanda por minério de ferro no mercado mundial chegou a ser maior que a oferta até meados de 2008. Frente à necessidade de se aumentar a oferta deste bem mineral, estudos estão sendo direcionados para tornar economicamente viável a exploração de depósitos minerais que apresentam teores elevados de ferro, mas que por apresentarem concentrações de impurezas fora dos padrões de mercado ainda não são lavrados.

O beneficiamento do minério de ferro depende das características físicas, mineralógicas e do teor de ferro apresentado por este. No Brasil e na Austrália, onde os depósitos de grandes dimensões e altos teores são predominantes, uma parcela expressiva dos produtos é gerada apenas por etapas de britagem e classificação granulométrica. Os minérios de teor mais baixo, mas que apresentam liberação de minerais de ganga em faixas granulométricas mais grosseiras, após as etapas de britagem ou moagem passam a operações de concentração por métodos gravíticos. No caso de a liberação ocorrer em granulometria mais fina o minério deve ser totalmente moído e concentrado, seja por flotação, por separação magnética de alta intensidade, ou a combinação desses processos.

O fósforo é um contaminante que pode apresentar difícil remoção em alguns minérios. O que dificulta a separação do fósforo do minério pelos métodos usuais de processamento é o seu “modo de ocorrência”. O “modo de ocorrência” do fósforo é muito variável, podendo ser encontrado de forma disseminada ou associada a óxidos de ferro, o que dificulta, até mesmo, identificar os minerais portadores de fósforo (CURI, 1991).

A ocorrência de alumínio em minério de ferro pode se dar na forma de mineral silicatado, como caolinita, na forma de óxido/hidróxido, substituído isomorficamente em óxidos de ferro ou na forma de fosfatos associados.

Portanto, existe a necessidade de se desenvolver estudos de caracterização que possibilitem a compreensão da forma de ocorrência destes contaminantes nos minérios de ferro.

A finalidade desta pesquisa é dar suporte à novos estudos e projetos, que venham a ser desenvolvidos no sentido de viabilizar jazidas que hoje são consideradas fora dos padrões para lavra ou que demandam onerosos processos de beneficiamento devido a altos teores de alumínio e fósforo.

2 OBJETIVO

Caracterizar as amostras de minério de ferro provenientes das minas de Andrade, Capanema, Conta História, Córrego Feijão, Jangada, Apolo, Segredo e Urucum de propriedade da Vale e verificar as formas de ocorrência e associação de alumínio e fósforo nestes minérios.

3 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA

As empresas mineradoras brasileiras oferecem geralmente minérios de ferro com teores acima de 64 % de ferro e baixos teores de fósforo ($< 0,1$ %) e óxidos de alumínio (Al_2O_3) menor que 1 %. No entanto, a demanda por minério de ferro se torna cada vez maior, havendo a necessidade de viabilizar depósitos que apesar de apresentarem alto teor de ferro contém níveis de impurezas acima das especificações de mercado.

Vários estudos têm sido realizados no sentido de se estabelecer métodos de remoção ou redução de impurezas em minérios. Para tanto, são necessários estudos de investigação da forma em que estas impurezas ocorrem nos minérios.

É importante ressaltar que a forma em que uma dada impureza ocorre em um minério está associada à formação daquele depósito, de forma que se mostra específica a associação entre eles.

O fósforo apresenta um efeito indesejável no ferro gusa e aço, causando o aparecimento de fissuras e aumentando a fragilidade á frio. A remoção ou redução da concentração deste elemento para níveis aceitáveis é extremamente desejável no beneficiamento, pois sua quantidade no aço depende diretamente do teor presente no minério de origem.

A remoção de alumínio no minério de ferro também é desejável, podendo tornar viável a exploração de jazidas que apresentam alto teor desse elemento.

A motivação de se estudar este tema se justifica pela busca por uma tecnologia viável, que possibilite a remoção dessas impurezas durante o processamento do minério de ferro.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 *Minério de Ferro*

4.1.1 Aspectos gerais

O ferro entra na proporção de 4,2 % da litosfera, sendo o metal mais abundante depois do alumínio (7,5 %). Embora seus compostos sejam numerosos, apresenta-se em grandes concentrações somente sob a forma de óxidos (ABREU, 1973).

Quase todos os óxidos e hidróxidos de ferro existem na forma cristalina. O grau de ordenação estrutural e o tamanho do cristal dependem das condições em que estes foram formados. Óxidos e hidróxidos de ferro consistem de um arranjo de íons ferro, íons O^{2-} e OH^- . Como os ânions são maiores que os cátions, o arranjo dos ânions determina a estrutura cristalina a ser formada (CORNELL e SCHWERTMANN, 1996).

O ferro está presente no solo, dissolvido ou organicamente complexado, e dentro das estruturas cristalinas de uma grande variedade de minerais, a maioria silicatos ou óxidos. Provavelmente a melhor descrição dos óxidos de ferro é que são compostos de empacotamento fechado com os íons O^{2-} e Fe preenchendo os interstícios. Os óxidos de ferro ocorrem tanto em arranjos hexagonais (hcp) quanto cúbicos (ccp). Hematita (α - Fe_2O_3) e goethita (α - $FeOOH$) são os minerais mais comuns com arranjos do tipo hcp, enquanto maghemita (γ - Fe_2O_3) e lepidocrocita (γ - $FeOOH$) os mais comuns de arranjo ccp (CORNELL e SCHWERTMANN, 1996).

Após a redução dos óxidos, o ferro é utilizado principalmente para a confecção de aço, o principal material aplicado na indústria moderna (DETLEF, 1986). As ligas ferrosas são as mais utilizadas entre todas as ligas metálicas. O ferro é um metal de fácil processamento e caracteriza-se por ligar-se com muitos outros elementos metálicos e não metálicos, sendo o principal deles o carbono.

4.1.1.1 Minerais de Ferro

➤ **Goethita**

A goethita é o hidróxido de ferro mais comum e é tipicamente formada sob condições oxidantes como produto de intemperismo dos minerais portadores de ferro (KLEIN e HURLBUT, 1999).

Possui estrutura do tipo hcp (empacotamento hexagonal compacto), com oxigênio e hidroxila formando planos paralelos à direção [100] na seqüência ABABA e com Fe (III) ocupando sítios octaédricos. A Figura 1 mostra a estrutura cristalina da goethita que apresenta um sistema cristalino ortorrômbico e tem dimensões de célula unitária de $a = 0,4608$; $b = 0,9956$ e $c = 0,3021$ nm. É isoestrutural com a manganita (α -MnOOH) e com o diásporo (α -AlOOH) (CORNELL e SCHWERTMANN, 1996).

Possui cor amarela até marrom, e não apresenta caráter magnético, contendo 62,8% de ferro. Geralmente possui pouca consistência e apresenta textura porosa, brilho adamantino e opaco (DETLEF, 1986).

Com aquecimento em temperaturas entre 250 e 350°C, a goethita se transforma em hematita (SCHWERTMANN e TAYLOR, 1989).

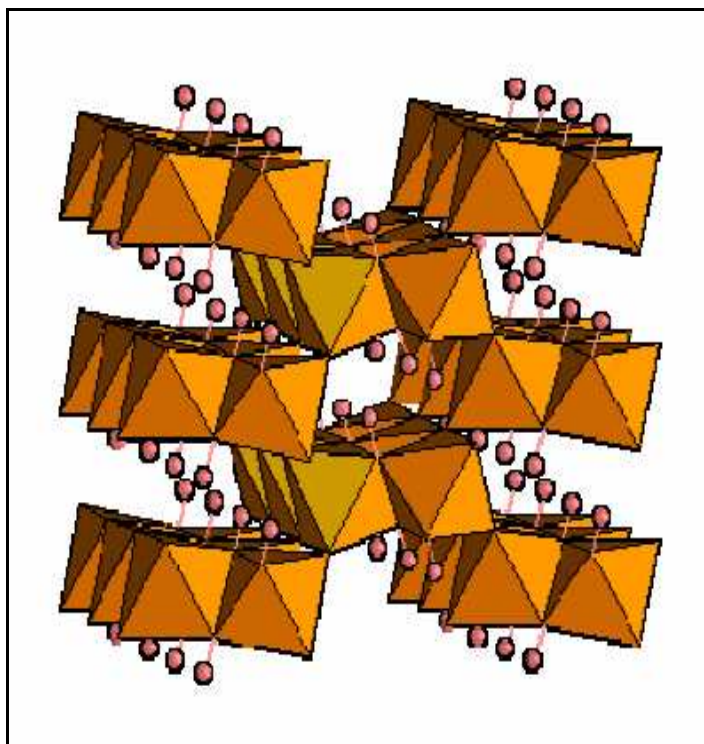


Figura 1. Estrutura cristalina da goethita (KLEIN e HURLBUT 1999).

A goethita é o exemplo mais bem estudado de óxido/hidróxido de ferro isomorficamente substituído e dentre as várias possibilidades de substituintes, tanto em amostras naturais como sintéticas, o alumínio é o melhor exemplo. Uma explicação para isso se deve a abundância de alumínio em rochas e solos junto ao ferro durante o

intemperismo. Assim o alumínio pode ser separado formando aluminosilicatos (argilominerais) ou então, uma significativa proporção é também incorporada dentro dos óxidos de Fe (III) (CORNELL e SCHWERTMANN, 1996).

De acordo com SCHULZE e SCHWERTMANN (1987), é possível observar que os cristais de goethita se tornam menores com o aumento da substituição de ferro por alumínio e com a mudança de cristais com polidomínios maiores para menores, ou monodomínios como se observa na Figura 2.

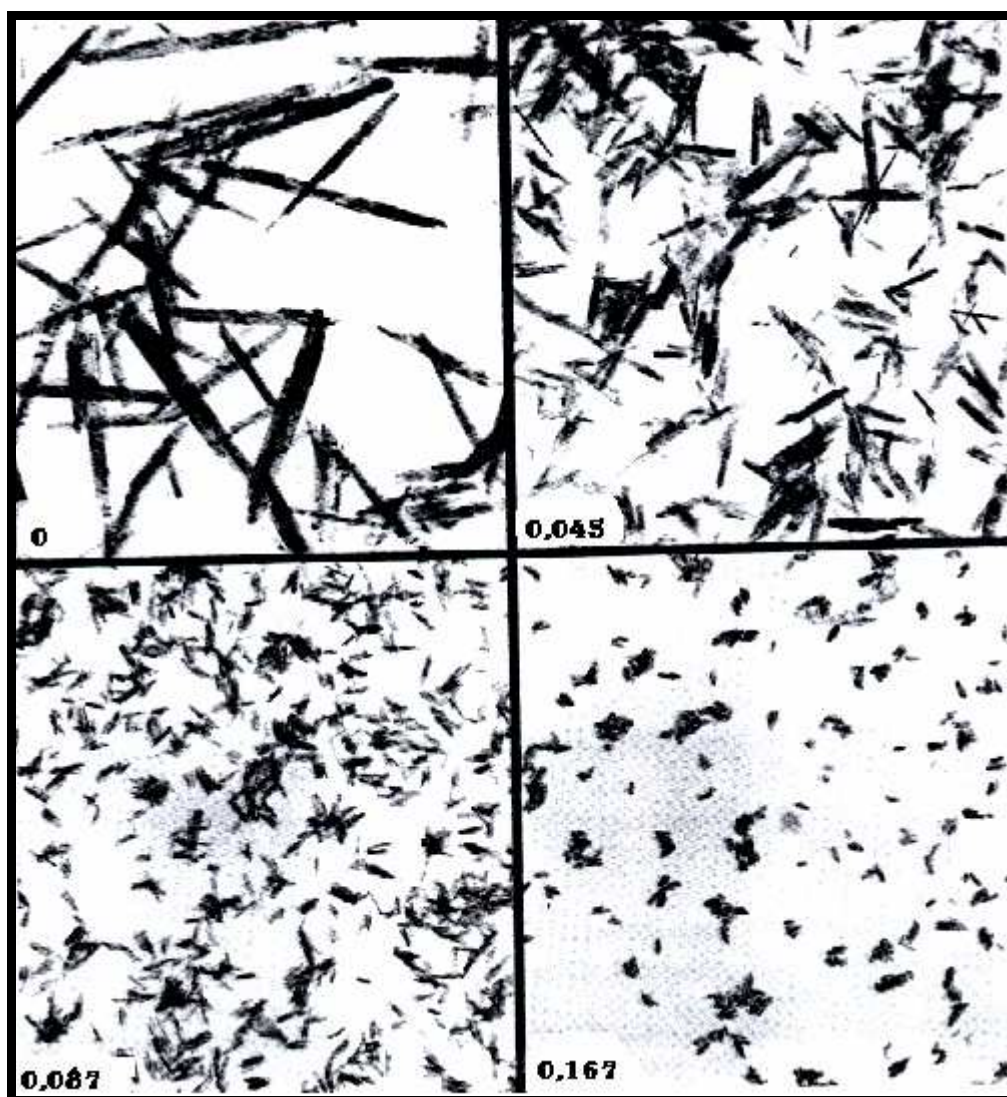


Figura 2. Micrografias de goethitas contendo de 0 a 0,167 mol.mol⁻¹ de alumínio (CORNELL e SCHWERTMANN 1996).

Essa mudança pode estar associada à taxa de formação do cristal que diminui com o aumento de alumínio no sistema. O campo magnético hiperfino (H_{hf}) também diminui quando aumenta a substituição de alumínio. Isto é esperado, pois o alumínio é diamagnético, e não contribui para o campo magnético. Assim, $H_{hf}(T)$ é também reduzido quando o tamanho do cristal diminui (CORNELL e SCHWERTMANN, 1996).

➤ Hematita

A hematita é um mineral amplamente distribuído em rochas de todas as idades e forma o minério de ferro mais abundante e importante. Pode ocorrer como produto de sublimação em conexão com as atividades vulcânicas, em depósitos metamórficos de contato e, como mineral acessório, nas rochas ígneas feldspáticas, tais como o granito (Dana, 1978). É isoestrutural com o coríndon. A célula unitária é hexagonal com dimensões $a = 0,5034$ e $c = 1,3752$ nm (CORNELL e SCHWERTMANN, 1996).

A estrutura da hematita pode ser descrita como arranjos do tipo hcp de íons oxigênio empilhados na direção [001] e apresenta sistema cristalino romboédrico. A cor varia de preta até vermelha, dependendo da granulometria; Contém 69,9 % de Fe. Placas delgadas podem estar agrupadas em forma de rosetas. A Figura 3 mostra a estrutura cristalina da hematita.

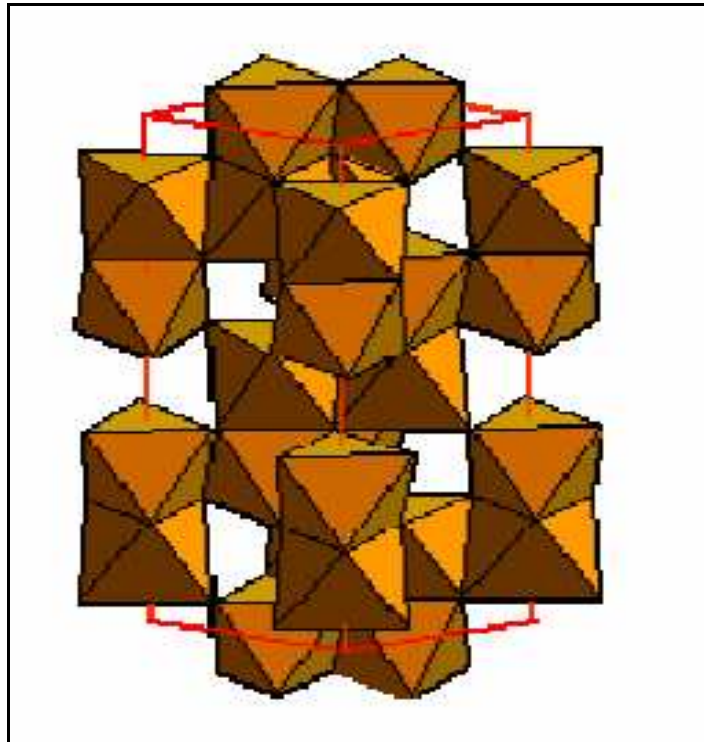


Figura 3. Estrutura cristalina da hematita (KLEIN e HURLBUT 1999).

A hematita é encontrada principalmente:

- Em formações ferríferas bandadas (*BIF*) do Pré-cambriano;
- Associada com goethita-limonita em cangas ou em minérios oolíticos;
- Associada com goethita, calcita e quartzo clástico; e
- Em arenitos e quartzitos ferruginosos como material de cimentação (DETLEF, 1986).

Os minérios oolíticos são de origem sedimentar e podem ocorrer em camadas de tamanho considerável (DANA, 1978).

A substituição isomórfica de Al^{3+} por Fe^{3+} é um fenômeno natural comum na goethita e hematita, sendo mais frequente em goethitas de clima tropical (SCHWERTMANN e TAYLOR, 1989; CORNELL e SCHWERTMANN, 1996).

➤ **Magnetita**

A magnetita (Fe_3O_4) cristaliza-se no sistema cúbico com parâmetro de rede $a = 0,8391$ nm). Ela difere dos demais óxidos/hidróxidos de ferro, pois contém tanto

ferro divalente quanto trivalente em sua estrutura (CORNELL e SCHWERTMANN, 1996).

Um terço do total de ferro ocorre como Fe(III) nos sítios tetraédricos, um terço de Fe(III) ocorre em coordenação octaédrica e um terço como Fe(II) em coordenação octaédrica (Figura 4). Com aquecimento ($T \sim 250^{\circ}\text{C}$) sob condições oxidantes, magnetita de pequeno tamanho de partícula forma maghemita (SCHWERTMANN e TAYLOR, 1989). A transformação da magnetita para maghemita é acompanhada pela redução do volume da célula unitária feita através da substituição de Fe(II) com raio iônico de 0,074 nm para Fe(III) com raio de 0,065 nm (DETLEF, 1986).

A magnetita tem cor preta, é fortemente magnética, contendo 72,4 % de Fe. Encontra-se distribuída sob a forma de um mineral acessório comum em rochas magmáticas. Em certos tipos de rocha, através de segregação magmática, torna-se um dos principais constituintes e pode, assim, formar grandes corpos de minério estando mais comumente associada a rochas metamórficas cristalinas (DANA, 1978).

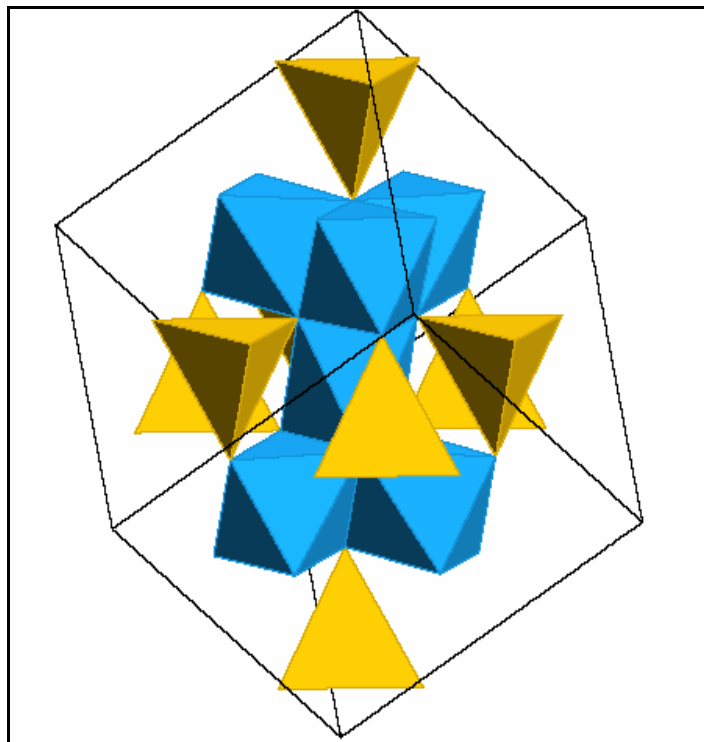


Figura 4. Estrutura cristalina da magnetita (KLEIN e HURLBUT 1999).

4.1.1.2 Geologia das amostras estudadas

Os minérios de ferro podem resultar de segregações magmáticas, como é o caso de depósitos de magnetitas visivelmente relacionados com rochas eruptivas ou, então, de deposição química, que é a origem mais freqüente. As grandes jazidas de hematita provêm de sedimentos que foram objeto de metamorfismo, desidratando limonitas e cristalizando os óxidos de ferro. Igualmente, a magnetita pode ser o produto de intenso metamorfismo de sedimentos ferríferos. As jazidas de minério de ferro têm ampla distribuição sendo encontradas entre as camadas sedimentares terciárias, mesozóicas e paleozóicas, ou entre as rochas metamórficas pré-cambrianas e as eruptivas. Os depósitos do Pré-cambriano são os mais abundantes (ABREU, 1973).

As amostras em estudo neste trabalho são provenientes de oito minas da Vale, sendo sete provenientes do Quadrilátero Ferrífero e uma do Mato Grosso do Sul, com características físicas e químicas diferentes entre si.

No Quadrilátero Ferrífero, o minério de ferro ocorre nas formações sedimentares de origem pré-cambriana do Supergrupo Minas, principalmente, na Formação Cauê, Grupo Itabira. Os seus maiores depósitos, estimados em cerca de 29 bilhões de toneladas, podem ser encontrados no Pico do Itabirito, nas serras da Moeda, do Curral, Tamanduá, Igarapé, Itabira, Antônio Pereira e Caraça.

AFCM – Capanema (Amostras de frente de lavra)

Localiza-se na porção sudeste do Quadrilátero Ferrífero, na extremidade sudeste de Serra do Ouro Fino, no município de Santa Bárbara.

Especialmente nas regiões de Alegria e na Mina de Capanema, região centro-leste do Quadrilátero Ferrífero, as formações ferríferas enriquecidas por processos supergênicos contêm o fósforo principalmente na forma aniônica dissolvida na matriz hospedeira goethítica (COELHO, 1999).

AFGO – Andrade (Amostras de frente de lavra)

A mina de Andrade situa-se a nordeste do Quadrilátero Ferrífero, no município de Bela Vista de Minas, a aproximadamente 5 Km da cidade de João Monlevade. O jazimento ferrífero insere-se na Formação Cauê, base do Grupo Itabira. O recurso total

da jazida é da ordem de 305 Mt com teor médio de 52 % de Fe. Dentre os principais litotipos ricos em ferro da Mina do Andrade destaca-se:

- Hematita Friável: geralmente com teores de ferro maiores que 63 %, a hematita friável predominantemente especularítica é resultado do enriquecimento em ferro a partir dos itabiritos que sofreram intensa deformação.
- Hematita Compacta: possui teores de ferro geralmente maiores que 63 % e diferencia-se da hematita friável por ser compacta. Os teores de contaminantes são baixos.
- Hematita Fosforosa: com teores em geral superiores a 60 % de ferro, diferencia-se da hematita friável pela sua compactidade e da hematita compacta pelos contaminantes elevados. Os principais contaminantes são o fósforo com média de 0,16 %, além de percentuais menos significativos de MgO e CaO.

AFMQ – Apolo (Amostras de frente de lavra)

A jazida de Apolo, anteriormente chamada de Maquiné, situa-se na porção central do Quadrilátero Ferrífero, próximo à cidade de Rio Acima, aproximadamente 40 km a sudeste de Belo Horizonte. Os principais tipos de materiais ricos em ferro da jazida de Apolo são:

- Hematita Friável: formadas predominantemente pelo enriquecimento supergênico dos itabiritos friáveis, os corpos de hematita friável ocorrem próximo à superfície e apresentam teores de Fe de cerca de 60 % . Possui teores relativamente baixos de fósforo, o que o distingue quimicamente dos itabiritos goethíticos.
- Hematita Compacta: restritas à região norte da área de abrangência da mina. Possui estrutura maciça ou foliada e é rica em goethita com altos teores de fósforo.
- Itabirito Goethítico: itabirito hidratado, rico em goethita, com teores médios de ferro em torno de 56 %.
- Itabirito Friável: Distingue do itabirito goethítico pelos teores bem mais baixos de ferro e fósforo. O teor médio de ferro é de aproximadamente 48 %.
- Itabirito Compacto: Formações ferríferas bandadas predominantemente compactas com alternância de bandas quartzosas e de hematita. Teor médio de ferro de 41 %.

- Canga: Rochas de natureza detrítica e geradas pela erosão da camada de formação ferrífera. O teor médio de ferro é de cerca de 57% e possui altos teores de fósforo, alumínio e perda ao fogo.

AGCT – Conta História (Estéril)

A jazida de Conta História situa-se na borda Leste do Quadrilátero Ferrífero, próximo à cidade de Mariana, aproximadamente 143 km a sudeste de Belo Horizonte.

O recurso total desta jazida é da ordem de 1,342 Mt com teor médio de 43 % de ferro.

Os principais tipos de materiais ricos em ferro da Mina de Conta História são:

- Hematita Goethítica: O teor médio de ferro é de 63 % e os teores de contaminantes são mais elevados, com a perda ao fogo atingindo média de 4,9 %, fósforo médio de 0,094% e alumina média em torno de 1,8 %.
- Itabirito Friável: bastante abundante na jazida de Conta História. Apresenta teor médio de ferro em torno de 46 %. Os teores de elementos contaminantes são baixos, apresentando perda ao fogo média de 2,8 %.
- Itabirito Goethítico: Caracterizado pela coloração amarelada e por teores elevados de perda ao fogo, fósforo e sílica. Apresenta teor médio de ferro em torno de 43 %.
- Itabirito Manganésífero: É o tipo mais contaminado da jazida, apresentando teores elevados de todos os contaminantes (Si, P, Al, e perda ao fogo), sendo o teor médio de manganês de 8,1 %. Apresenta teor médio de ferro em torno de 44 %.
- Itabirito Compacto: É o tipo mais abundante do modelo de Conta História. São corpos maciços com bandas de quartzo e hematita concordantes com estruturação geral das camadas. O teor médio de ferro é de 40 %.
- Itabirito Dolomítico: É o tipo menos abundante do modelo de Conta História, ocorrendo como pequenas lentes em profundidade. São corpos maciços com bandas de quartzo e dolomita concordantes com estruturação geral das camadas. O teor médio de ferro é de 29 %.

- Canga: rocha de natureza detrítica, gerada pela erosão da camada de formação ferrífera. A espessura média é de 12,5 m. O teor médio de Fe é de 59 % e possui altos teores de P, Al e Perda ao Fogo.

JGD – Jangada

A mina de Jangada está localizada nos municípios de Sarzedo (Região Metropolitana de Belo Horizonte) e Brumadinho, nos locais denominados Jangada, Samambaia e Mangaba.

Os principais tipos de materiais ricos em ferro da mina de Jangada são:

- Hematita: massiva ou bandada, tendo martita e kenomagnetita como principais minerais, com proporções de goethita crescentes próximo às fraturas e presença subordinada de hematita tabular.
- Hematita Fosforosa: se deve a presença do mineral wavelita, que se associa a fluidos hidrotermais, depositando-se em fraturas e zonas de contato. Hematita, em geral, dura, em posições onde a percolação de fluido é facilitada, implicando na dissolução da wavelita e conseqüente disseminação do fósforo. Descreve-se também na parte oeste da Jangada, lentes concordantes com o bandamento de hematitas compactas.
- Hematita Goethítica: hematita média, hidratada e aluminosa, porosa, acinzentada a amarelada, ocorrendo em posições semelhantes à de hematita fosforosa superficialmente.
- Itabirito Goethítico rico: ocorre sob rolados no extremo leste da Jangada e oeste de Água Santa, correspondendo a enriquecimento do horizonte carbonático, com teor de ferro médio a alto, mas com teores de alumina, fósforo e hidratação de médios a altos. Em geral é considerado 50 % estéril na área das minas.
- Itabiritos Silicosos: os teores de alumina e fósforo são sempre baixos e, exceto próximo ao contato com hematita. Considerado minério quando o teor de ferro total é maior que 52 %.

TDCF – Córrego Feijão (Amostras de testemunho diamantado)

A Mina do Córrego do Feijão, incluindo beneficiamento e embarque, está localizada a cerca de 50 km do centro de Belo Horizonte. Situa-se na porção oeste do Quadrilátero Ferrífero, próximo ao Município de Brumadinho, no Estado de Minas Gerais. Esta jazida constitui-se por hematitas friáveis e compactas. A gênese do minério friável está relacionada à alteração (lixiviação) de rochas ricas em carbonato e ferro. As hematitas caracterizam-se por teores de ferro da ordem de 67 %. Os itabiritos silicosos apresentam-se com teores em ferro da ordem de 62 %. Quanto à mineralogia, predomina hematita martítica com magnetita relictual.

TDSP – Segredo (Amostras de testemunho diamantado)

A mina de Segredo está localizada no município de Congonhas do Campo, às margens da BR-040, a aproximadamente 75 km de Belo Horizonte. O recurso total de minério de ferro de Segredo é de aproximadamente 607 Mt com teor médio de 47 % de Fe. Quanto à gênese, os minérios da região de Segredo podem ser considerados como predominantemente supergênicos, com marcado enriquecimento em ferro e contaminantes próximo a superfície. Os corpos de minério muito rico ocorrem em profundidade e estão relacionados a um enriquecimento antigo dos itabiritos.

Os principais tipos de formação ferrífera da Jazida de Segredo são:

- Hematita Friável: os corpos de hematita friável apresentam teores de ferro de cerca de 65 % e teores de fósforo medianos, em torno de 0,040 %. Ocorre geralmente em contato com hematita compacta e itabiritos friáveis ricos.
- Hematita Compacta: possui estrutura maciça ou foliada com teor de ferro de aproximadamente 66 %.
- Hematita Goethítica: hematita rica em goethita, com aproximadamente 64 % de Fe e altos teores de P (~ 0,13 %).
- Itabirito Goethítico: itabirito hidratado, rico em goethita, caracterizado pelos altos teores de fósforo (~ 0,16 %) e teor de ferro em torno de 51 %.

- Itabirito Friável: apresenta teores de ferro em torno de 40 % e baixos teores de contaminantes. Distingue-se do itabirito goethítico pelos teores bem mais baixos de fósforo (~ 0,040 %) e dos itabiritos friáveis ricos pelos baixos teores de ferro.
- Itabirito Friável Rico: apresenta teores de ferro em torno de 57 % e baixos teores de contaminantes. Distingue dos itabiritos friáveis pelos teores bem mais elevados de ferro.
- Itabirito Compacto: são corpos maciços que predominam nas partes mais profundas da jazida. O teor de ferro é baixo (~ 44 %) embora existam corpos com teores de até 60 %.
- Canga: rocha de natureza detrítica, constituída por fragmentos de hematita e itabirito cimentados por goethita. Tem alto teor de ferro (~ 60 %), mas também altos teores de fósforo (~ 0,12 %) e alumínio (~ 4,40 %).

A Figura 5 mostra a localização no Quadrilátero Ferrífero das sete minas em estudo.

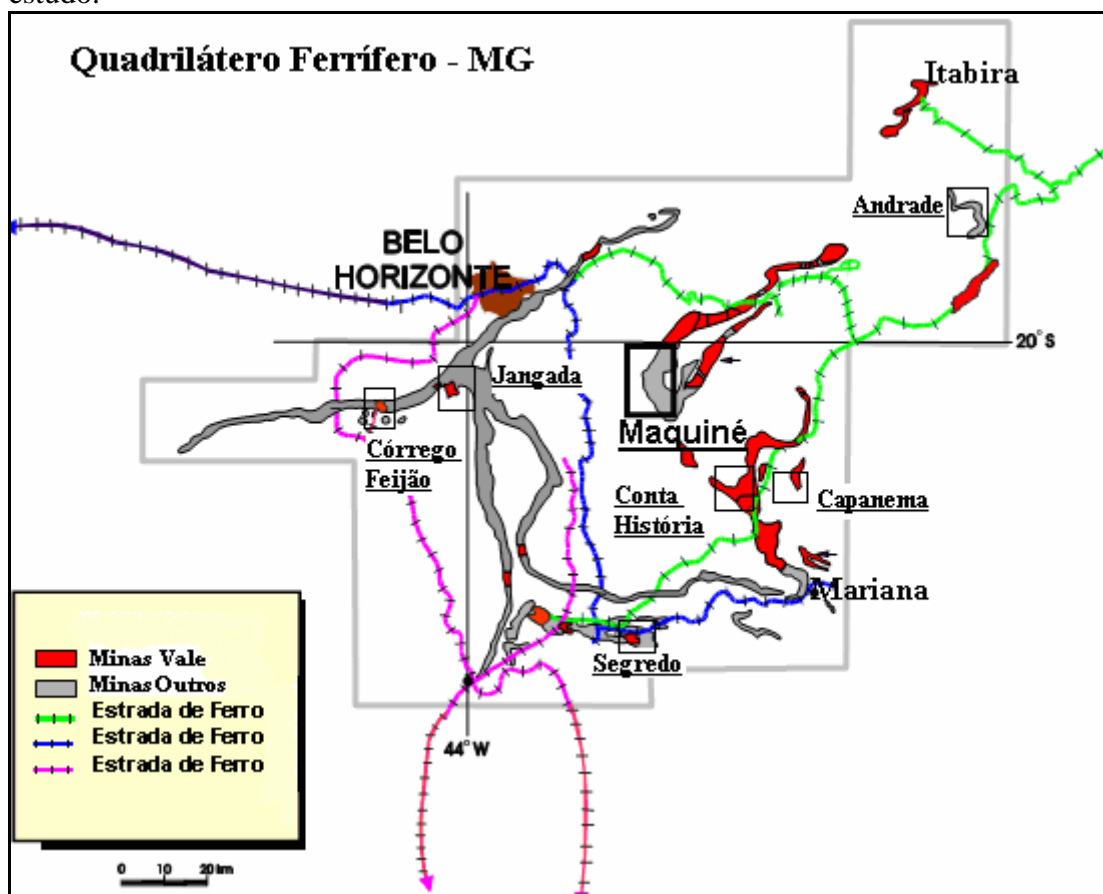


Figura 5. Localização das minas estudadas no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais.

Sinter feed Urucum

A mina de Urucum está localizada no extremo oeste do Brasil, no estado do Mato Grosso do Sul, na borda ocidental do Pantanal, em uma região de fronteira com a Bolívia, próximo à cidade de Corumbá e representa cerca de 3 % das reservas de ferro do Brasil (Figura 6). O minério de ferro de Urucum é classificado como um minério de estrutura predominantemente clástica e estratificado, com teores entre 60 e 67 % de ferro. Um fator negativo para comercialização de minério de ferro e manganês na Serra de Urucum é o elevado custo do transporte, do distrito mineiro para os mercados consumidores, tanto interno quanto externo. Isso se deve à necessidade de melhorias quanto à modernização das empresas de navegação e do sistema portuário.



Figura 6. Localização da mina de Urucum em Corumbá, Mato Grosso do Sul.

4.1.1.3 Reservas, produção e consumo

A existência de reservas, de importantes empreendimentos de mineração, de unidades siderúrgicas e de sistemas logísticos eficientes de transporte e portos de embarque promoveu o Brasil a uma posição de destaque, tanto no mercado interno como externo, na produção e na exportação de minérios e produtos intermediários (concentrados de ferro), manganês e nióbio, de aço, de ferro ligas (Fe-Mn, Fe-Nb, Fe-Ni, Fe-Si) e silício metálico (DAMASCENO, 2006).

O Brasil é o segundo maior produtor de minério de ferro. Sua produção em 2008 foi estimada em 409 milhões de toneladas, o que equivale a 19 % do total mundial (1,9 bilhão de ton). A China foi o maior produtor em 2008, com 600 milhões de toneladas (Figura 7).

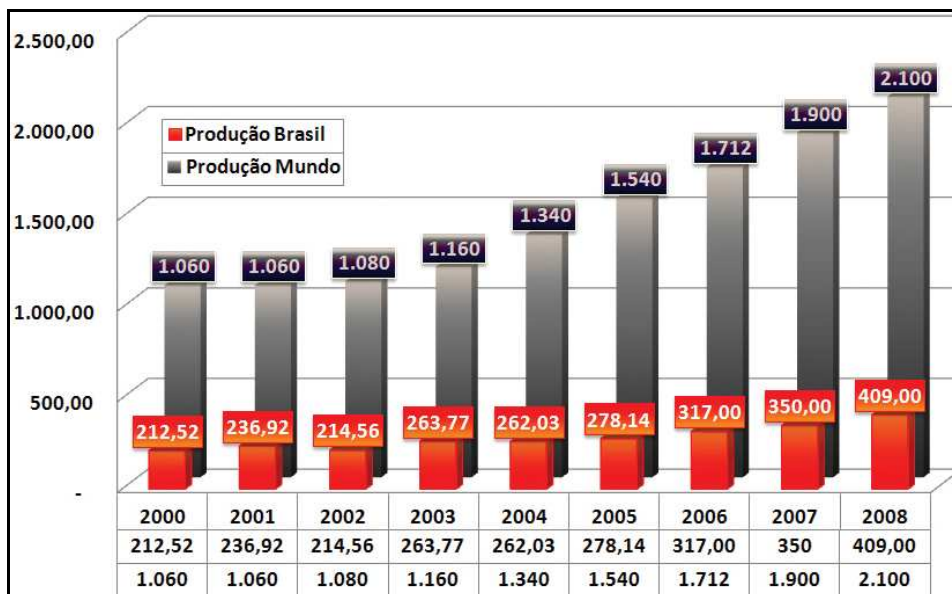


Figura 7. Comparação entre produção mundial e brasileira de minério de ferro nos últimos anos em milhões de toneladas/ano (IBRAM- Panorama Mineral Brasileiro – Minério de Ferro, 2008).

De acordo com estatísticas do IBRAM, as reservas mundiais de minério de ferro (medidas + indicadas), no ano de 2008, são da ordem de 370 bilhões de toneladas, estando o Brasil situado em quinto lugar em relação às reservas mundiais, com 26 bilhões de toneladas.

As reservas do Brasil destacam-se, pois apresentam alto teor de ferro contido no minério. Este fato ocorre devido ao alto teor encontrado nos minérios do Pará

(hematítico, média de 60 % de ferro) e de Minas Gerais (itabirito, média de 50 % de ferro).

Segundo o Panorama Mineral Brasileiro de 2008, fornecido pelo IBRAM, apesar da crise econômica mundial que mostrou seu impacto a partir do 3º trimestre do ano, a produção de minério de ferro registrou aumento. As exportações brasileiras de bens primários de ferro em 2008 atingiram 298 milhões de toneladas o que representa um aumento de 11 % em quantidade e de 52 % no valor das exportações em comparação com 2007.

O total de investimentos previstos para os próximos cinco anos é de US\$ 37 bilhões. Os principais países importadores do minério de ferro brasileiro em 2008 foram: China (32,0 %), Japão (11,0 %), Alemanha (9,0 %), Itália (5,0 %), França e Coreia do Sul (4,0% cada), Trinidad e Tobago (3%), Argentina (3 %) e outros (29 %) conforme mostra a Figura 8.

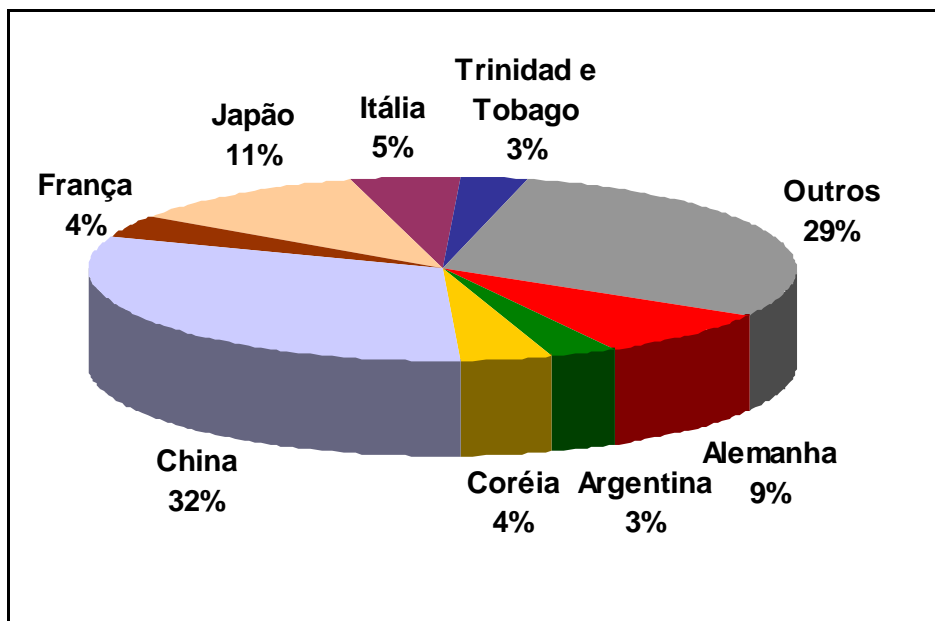


Figura 8. Principais mercados consumidores de minério de ferro brasileiro (IBRAM-Panorama Mineral Brasileiro – Minério de Ferro, 2008).

4.1.2 Caracterização Tecnológica de Minérios

Visando o máximo aproveitamento do recurso mineral, tem-se como etapa fundamental a caracterização tecnológica de minérios. As informações obtidas a partir de ensaios e medidas realizadas se aplicam ao beneficiamento do minério que utiliza

destas informações para otimização de processos. O que determina o modo como uma amostra será caracterizada são as propriedades inerentes ao minério, os objetivos da caracterização, associação com as rotas de processamento e a disponibilidade de técnicas e recursos financeiros (NEUMANN, 2004).

Segundo SANTOS e BRANDÃO (2002), em estudos de caracterização e utilizando várias técnicas integradas pode-se prever o comportamento dos minérios. A identificação de minerais, tanto os valiosos quanto os minerais de ganga, é o primeiro passo a ser dado em investigações mineralógicas. Os métodos de investigação são muitos e variam de acordo com o objetivo de cada trabalho, não tendo o presente estudo finalidade de detalhá-los.

Ao se escolher as técnicas analíticas que serão utilizadas na determinação da composição química de um minério deve-se atentar para quais os constituintes serão analisados. Assim, a técnica escolhida para as determinações elementares nas amostras minerais foi espectrometria de emissão atômica por plasma de acoplamento indutivo (ICP), por ser a mais indicada na determinação de elementos traços, como o fósforo em minério de ferro

4.2 Alumínio e fósforo

4.2.1 Aspectos gerais

O alumínio tem raio iônico igual a 0,053 nm, menor que o do ferro (0,073 nm). Assim, a substituição de ferro por alumínio influencia alguns parâmetros cristalográficos dos óxidos de ferro. Em muitos casos, a substituição pode ser determinada pelo deslocamento dos picos no difratograma de raios-X. Numerosos autores têm trabalhado com alumínio substituído em óxidos de ferro e têm correlacionado desvios na posição de um ou mais picos nos difratogramas com a quantidade de alumínio substituído. No caso de substituição por alumínio, o deslocamento dos picos de difração é usualmente para ângulos maiores devido ao raio iônico do alumínio ser menor que o do ferro (COSTA, 1996). Os limites máximos de

substituição para amostras naturais de hematita e goethita são, respectivamente, 15 mol% e 33 mol% (STANJEK,1992 & FITZPATRICK,1983).

Além de poder estar presente substituindo isomorficamente o ferro na estrutura da hematita e da goethita, o alumínio se apresenta em óxidos e hidróxidos de alumínio ou em silicatos.

A presença de alumínio no sistema de formação dos óxidos de ferro modifica as condições de cristalização e a taxa de crescimento dos cristais (SCHWERTMANN,1984b).

De acordo com SANTOS e BRANDÃO (1999), materiais terrosos finos, argilosos e/ou aluminosos estão geneticamente relacionados aos depósitos de minério de ferro brasileiros. Devido às exigências de qualidade no mercado de minério de ferro, bem como as mudanças nas características das reservas atualmente disponíveis, as especificações se tornam cada vez mais rígidas para o teor de alumínio, devido aos problemas que este causa ao sinter e à pelota.

Já o fósforo, componente essencial à vida, é encontrado na natureza em diversas formas alotrópicas. Fósforo branco (α), cúbico e (β), hexagonal) contém moléculas em coordenação tetraédrica enquanto no fósforo negro, ortorrômbico e romboédrico, os átomos se dispõem em camadas. O fósforo vermelho, monoclinico, tem estrutura mais complicada em que se tem de 2 a 3 átomos de fósforo coordenados. Sob alta pressão o fósforo negro apresenta uma estrutura cúbica, com átomos de fósforo em coordenação octaédrica. Os fosfatos $[\text{PO}_4^{3-}]$ são praticamente os únicos compostos de fósforo que ocorrem na natureza (CORRENS *et al.*, 1978).

A apatita é o mineral de fósforo mais comum em sedimentos. Em alguns casos os fosfatos de ferro e alumínio são abundantes sendo que em rochas ricas em óxidos de ferro com alta fração de argilominerais a adsorção pode ser um fator importante. O fósforo contido nessas rochas varia quanto a sua origem e tamanho de grão. Geralmente com a diminuição do tamanho do grão do mineral adsorvente o conteúdo de fósforo aumenta (CORRENS *et al.*, 1978).

A forma na qual o fósforo e o alumínio se encontra nos minérios de ferro ainda não é bem conhecida, mas com base em resultados encontrados para amostras sintéticas de goethita e hematita pode-se inferir que o fósforo, provavelmente na forma de fosfato, se encontra adsorvido na superfície das partículas, ocluído nos microporos, inserido na

estrutura cristalográfica ou como mineral fosfatado (TORRENT, 1992; COLOMBO, 1994, GÁLVEZ, 1999).

Segundo BARRÓN *et al* (1988) foi observada uma diminuição significativa na capacidade de adsorção de fosfato em óxidos de ferro, quando a razão diâmetro/espessura das partículas aumentou. Isto está de acordo com a hipótese de que faces basais da hematita não são capazes de adsorver fosfato, ao contrário de algumas faces não-basais.

PARFITT *et al* (1975) mostrou por evidências em infravermelho, a formação de um complexo binuclear em que o fosfato é substituído em dois grupos OH que foram coordenados separadamente com dois íons férricos. A mesma conclusão foi alcançada por MARTIN e SMART (1987) usando espectroscopia de raios-X por fotoelétron em goethita fosfática.

A teoria de adsorção superficial pode ser usada para explicar a existência de fósforo na goethita e para o processo de desfosforização. O aquecimento de minério de ferro na presença de ácido sulfúrico causa a desidratação da goethita liberando o fósforo na forma ácida solúvel, sendo possível reduzir o teor de fósforo em até 65% (CHENG *et al*, 1999).

4.2.2 Processos de fixação do fósforo em minério de ferro e solos

Óxidos de ferro, hidróxidos e oxi-hidróxidos (chamados apenas óxidos de ferro) podem apresentar sítios de sorção para compostos com alta afinidade pela superfície do óxido de ferro como é o caso de muitos metais traços, sílica e fósforo (KROM e BERNER,1980). A disponibilização do fósforo para o meio ambiente teria sido processada pela atividade de microorganismos, permitindo sua absorção pelas raízes dos vegetais e em conseqüência, por toda a seqüência da cadeia alimentar. Ao fim de seu ciclo de vida, esses microorganismos devolvem o fósforo para o solo onde, no período de estações chuvosas, uma parte desse fósforo entra em solução juntamente com o ferro (Fe^{+2}), percolando através da formação ferrífera. A saturação relativa dessa solução promove a cristalização (no caso da goethita) em poros, fraturas, diáclases, etc. Como de modo geral a formação ferrífera é pobre em cátions livres (metais alcalinos e alcalino-terrosos), o fósforo tem poucas chances de sintetizar um fosfato, permanecendo então como uma fase possivelmente aniônica adsorvida na microporosidade da goethita.

Porém, em alguns casos, mesmo na ausência desses cátions livres, o fósforo pode associar-se ao alumínio para formar um fosfato denominado wavelita, $\text{Al}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH};\text{F})_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (COELHO, 1999).

Segundo TORRENT *et al.* (1992), a adsorção de fósforo em goethita pode ser controlada por um tipo de face cristalina que se mostra dominante em cristais naturais ou sintéticos, sendo que, resultados de microscopia eletrônica de transmissão apontam para a face [110].

A adsorção de fosfatos em hematita parece estar associada não somente à área superficial das partículas (superfície específica), mas com o formato destas. Assim, faces basais de hematita não adsorvem fosfato enquanto as não basais podem adsorver (BARRÓN *et al.*, 1988).

Quanto à capacidade de adsorção de fosfato, a hematita adsorve menos fosfato por unidade de área tendo menos afinidade por este em comparação à goethita (COLOMBO, 1994).

Estudos recentes conduzidos por LER e STANFORTH (2003) sugerem que a interação entre fosfato e goethita inclui adsorção ternária/ precipitação superficial bem como formação de um complexo superficial. Os processos de adsorção ternária e precipitação superficial envolvem a dissolução do cristal de goethita e a subsequente adsorção de ferro na superfície de ligação com fosfato. A superfície de precipitação dos ânions envolvidos no modelo engloba a dissolução do cristal de goethita que provê os íons ferro na estrutura cristalina. O processo proposto é esquematizado na Figura 9. As etapas envolvidas são as seguintes:

Etapa 1 – A chegada do fosfato forma um complexo mono ou bidentado com as hidroxilas, na superfície da goethita (estudos revelam a possibilidade de ambas as formas).

Etapa 2 – O fosfato adsorvido age como um sítio de sorção para ferro dissolvido, formando um complexo ternário e reduzindo a concentração de ferro em solução.

Etapa 3 – A goethita é dissolvida para então fornecer o íon ferro em solução, que pode assim adsorver fosfato em sua superfície. Tem sido mostrado que ânions adsorvidos podem formar complexos ternários com metais em solução.

Etapa 4 – O ferro adsorvido age como um sítio de sorção para o fosfato, e o processo continua.

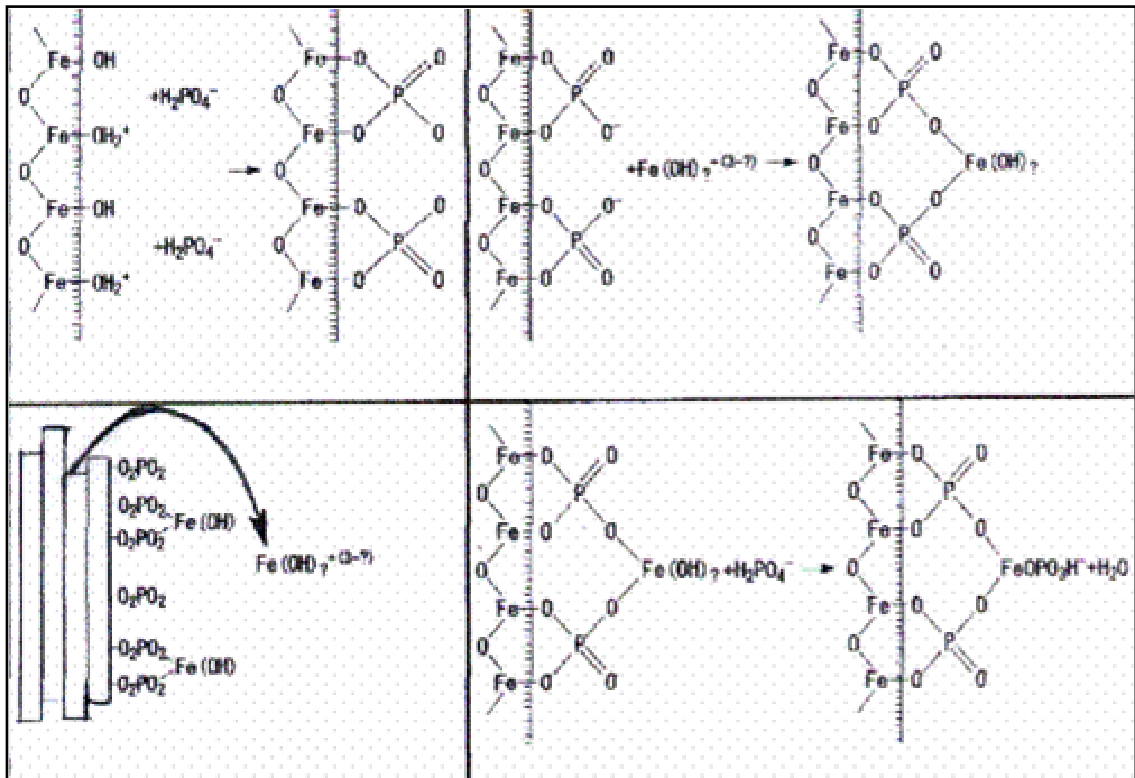


Figura 9. Esquema do processo de precipitação de fósforo (LER e STANFORTH, 2003).

4.2.3 A influência do fósforo nas propriedades do aço

Os produtos siderúrgicos apresentam normalmente, além do carbono como principal elemento de liga, uma série de impurezas como o fósforo, o enxofre, o manganês, o silício e o alumínio. A maior parte delas reage entre si ou com outros elementos não metálicos como o oxigênio e eventualmente o nitrogênio, formando as chamadas “inclusões não metálicas”. A formação dessas inclusões se dá, em grande parte, na fase final de desoxidação dos aços. Na realidade, algumas das inclusões podem até mesmo serem consideradas necessárias ou benéficas devido ao efeito de certo modo positivo que podem acarretar. Mesmo assim, e principalmente quando as condições de serviço provocam o aparecimento de esforços cíclicos e alternados, alguns tipos de inclusões, podem ser prejudiciais, sobretudo quando sua quantidade, forma e dimensões estão além do que se considera aceitável (CHIAVERINI, 2008).

Dentre as impurezas o fósforo foi considerado por muito tempo um elemento exclusivamente nocivo devido à fragilidade a frio que confere aos aços, sobretudo nos

aços duros de alto carbono quando o seu teor ultrapassa certos limites. Por essa razão, as especificações são rigorosas a respeito (COLPAERT, 1969).

Nos aços-liga, o fósforo é especificado como 0,04 % no máximo em alguns casos e em outros, 0,025 % máximo. Este elemento não possui tendência a formar carbonetos, mas dissolve-se na ferrita, endurecendo-a e aumentando o tamanho de grão do material, ocasionando a “fragilidade a frio” representada por baixa resistência ao choque ou baixa tenacidade. Essa influência é tanto mais séria quanto mais alto o teor de carbono do aço. Por outro lado, o fósforo apresenta alguns aspectos favoráveis pois ao aumentar a dureza do aço, aumenta igualmente sua resistência à tração, fato esse que pode ser aproveitado nos aços de baixo carbono onde seu efeito nocivo é menor, juntamente com outros elementos como cobre, níquel e cromo em baixos teores. Não se ultrapassa, entretanto, 0,12 % de fósforo, pois seus efeitos negativos poderiam prevalecer (CHIAVERINI, 2008).

O conceito “aço limpo”, ou seja, isento de inclusões é relativo, porque, sob o ponto de vista técnico é impossível produzir-se um aço totalmente isento de inclusões; além disso, algumas delas, as micro-inclusões são em geral necessárias. O importante é a identificação dessas inclusões sob os pontos de vista de composição, quantidade e dimensões e aperfeiçoar os processos de fabricação dos produtos siderúrgicos, de modo que elas afetem o menos possível as propriedades básicas daqueles produtos. As inclusões mais prejudiciais são as macro-inclusões: frequentemente utiliza-se como fronteira que separa as micro das macro-inclusões a dimensão de inclusão de 5 a 100 microns (KIESSILING, 1969 *in* CHIAVERINI, 2008).

5 METODOLOGIA

5.1 Preparação das amostras

Foram recebidos aproximadamente 20 kg das amostras globais provenientes de cada mina e jazida, juntamente com uma análise granulométrica realizada pela Vale (vide anexo IV). Estas amostras foram então quarteadas até se obter uma amostra de laboratório com massa de 1,0 kg. A faixa de tamanho utilizada no peneiramento variou de 4,00 a 0,045 mm. O fluxograma 1 mostra a sequencia de operações realizadas na caracterização das amostras.

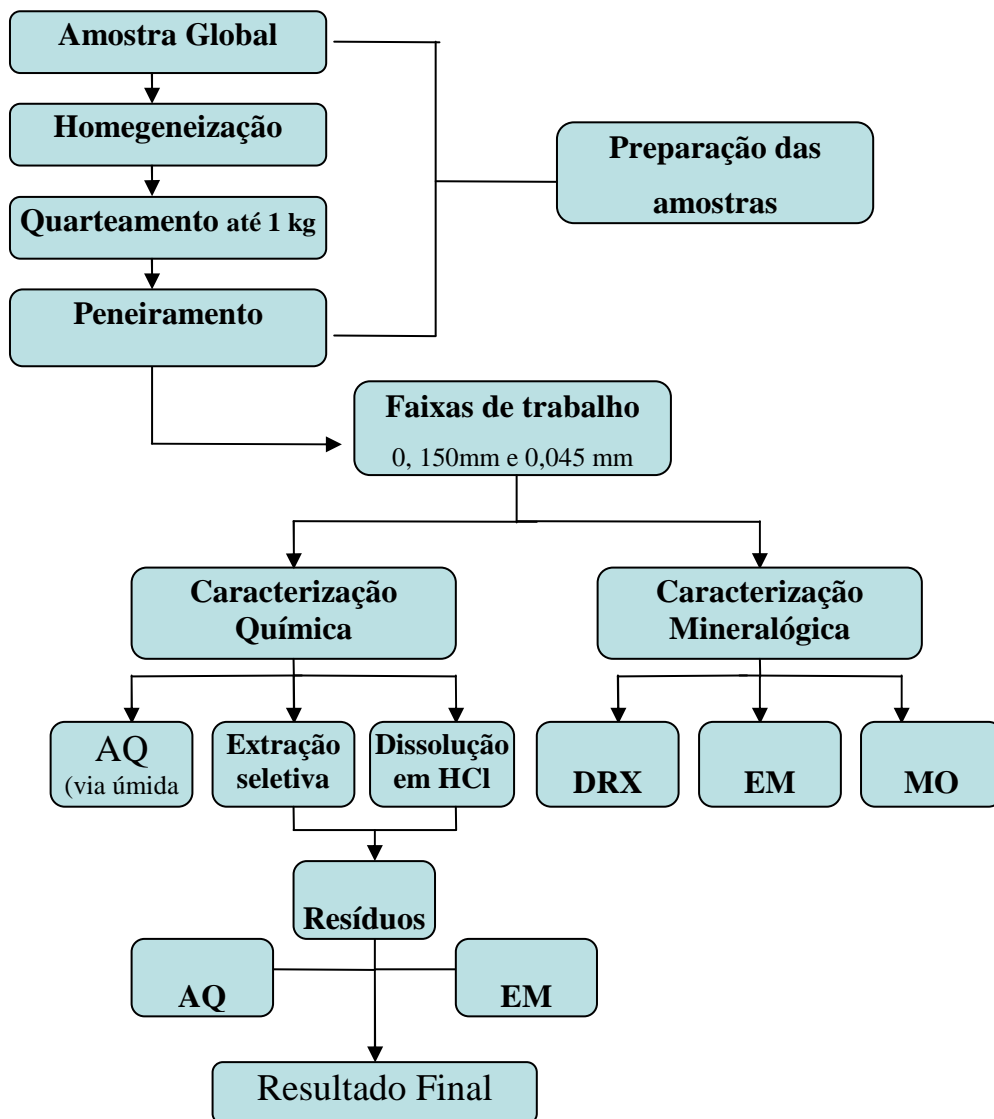


Figura 10. Fluxograma de operações realizadas na preparação das amostras e etapas de caracterização.

Tendo em vista os resultados das análises granuloquímicas realizadas pela Vale, as faixas de tamanho escolhidas para realização dos ensaios foram as de +0,150 mm e +0,045 mm. Esta escolha foi feita levando-se em consideração os tamanhos de grãos mais adequados aos ensaios de extração seletiva e dissolução ácida. A Tabela 1 mostra a distribuição percentual de fósforo nas amostras por malha utilizada em (mm).

Tabela 1. Distribuição percentual de fósforo obtida em análise granuloquímica por fluorescência de raios-X.

Abertura (mm)	AFCM P(%)	AFGO P(%)	AFMQ P(%)	AGCT P(%)	SFU P(%)	TDCF P(%)	TDSP P(%)
6.350	11,48	7,50	1,69	7,26	8,29	0,99	8,26
4.000	8,82	18,80	4,36	11,70	28,02	2,07	27,11
2.400	8,01	15,10	8,85	8,56	24,64	2,47	23,14
1.000	13,00	16,12	7,53	12,69	22,66	4,82	15,93
0.710	2,31	3,25	3,25	3,95	4,13	2,85	4,74
0.500	3,83	2,29	3,36	3,96	3,09	3,39	4,60
0.300	5,07	3,44	4,59	10,14	4,70	3,97	3,84
0.210	4,26	4,39	2,57	8,26	2,25	2,59	1,86
0.150	4,84	5,19	2,04	6,15	1,36	3,56	1,52
0.106	4,78	3,66	1,84	6,39	0,87	5,41	1,24
0.075	4,70	2,90	1,84	4,77	0,43	8,32	1,31
0.045	4,79	2,98	2,74	5,44	0,14	10,07	1,19
-0.045	24,10	14,37	55,35	10,75	1,01	49,50	5,26
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	101,59	100,00	100,00

* Para a amostra de Jangada não foram apresentados dados de distribuição granulométrica.

As técnicas de caracterização tecnológica escolhidas para este estudo foram: difração de raios X, microscopia óptica, espectroscopia Mössbauer e análises químicas por via úmida e espectrometria de emissão atômica por plasma. A relação das siglas e dos nomes das amostras está mostrada na Tabela 2.

Tabela 2. Relação entre as siglas e os nomes das minas de origem.

AMOSTRA	MINA DE ORIGEM
AFGO	Andrade
AFCM	Capanema
AFMQ	Apolo
AGCT	Conta História
JGD	Jangada
Sinter feed Urucum	Urucum
TDCF	Córrego Feijão
TDSP	Segredo

5.2 Caracterização

5.2.1 Espectroscopia Mössbauer

Com o intuito de se obter resultados quantitativos das fases de ferro presentes nas amostras estudadas foram realizadas análises por espectroscopia Mössbauer.

As informações contidas nos espectros Mössbauer consistem de parâmetros hiperfinos e outros parâmetros espectrais como largura e área dos picos, todos eles relatados como variáveis físicas e propriedades químicas do material da amostra. A análise do espectro Mössbauer consiste de otimizar o número de parâmetros pela minimização do χ^2 (qui - quadrado), que é a soma dos desvios ao quadrado do espectro calculado dividido pela variância. Nos ajustes dos espectros são utilizados algoritmos que permitem ajustar os dados experimentais ao conjunto de funções teóricas (VANDENBERGHE, 1991).

Os espectros coletados foram ajustados através dos programas MOSF utilizando Lorentzianas e DIST3E, o qual é baseado em um modelo independente de distribuição dos campos hiperfinos e/ou desdobramentos quadrupolares. Os resultados numéricos dos ajustes são reportados como parâmetros hiperfinos, os quais são:

- campo magnético hiperfino (H_{hf}) que é dado em kOe;
- área sub-espectral relativa (S) em %;
- deslocamento e/ou desdobramento quadrupolar ($2\varepsilon_Q$, ΔE_Q) e o desvio isomérico (δ) dados em mm/s.

Nos casos em que os ajustes foram feitos com o programa DIST3E, os valores de H_{hf} e ΔE_Q reportados são os de máxima probabilidade. Para dubletos, ΔE_Q significa o valor do desdobramento quadrupolar. As áreas relativas de cada sub-espectro são proporcionais à concentração de ferro nas amostras analisadas. Os espectros Mössbauer foram coletados no Laboratório de Espectroscopia Mössbauer do Departamento de Química da Universidade Federal de Ouro Preto, com um espectrômetro operando à temperatura ambiente no modo de aceleração constante, e a acumulação dos dados foi feita com um analisador multicanal com 512 ou 1024 canais, os quais são sequencialmente sincronizados com o movimento da fonte. A calibração de velocidade foi feita com um absorvedor de ferro metálico e os desvios isoméricos são relativos ao

α -Fe. Os absorvedores foram preparados misturando-se uma quantidade apropriada da amostra com glucose a fim de se obter cerca de 10 mg de Fe por centímetro quadrado.

Os teores dos minerais foram calculados a partir das concentrações de ferro determinados na análise química por via úmida, análises por ICP OES e pelas áreas relativas dos sextetos e dubletos para cada amostra.

5.2.2 Difração de raios X

Através da difração de raios X foi possível identificar os minerais existentes em cada amostra. Os difratogramas foram coletados em um difratômetro Shimadzu, modelo XRD 6000, equipado com tubo de Fe e monocromador de grafite. As varreduras foram feitas entre $7-75^\circ$ (2θ) com velocidade do goniômetro de $2^\circ/\text{min}$. Foi feita a adição de silício às amostras para atuar como padrão interno. Utilizou-se o programa JADE para a identificação das fases nas amostras, bem como a estimativa do tamanho médio de cristalito (MCD) que foram calculados a partir da equação de Scherrer após subtração do background e do $K_{\alpha 2}$.

5.2.3 Microscopia Ótica

A análise por microscopia ótica teve como objetivo comprovar a presença das fases minerais encontradas pela difração de raios X e identificar a presença de martita e especularita. Optou-se pela análise das frações de $-0,045$ mm por facilitar a identificação das fases presentes.

As análises mineralógicas foram feitas com pastilhas polidas em um microscópio ótico de luz refletida Leica, modelo DMEP com magnificação de 200 vezes. Todas as análises mineralógicas foram realizadas no Laboratório de Microscopia ótica do Departamento de Geologia da UFOP.

5.2.4 Análise química quantitativa

Os teores de diversos elementos foram determinados a partir de medidas por fluorescência de raios-X e espectroscopia de emissão atômica por plasma. O teor de

ferro foi ainda determinado por análise química via úmida de acordo com a Norma NBR ISO 9507, (*Determinação do Teor de Ferro Total - Método de Redução por Cloreto de Titânio III*). As amostras enviadas para a análise por ICP foram preparadas dissolvendo-se cerca de 0,1000 g de minério em 10 mL de HCL concentrado sob fervura e diluindo-se para 50 mL em balão volumétrico. O equipamento utilizado para análise das amostras foi o Espectrofotômetro de Emissão Atômica com Fonte Plasma, marca - Spectro / Modelo - Ciros CCD.

5.2.5 Extração seletiva para remoção de Fósforo e Alumínio

O método aqui empregado consiste de uma adaptação dos métodos apresentados por MEHRA e JACKSON (1960) e RUTTENBERG (1992).

Este procedimento foi realizado com as amostras originais (sem nenhum tratamento) e envolve extrações em quatro etapas:

- Etapa I: Pesar cerca de 0,5 g da amostra, adicionar 30 mL de cloreto de magnésio em solução 0,1M, agitar durante 2 horas e centrifugar. Repetir o processo e ao final lavar com água destilada. Essa etapa remove fósforo lábil;

-Etapa II: Tratar o resíduo da etapa I com 30 mL de solução tampão de acetato de sódio 0,1M (pH = 4) agitando durante 4 horas, centrifugar, lavar com cloreto de magnésio agitando por 1 hora. Repetir o processo com cloreto de magnésio, e ao término lavar com água destilada. Essa etapa remove fósforo ligado a carbonatos e apatita.

- Etapa III: Tratamento com DCB(Ditionito-citrato-bicarbonato).Tratar o resíduo da etapa II com 25 mL de solução de citrato-bicarbonato (1 M-0,3 M) a quente, em seguida colocar em banho-maria a 80°C por 30 min. Com intervalos de 15 min adicionar 3 porções de 1 g de ditionito de sódio. Deixar sob aquecimento por 1 hora, centrifugar e lavar com água destilada. Essa etapa remove fósforo ligado a óxidos de ferro.

- Etapa IV: Ao resíduo da etapa III adicionar 30 mL de ácido clorídrico 1 M agitando durante 4 horas. Centrifugar e lavar com água destilada. Essa etapa remove apatita dentrítica.

5.2.6 Extração com HCl concentrado

O método de extração com ácido clorídrico concentrado teve como objetivo observar o comportamento dos elementos e das fases mineralógicas presentes nas amostras ao longo do tempo de exposição. Tal comportamento reflete a forma como estes elementos ocorrem e a que fases estão associados.

Em um banho-maria foram colocados béqueres contendo cerca de 1,000 g de amostra e 50 mL de ácido clorídrico concentrado na temperatura de 35-36°C, variando-se o tempo de 0 a 350 min. Ao se retirar as amostras nos respectivos tempos procedeu-se à centrifugação e lavagem das mesmas, transferindo-as para placas de Petri para secagem. Os resíduos foram pesados para o cálculo das percentagens de massa dissolvida. Após dissolução em HCl concentrado sob fervura, estes resíduos foram encaminhados para análise química por ICP.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Análise química quantitativa

Os resultados das análises químicas realizadas nas amostras originais estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Teores dos principais elementos das amostras originais obtidos via ICP.

Amostra	Al %	Ca mg/kg	Fe %	Mg mg/kg	Mn mg/kg	P mg/kg	Ti mg/kg
AFCM 0,150	0,184	190	64,2	553	853	555	64
AFCM 0,045	0,174	165	65,4	557	886	569	64
AFGO 0,150	0,309	681	56,3	28	815	1288	82
AFGO 0,045	0,295	1196	65,6	9	760	957	114
AFMQ 0,150	1,366	486	53,3	872	1673	490	411
AFMQ 0,045	1,264	402	55,3	912	1737	509	373
AGCT 0,150	0,043	117	38,7	61	613	322	34
AGCT 0,045	0,088	127	36,7	149	975	492	139
JGD 0,150	0,924	210	62,2	192	1705	1272	114
JGD 0,045	0,653	296	61,1	268	2297	1120	139
SFU 0,250	0,688	329	62,1	6	980	572	521
TDCF 0,150	0,082	439	68,2	212	5792	626	43
TDCF 0,045	0,104	369	66,8	183	6658	773	49
TDSP 0,150	0,103	471	66,1	117	1748	1486	84
TDSP 0,045	0,115	329	57,9	72	1403	1234	48

De acordo com os resultados das análises químicas, todas as amostras apresentam mais de 50 % de ferro, exceto a amostra AGCT, proveniente da mina de Conta História, que apresentou uma concentração média de 37 %. Os teores de fósforo e alumínio são comparados na Figura 10, onde se observa que as amostras AFMQ, JGD e AFGO apresentaram as maiores concentrações de alumínio. Os teores mais elevados de fósforos foram apresentados pelas amostras TDSP, JGD e AFGO.

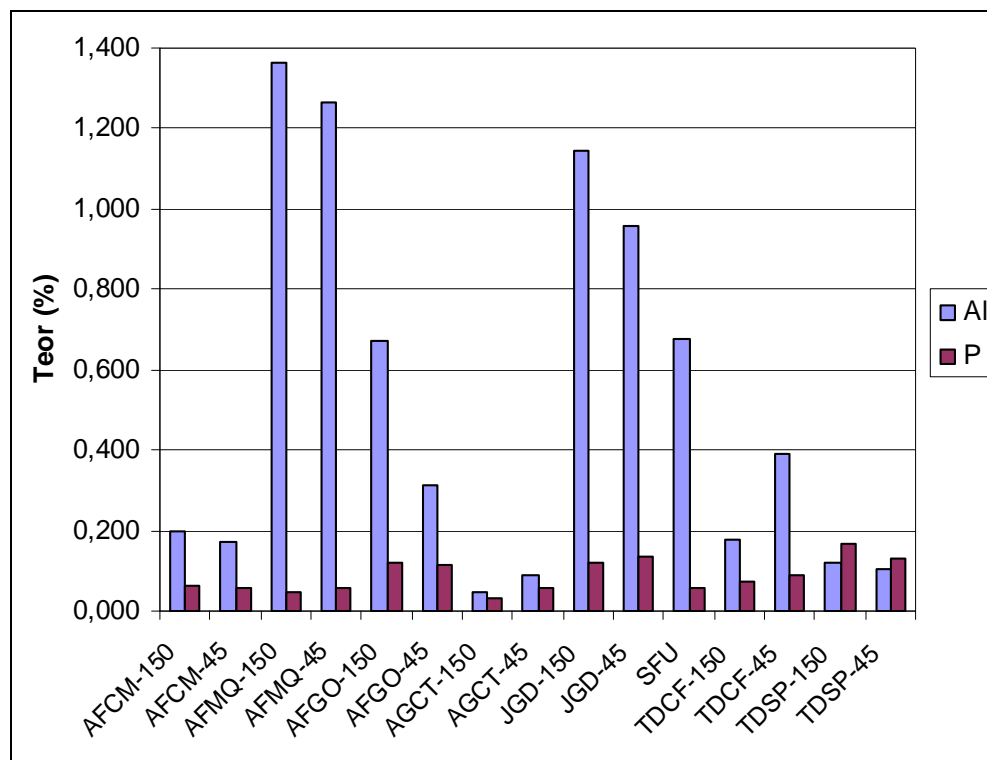


Figura 11. Teores (%) de fósforo e alumínio das amostras originais.

Na Tabela 4 tem-se uma comparação entre as análises de ferro via ICP, fluorescência de raios-X e via úmida, bem como dos teores de fósforo via ICP e fluorescência de raios-X. As diferenças encontradas entre as medidas feitas pelos diferentes métodos de análise não foram significativas variando até 5% para ferro o que pode ser explicado pelas diferenças de método de preparação e análise inerentes às técnicas utilizadas e sendo, portanto aceitável para o objetivo deste estudo.

Tabela 4. Teores de ferro e fósforo nas amostras originais determinados por diferentes métodos.

Amostra	Fe ICP (%)	Fe Fluor. (%)	Fe via úmida (%)	P ICP (%)	P Fluor. (%)
AFCM 0,150	64,2	63,3	63,8	0,055	0,070
AFCM 0,045	65,4	64,4	65,0	0,057	0,060
AFGO 0,150	56,3	68,0	68,5	0,129	0,141
AFGO 0,045	65,6	69,3	68,1	0,096	0,061
AFMQ 0,150	53,3	53,9	56,8	0,049	0,060
AFMQ 0,045	55,3	55,0	56,7	0,051	0,060
AGCT 0,150	38,7	32,6	36,0	0,032	0,029
AGCT 0,045	36,7	38,0	36,4	0,049	0,052
JGD 0,150	62,2	63,1	61,9	0,127	0,141
JGD 0,045	61,1	65,2	62,0	0,112	0,123
SF Urucum	62,1	64,4	64,7	0,057	0,071
TDCF 0,150	68,2	67,7	68,1	0,063	0,053
TDCF 0,045	66,8	68,2	67,7	0,077	0,054
TDSP 0,150	66,1	63,5	64,6	0,149	0,207
TDSP 0,045	57,9	55,6	57,5	0,123	0,137

6.2 Difração de raios-X e microscopia ótica

A partir das análises por difração de raios-X e microscopia ótica (Figuras 11 a 26) observou-se que as fases minerais predominantes nas amostras estudadas são hematita (H), goethita (G), magnetita (Mt), caulinita (C), muscovita (Mu) e sílica (Qtz) (quartzo ou sílex). Conforme mencionado anteriormente, silício (Si) foi adicionado como padrão interno a todas as amostras nas medidas de difração de raios-X.

Foi observada em grande parte das amostras, a presença de martita que é hematita pseudomórfica de magnetita. Martita não é um nome válido de um espécime mineral, sendo este termo usado para designar octaedros de magnetita que sofreram modificação química e se transformaram em hematita, mantendo, contudo o hábito octaédrico da magnetita. É comumente encontrada em ambientes sujeitos à ação do intemperismo químico como solos, aluviões e rochas em processo de alteração.



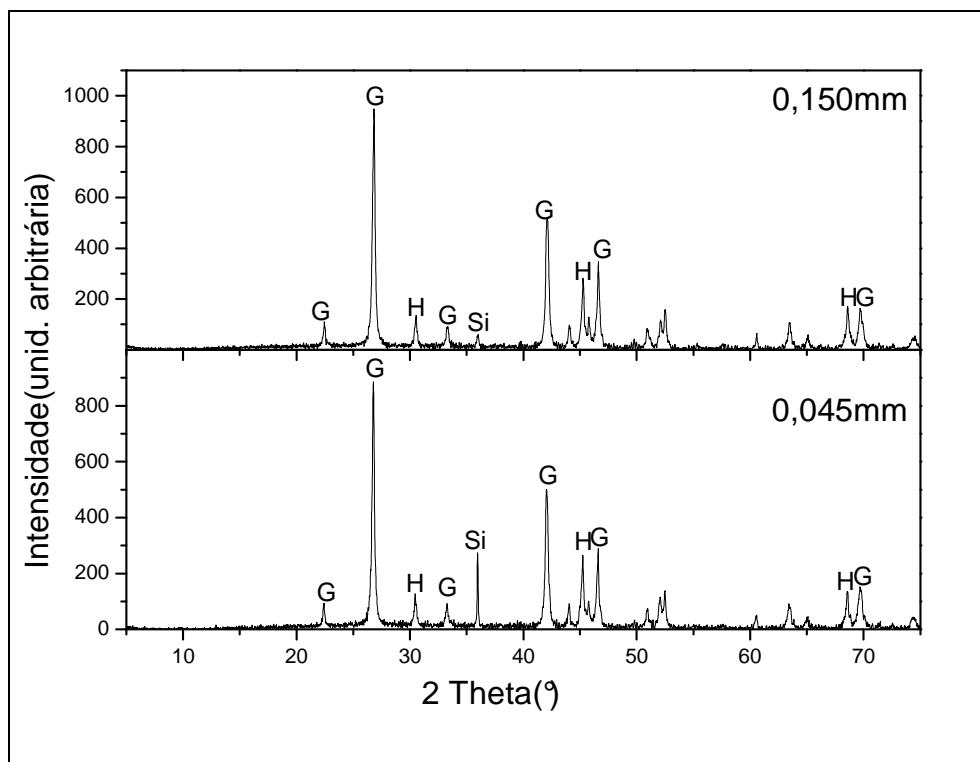


Figura 12. Difratogramas de raios-X das amostras de Capanema.

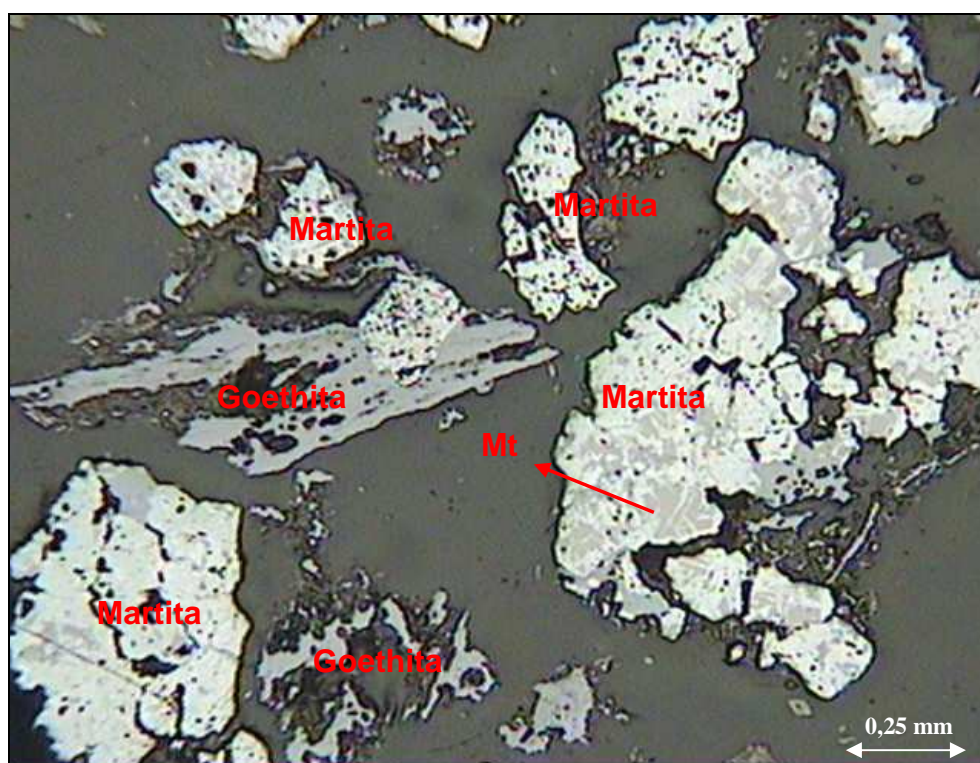


Figura 13. Micrografia ótica de luz refletida de uma amostra típica de Capanema obtida na fração -0,045 mm.

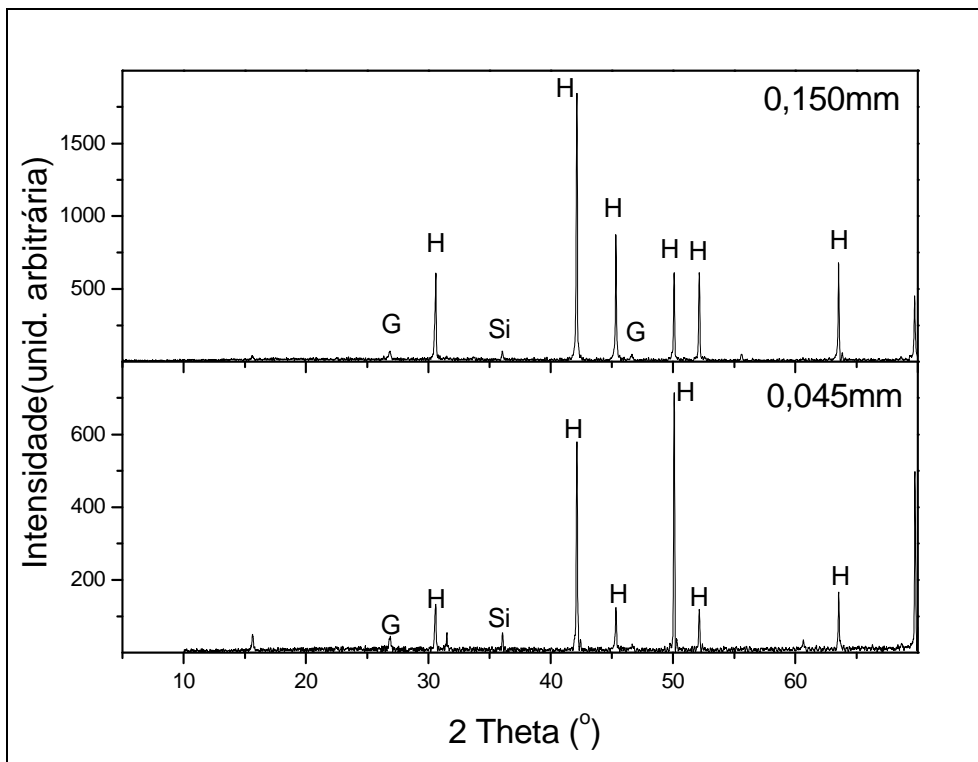


Figura 14. Difratomogramas de raios-X das amostras de Andrade.

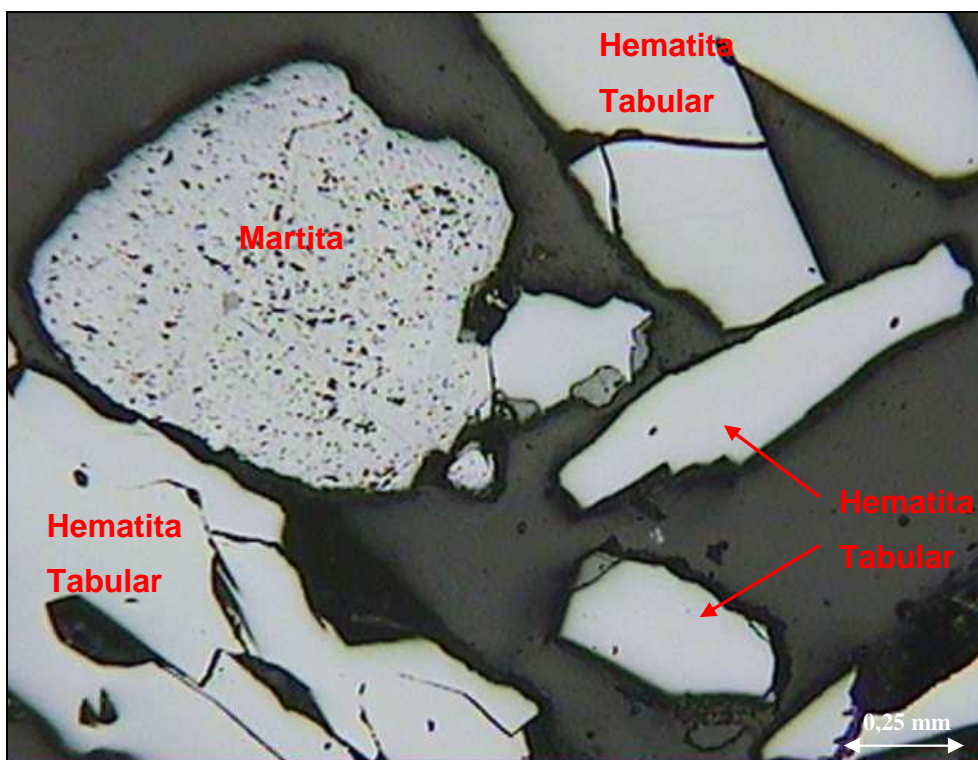


Figura 15. Micrografia ótica de luz refletida de uma amostra típica de Andrade obtida na fração -0,045 mm.

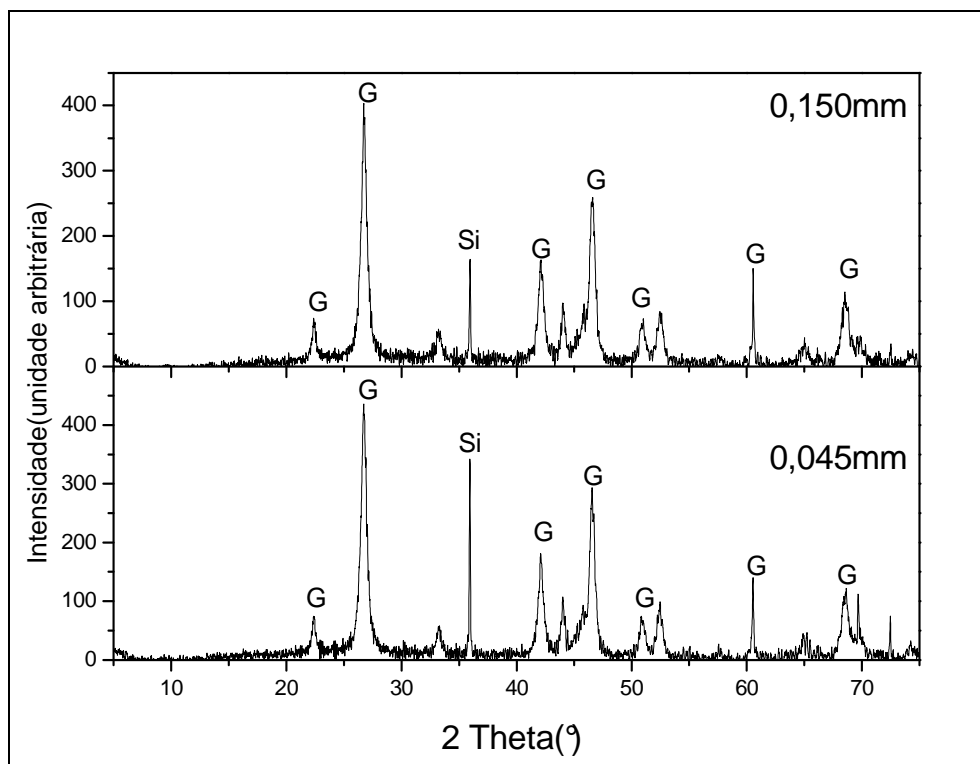


Figura 16. Difratogramas de raios-X das amostras de Apolo.

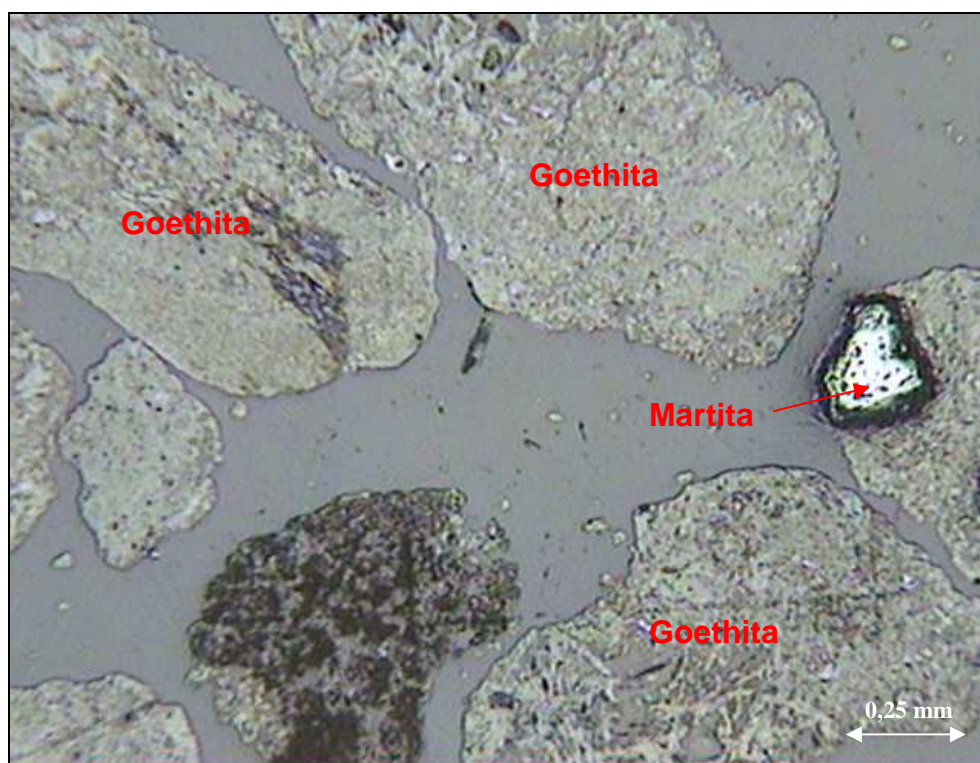


Figura 17. Micrografia ótica de luz refletida de uma amostra típica de Apolo obtida na fração -0,045 mm.

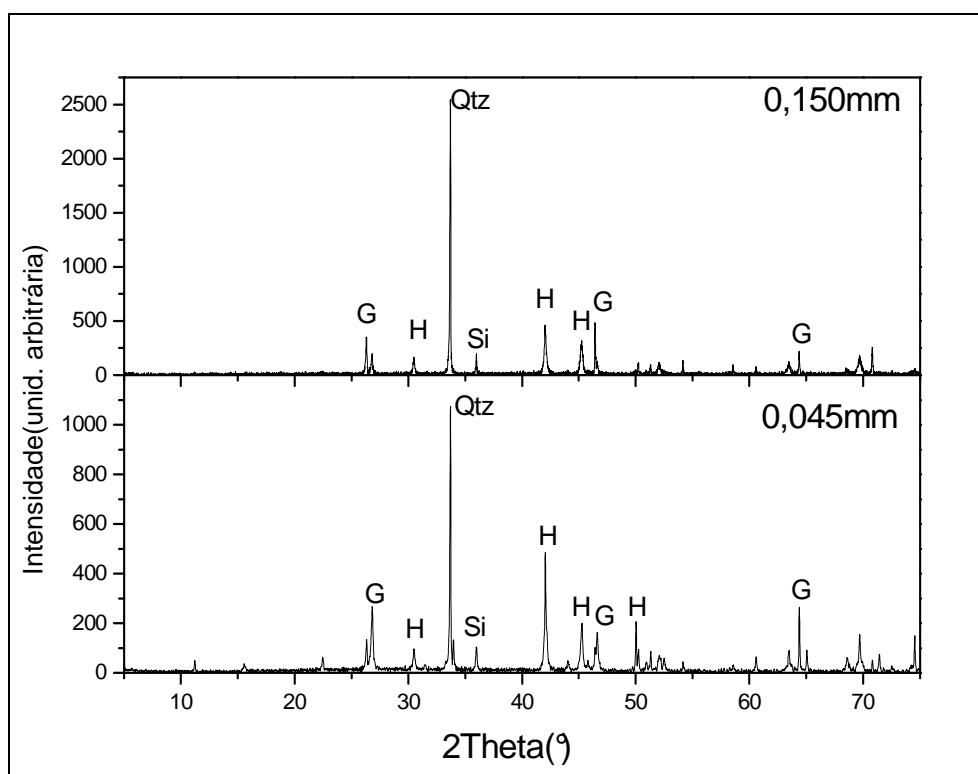


Figura 18. Difratoformas de raios-X das amostras de Conta História.

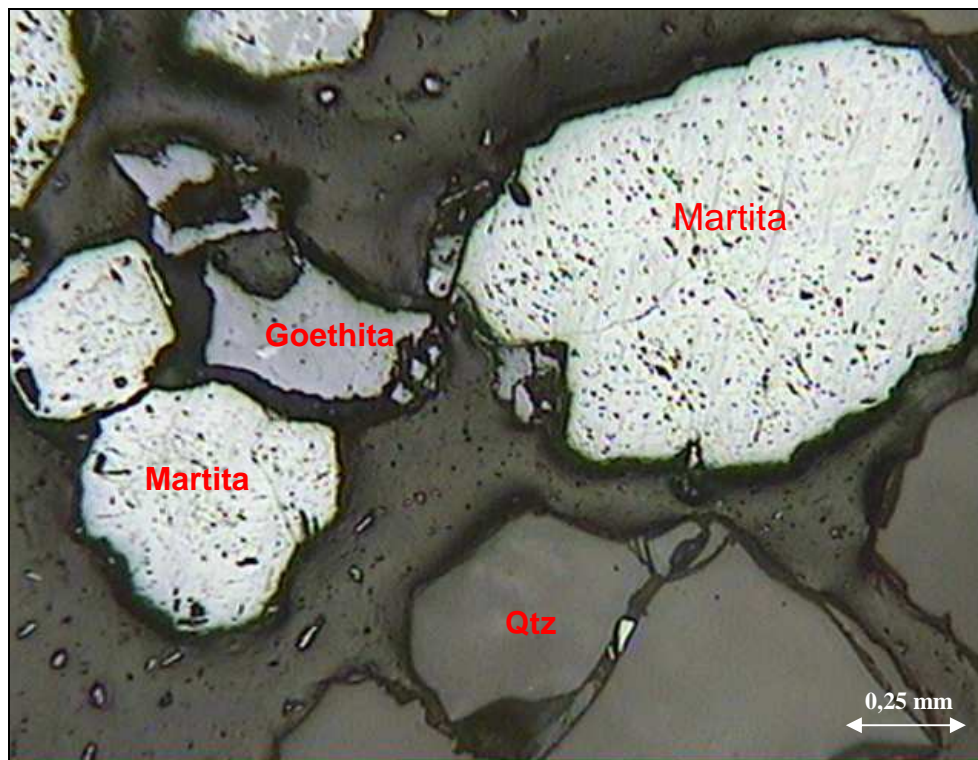


Figura 19. Micrografia ótica de luz refletida de uma amostra típica de Conta História obtida na fração -0,045 mm.

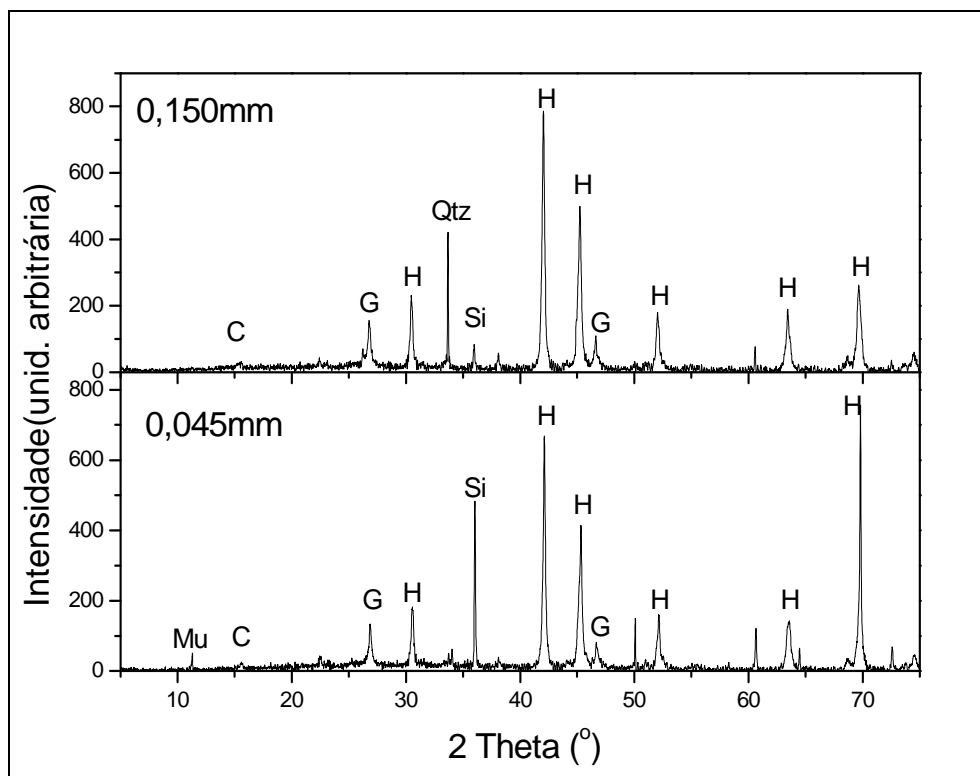


Figura 20. Difratomogramas de raios-X das amostras de Jangada.

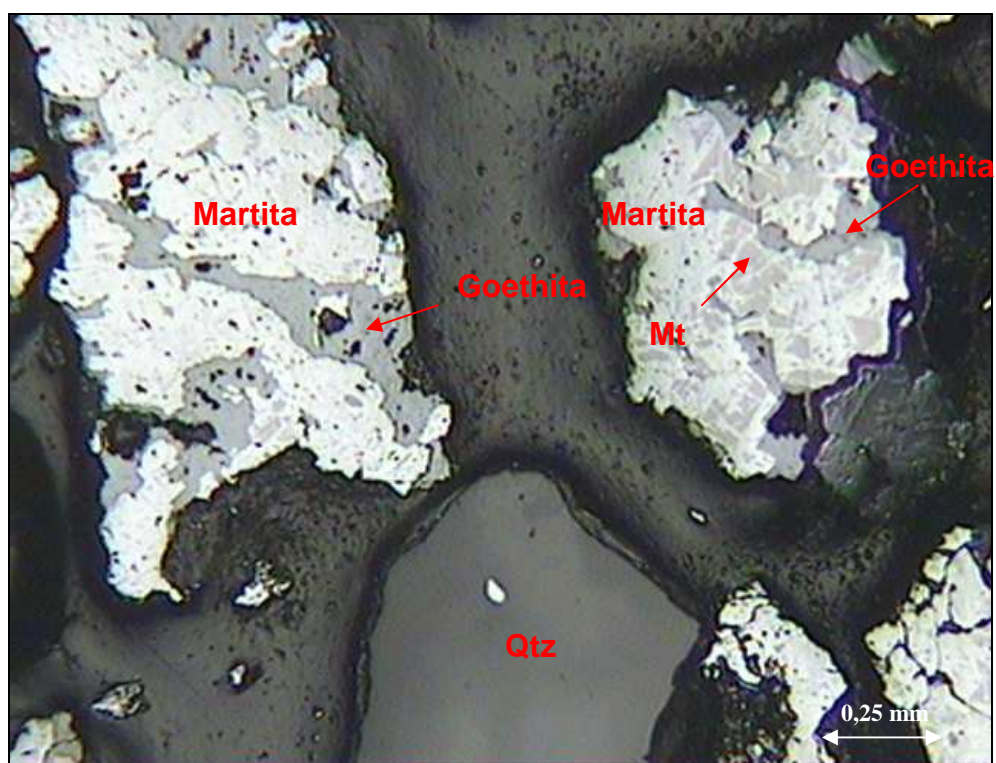


Figura 21. Micrografia ótica de luz refletida de uma amostra típica de Jangada obtida na fração -0,045 mm.

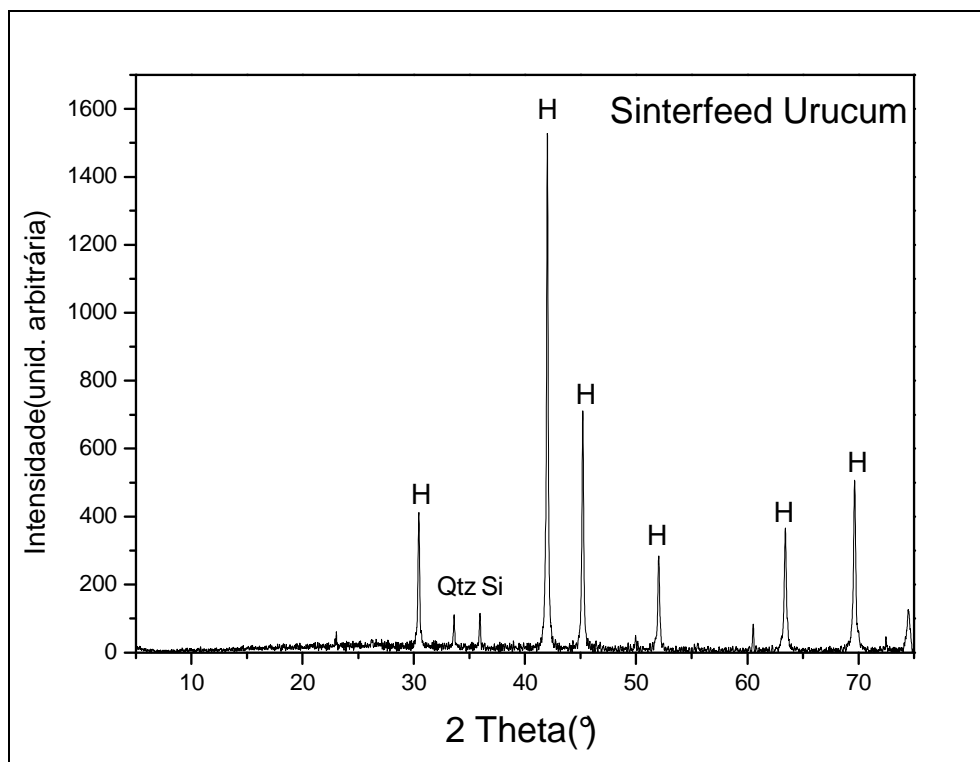


Figura 22. Difratoograma de raios-X da amostra de Urucum.

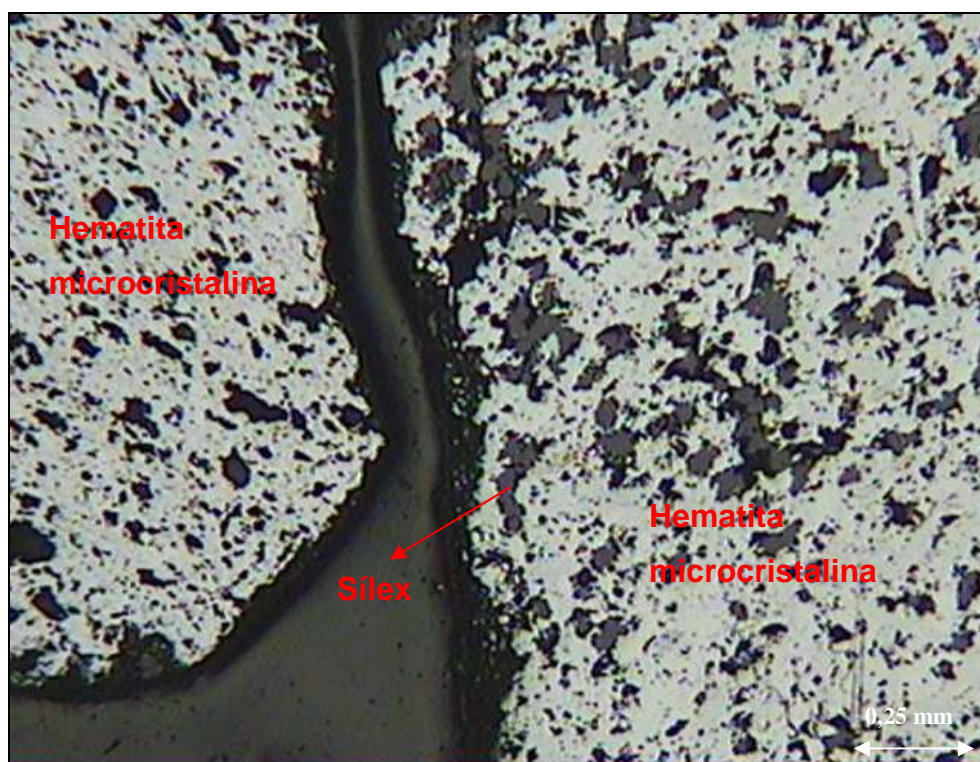


Figura 23. Micrografia ótica de luz refletida de uma amostra típica de Urucum obtida na fração -0,045 mm.

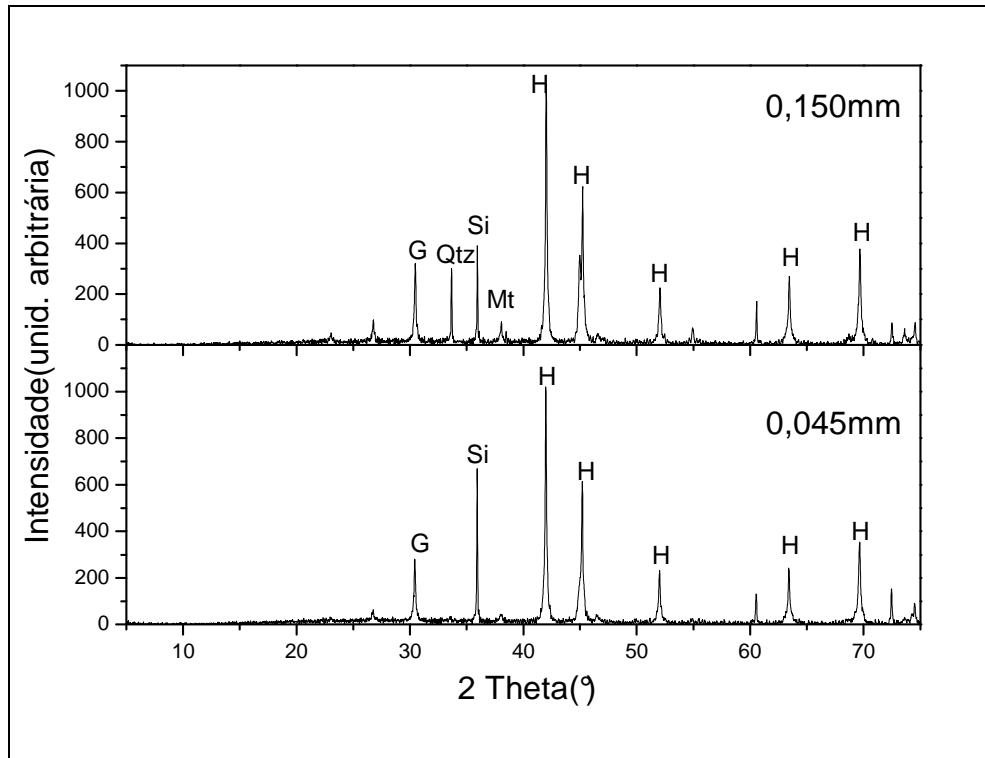


Figura 24. Difratogramas de raios-X das amostras de Córrego Feijão.

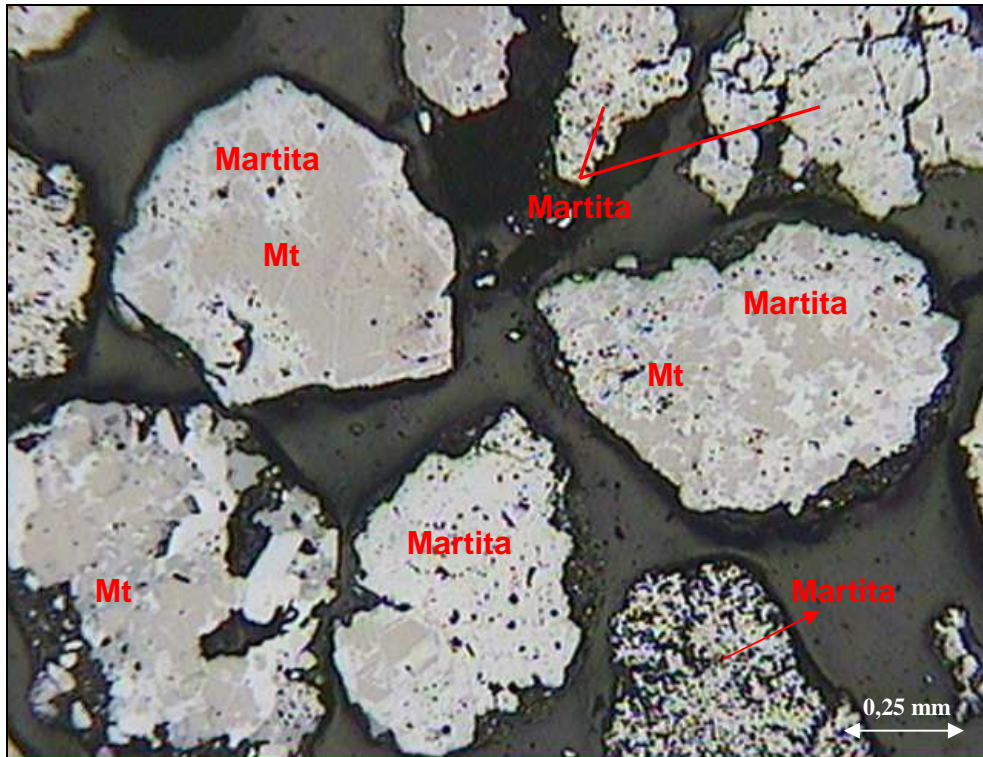


Figura 25. Micrografia ótica de luz refletida de uma amostra típica de Córrego Feijão obtida na fração -0,045 mm.

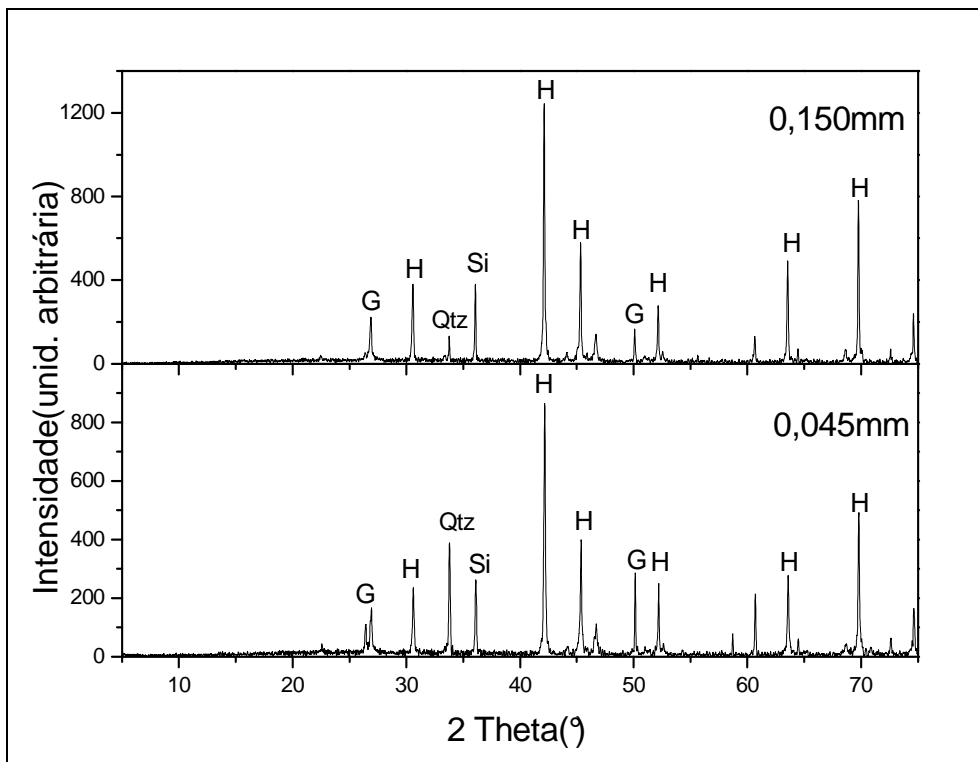


Figura 26. Difratomogramas de raios-X das amostras de Segredo.

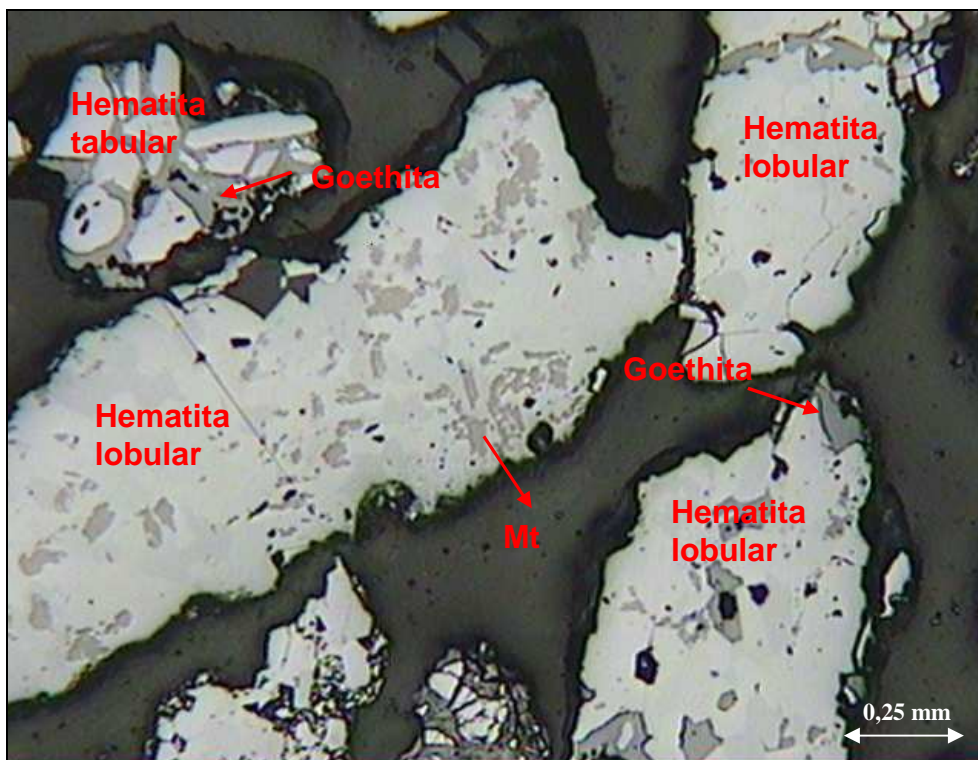


Figura 27. Micrografia ótica de luz refletida de uma amostra típica de Segredo obtida na fração -0,045 mm.

Os minerais predominantes identificados em todas as amostras estão listados na Tabela 5.

Tabela 5. Espécies minerais determinadas por difração de raios-X e microscopia ótica.

Amostras	Espécies Minerais Presentes
AFCM	Martita, Goethita
AFGO	Hematita tabular, Martita
AFMQ	Goethita, Martita
AGCT	Goethita, Martita, Quartzo
JGD	Martita, Goethita, Magnetita, Caolinita, Muscovita e Quartzo
SF Urucum	Hematita microcristalina, sílex
TDCF	Martita, Magnetita
TDSP	Hematita tabular, Goethita, Magnetita

As dimensões médias de cristalito (MCD) apresentadas pelas amostras foram calculadas a partir da equação de Scherrer após subtração do background e do $K_{\alpha 2}$. As larguras dos picos de difração foram obtidas a partir do ajuste computacional com uma função de Pearson. Os valores encontrados estão mostrados na Tabela 6.

Tabela 6. Dimensão média de cristalito (Å) calculados por difração de raios X nos principais planos cristalográficos de hematita e goethita.

Amostras	Hematita			Goethita	
	(012)	(104)	(110)	(110)	(111)
AFCM-15	730	-	>1000	660	630
AFCM-45	880	-	940	770	710
AFGO-15	>1000	>1000	>1000	-	-
AFGO-45	>1000	>1000	>1000	-	-
AFMQ-15	-	-	-	210	210
AFMQ-45	-	-	-	350	330
AGCT-15	>1000	820	800	>1000	>1000
AGCT-45	>1000	>1000	>1000	>1000	490
JGD-15	780	640	440	600	460
JGD-45	780	700	440	660	510
SF urucum	>1000	>1000	>1000	-	-
TDCF-15	>1000	-	300	>1000	-
TDCF-45	>1000	>1000	860	-	-
TDSP-15	>1000	>1000	>1000	>1000	960
TDSP-45	>1000	>1000	>1000	>1000	610

A goethita presente em várias amostras apresenta tamanho menor que 1000 Å, sendo que na amostra AFMQ os tamanhos variam de 200 a 300 Å. Para a hematita os

tamanhos normalmente são acima de 1000 Å, exceto para a amostra JGD que apresentou tamanho médio de 700 Å.

6.3 Determinação das Formas de Ocorrência de Alumínio e Fósforo

Ensaio de extração seletiva e dissolução em HCl concentrado foram realizados com o objetivo de determinar a forma em que alumínio e fósforo ocorrem nas amostras estudadas.

6.3.1 Extração seletiva para alumínio e fósforo

A extração seletiva de fósforo foi realizada com base nos métodos desenvolvidos por MEHRA e JACKSON (1960) e RUTTENBERG (1992). Os resultados dos percentuais de remoção acumulados de alumínio e fósforo nas quatro etapas estão listados na Tabela 7.

Tabela 7. Remoção de fósforo e alumínio (%) após os ensaios de extração seletiva.

Amostra	Etapa I		Etapa II		Etapa III		Etapa IV	
	Al	P	Al	P	Al	P	Al	P
AFCM 0,150	10	9	0	7	60	73	77	74
AFCM 0,045	5	0	0	0	81	68	86	81
AFGO 0,150	0	1	18	30	66	47	38	36
AFGO 0,045	0	0	0	0	67	66	56	82
AFMQ 0,150	0	0	0	0	*	*	*	*
AFMQ 0,045	0	0	0	0	*	*	*	*
AGCT 0,150	13	0	35	1	60	77	47	76
AGCT 0,45	0	8	7	12	93	78	97	80
JGD 0,150	66	0	52	0	78	53	69	50
JGD 0,045	43	10	42	12	85	75	79	84
SFUrucum	44	17	35	19	45	28	47	30
TDCF 0,150	44	2	49	15	89	88	95	96
TDCF 0,045	73	4	79	28	85	83	98	92
TDSP 0,150	0	0	8	5	27	66	97	52
TDSP 0,045	10	18	3	23	31	82	59	78

* A amostra AFMQ teve sua massa totalmente consumida na terceira etapa de extração.

Nas etapas I e II da extração apenas as amostras JGD, SFU e TDCF apresentaram remoção significativa de alumínio e pouco significativa de fósforo mostrando, portanto, que nestas amostras não existem grandes quantidades de fósforo lábil ou ligado a carbonatos. No entanto, há remoção de alumínio nestas amostras.

Na etapa III foram realizadas duas extrações sucessivas com DCB (Ditionito-citrato-bicarbonato) e os percentuais de remoção de fósforo e alumínio estão mostrados na Figura 28. Utilizaram-se duas extrações com DCB devido à maior resistência à dissolução dos óxidos de ferro com alta cristalinidade ou elevada substituição de Fe^{3+} por Al^{3+} estrutural (INDA JÚNIOR, 2003). Observa-se que para a maioria das amostras ocorre extração significativa do fósforo e do alumínio nesta etapa.

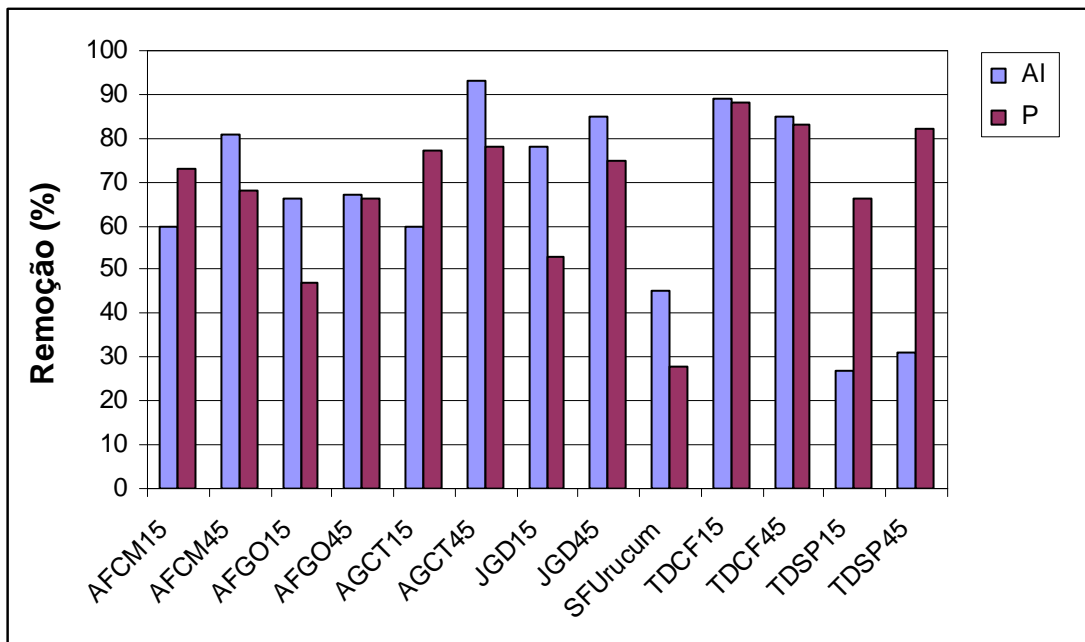


Figura 28. Percentuais de remoção de fósforo e alumínio na etapa III (Tratamento com DCB).

6.3.1.2 Espectroscopia Mössbauer

Os espectros Mössbauer das amostras de +0,045 mm, antes e após a extração com DCB estão mostrados nas Figuras de 29 a 32. Para a maioria das amostras o tratamento com DCB remove preferencialmente a goethita, conforme pode ser facilmente observado nas amostras AFCM, AGCT, JGD e TDSP em que a área que

corresponde aos sextetos característicos de goethita (em azul) diminuem após a extração e a área correspondente aos sextetos de hematita (em vermelho) se mantém as mesmas..

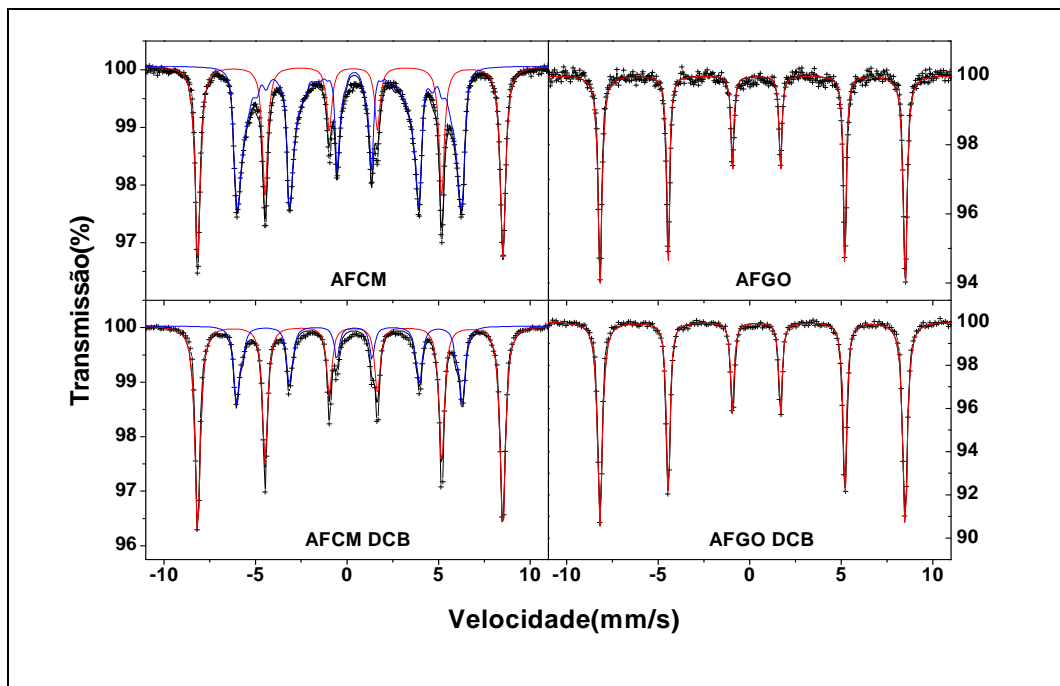


Figura 29. Espectros Mössbauer das amostras AFCM e AFGO de +0,045 mm antes e após tratamento com DCB.

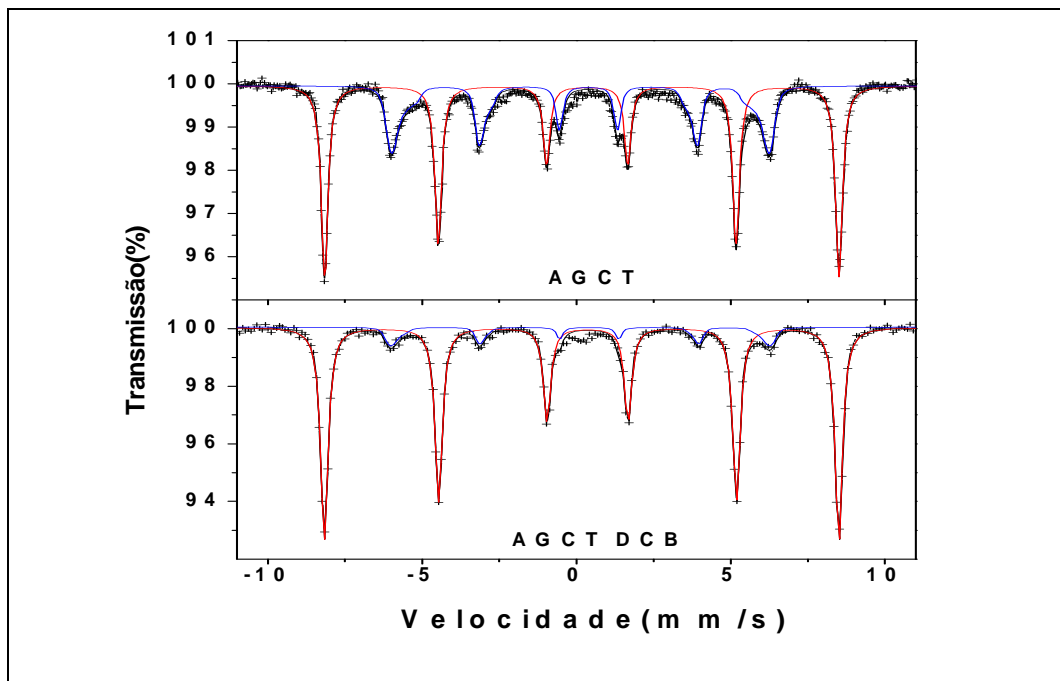


Figura 30. Espectros Mössbauer da amostra AGCT +0,045 mm antes e após tratamento com DCB.

Para as amostras de Jangada (JGD) e Córrego Feijão (TDCF) evidencia-se a presença de magnetita após a extração com DCB, em que se extraiu goethita. Os resultados numéricos dos ajustes dos espectros Mössbauer das amostras originais e tratadas com DCB são mostrados nas Tabelas 8 e 9, respectivamente.

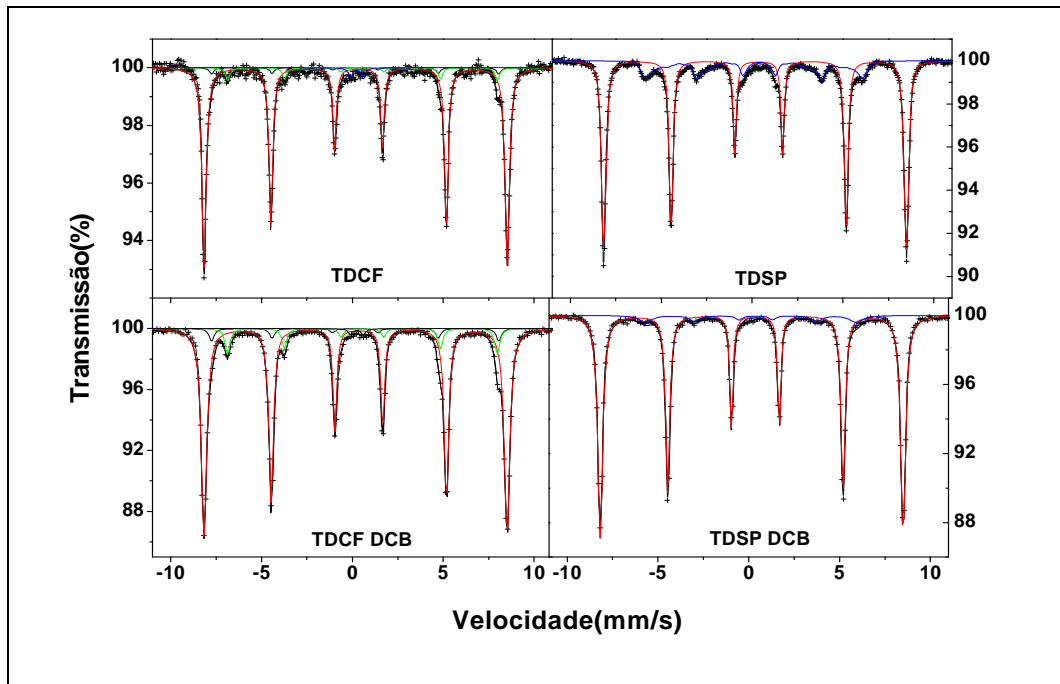


Figura 31. Espectros Mössbauer das amostras TDCF e TDSP de +0,045 mm antes e após tratamento com DCB.

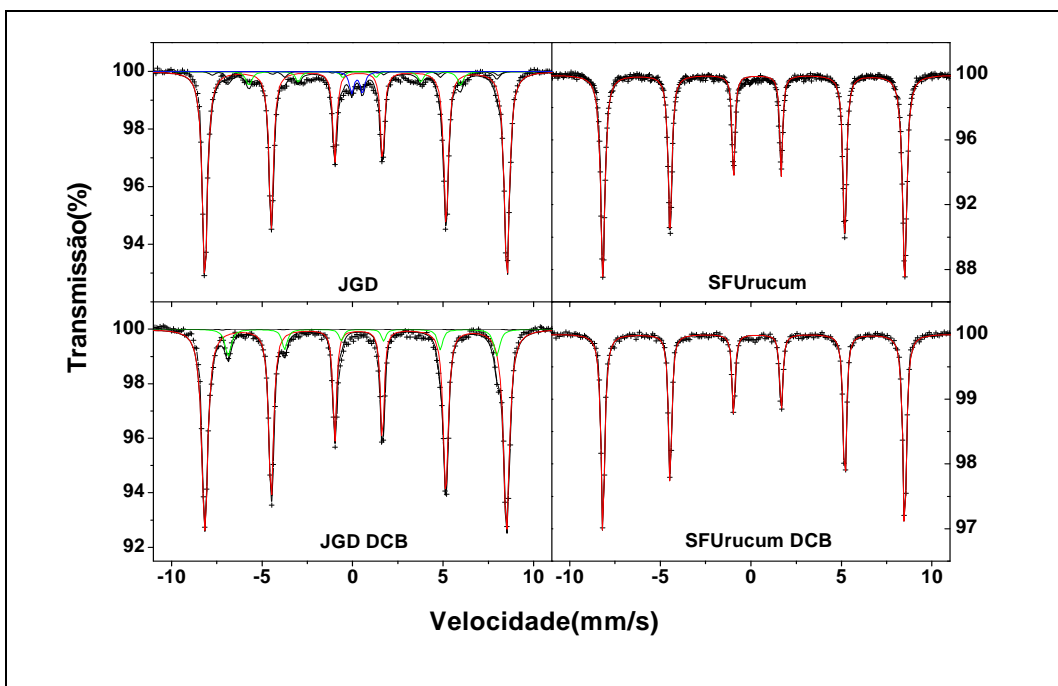


Figura 32. Espectros Mössbauer das amostras JGD de +0,045 mm e SFUrucum antes e após tratamento com DCB.

Tabela 8. Parâmetros experimentais obtidos dos espectros Mössbauer das amostras originais. H_{hf} (kOe) = campo magnético hiperfino; $2\varepsilon_Q$ (mm/s) = deslocamento quadrupolar; δ (mm/s) = desvio isomérico; S = área relativa; ΔE_Q (mm/s) = desdobramento quadrupolar.

Amostra	Fração	Hematita				Goethita				Sexteto 1 Magnetita				Sexteto 2 Magnetita				Dubleto (goethita)		
		H_{hf}	$2\varepsilon_Q$	δ	S	H_{hf}	$2\varepsilon_Q$	δ	S	H_{hf}	$2\varepsilon_Q$	δ	S	Hhf	$2\varepsilon_Q$	δ	S	ΔE_Q	Δ	S
Capanema	0,150 mm	517	-0,17	0,37	39	379	-0,27	0,37	61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,045 mm	517	-0,17	0,37	41	380	-0,27	0,37	59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Andrade	0,150 mm	517	-0,21	0,37	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,045 mm	517	-0,21	0,37	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Apolo	0,150 mm	-	-	-	-	371	-0,27	0,37	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,045 mm	514	-0,22	0,37	2	369	-0,27	0,37	98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conta História	0,150 mm	517	-0,16	0,37	43	379	-0,27	0,37	57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,045 mm	517	-0,17	0,37	63	379	-0,26	0,37	37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Jangada	0,150 mm	517	-0,14	0,37	82	360	-0,26	0,36	7	490	0	0,26	3	460	0	0,66	5	0,60	0,36	3
	0,045 mm	517	-0,15	0,37	84	362	-0,26	0,36	6	490	0	0,26	2	460	0	0,66	4	0,60	0,36	4
Urucum	*0,250 mm	517	-0,20	0,37	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Córrego Feijão	0,150 mm	517	-0,15	0,36	82	-	-	-	-	490	0	0,26	5	460	0	0,71	11	0,70	0,36	2
	0,045 mm	517	-0,16	0,37	89	-	-	-	-	490	0	0,26	3	460	0	0,66	6	0,70	0,36	2
Segredo	0,150 mm	511	-0,20	0,37	70	371	-0,25	0,38	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,045 mm	511	-0,20	0,37	78	371	-0,28	0,36	22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

* Dados relativos à fração de 0,250 mm.

Tabela 9. Parâmetros experimentais obtidos dos espectros Mössbauer dos resíduos das extrações com DCB da fração 0,045mm. H_{hf} (kOe) = campo magnético hiperfino; $2\varepsilon_Q$ (mm/s) = deslocamento quadrupolar; δ (mm/s) = desvio isomérico; S = área relativa; ΔE_Q (mm/s) = desdobramento quadrupolar.

Amostra	Fração	Hematita				Goethita				Sexteto 1 Magnetita				Sexteto 2 Magnetita				Dubleto (goethita)		
		H_{hf}	$2\varepsilon_Q$	δ	S	H_{hf}	$2\varepsilon_Q$	δ	S	H_{hf}	$2\varepsilon_Q$	δ	S	H_{hf}	$2\varepsilon_Q$	δ	S	ΔE_Q	δ	S
Capanema	0,045 mm	517	-0,17	0,37	69	383	-0,27	0,38	31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Andrade	0,045 mm	517	-0,22	0,37	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conta História	0,045 mm	517	-0,20	0,37	89	382	-0,29	0,38	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Jangada	0,045 mm	517	-0,16	0,37	84	-	-	-	-	490	0	0,26	5	460	0	0,67	10	0,70	0,36	1
Urucum	*0,250 mm	517	-0,20	0,37	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Córrego Feijão	0,045 mm	517	-0,18	0,37	84	-	-	-	-	490	0	0,26	5	460	0	0,66	10	0,70	0,36	1
Segredo	0,045 mm	517	-0,21	0,37	92	360	-0,26	0,36	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

* Dados relativos à fração de 0,250 mm.

A partir das áreas relativas obtidas nos espectros Mössbauer e dos teores de ferro obtidos por análises químicas, foi possível calcular a mineralogia das amostras. Os resultados estão listados na Tabela 10. É possível observar que as amostras que apresentavam goethita tiveram a concentração deste óxido diminuída após a extração, o que, de acordo com o método que extrai fósforo ligado a óxidos de ferro, indica que havia fósforo e em alguns casos, alumínio associados à goethita nestas amostras.

Tabela 10. Teores percentuais de hematita, goethita e magnetita antes e após extração com DCB para fração +0,045 mm.

Amostras	Antes				Após				Massa dissolvida DCB (%)	Mineralogia antes de DCB (Microscopia ótica)
	H	G	Mt	Qz	H	G	Mt	Qz		
AFCM-45	38	61	-	1	63	32	-	5	73	Martita, Goethita
AFGO-45	94	-	-	6	99	-	-	1	21	Hematita tabular (especularita), Martita
AGCT-45	33	22	-	45	24	3	-	73	48	Goethita, Martita, Quartzo
JGD-45	73	10	5	12	76	1	13	10	55	Martita, Goethita, Magnetita, Quartzo
SFU-250	89	-	-	11	90	-	-	10	53	Hematita microcristalina, sílex
TDCE-45	78	2	15	5	63	1	10	26	48	Martita, Magnetita
TDSP-45	65	20	-	15	67	6	-	27	60	Hematita lobular, Goethita, Magnetita

No caso da amostra AFMQ, o ensaio com DCB foi repetido aumentando-se a massa para extração, mas ainda assim, o resíduo que restou não apresentava massa suficiente para análise química e espectroscopia Mössbauer. O percentual de massa dissolvida da amostra após este procedimento foi de 97,8 (%).

De acordo com a Tabela 10 é possível inferir que, as amostras que tiveram o teor de goethita diminuído AFCM, TDSP, JGD e AGCT também apresentam os maiores percentuais de massa dissolvida: 73(%), 60(%), 55 (%) e 48 (%) respectivamente. Já as amostras AFGO e SFU, que não apresentam goethita, tiveram percentuais de massa dissolvida de 21 (%) e 53 (%) respectivamente. Esta diferença no comportamento

frente à dissolução em DCB entre hematitas provavelmente se deve ao fato de estas amostras possuírem quantidades variáveis de martita, especularita e hematita criptocristalina. O efeito do tratamento com DCB nestas variedades de hematita ainda não é descrito na literatura, e ensaios adicionais devem ser realizados para se estabelecer a solubilidade destas fases.

6.3.2 Dissolução em HCl concentrado

Segundo LANDERS e GILKES (2007), a dissolução congruente de metais substituídos e de ferro nos óxidos de ferro fornece importantes informações sobre a dissolução destes metais. Se o ferro e os metais associados têm taxas de dissolução idênticas é possível inferir que o metal está uniformemente distribuído em todos os cristais dos óxidos de ferro. Se a dissolução é não-congruente é evidente que a distribuição do metal não é uniforme ou que o ferro e o metal não estão presentes no mesmo mineral.

Este ensaio foi utilizado a fim de se determinar de que forma estavam distribuídos alumínio e fósforo nos óxidos de ferro, mesmo o fósforo não sendo um metal. Os resultados se mostram satisfatórios e levam a correlações esclarecedoras a cerca da distribuição destes elementos no minério de ferro.

As Figuras 33 e 34 mostram o percentual de massa dissolvida em cada amostra em função do tempo de tratamento com HCl concentrado. É possível observar a semelhança de comportamento entre as amostras, exceto no caso de AFGO. Esta diferença de comportamento pode ser explicada pela presença de hematita do tipo tabular (especularita), encontrada apenas nesta amostra.

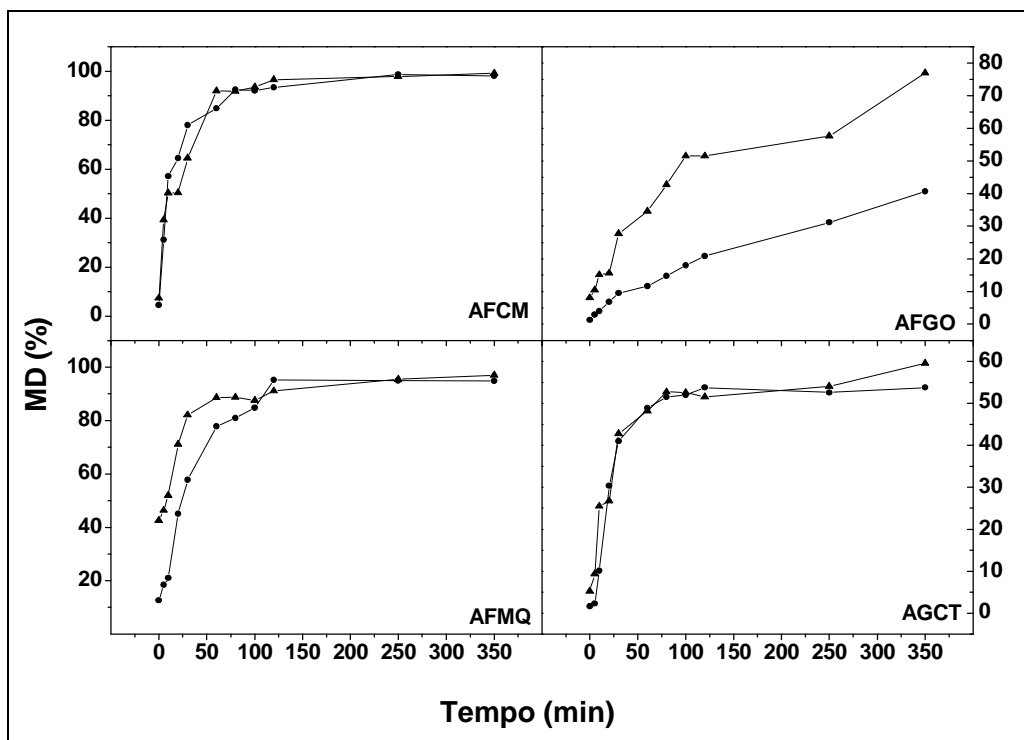


Figura 33. Percentual de massa dissolvida das amostras AFCM, AFGO, AFMQ e AGCT versus tempo de exposição ao HCl concentrado. ●: 0,150 mm; ▲: 0,045mm.

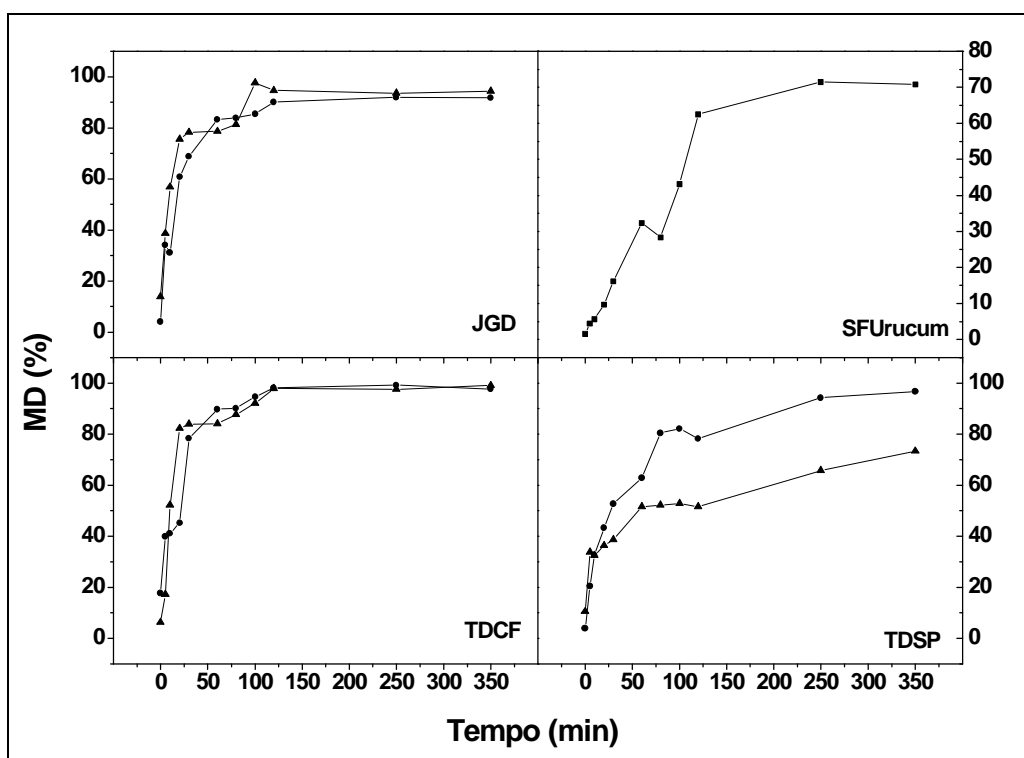


Figura 34. Percentual de massa dissolvida das amostras JGD, SFUrucum, TDCF e TDSP versus tempo de exposição ao HCl concentrado. ●: 0,150 mm; ▲: 0,045mm; ■: 0,250mm.

De acordo com as Figuras 33 e 34 todas as amostras apresentaram uma dissolução crescente em HCl concentrado mostrando que quanto maior o tempo de exposição maior o percentual de dissolução das amostras. As diferentes taxas de dissolução certamente estão relacionadas não apenas às fases minerais presentes nas amostras, mas também dependem fundamentalmente das proporções de martita, especularita e hematita microcristalina. Os resultados das análises químicas e mineralógicas após a dissolução ácida encontram-se nos anexos I, II e III.

6.4 *Discussão das formas de ocorrência de alumínio e fósforo em cada amostra*

Foram avaliadas as correlações existentes entre os elementos Al, Fe e P durante a extração com HCl concentrado, bem como a correlação destes elementos com os óxidos de ferro quantificados por espectroscopia Mössbauer.

Os gráficos que se seguem mostram a correlação entre os elementos antes e após exposição ao HCl concentrado. As ordenadas foram calculadas na forma X/X_i , onde i significa o teor do elemento na amostra original.

6.4.1 Amostras de Frente de Lavra - Mina de Capanema

De acordo com os resultados das análises químicas, após a dissolução em HCl concentrado, as amostras de Capanema (AFCM) apresentam uma fraca correlação entre fósforo e ferro e também entre alumínio e ferro. Por outro lado, existe uma correlação significativa entre os teores de fósforo e de alumínio nas duas frações granulométricas investigadas ($r^2 > 0,90$), sugerindo a existência de um fosfato de alumínio nestas amostras. De acordo com os espectros Mössbauer obtidos após cada tempo de extração com HCl, os teores de hematita e goethita diminuem com o tempo de exposição ao ácido. Entretanto, parece não existirem correlações entre os teores de hematita e goethita com os de fósforo. É importante enfatizar que na fração 0,150mm, todo o alumínio e fósforo foram removidos (Figura 37), fato que não ocorreu na fração 0,045 mm. Portanto, além da presença de um fosfato de alumínio, é possível que uma pequena fração tanto de fósforo como de alumínio estejam presentes nos óxidos de ferro.

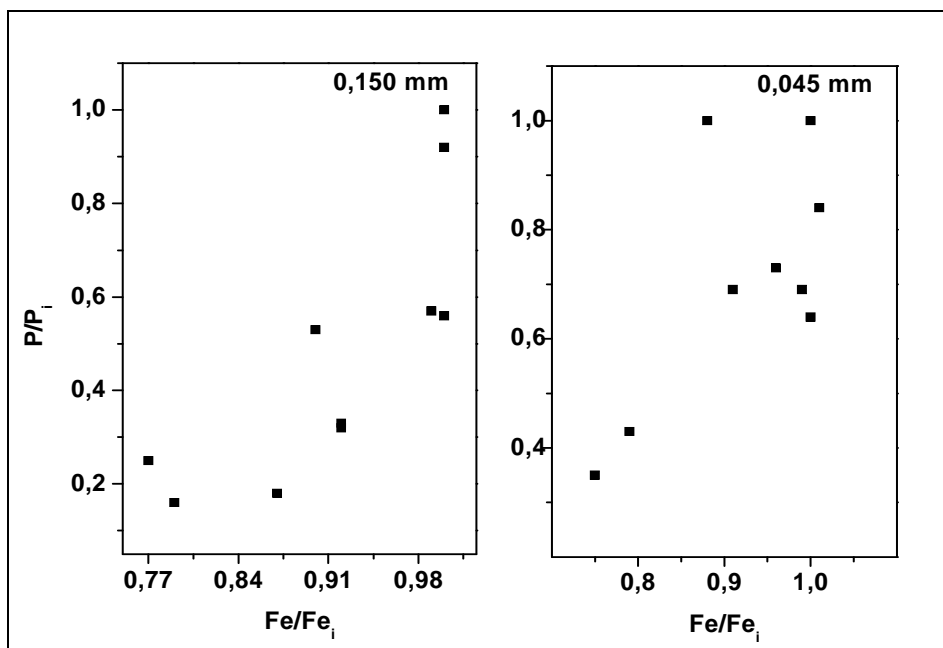


Figura 35. Variação dos teores de fósforo e de ferro nas amostras AFCM +0,150mm e +0,045mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.

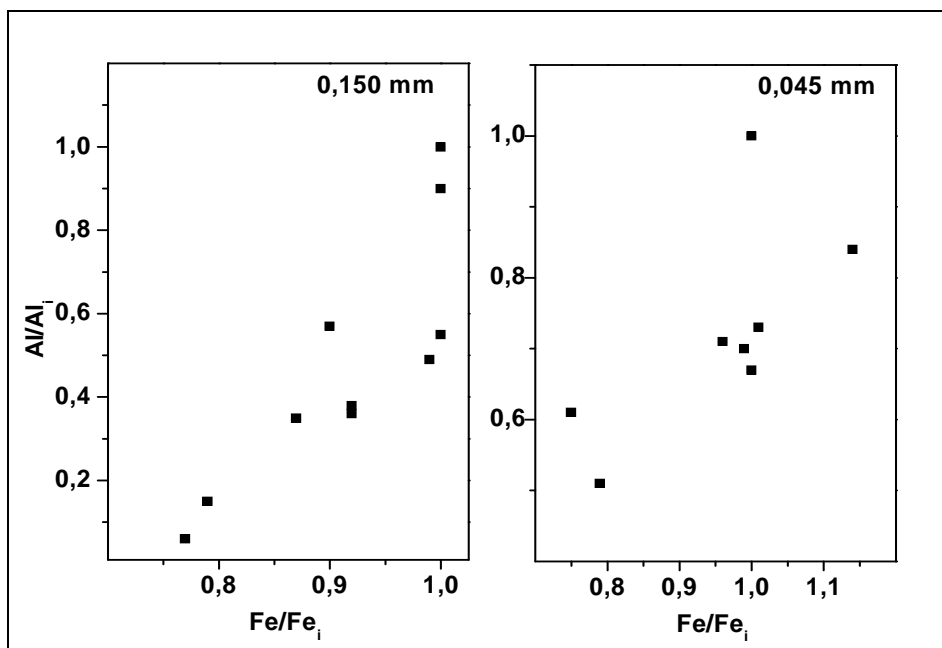


Figura 36. Variação dos teores de alumínio e de ferro das amostras AFCM +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.

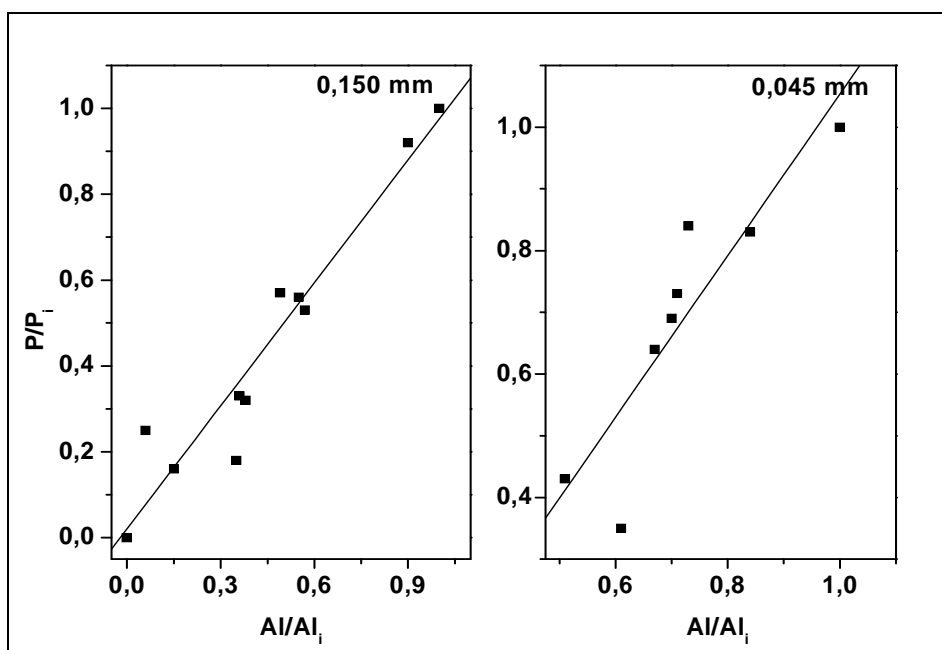


Figura 37. Variação dos teores de alumínio e de fósforo das amostras AFCM +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.

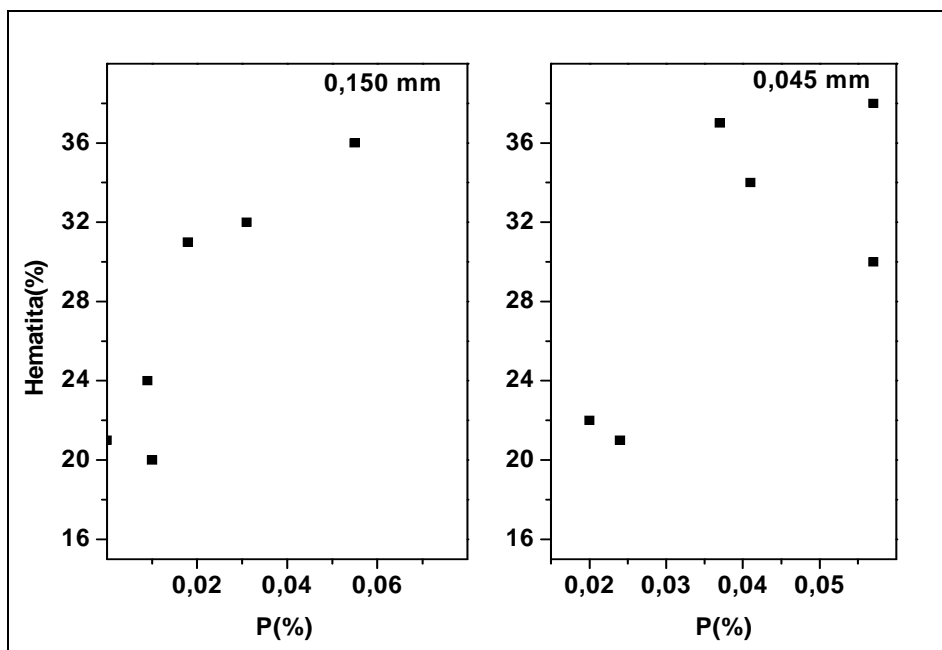


Figura 38. Correlação entre os teores de hematita e de fósforo nas amostras AFCM +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.

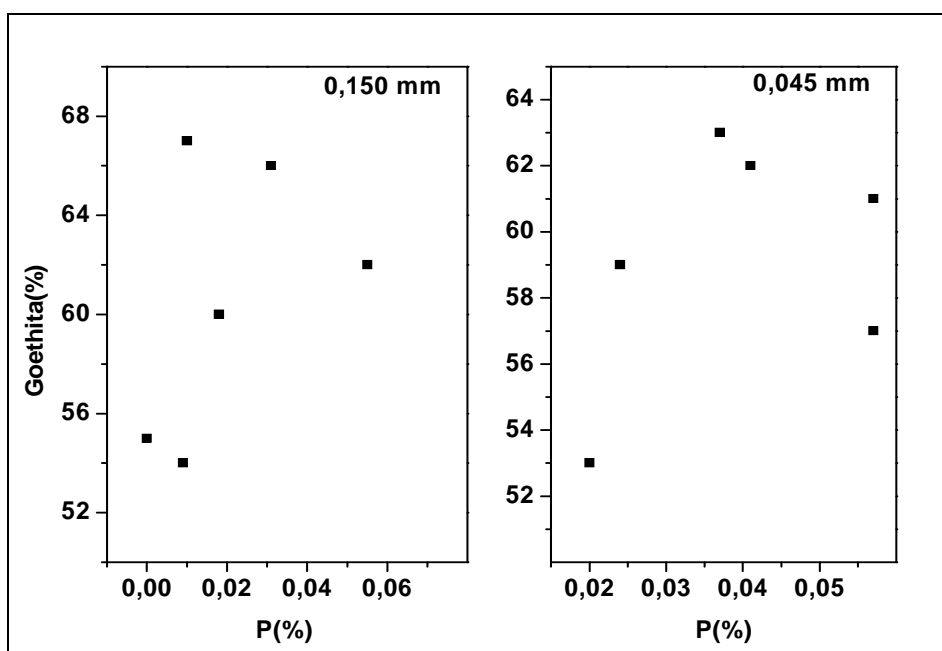


Figura 39. Correlação entre os teores de goethita e de fósforo nas amostras AFCM +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.

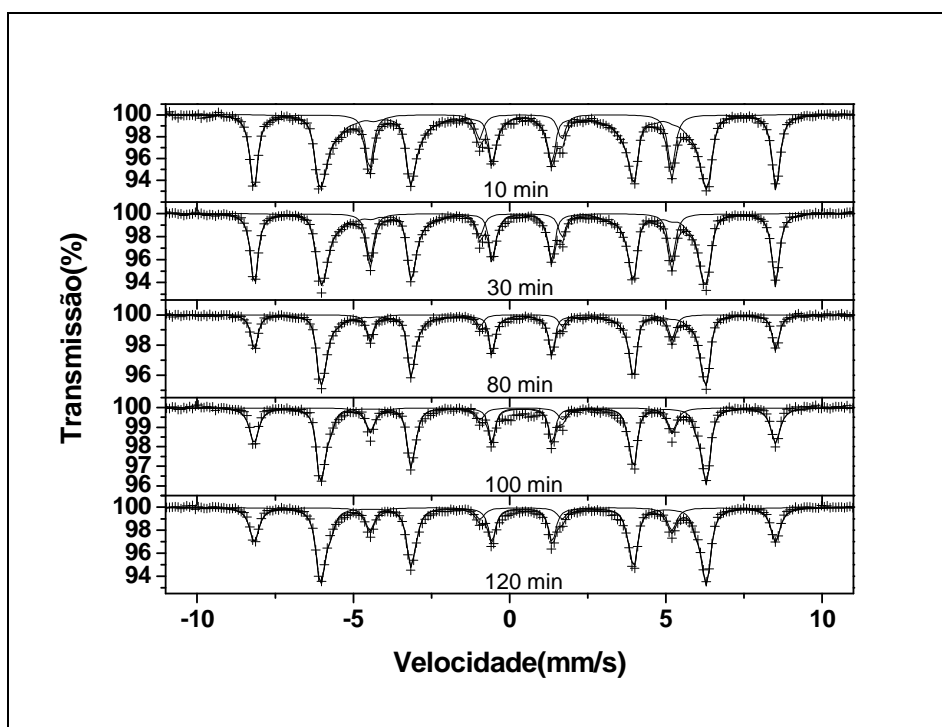


Figura 40. Espectros Mössbauer das amostras AFCM +0,150 mm tratadas em HCl concentrado durante os tempos indicados (minutos).

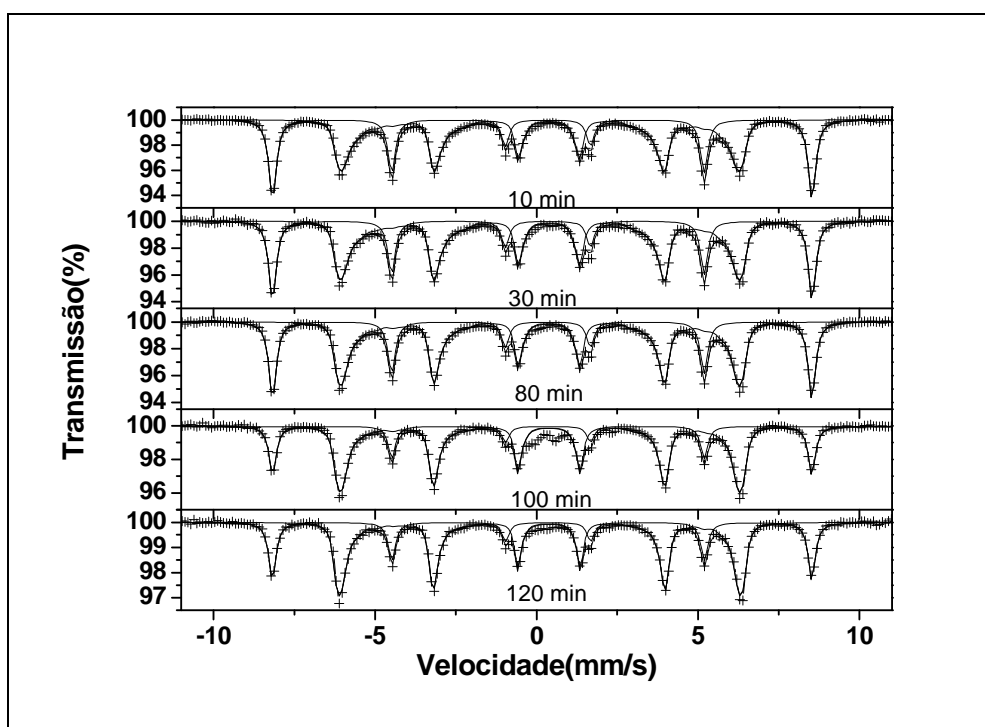


Figura 41. Espectros Mössbauer das amostras AFCM +0,045mm tratadas em HCl concentrado durante os tempos indicados (minutos).

6.4.2 Amostras de Frente de Lavra – Mina de Andrade

De acordo com os resultados das análises químicas não há associação de ferro com fósforo ou com alumínio. No entanto, fósforo e alumínio possuem uma nítida correlação durante todas as etapas de extração. Observa-se, entretanto, que uma fração significativa do alumínio não está associada ao fósforo, sugerindo a existência de outra fonte para este elemento.

Assim, a forma em que o fósforo ocorre nesta amostra não está associada aos óxidos de ferro, que neste caso, se trata de hematita do tipo especular (predominante) e martita (Figura 15). Após as extrações com HCl concentrado as amostras em ambas as frações não mostraram qualquer alteração nos espectros Mössbauer em relação as amostras não tratadas, independente do tempo de exposição ao ácido.

A associação de fósforo e alumínio sugere a possibilidade de um fosfato de alumínio estar presente nesta amostra, provavelmente a wavelita. A origem deste mineral pode ser a apatita associada a rochas intrusivas básicas ou rochas graníticas.

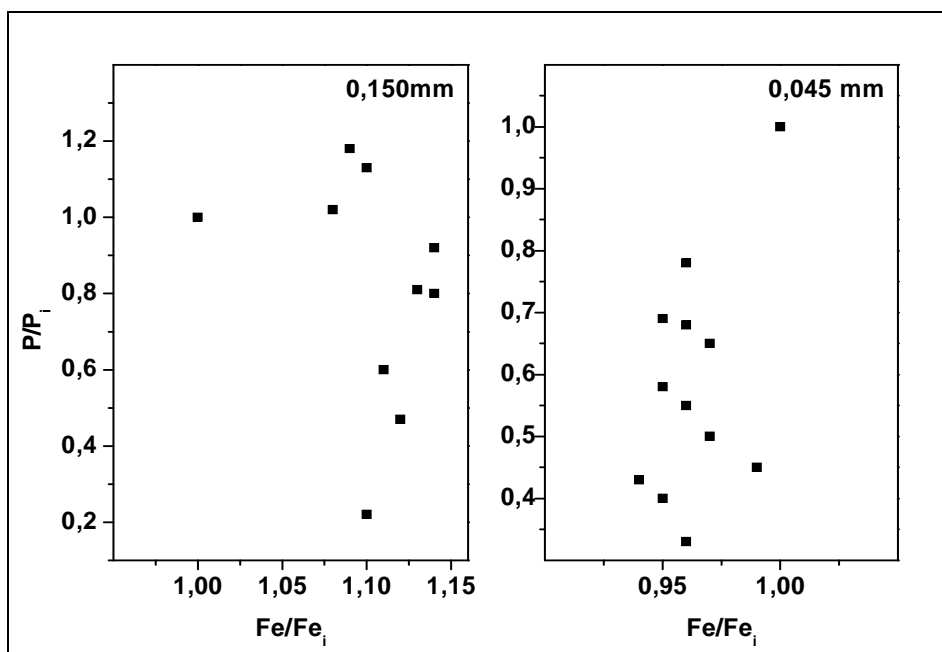


Figura 42. Variação dos teores de fósforo e de ferro nas amostras AFGO +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.

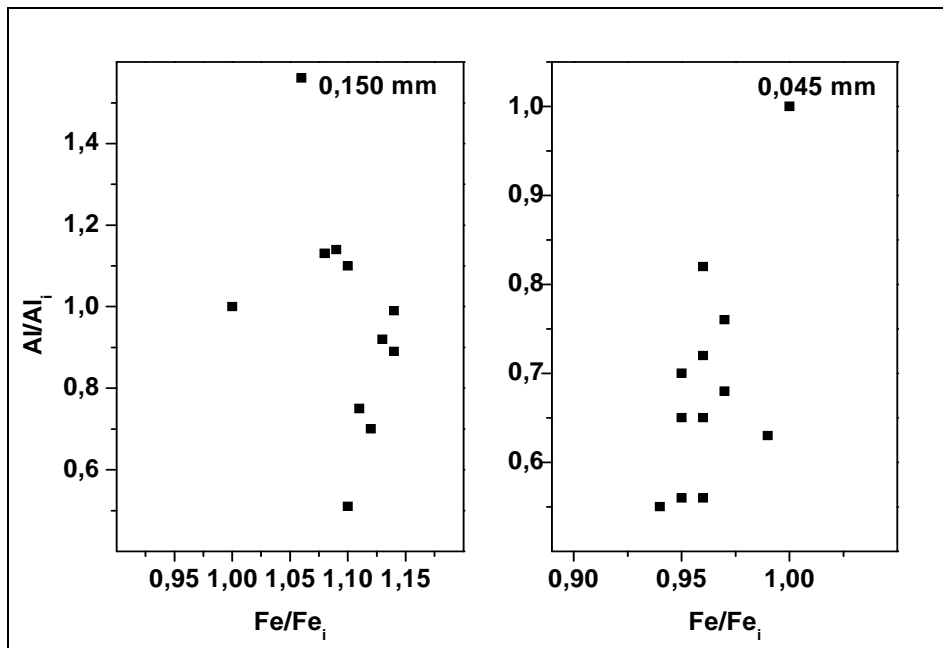


Figura 43. Variação dos teores de alumínio e de ferro das amostras AFGO +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado .

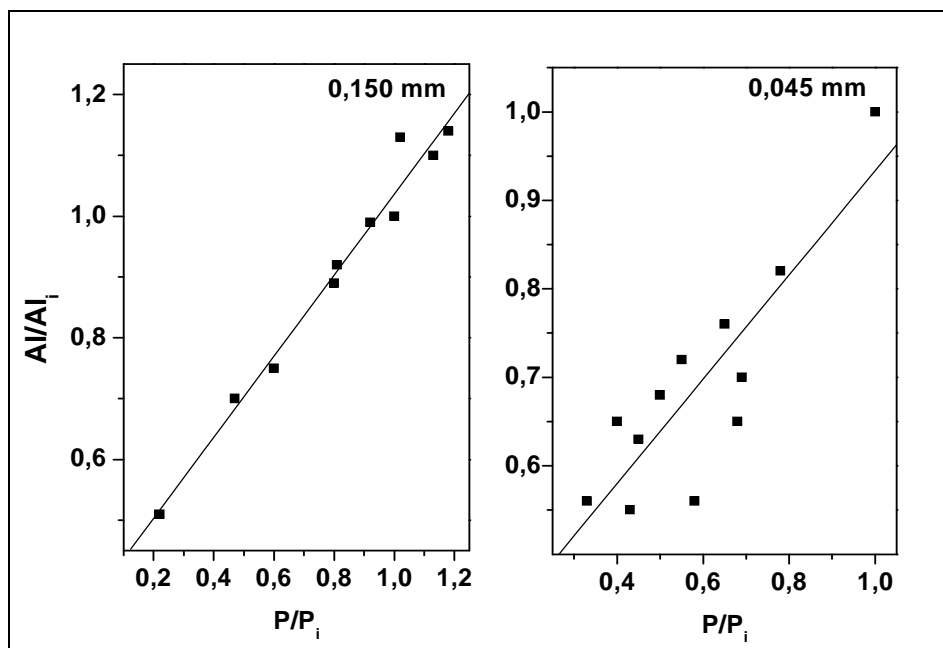


Figura 44. Variação dos teores de alumínio e de fósforo das amostras AFGO +0,150mm e +0,045mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado .

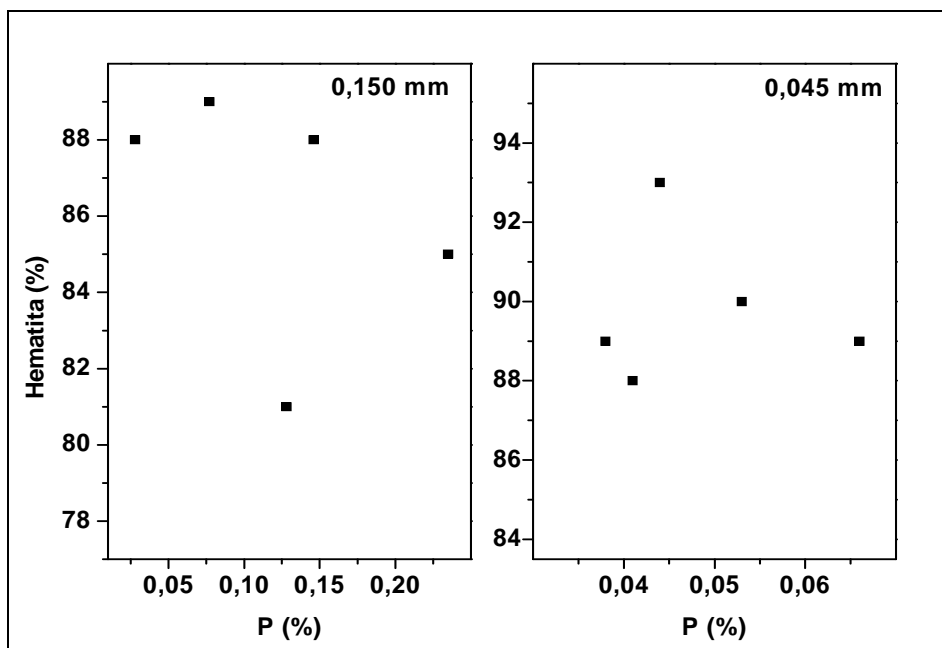


Figura 45. Correlação entre os teores de hematita e fósforo nas amostras AFGO +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.

6.4.3 Amostras de Frente de Lavra – Mina de Apolo

As amostras de frente de lavra da Mina de Apolo são constituídas basicamente de goethita na fração +0,150 mm e goethita e hematita martítica na fração +0,045 mm. As figuras anteriores mostram que existem excelentes correlações entre fósforo e ferro e entre alumínio e ferro. Fósforo e alumínio também mostram uma boa correlação na fração 0,150mm, mas nenhuma correlação na fração 0,045mm. Deve-se observar que na amostra de 0,150mm, praticamente todo o fósforo e alumínio foram extraídos, enquanto na fração mais fina esta remoção foi apenas parcial. A extração com HCl concentrado evidencia a presença de hematita, na fração 0,045 mm, enquanto o teor de goethita diminui. Estes resultados permitem concluir que nesta amostra o fósforo ocorre predominantemente adsorvido na superfície da goethita, na forma de um fosfato de alumínio.

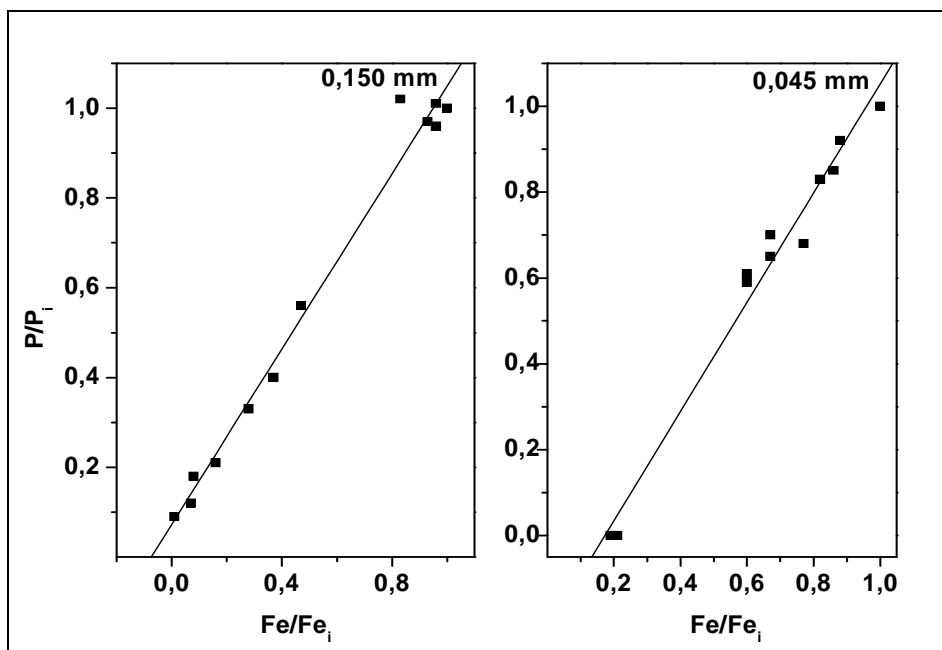


Figura 46. Variação dos teores de fósforo e de ferro nas amostras AFMQ +0,150mm e +0,045mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado .

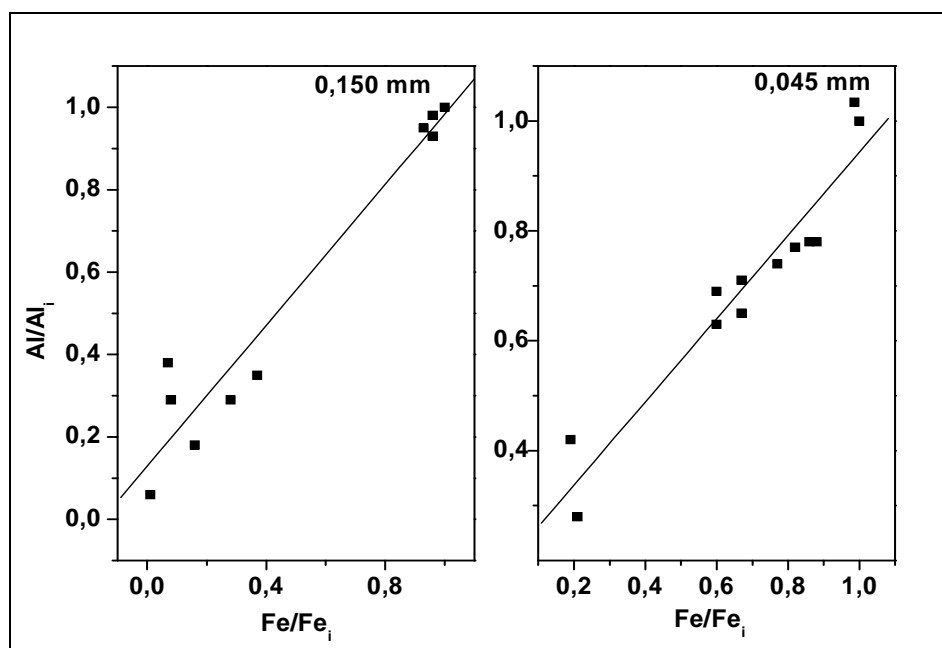


Figura 47. Variação dos teores de alumínio e de ferro das amostras AFMQ +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado .

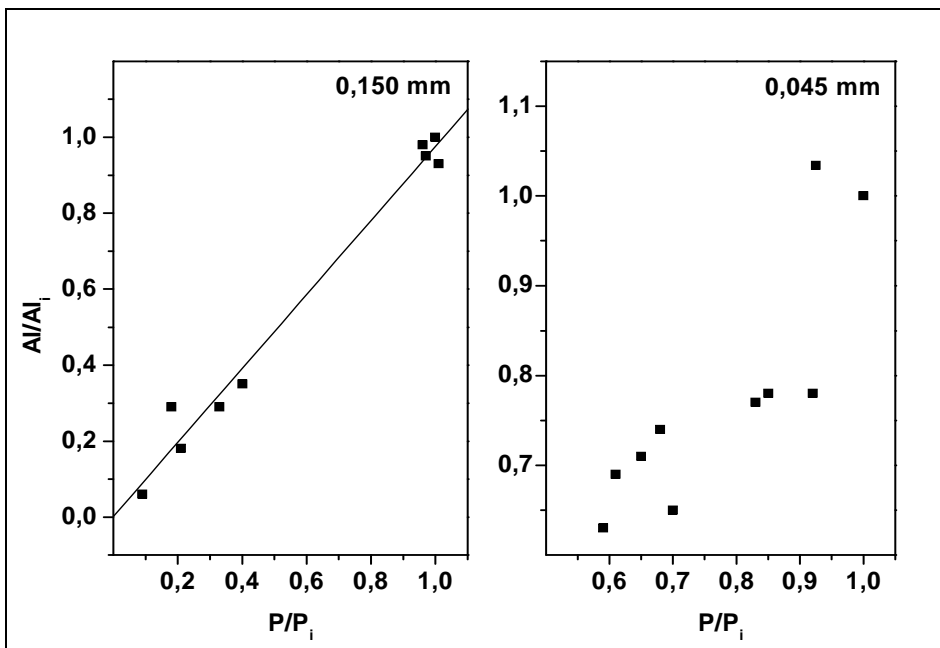


Figura 48. Variação dos teores de alumínio e de fósforo das amostras AFMQ +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado .

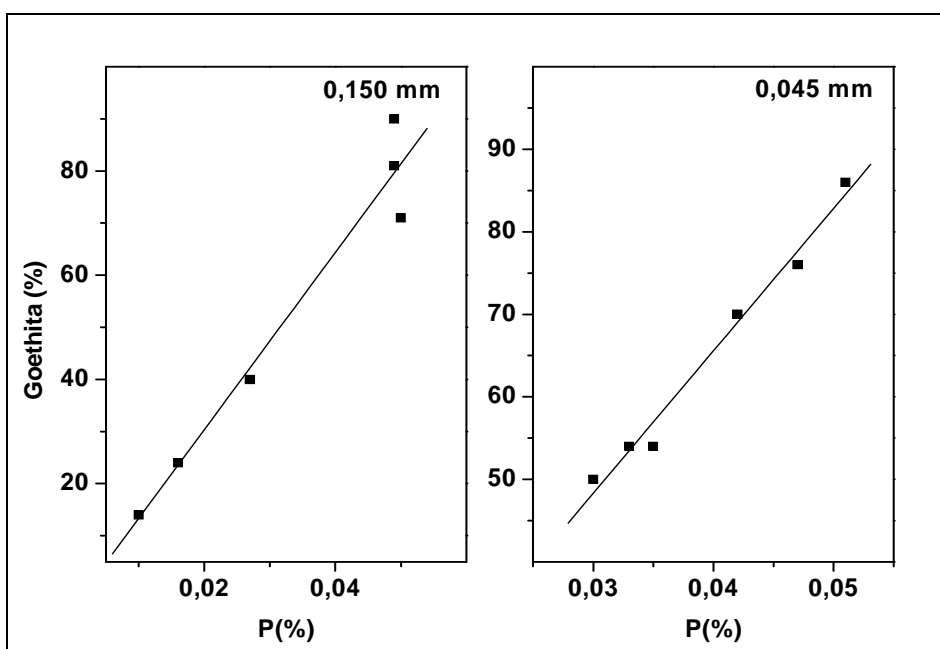


Figura 49. Correlação entre os teores de goethita e fósforo nas amostras AFMQ +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado .

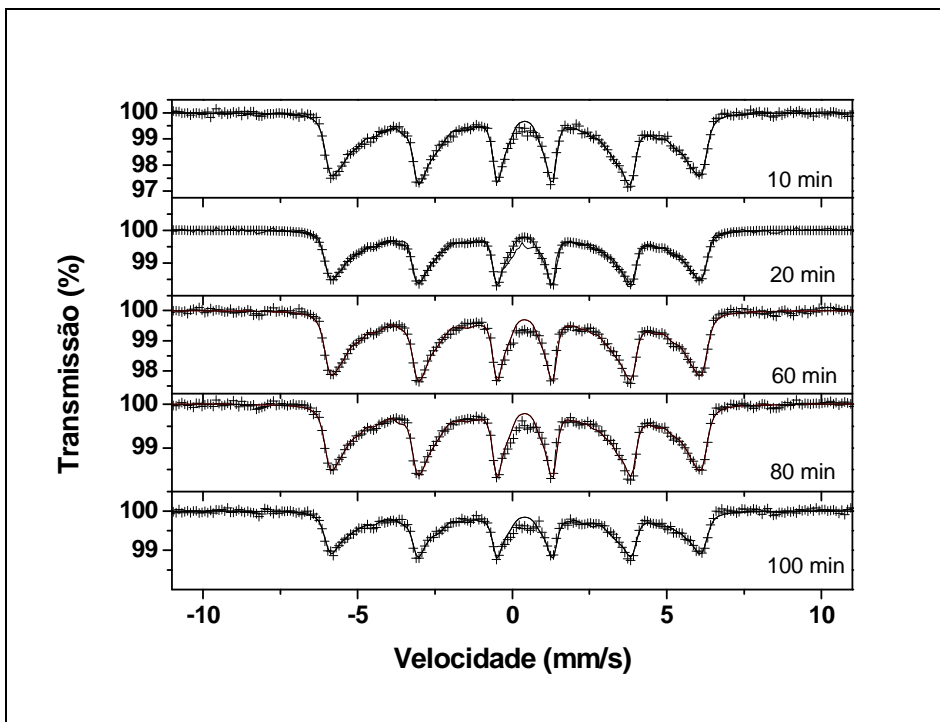


Figura 50. Espectros Mössbauer da amostra AFMQ +0,150 mm tratada em HCl concentrado durante os tempos indicados (minutos).

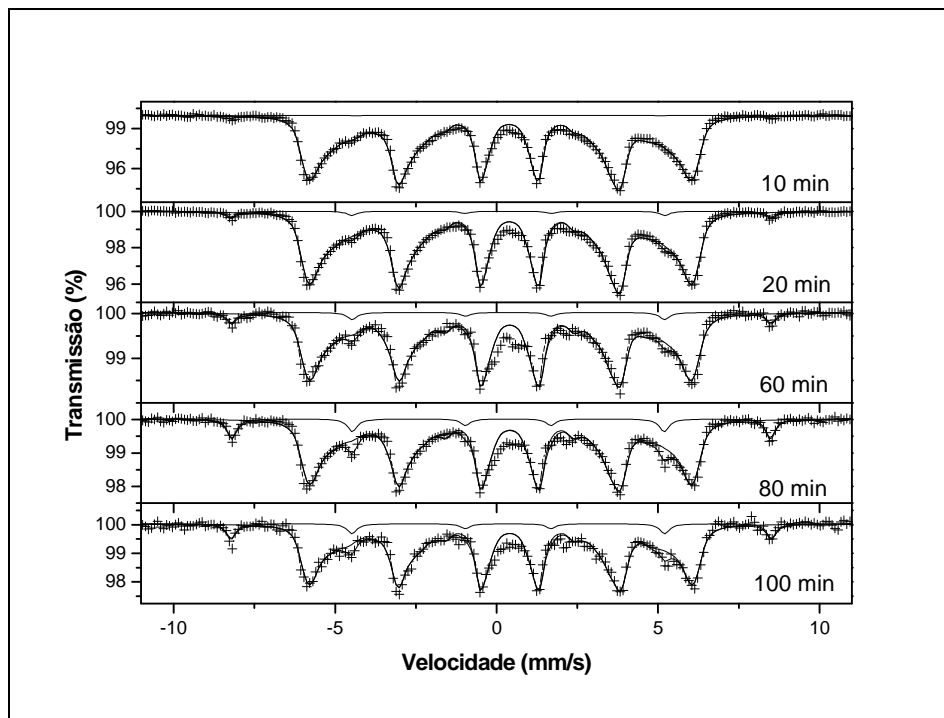


Figura 51. Espectros Mössbauer da amostra AFMQ +0,045 mm tratada em HCl concentrado durante os tempos indicados (minutos).

6.4.4 Amostras de Frente de Lavra – Mina de Conta História

As amostras da jazida de Conta História apresentam comportamento semelhante as da mina de Apolo. No entanto, os teores de alumínio e fósforo são baixos, correspondentes basicamente a itabiritos compactos e friáveis. A partir das análises químicas, após a extração com HCl concentrado, verifica-se uma perfeita correlação entre alumínio e fósforo e destes com o ferro. Além disso, a quantidade de goethita diminui com o aumento do tempo de exposição ao ácido e também após extração com DCB. Nesta amostra, sugere-se que tanto fósforo quanto alumínio estão associados à goethita, predominantemente adsorvidos na superfície da goethita, na forma de um fosfato de alumínio.

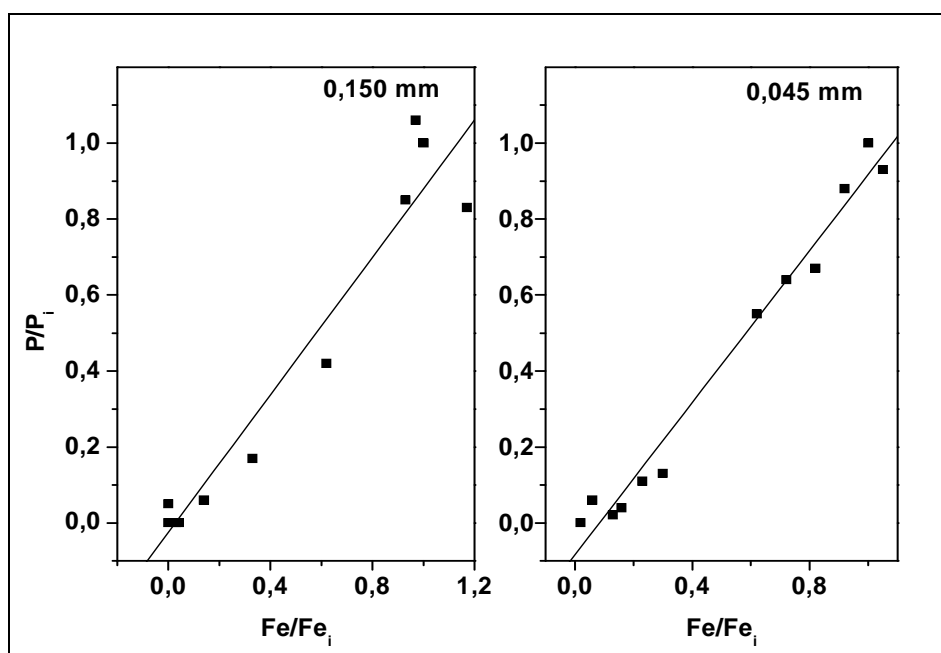


Figura 52. Variação dos teores de fósforo e de ferro nas amostras AGCT +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado .

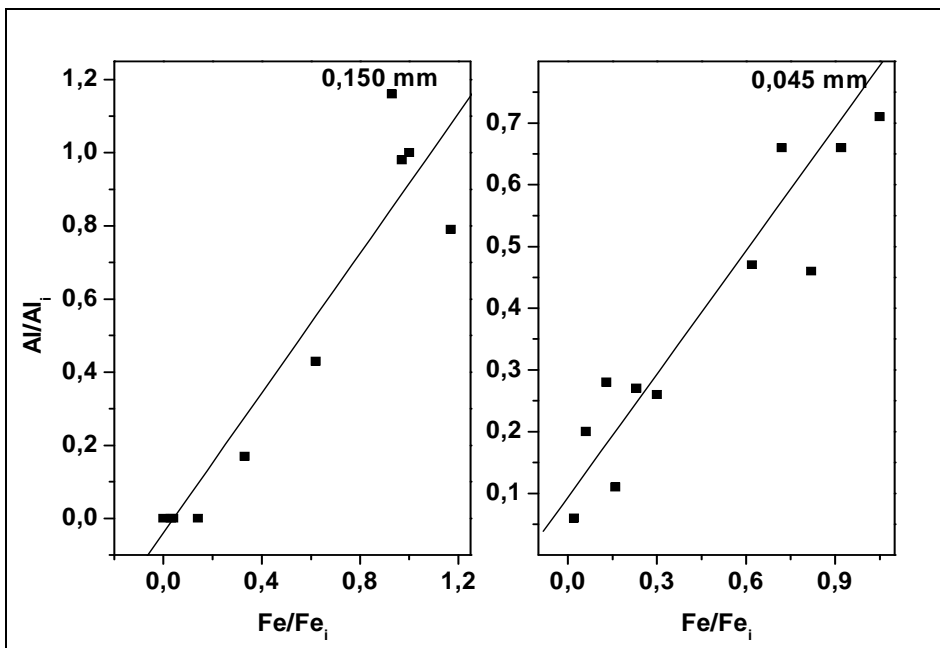


Figura 53. Variação dos teores de alumínio e de ferro das amostras AGCT +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado .

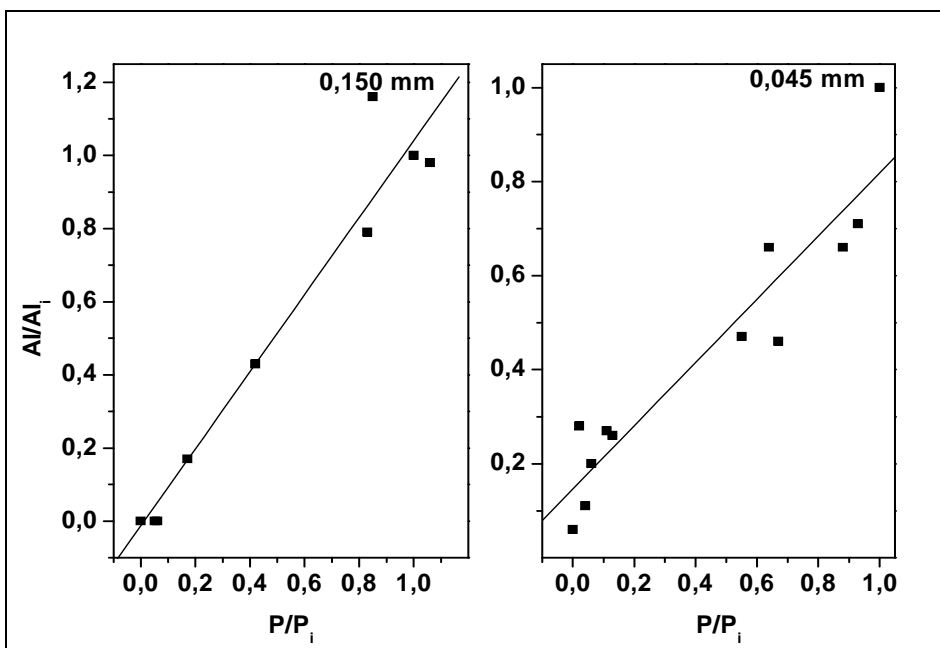


Figura 54. Variação dos teores de alumínio e de fósforo das amostras AGCT +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado .

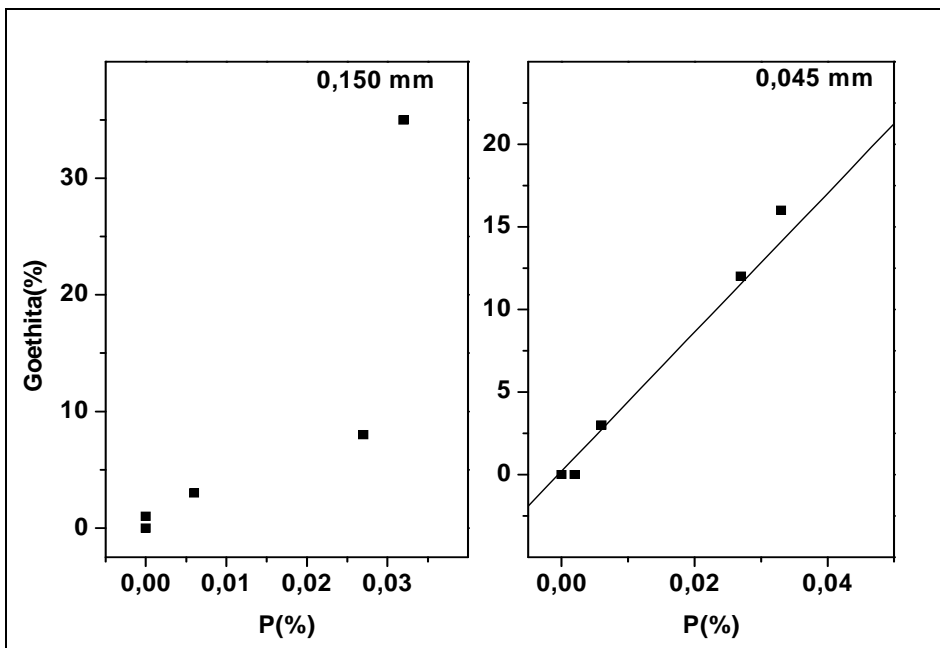


Figura 55. Correlação entre os teores de goethita e fósforo nas amostras AGCT +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.

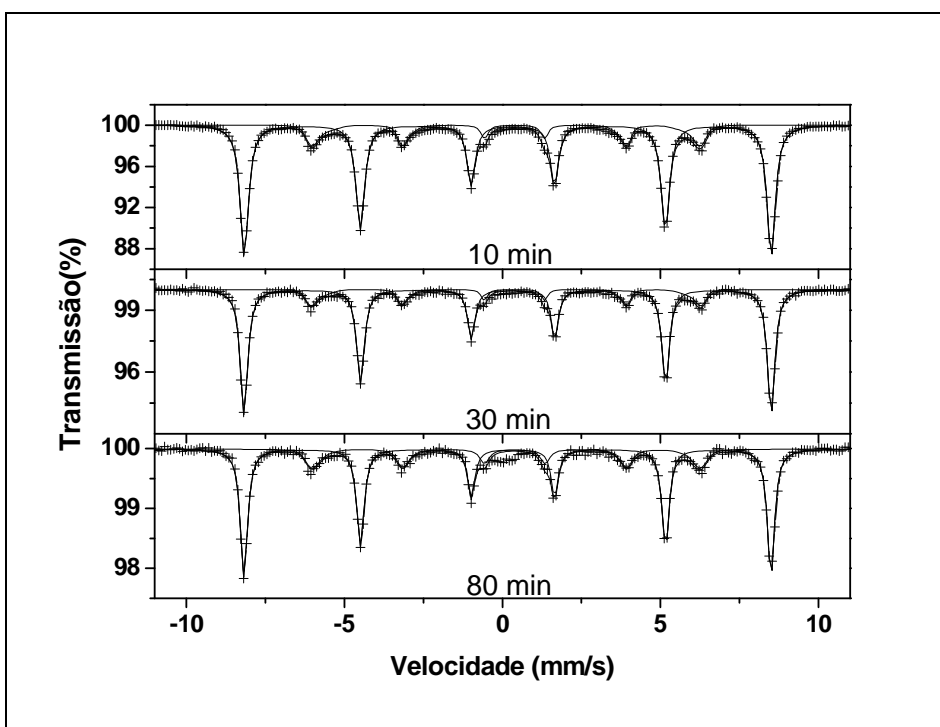


Figura 56. Espectros Mössbauer da amostra AGCT +0,150 mm tratada em HCl concentrado durante os tempos indicados (minutos).

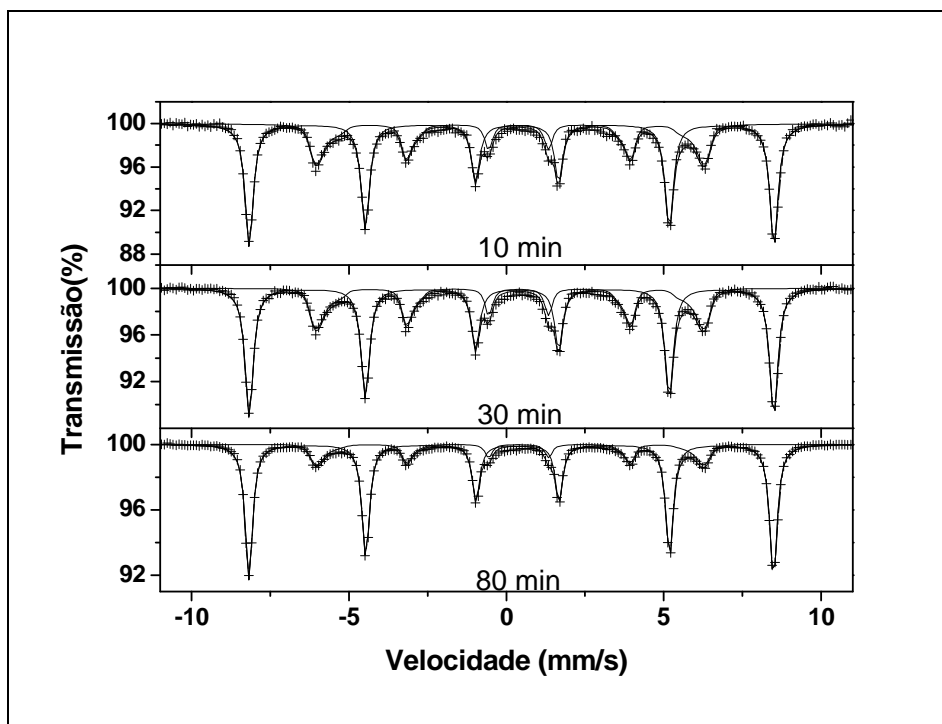


Figura 57. Espectros Mössbauer da amostra AGCT +0,045 mm tratada em HCl concentrado durante os tempos indicados (minutos).

6.4.5 Mina de Jangada

As amostras de Jangada apresentam basicamente hematita martítica associada a pequenas quantidades de goethita e magnetita. O resultado mais intrigante desta amostra se refere aos teores de alumínio, que aumentam com o tempo de exposição ao HCl, significando que alguma fase contendo alumínio não foi extraída no processo. O fósforo exibe uma fraca correlação com o ferro, mas aparentemente não se associa ao alumínio. Os resultados da extração com DCB mostram que houve diminuição do teor de goethita nas amostras e que o fósforo pode se associar tanto à hematita quanto a goethita. Após as extrações das etapas I e II ocorreu a extração de alumínio, mas não de fósforo. Assim, o alumínio parece não estar realmente associado ao fósforo conforme mostra a Figura 60. De acordo com os difratogramas de raios X de Jangada existe uma pequena quantidade de muscovita ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OHF})_2$) um aluminossilicato e caulinita ($\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) um argilomineral, nas amostras analisadas. Assim o alumínio presente nestas amostras ocorre associado a estas fases minerais explicando sua insolubilidade em HCl concentrado. A existência de fraca correlação entre fósforo e ferro (Figura 58) e

entre fósforo e hematita e goethita (Figuras 61 e 62) sugere que nesta amostra o fósforo está adsorvido nestas fases.

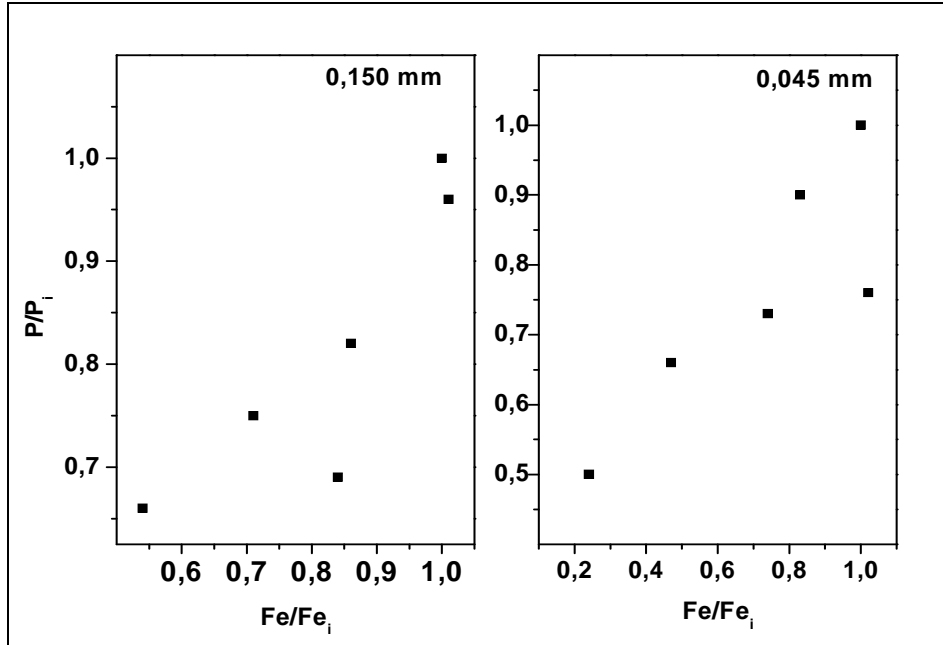


Figura 58. Variação dos teores de fósforo e de ferro nas amostras JGD +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.

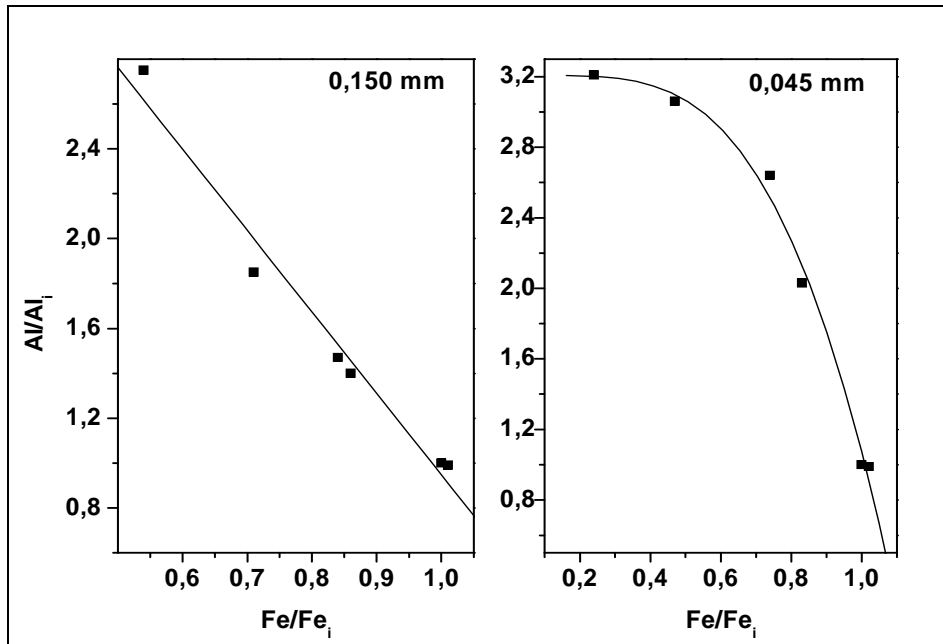


Figura 59. Variação dos teores de alumínio e de ferro das amostras JGD +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado .

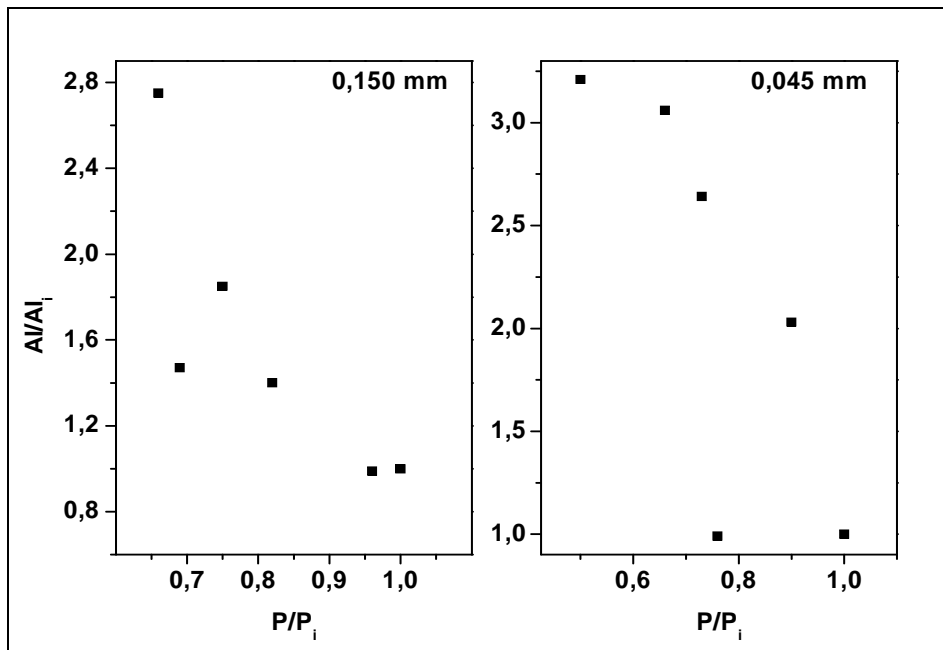


Figura 60. Variação dos teores de alumínio e de fósforo das amostras JGD +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado .

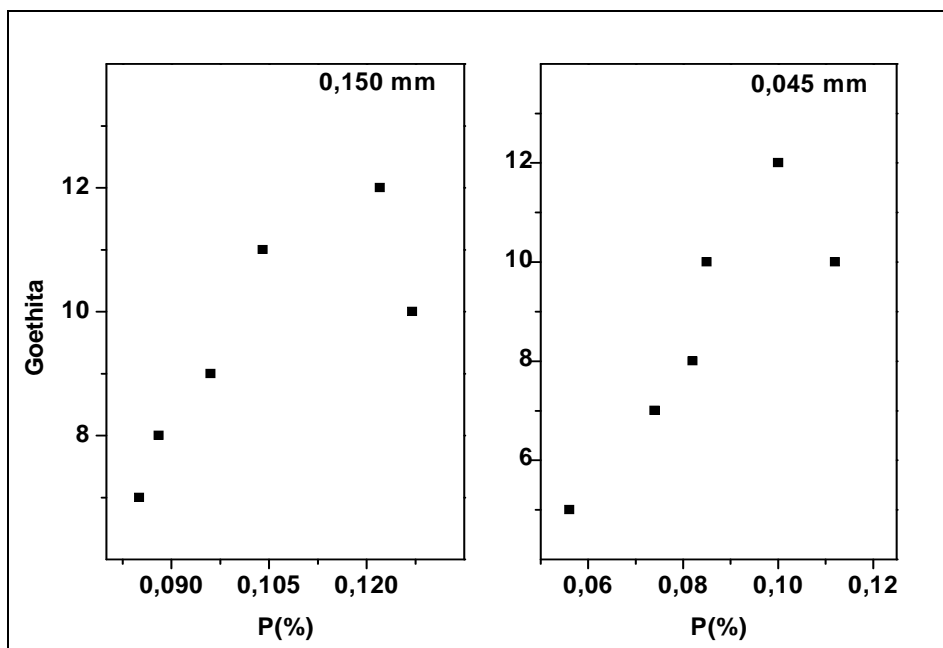


Figura 61. Correlação entre os teores de goethita e fósforo nas amostras JGD +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado .

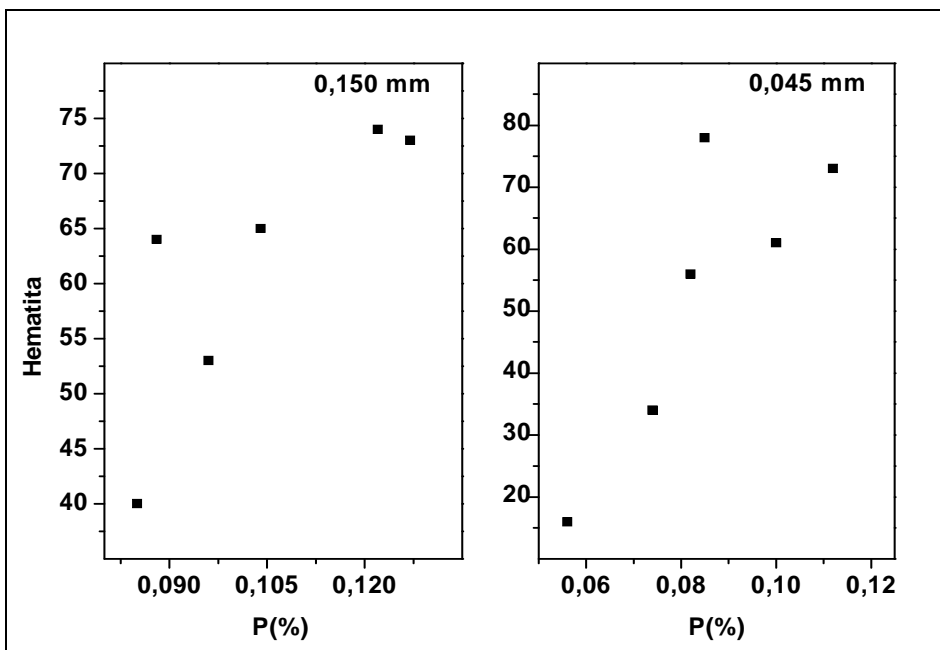


Figura 62. Correlação entre os teores de hematita e fósforo nas amostras JGD +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado .

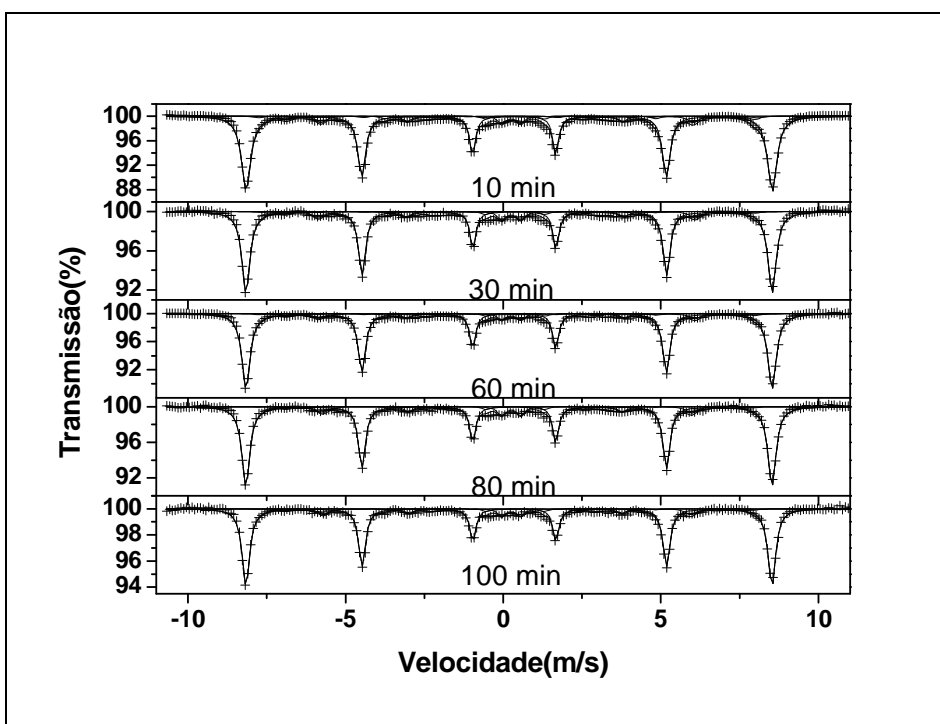


Figura 63. Espectros Mössbauer da amostra JGD +0,150 mm tratada em HCl concentrado durante os tempos indicados (minutos).

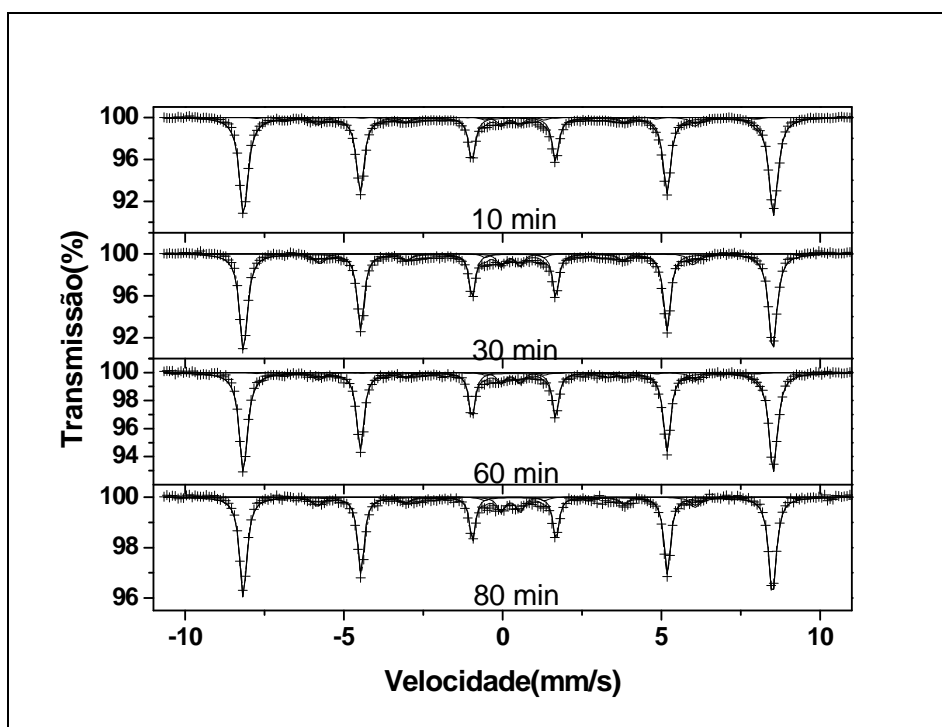


Figura 64. Espectros Mössbauer da amostra JGD +0,045mm tratada em HCl concentrado durante os tempos indicados (minutos).

6.4.6 Amostras de Sinter Feed – Mina de Urucum

A amostra de *sinter feed* da Mina de Urucum apresenta basicamente hematita microcristalina com sílex parcialmente solubilizado e não apresenta ferro associado a alumínio ou a fósforo. De acordo com os resultados das análises químicas após a extração seletiva de fósforo e alumínio nas etapas I e II (Tabela 7) houve uma parcial solubilização de alumínio e muito pouca de fósforo. Após dissolução ácida verifica-se uma fraca correlação entre alumínio e fósforo e nenhuma correlação destes com ferro. No entanto, os resultados obtidos neste trabalho não são conclusivos para determinar a forma em que alumínio e fósforo ocorrem no minério de Urucum.

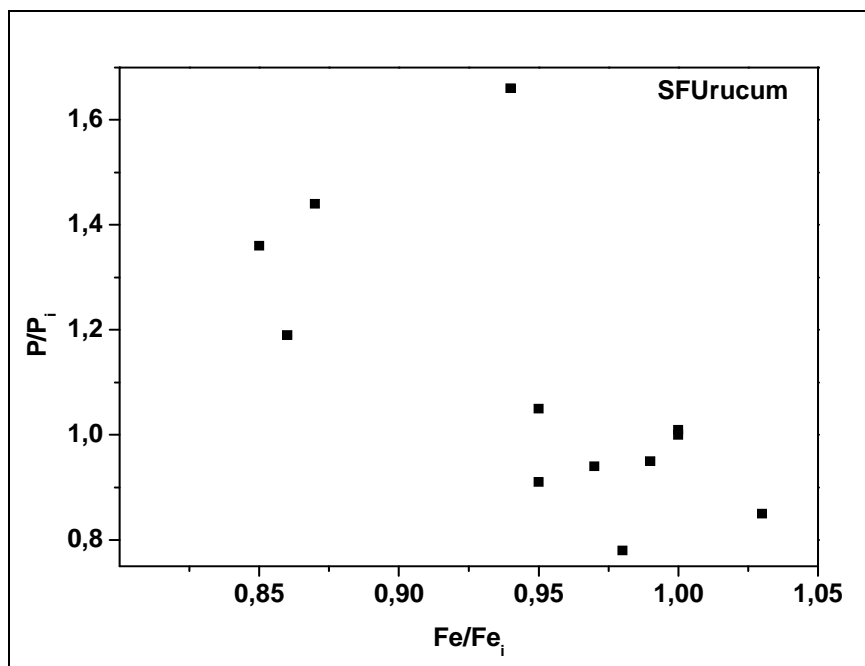


Figura 65. Variação dos teores de fósforo e de ferro na amostra SFU +0,250 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado .

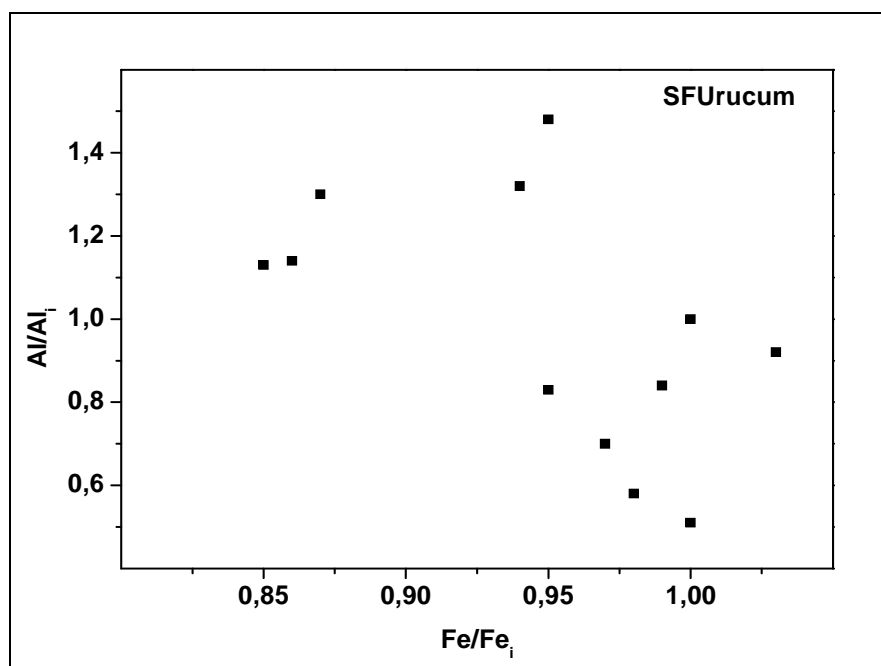


Figura 66. Variação dos teores de alumínio e de ferro das amostras SFU +0,250 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.

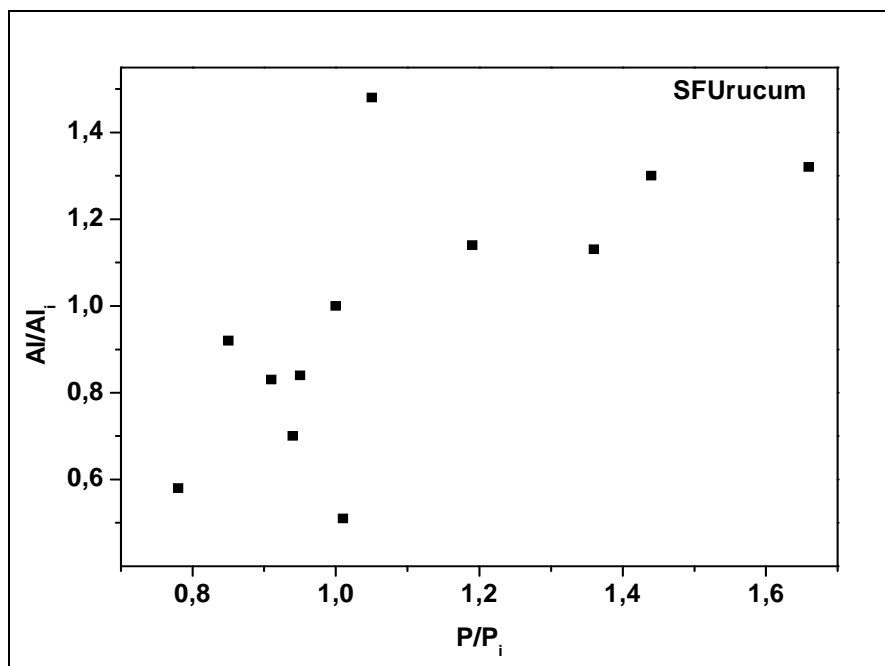


Figura 67. Variação dos teores de alumínio e de fósforo das amostras SFU +0,250 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.

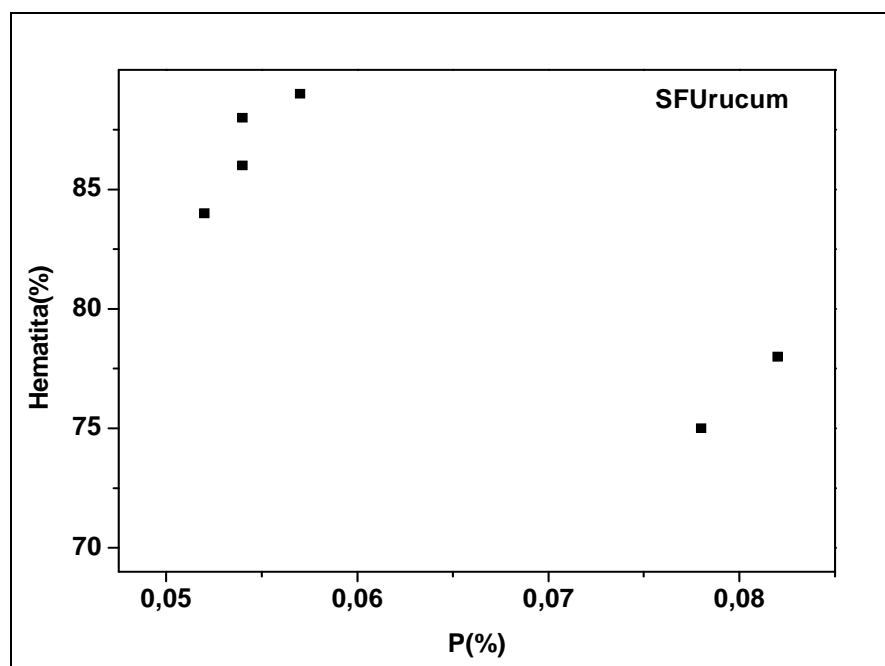


Figura 68. Correlação entre os teores de hematita e fósforo na amostra SFU +0,250 mm, obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.

6.4.7 Testemunho Diamantado – Mina de Córrego Feijão

O comportamento da dissolução do fósforo nesta amostra é diferente das demais amostras investigadas neste trabalho. Após a exposição ao HCl por apenas dois minutos, ocorreu uma redução significativa do teor de fósforo, passando de cerca de 0,06% nas amostras iniciais para cerca de 0,03%. Esta redução pode significar a existência de algum mineral de fósforo altamente solúvel em HCl, mas ensaios adicionais devem ser feitos para se comprovar esta hipótese. A composição mineralógica dessas amostras se resume em hematita martítica com associações de magnetita e goethita em pequenos teores. As análises químicas após a extração de alumínio e fósforo mostram que nas duas primeiras etapas ocorreu extração de alumínio, mas não de fósforo. Após a extração com HCl concentrado também não se observa correlação entre alumínio e fósforo, mas existe uma fraca correlação entre o fósforo e o ferro. Entretanto, os baixos teores de fósforo após 2 minutos de extração, associado às incertezas das análises químicas, não possibilita a obtenção de resultados conclusivos.

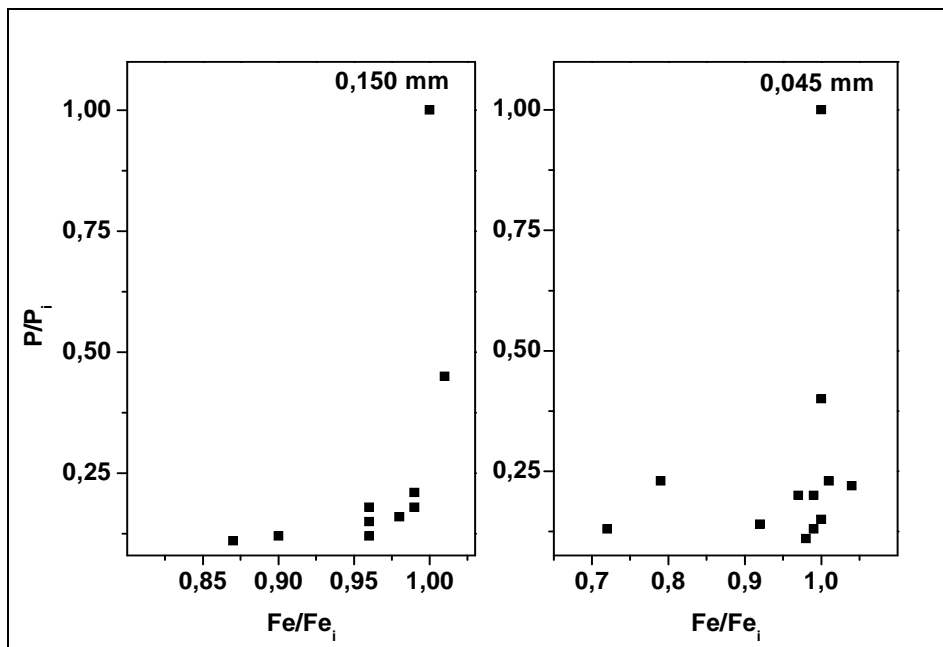


Figura 69. Variação dos teores de fósforo e de ferro nas amostras TDCF +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.

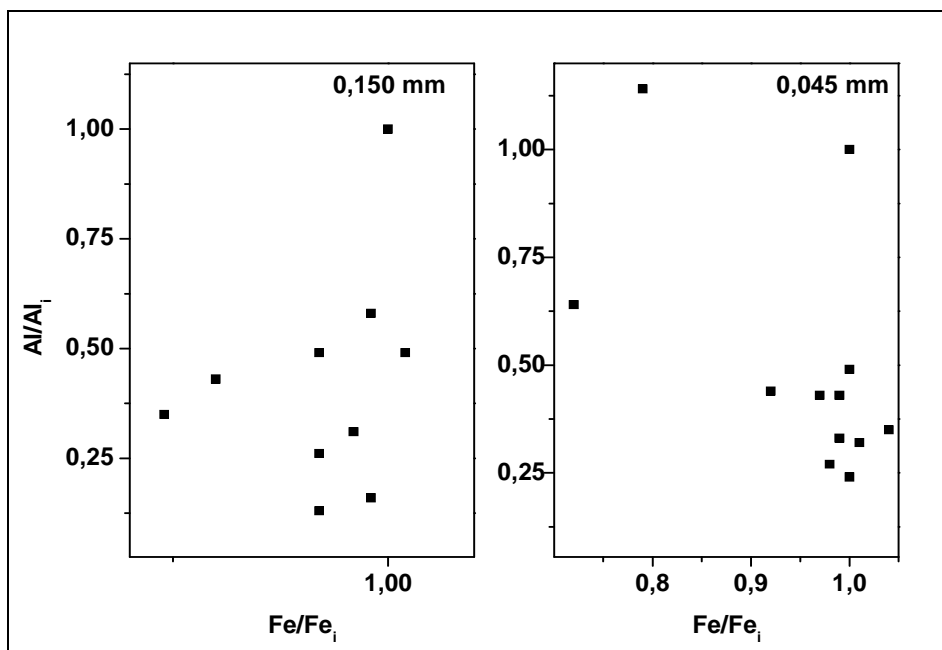


Figura 70. Variação dos teores de alumínio e de ferro das amostras TDCF +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado .

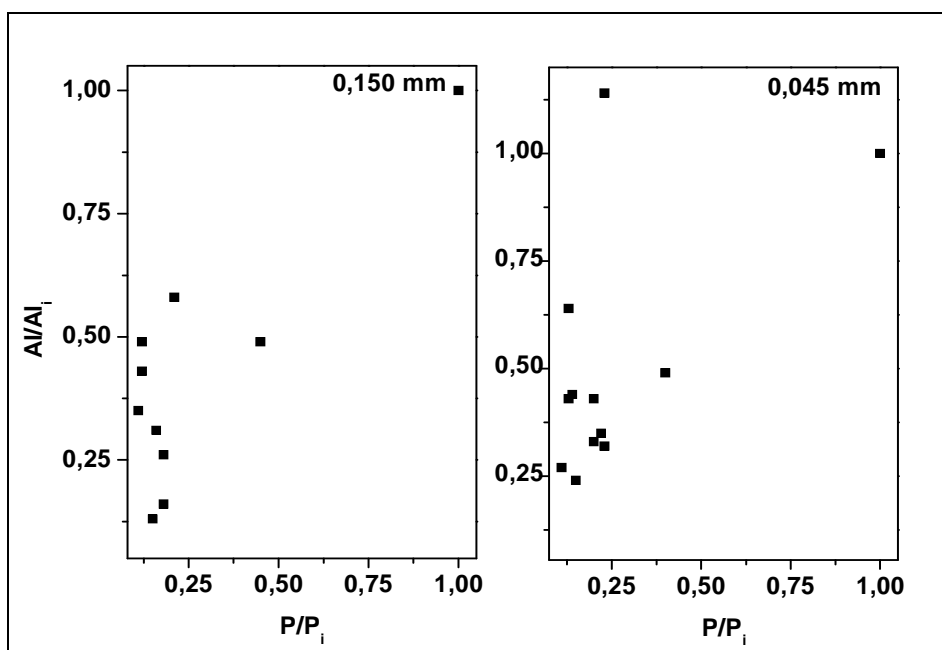


Figura 71. Variação dos teores de alumínio e de fósforo das amostras TDCF +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado .

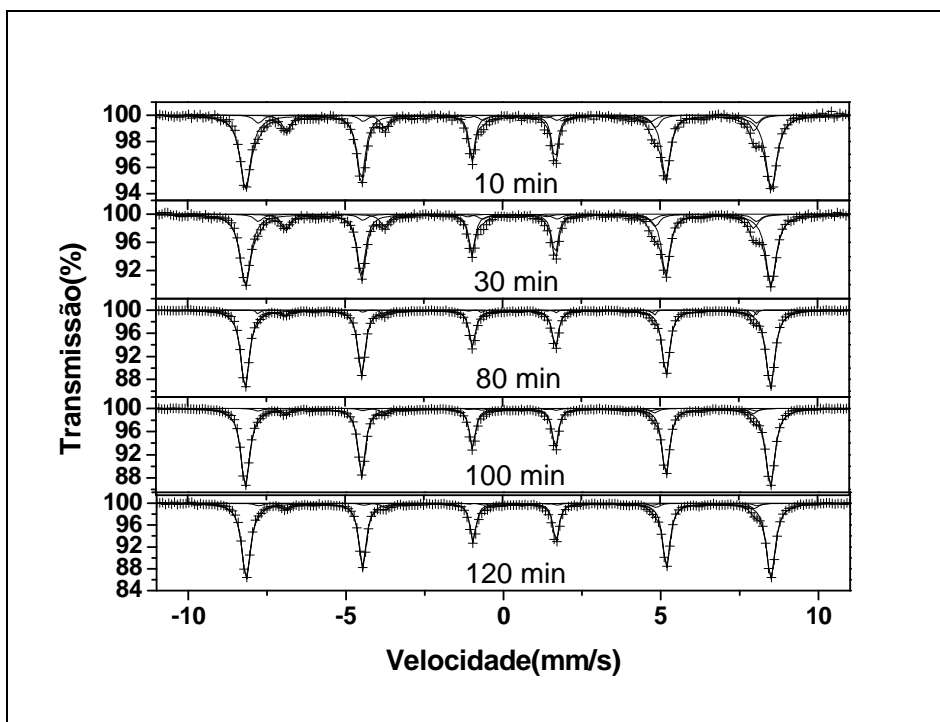


Figura 72. Espectros Mössbauer da amostra TDCF +0,150 mm tratada em HCl concentrado durante os tempos indicados (minutos).

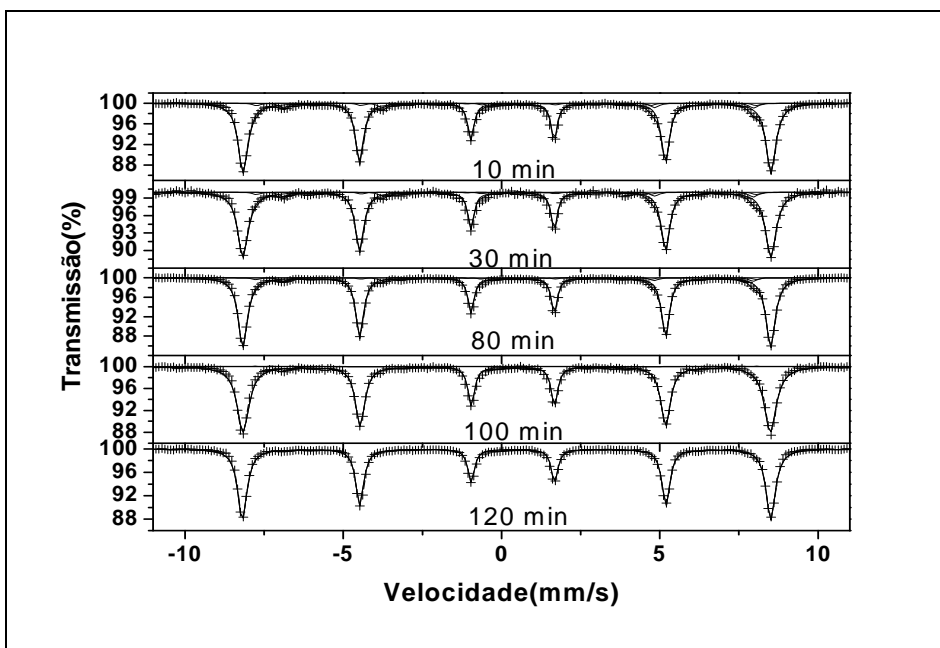


Figura 73. Espectros Mössbauer da amostra TDCF +0,045 mm tratada em HCl concentrado durante os tempos indicados (minutos).

6.4.8 Testemunho Diamantado – Mina de Segredo

A dissolução do fósforo nesta amostra em função da dissolução do ferro é muito similar à amostra Córrego feijão: há uma significativa remoção de fósforo após a extração por apenas dois minutos. Novamente, este resultado deve ser visto com cautela e deve ser repetido com outras amostras destas minas para se comprovar se realmente existe algum mineral que contém fósforo e é altamente solúvel em HCl. Por outro lado, nesta amostra a correlação entre fósforo e goethita é muito significativa mostrando uma dissolução congruente, conforme mostrado na Figura 77. Não se observa correlação entre as razões de dissolução de alumínio e fósforo. Portanto, pode-se concluir que nesta amostra existe fósforo adsorvido em goethita e possivelmente também existe algum fosfato que seja altamente solúvel em ácido clorídrico.

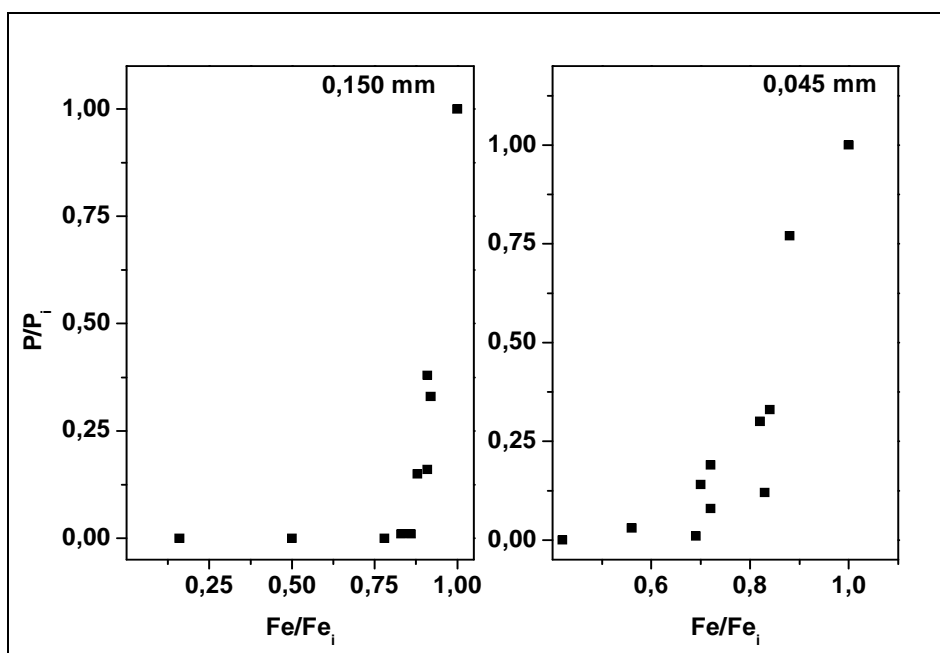


Figura 74. Variação dos teores de fósforo e de ferro nas amostras TDSP +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado.

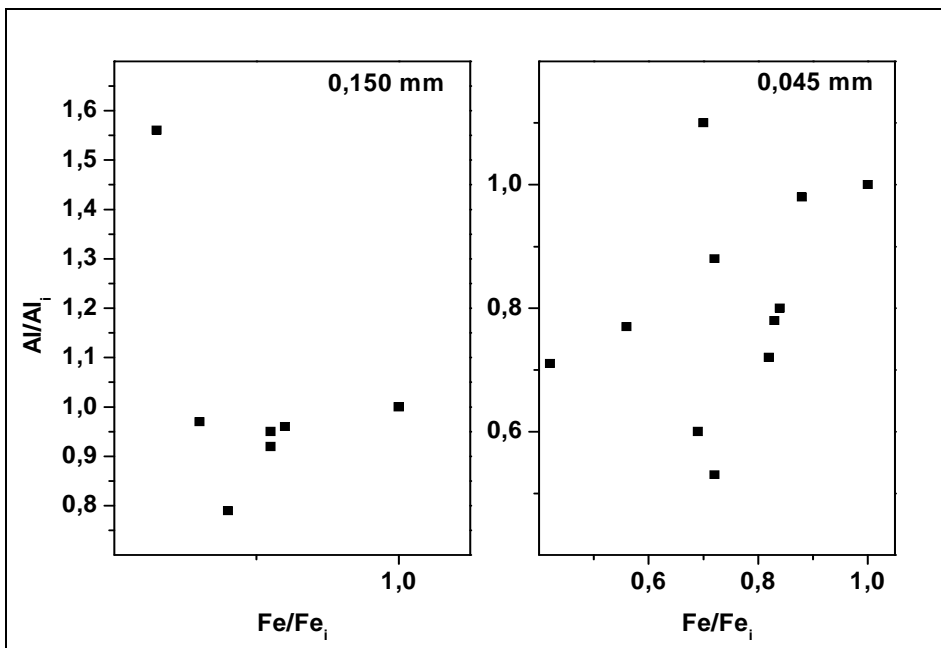


Figura 75. Variação dos teores de alumínio e de ferro das amostras TDSP +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado .

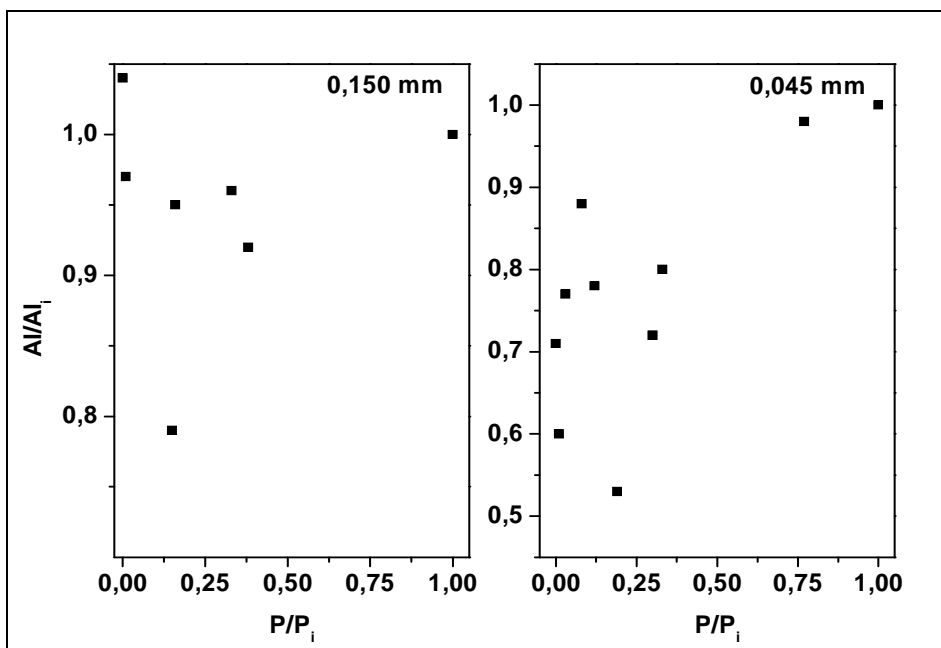


Figura 76. Variação dos teores de alumínio e de fósforo das amostras TDSP +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado .

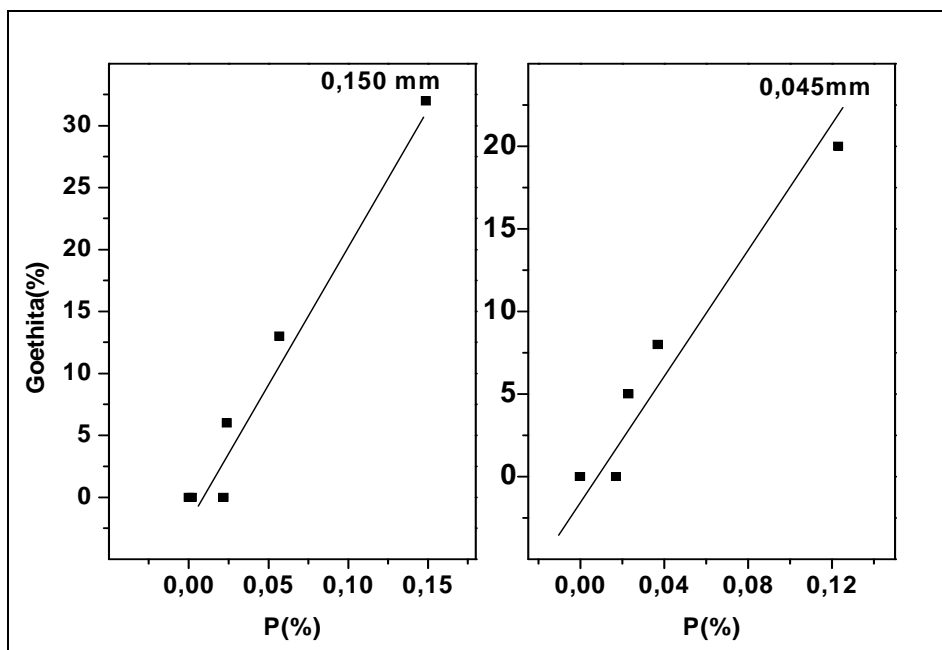


Figura 77. Variação dos teores de goethita e fósforo nas amostras TDSP +0,150 mm e +0,045 mm obtidos nos ensaios de dissolução em HCl concentrado .

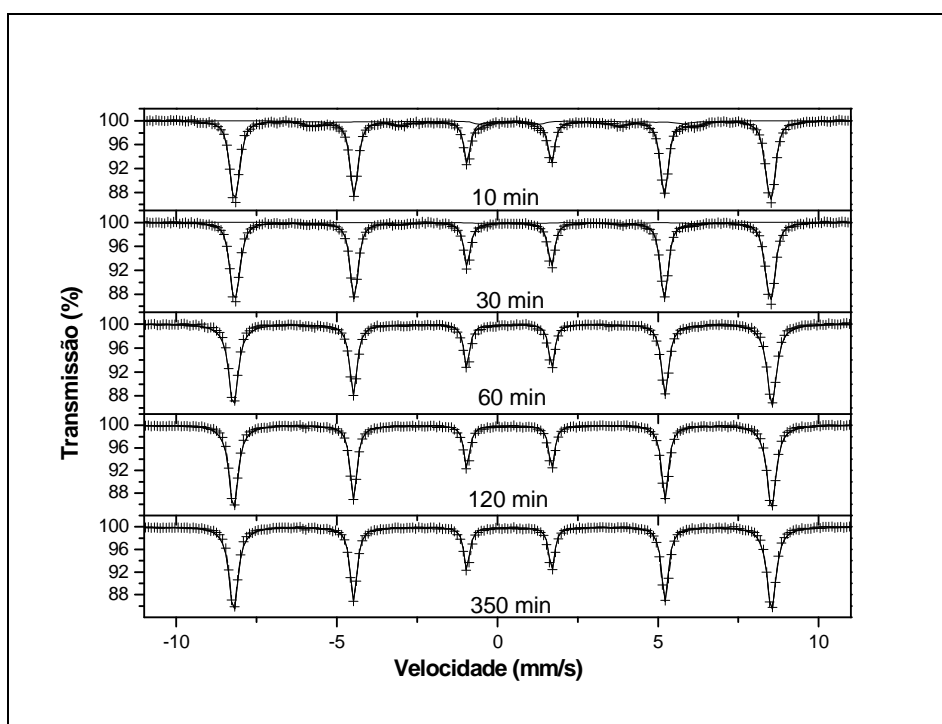


Figura 78. Espectros Mössbauer da amostra TDSP +0,150 mm tratada em HCl concentrado durante os tempos indicados (minutos).

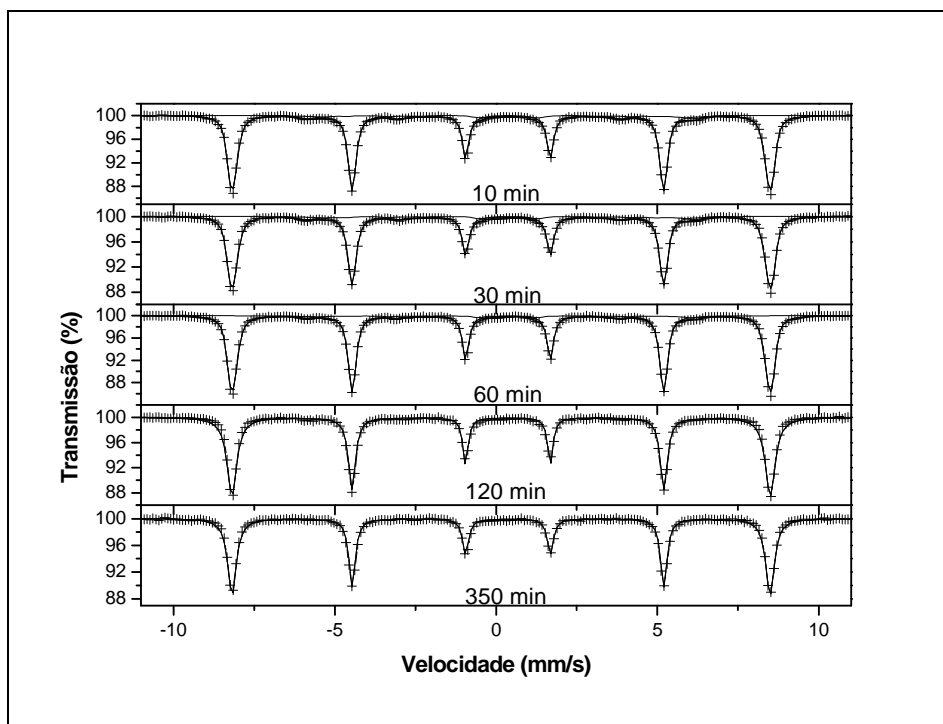


Figura 79. Espectros Mössbauer da amostra TDSP +0,045mm tratada em HCl concentrado durante os tempos indicados (minutos).

7 CONCLUSÕES

A forma em que alumínio e fósforo estão associados entre si e aos óxidos/hidróxidos de ferro varia de acordo com a geologia de cada mina estudada.

O método de extração seletiva utilizado neste estudo se baseia nos métodos estabelecidos por MEHRA e JACKSON (1960) e por RUTTENBERG (1992) e se mostrou satisfatório para a remoção de fósforo, bem como de algumas formas de alumínio. Foi possível analisar a forma de ocorrência de fósforo nos minérios de ferro investigados e ainda estabelecer esta correlação para o alumínio.

O método de dissolução ácida foi decisivo no que diz respeito à distribuição do elemento contaminante sobre os óxidos/hidróxidos de ferro. A dissolução congruente ocorre em todos os casos em que há fósforo ou alumínio associado a ferro nas amostras estudadas.

A caracterização geral realizada a partir dos resultados de difração de raios-X, microscopia ótica, espectroscopia Mössbauer e análises químicas mostraram que:

As amostras de Capanema apresentam como principais constituintes minerais hematita do tipo martítica e goethita. Os resultados das extrações seletivas e da dissolução ácida permitem concluir que o fósforo se encontra presente principalmente na forma de um fosfato de alumínio.

As amostras de Andrade constituem-se basicamente de hematita do tipo tabular (especularita). Os resultados das extrações seletivas não mostraram alterações significativas na composição das amostras. A dissolução ácida mostrou que existe correlação de fósforo com alumínio, e que estes elementos não se associam ao ferro. Assim é possível concluir que o alumínio e fósforo ocorrem na forma de um fosfato secundário, provavelmente wavelita.

As amostras de Apolo contêm cerca de 86% de goethita e uma pequena porção de hematita do tipo martítica. Nas extrações com DCB ocorreu a dissolução completa das amostras, impossibilitando a realização de análises químicas dos resíduos. Os ensaios de dissolução ácida mostraram que tanto o fósforo quanto o alumínio estão associados ao ferro, e entre si. À medida que a dissolução avança diminui-se a concentração de goethita e fósforo, mostrando claramente a correlação existente entre eles.

As amostras provenientes de Conta História apresentam cerca de 37% de ferro total. Os principais minerais são goethita (21%), hematita martítica (33%) e quartzo (> 50%). Os ensaios de extração seletiva com DCB mostraram que houve extração simultânea de fósforo e alumínio, o que mostra a associação destes elementos aos óxidos/hidróxidos de ferro. Os resultados de dissolução ácida mostraram uma dissolução congruente de alumínio e fósforo em ferro, sugerindo a associação destes elementos com a goethita.

Em Jangada há uma maior variedade mineralógica com a presença de martita associada à goethita, magnetita, quartzo, caolinita e muscovita. Os ensaios de extração seletiva mostram que houve grande percentual de extração de alumínio nas duas primeiras etapas, mas não se extraiu fósforo. O fósforo somente foi extraído na etapa III com DCB, o que mostra que não existe associação entre alumínio e fósforo. Assim, sugere-se que o fósforo ocorre associado aos óxidos de ferro. O alumínio não se relaciona ao ferro e parece ocorrer na forma de caolinita e muscovita dado sua insolubilidade em HCl.

Em Urucum as amostras são compostas por hematita microcristalina e sílex. Os espectros Mössbauer mostram sextetos característicos de hematita bem cristalizada, sem a presença de goethita. Os resultados de extração seletiva mostram que houve extração parcial de alumínio e fósforo nas etapas I e II, mas, que não há associação entre eles visto que na dissolução ácida, eles não mantêm nenhuma correlação. A partir da dissolução ácida verificou-se também que estes elementos não estão relacionados ao ferro. Infelizmente os resultados foram inconclusivos em relação à distribuição dos elementos fósforo e alumínio.

As amostras da mina de Córrego Feijão são constituídas basicamente por hematita do tipo martítica e hematita martítica associada à magnetita. Os ensaios de dissolução em HCl sugerem a existência de algum mineral de fósforo altamente solúvel em HCl. Entretanto, os baixos teores de fósforo após 2 minutos de extração, associado às incertezas das análises químicas, não possibilita a obtenção de resultados conclusivos relativos à distribuição do fósforo e do alumínio.

Na mina de Segredo, as amostras apresentam hematita tabular associada à goethita, e hematita lobular associada à goethita e magnetita. A dissolução do fósforo nesta amostra em função da dissolução do ferro é muito similar à amostra Córrego

feijão: há uma significativa remoção de fósforo após a extração durante apenas dois minutos. Por outro lado, nesta amostra a correlação entre fósforo e goethita é muito significativa, e portanto, pode-se concluir que nesta amostra existe fósforo adsorvido em goethita e possivelmente também existe algum fosfato que seja altamente solúvel em ácido clorídrico.

Assim, através da caracterização mineralógica e química foi possível identificar os principais minerais portadores de alumínio e fósforo. A partir desses resultados, sugeriu-se que sejam estudadas alternativas para o processamento mineral que permitam minimizar a concentração de elementos deletérios no concentrado, o que poderá impactar diretamente no preço final de mercado do minério de ferro. Pode-se até mesmo viabilizar jazidas consideradas não-econômicas, devido aos elevados teores desses elementos deletérios. Espera-se com esse trabalho ter agregado informações à Vale acerca das minas e jazidas, confirmando dados geológicos de pesquisas já concluídas e auxiliando estudos que venham a ser realizados. É importante ressaltar que a metodologia adotada nesse trabalho pode ser aplicada na caracterização tecnológica do minério durante as etapas de avaliação/viabilidade de jazidas, a fim de auxiliar os ensaios de processo e desenvolvimento.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, F.S.(1973). Recursos Minerais do Brasil. 2ª edição. Editora Edgard Blücher, Instituto Nacional de Tecnologia, Rio de Janeiro.

BARRÓN, V. HERRUZO, M. and TORRENT, J. (1988). Phosphate Adsorption by Aluminous Hematites of Different Shapes. Soil Sci. Soc. Am. J. 52:647-651.

CHENG, C.Y.; MISRA, V.N.; CLOUGH, J. & MUN, R. (1999). Dephosphorisation of Western Australian Iron Ore by Hydrometallurgical Process. Minerals Engineering. V.12, n.9, pp. 1083-1092.

CHIAVERINI, V. (2008). Aços e Ferros Fundidos, 7ª Edição, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.

COELHO, L. H. (1999). A Origem do Fósforo e sua Localização Espacial nos Minérios de Ferro Enriquecidos Supergenicamente. In: II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, Ouro Preto, Brasil. Anais. P. 44-52.

COLOMBO, C.; BARRÓN, V. and TORRENT, J. (1994). Phosphate adsorption and desorption in relation to morphology and crystal properties of synthetic hematites. Geochimica et Cosmochimica Acta, V.58, n.4:1261-1269.

COLPAERT, H. (1969). Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. Edgard Blücher, 412p.

CORNELL, R.M. & SCHWERTMANN, U. (1996). The Iron Oxides. VCH Publishers, New York, 573p.

CORNELL, R.M.; GIOVANOLI, R. (1993). Acid dissolution of hematites of different morphologies. Clay Minerals, v.28, p.223-232.

CORRENS, C.W.; SHAW, D.M.; TUREKIAN, K.K.; ZEMANN, J. (1978) Handbook of geochemistry. Executive Editor: K.H. WEDEPOHL. Editorial Board: vol.III.

COSTA, A. C. S da. (1996). Iron oxide mineralogy of soils derived from volcanic rocks in the Paraná river basin, Brazil. Columbus – Oh, USA. March. Tese de doutorado em Philosophy.

CURI, A. (1991). Estudos para redução do teor de fósforo em minério de ferro. Belo Horizonte, 110p. Dissertação de mestrado em Tecnologia Mineral. Universidade Federal de Minas Gerais.

DAMASCENO, E.C. (2006). Disponibilidade, suprimentos e demanda de minérios para metalurgia. Séries Estudos e Documentos, CETEM – SED -69.

DANA, J.D. (1978). Manual de mineralogia. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 642 p.

De GRAVE, E; Da COSTA, G.M; BOWEN L.H.; BARREIRO, C.A. VANDENBERGHE, R.E. (1998). Hiperfine Interactions 117: 245-270.

DETLEF, H.G.W. (1986). Principais Depósitos Minerais do Brasil. Departamento Nacional da Produção Mineral, DNPM, Brasília, DF, Cap. 5; vol 2, p. 3-6.

DUPONT, D. (1976). Le Minerai de Fer dans le Monde. Paris, ARBED : 116p.

FITZPATRICK, R.W. SCHWERTMANN, U. (1983) Al-substituted goethite an indicator of pedogenic and other weathering environments in South Africa.in: MURAD, E. and SCHWERTMANN, U. The influence of aluminum substitution and crystallinity on the Mössbauer spectra of goethite. Clay Minerals, n.18, 301-312.

GÁLVEZ, N.; BARRÓN, V. and TORRENT, J. (1999) Preparation and properties of hematite with structural phosphorus. Clays and Clay Minerals., V.47:375-385.

INDA JUNIOR, A.V. and KÄMPF, N. (2003) Avaliação de procedimentos de extração dos óxidos de ferro pedogênicos com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio. Rev. Bras. Ci. Solo, 27:1139-1147.

KIESSILING, R.(2008) – The influence of Non-Metallic Inclusions The Properties of Steel – Journal of Metals – October, 1969 – apud: CHIAVERINI , V.. Aços e Ferros Fundidos, 7ª Edição, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.

KLEIN, C. and HURLBUT, C. S., Jr. (1999)/ Manual of Mineralogy, 21st Revised Edition, New York, cl, 681 pages, with CD-ROM Version 2.0

KROM, M.D; BERNER, R.A. (1980) Adsorption of phosphate in anoxic marine sediments. *Limnol. Oceanogr.*, 25: 796-806.

LANDERS, M.; GILKES, R. J. (2007) Dehydroxylation and dissolution of nickeliferous goethite in New Caledonian lateritic Ni ore. *Science Direct – Applied Clay Science* 35: 162-172.

LER,A.; STANFORTH, R.(2003). Evidence for surface precipitation of phosphate on goethite. *Environmental science & technology*, v.37, n.12. p.2694-2700.

MARTIN, R.R., and R. St. C. SMART. (1987) X-ray photoelectron studies of anion adsorption on goethite. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 51:54-56.

MHERA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-system buffered with sodium bicarbonate. *Proceedings Clay & Clay Mineral Conference*, v.7, p.317-327, 1960.

NEUMANN, R; SCHENEIDER, C.L; ALCOVER NETO, A.(2004) Caracterização tecnológica de Minérios. CT2004-181-00 Comunicação Técnica elaborada para 4ª Edição do Livro de Tratamento de Minérios. p 55-109. CETEM, Rio de Janeiro.

PARFITT, R.L., Atkinson, R.J., and R. St. C. SMART. (1975) The mechanism of phosphate fixation by iron oxides. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.* 39:837-841.

RUTTENBERG, K.C. (1992) Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments. *Limnol Oceanogr.* Vol.37, n.7.p.1460-1482.

SANTOS, L.D; BRANDÃO, P.R.G.(2002) Mineralogical, microchemical and microstructural study of Brazilian iron ores. In: Proceedings of the Second International Conference on the Iron Ore Industry: Today and Tomorrow (TIOITT), Kiruna, pp.90-103, 2002. apud SANTOS, L.D; BRANDÃO, P.R.G. Morphological varieties of goethite in iron ore from Minas Gerais, Brazil. Minerals Engineering 16:1285-1289.

SANTOS, L.D; BRANDÃO, P.R.G.(1999) Aspectos Microestruturais Finos e Minério de Ferro: Estudo Visando Detectar Fases Portadoras de Alumínio. II Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro. Ouro Preto-MG, p. 427-442.

SCHWERTMANN, U. (1984b) The influence of aluminum on iron oxides. Part IX: Dissolution of Al-goethites in 6M HCl. Clay Minerals, 19, 9-19.

SCHULZE, D. G. and SCHWERTMANN, U. (1987) The influence of aluminium on iron oxides. XIII. Properties of goethites synthesised in 0.3 M KOH at 25°C: Clay Miner. 22, 83-92.

SCHWERTMANN, U. & TAYLOR, R.M. Iron oxides.(1989) In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. Minerals in soil environments. Madison, Soil Science Society of America, p.379-438.

STANJEK, H. and SHWERTMANN, U.(1992) The influence of aluminum on iron oxides. Part XVI: Hidroxyl and aluminum substitution in syhthetic hematites. Clays and Clay Minerals, vol. 40, n.3, 347-354.

TORRENT, J; SCHWERTMANN, U. and BARRÓN, V. (1992) Fast and slow phosphate sorption by goethite-rich natural materials. Clays and Clay Minerals, V. 40. n. 1, 14-21.

TORRENT, J.(1987).The reductive dissolution of synthetic goethite and hematite in dithionite. Clay and Clay Minerals, v.22, p.329-337.

VANDENBERGHE, Robert. E. (1991) Mössbauer Spectroscopy and Applications in Geology. International Training Centre For Post-Graduate Soil Scientists. Faculteit der Wetenschappen - Rijksuniversiteit Gent. Belgium.

Sites consultados:

Departamento Nacional de Pesquisa Mineral. Sumário Mineral 2007. Disponível em: <www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/AMB2006/I_2006.pdf> Acessado em 19/01/2009.

Instituto Brasileiro de Mineração IBRAM. Estatísticas. Ferro. Disponível em: < www.ibram.org.br/sites/700/784/00000727.pdf. > Acessado em 19/01/2009.

Dept. of Earth Sciences - University of Bristol Disponível em:

<<http://www.gly.bris.ac.uk/www/teach/L2/mineralogy/13LectureSummary.pdf>>

Acessado em: 26/01/2009.

ANEXO I

Tabela 1. Composições químicas após extrações com HCl concentrado.

AFCM 150							
Tempo	Al	Ca	Fe	Mg	Mn	P	Ti
	mg/Kg	mg/Kg	%	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg
2	1649	380	64,17	615	751	510	67
5	1048	444	57,82	521	641	294	59
10	1017	414	64,15	628	672	311	71
20	903	311	63,30	632	651	315	77
30	656	337	59,37	694	589	182	67
60	705	290	58,97	813	553	176	77
80	634	1018	55,79	829	310	97	75
100	273	633	50,63	1276	258	87	86
120	106	984	49,64	943	181	141	83
250	0	1965	4,31	1557	<L.Q.	0	106
350	1111	1393	2,74	2662	<L.Q.	0	98
L.Q.	0,25	0,34	0,66	0,013	0,01	0,06	0,01
AFCM 45							
Tempo	Al	Ca	Fe	Mg	Mn	P	Ti
	mg/Kg	mg/Kg	%	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg
2	1269	218	66,15	567	756	476	69
5	1465	323	74,29	678	863	474	80
10	1168	449	65,73	657	701	365	69
20	1214	297	64,78	699	749	393	68
30	1242	584	62,78	834	669	413	73
60	0	3032	59,61	2283	<L.Q.	395	156
80	0	3124	57,40	2805	<L.Q.	568	202
100	884	2289	51,97	1856	59	244	117
250	1062	1825	48,78	1741	10	198	112
L.Q.	0,25	0,34	0,66	0,013	0,01	0,06	0,01
AFGO 150							
Tempo	Al	Ca	Fe	Mg	Mn	P	Ti
	mg/Kg	mg/Kg	%	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg
2	3485	2209	60,57	482	1092	1315	83
5	3519	775	61,62	25	633	1519	77
10	4812	649	59,42	15	607	2352	76
20	2740	1031	64,20	37	626	1029	77
30	2847	1313	63,37	117	623	1049	78
60	3411	751	61,72	25	604	1457	82
80	3075	1098	63,91	56	626	1188	81
100	2328	790	62,38	31	590	773	76
120	3488	835	60,97	6	595	-	78
250	2163	892	63,17	25	579	599	75
350	1586	937	61,82	26	589	283	72
L.Q.	0,25	0,34	0,66	0,013	0,01	0,06	0,01

ANEXO I

Tabela 2. Composições químicas após extrações com HCl concentrado.

AFGO 45	Al	Ca	Fe	Mg	Mn	P	Ti
Tempo	mg/Kg	mg/Kg	%	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg
2	1664	584	62,42	4	580	551	114
5	1919	366	63,03	<L.Q	616	652	111
10	2073	559	62,25	27	594	658	110
20	2407	925	63,00	81	602	743	110
30	1871	658	64,71	31	600	435	118
60	1636	570	61,82	30	563	407	111
80	2229	871	63,54	121	594	625	110
100	2120	836	63,20	113	594	528	103
120	1639	702	62,92	49	581	320	102
250	2006	1261	63,49	217	608	474	105
350	1927	744	62,38	69	578	384	98
L.Q.	0,25	0,34	0,66	0,013	0,01	0,06	0,01
AFMQ 150	Al	Ca	Fe	Mg	Mn	P	Ti
Tempo	mg/Kg	mg/Kg	%	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg
2	12933	774	49,44	934	1533	473	459
5	13403	605	51,21	972	1649	469	434
10	12695	567	51,03	972	1639	493	370
20	3961	-	14,99	873	387	162	314
30	4721	762	19,65	421	507	195	538
60	-	530	44,41	785	1319	498	1488
80	-	1729	25,08	725	640	274	1562
100	2416	1265	8,62	384	148	103	1131
120	3915	4899	4,18	1163	0	91	4252
250	5221	3644	3,80	724	0	60	3486
350	784	1986	0,56	353	0	47	1271
L.Q.	0,25	0,34	0,66	0,013	0,01	0,06	0,01
AFMQ 45	Al	Ca	Fe	Mg	Mn	P	Ti
Tempo	mg/Kg	mg/Kg	%	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg
5	9851	313	47,60	832	1435	434	915
10	9839	337	48,73	858	1456	467	374
20	9673	274	45,38	743	1270	425	1335
30	9378	270	42,24	658	1084	348	2111
60	7984	281	33,17	543	827	299	3448
80	8928	1004	36,99	875	871	332	3815
100	8196	302	37,10	623	952	354	2951
120	8759	<L.Q.	33,02	732	700	311	3807
250	5286	<L.Q.	10,37	507	<L.Q.	0	6337
350	3490	<L.Q.	11,51	434	<L.Q.	0	6565
L.Q.	0,25	0,34	0,66	0,013	0,01	0,06	0,01

ANEXO I

Tabela 3. Composições químicas após extrações com HCl concentrado.

AGCT 150	Al	Ca	Fe	Mg	Mn	P	Ti
Tempo	mg/Kg	mg/Kg	%	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg
2	421	848	37,63	139	544	343	35
5	497	435	35,90	86	458	273	32
10	337	699	45,15	110	532	267	38
20	185	950	24,07	145	273	137	28
30	72	836	12,78	114	82	55	17
60	0	695	5,50	83	<L.Q	19	15
80	0	582	1,68	63	<L.Q	0	12
100	0	761	1,06	91	<L.Q	0	10
120	0	489	0,07	55	<L.Q	0	9
250	0	699	0,10	80	<L.Q	0	10
350	0	1272	0,05	123	<L.Q	17	8
L.Q.	0,25	0,34	0,66	0,013	0,01	0,06	0,01
AGCT 45	Al	Ca	Fe	Mg	Mn	P	Ti
Tempo	mg/Kg	mg/Kg	%	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg
2	630	649	38,68	185	704	457	157
5	580	706	33,86	184	607	431	147
10	408	770	30,28	184	491	330	157
20	582	1144	26,56	218	497	315	144
30	416	1348	22,69	215	344	272	135
60	228	1523	11,15	203	62	64	158
80	235	1264	8,42	203	31	56	109
100	250	1396	4,80	164	<L.Q.	9	79
120	95	1332	5,94	150	<L.Q.	19	102
250	173	1754	2,26	266	<L.Q.	27	45
350	51	1532	0,62	169	<L.Q.	0	21
L.Q.	0,25	0,34	0,66	0,013	0,01	0,06	0,01
JGD 150	Al	Ca	Fe	Mg	Mn	P	Ti
Tempo	mg/Kg	mg/Kg	%	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg
10	9185	440	62,9	301	1000	1220	124
30	12922	486	53,8	505	706	1039	111
60	13581	462	52,3	544	634	878	112
80	17083	399	44,1	679	540	956	129
100	25419	728	33,7	1109	410	845	199
L.Q.	0,28	0,26	0,73	0,65	0,02	0,13	0,10
JGD 45	Al	Ca	Fe	Mg	Mn	P	Ti
Tempo	mg/Kg	mg/Kg	%	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg
10	6443	578	62,6	264	751	847	140
30	13288	603	50,9	601	648	1003	228
60	17269	612	45,1	801	513	818	225
80	19997	801	28,6	1056	292	735	260
100	21006	913	14,7	1338	101	564	228
L.Q.	0,28	0,26	0,73	0,65	0,02	0,13	0,10

ANEXO I

Tabela 4. Composições químicas após extrações com HCl concentrado.

SFU	Al	Ca	Fe	Mg	Mn	P	Ti
Tempo	mg/Kg	mg/Kg	%	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg
0	6361	899	63,92	92	730	489	428
5	10206	1075	59,26	112	678	601	470
10	5686	875	58,97	98	682	518	419
20	3964	1223	60,73	135	574	447	334
30	4845	1370	60,05	105	635	540	381
60	5776	874	61,20	63	577	541	300
80	3517	1216	62,30	102	571	577	275
100	7856	1541	53,66	208	507	680	374
120	8958	1474	54,30	177	494	821	377
250	9066	1174	58,28	79	531	950	272
350	7794	1244	52,61	125	468	779	232
L.Q.	0,25	0,34	0,66	0,013	0,01	0,06	0,01
TDCF 150	Al	Ca	Fe	Mg	Mn	P	Ti
Tempo	mg/Kg	mg/Kg	%	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg
2	406	422	68,79	165	1600	279	57
5	252	1001	66,53	259	949	99	60
10	475	168	67,75	107	937	129	48,4
20	135	265	67,27	123	919	114	46,0
30	110	232	65,70	137	823	94	53,1
60	216	242	65,29	175	834	110	55,9
80	405	540	65,48	371	708	78	107
100	355	653	61,49	365	659	78	97
120	288	666	59,11	388	651	67	81
L.Q.	0,25	0,34	0,66	0,013	0,01	0,06	0,01
TDCF 45	Al	Ca	Fe	Mg	Mn	P	Ti
Tempo	mg/Kg	mg/Kg	%	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg
2	506	361	66,93	129	1738	312	50
5	329	480	67,24	134	980	181	59
10	363	491	69,62	138	1011	168	62
20	252	328	66,71	111	836	115	65
30	453	562	66,39	200	802	103	71
60	278	675	65,56	247	723	83	89
80	346	401	66,31	184	862	152	74
100	445	672	64,72	299	734	151	91
120	455	549	61,65	270	673	105	91
250	1183	1306	52,73	634	487	181	120
350	665	1334	48,04	550	345	103	100
L.Q.	0,25	0,34	0,66	0,013	0,01	0,06	0,01

ANEXO I

Tabela 5. Composições químicas após extrações com HCl concentrado.

TDSP 150	Al	Ca	Fe	Mg	Mn	P	Ti
Tempo	mg/Kg	mg/Kg	%	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg
10	952	524	60,22	79	759	565	55
20	987	318,3	60,54	64	793	485	53
30	983	347,5	60,18	70	642	244	56
60	812	432,2	58,33	111	591	224	84
80	1602	554	54,92	165	498	12	63
100	1067	521	51,31	162	447	0	58
120	997	468,4	56,64	108	494	18	57
250	2625	1539	33,07	407	<L.Q	0	108
350	4211	1433	10,83	458	<L.Q	0	66
L.Q.	0,25	0,34	0,66	0,013	0,01	0,06	0,01

TDSP 45	Al	Ca	Fe	Mg	Mn	P	Ti
Tempo	mg/Kg	mg/Kg	%	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg
2	1128	354	51,03	69	811	953	47
5	912	415	48,70	106	543	406	47
10	823	158	47,69	38	507	373	44
20	891	235	48,15	50	452	145	47
30	826	362	47,75	74	492	375	46
60	610	224	41,47	57	409	234	41
80	692	276	39,96	73	340	11	42
100	1011	186	41,95	67	374	100	42
120	1260	932	40,57	279	360	167	44
250	884	541	32,45	150	276	39	35
350	814	324	24,25	102	164	0	30
L.Q.	0,25	0,34	0,66	0,013	0,01	0,06	0,01

ANEXO II

Tabela 1. Áreas dos sub-espectros Mössbauer após extrações com HCl concentrado.

AFCM 150					
Tempo	H	G	M	Fe	P
0	39	61	-	64,2	0,055
10	35	65	-	64,1	0,031
30	36	64	-	59,4	0,018
80	25	75	-	55,8	0,010
100	33	67	-	50,6	0,009
120	30	70	-	49,6	0,000

AFCM 45					
Tempo	H	G	M	Fe	P
0	41	59	-	65,4	0,057
10	40	60	-	65,7	0,037
30	38	62	-	62,8	0,041
80	37	63	-	57,4	0,057
100	28	72	-	52,0	0,024
250	32	68	-	48,8	0,020

AFGO 150					
Tempo	H	G	M	Fe	P
0	100	-	-	56,3	0,128
10	100	-	-	59,4	0,235
30	100	-	-	63,4	0,105
60	100	-	-	61,7	0,146
100	100	-	-	62,4	0,077
350	100	-	-	61,8	0,028

AFGO 45					
Tempo	H	G	M	Fe	P
0	100	-	-	65,6	0,096
10	100	-	-	62,3	0,066
30	100	-	-	64,7	0,044
60	100	-	-	61,8	0,041
100	100	-	-	63,2	0,053
350	100	-	-	62,4	0,038

AFMQ 150					
Tempo	H	G	M	Fe	P
0	-	100	-	53,3	0,049
10	-	100	-	51,0	0,049
20	-	100	-	15,0	0,016
60	-	100	-	44,4	0,050
80	-	100	-	25,1	0,027
100	-	100	-	8,6	0,010

AFMQ 45					
Tempo	H	G	M	Fe	P
0	2	98	-	55,2	0,051
10	2	98	-	48,7	0,047
20	3	97	-	45,4	0,042
60	5	95	-	33,2	0,030
80	9	91	-	37,0	0,033
100	8	92	-	37,1	0,035

ANEXO II

Tabela 2. Áreas dos sub-espectros Mössbauer após extrações com HCl concentrado.

AGCT 150					
Tempo	H	G	M	Fe	P
0	43	57	-	38,70	0,032
10	81	19	-	25,74	0,027
30	83	17	-	12,78	0,006
80	76	24	-	1,68	0,000
120	-	-	-	0,07	0,000
350	-	-	-	0,05	0,000

AGCT 45					
Tempo	H	G	M	Fe	P
0	63	37	-	36,7	0,049
10	67	33	-	30,3	0,033
30	68	32	-	22,7	0,027
80	81	19	-	8,4	0,006
120	-	-	-	5,9	0,002
350	-	-	-	0,6	0,000

JGD150					
Tempo	H	G	M	Fe	P
0	82	10	8	62,2	0,127
10	82	12	6	62,9	0,122
30	84	13	3	53,8	0,104
60	86	10	4	52,3	0,088
80	84	13	3	44,1	0,096
100	84	13	3	33,7	0,085

JGD 45					
Tempo	H	G	M	Fe	P
0	84	10	6	61,1	0,112
10	87	10	3	62,6	0,085
30	84	15	1	50,9	0,100
60	87	11	2	45,1	0,082
80	84	16	-	28,6	0,074
100	78	22	-	14,7	0,056

SFU					
Tempo	H	G	M	Fe	P
0	100	-	-	62,1	0,057
10	100	-	-	59,0	0,052
30	100	-	-	60,0	0,054
60	100	-	-	61,2	0,054
120	100	-	-	54,3	0,082
350	100	-	-	52,6	0,078

ANEXO II

Tabela 3. Áreas dos sub-espectros Mössbauer após extrações com HCl concentrado.

TDCF150					
Tempo	H	G	M	Fe	P
0	82	2	16	68,2	0,063
10	78	1	21	67,7	0,013
30	78	1	21	65,7	0,009
80	94	1	5	65,5	0,008
100	91	1	8	61,5	0,008
120	90	1	9	59,1	0,007

TDCF 45					
Tempo	H	G	M	Fe	P
0	89	2	9	66,8	0,077
10	90	1	9	69,6	0,017
30	91	1	8	66,4	0,010
80	93	1	6	66,3	0,015
100	99	1	0	64,7	0,015
120	100	0	0	61,6	0,010

TDSP150					
Tempo	H	G	M	Fe	P
0	70	30	-	66,1	0,149
10	86	14	-	60,2	0,057
30	94	6	-	60,2	0,024
60	100	0	-	58,3	0,022
120	100	0	-	56,6	0,002
350	100	0	-	10,8	0,000

TDSP 45					
Tempo	H	G	M	Fe	P
0	78	22	-	57,9	0,123
10	90	10	-	47,7	0,037
30	90	10	-	47,8	0,037
60	93	7	-	41,5	0,023
120	100	0	-	40,6	0,017
350	100	0	-	24,3	0,000

ANEXO III

Tabela 1. Composições mineralógicas calculadas após extrações com HCl concentrado.

AFCM 150						
Tempo	H	G	M	Qz	Fe	P
0	36	62	-	2	64,2	0,055
10	32	66	-	2	64,1	0,031
30	31	60	-	9	59,4	0,018
80	20	67	-	14	55,8	0,010
100	24	54	-	22	50,6	0,009
120	21	55	-	23	49,6	0,000

AFCM 45						
Tempo	H	G	M	Qz	Fe	P
0	38	61	-	0	65,4	0,057
10	37	63	-	0	65,7	0,037
30	34	62	-	4	62,8	0,041
80	30	57	-	12	67,5	0,057
100	21	59	-	20	52,0	0,024
250	22	53	-	25	48,8	0,020

AFGO 150						
Tempo	H	G	M	Qz	Fe	P
0	81	-	-	19	56,3	0,128
10	85	-	-	15	59,4	0,235
30	91	-	-	9	63,4	0,105
80	88	-	-	12	61,7	0,146
100	89	-	-	11	62,4	0,077
120	88	-	-	12	61,8	0,028

AFGO 45						
Tempo	H	G	M	Qz	Fe	P
0	94	-	-	6	65,6	0,096
10	89	-	-	11	62,3	0,066
30	93	-	-	7	64,7	0,044
80	88	-	-	12	61,8	0,041
100	90	-	-	10	63,2	0,053
120	89	-	-	11	62,4	0,038

AFMQ 150						
Tempo	H	G	M	Qz	Fe	P
0	-	85	-	15	53,3	0,049
10	-	81	-	19	51,0	0,049
30	-	24	-	76	15,0	0,016
80	-	71	-	29	44,4	0,050
100	-	40	-	60	25,1	0,027
120	-	14	-	86	8,6	0,010

AFMQ 45						
Tempo	H	G	M	Qz	Fe	P
0	2	86	-	12	55,2	0,051
10	1	76	-	23	48,7	0,047
30	2	70	-	28	45,4	0,042
80	2	50	-	47	33,2	0,030
100	5	54	-	42	37,0	0,033
120	4	54	-	41	37,1	0,035

ANEXO III

Tabela 2. Composições mineralógicas calculadas após extrações com HCl concentrado.

AGCT 150						
Tempo	H	G	M	Qz	Fe	P
0	24	35	-	41	38,70	0,032
10	30	8	-	62	25,74	0,027
30	15	3	-	81	12,78	0,006
80	2	1	-	98	1,68	0,000
120	-	-	-	-	0,07	0,000
350	-	-	-	-	0,05	0,000

JGD 45						
Tempo	H	G	M	Qz	Fe	P
0	73	10	5	12	61,1	0,112
10	78	10	3	9	62,6	0,085
30	61	12	1	26	50,9	0,100
60	56	8	1	35	45,1	0,082
80	34	7	-	59	28,6	0,074
100	16	5	-	79	14,7	0,056

AGCT 45						
Tempo	H	G	M	Qz	Fe	P
0	33	22	-	45	36,7	0,049
10	29	16	-	55	30,3	0,033
30	22	12	-	66	22,7	0,027
80	10	3	-	88	8,4	0,006
120	-	-	-	-	5,9	0,002
350	-	-	-	-	0,6	0,000

SFU						
Tempo	H	G	M	Qz	Fe	P
0	89	-	-	11	62,1	0,057
10	84	-	-	16	59,0	0,052
30	86	-	-	14	60,0	0,054
80	88	-	-	12	61,2	0,054
100	78	-	-	22	54,3	0,082
120	75	-	-	25	52,6	0,078

JGD 150						
Tempo	H	G	M	Qz	Fe	P
0	73	10	7	10	62,2	0,127
10	74	12	5	9	62,9	0,122
30	65	11	2	22	53,8	0,104
60	64	8	3	24	52,3	0,088
80	53	9	2	36	44,1	0,096
100	40	7	1	51	33,7	0,085

ANEXO III

Tabela 3. Composições mineralógicas calculadas após extrações com HCl concentrado.

TDCF150						
Tempo	H	G	M	Qz	Fe	P
0	80	2	15	3	68,2	0,063
10	76	1	20	3	67,7	0,013
30	73	1	19	7	65,7	0,009
80	88	1	5	6	65,5	0,008
100	80	1	7	12	61,5	0,008
120	76	1	7	16	59,1	0,007

TDSP 45						
Tempo	H	G	M	Qz	Fe	P
0	65	20	-	15	57,9	0,123
10	61	8	-	31	47,7	0,037
30	61	8	-	31	47,8	0,037
60	55	5	-	40	41,5	0,023
120	58	0	-	42	40,6	0,017
350	35	0	-	65	24,3	0,000

TDCF 45						
Tempo	H	G	M	Qz	Fe	P
0	85	2	8	5	66,8	0,077
10	90	1	9	0	69,6	0,017
30	86	1	7	6	66,4	0,010
80	88	1	5	6	66,3	0,015
100	92	1	0	7	64,7	0,015
120	88	0	0	12	61,6	0,010

TDSP150						
Tempo	H	G	M	Qz	Fe	P
0	66	32	-	2	66,1	0,149
10	74	13	-	13	60,2	0,057
30	81	6	-	13	60,2	0,024
60	83	0	-	17	58,3	0,022
120	81	0	-	19	56,6	0,002
350	15	0	-	85	10,8	0,000

ANEXO IV

Tabela 1. Análise granuloquímica das amostras de Segredo e Apolo.

TDSP 0632- SEGREDO														
Microns	Massa (g)				Análise Química									
		R. Simples	R. Acum.	Pas. Acum.	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC	F.Q
8.000		0,00	0,00	0,00	65,84	3,02	0,158	0,160	0,080	0,041	0,060	0,020	1,8	99,74
6.350	16,90	8,09	8,09	91,91	66,21	3,21	0,146	0,150	0,070	0,049	0,070	0,020	1,6	100,19
4.000	58,70	28,10	36,19	63,81										99,49
2.400	50,10	23,98	60,17	39,83	65,30	3,95	0,138	0,13	0,08	0,05	0,07	0,02	1,49	0,00
1.000	34,50	16,52	76,69	23,31										0,00
0,710	9,20	4,40	81,09	18,91	65,36	3,84	0,154	0,14	0,09	0,04	0,06	0,01	1,75	99,76
0,500	7,90	3,78	84,87	15,13										99,85
0,300	6,60	3,16	88,03	11,97	65,61	3,28	0,174	0,17	0,11	0,03	0,07	0,02	1,93	0,00
0,210	3,20	1,53	89,56	10,44										0,00
0,150	2,20	1,05	90,62	9,38	63,52	3,79	0,207	2,300	0,144	0,059	0,070	0,010	2,3	99,98
0,106	1,90	0,91	91,53	8,47	60,20	10,14	0,195	0,18	0,16	0,05	0,07	0,03	2,37	99,57
0,075	2,00	0,96	92,48	7,52										0,00
0,045	2,60	1,24	93,73	6,27	55,59	17,93	0,137	0,140	0,130	0,050	0,060	0,030	1,8	99,92
-0,045	13,10	6,27	100,00	0,00	62,75	7,69	0,120	0,210	0,120	0,033	0,060	0,010	1,5	99,69
Total	208,90			Global Calculada										
AFMQ 111- APOLO														
Microns	Massa (g)				Análise Química									
		R. Simples	R. Acum.	Pas. Acum.	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC	F.Q
8.000		0,00	0,00	100,00	60,02	2,12	0,055	5,380	0,135	0,150	0,070	0,200	5,4	99,40
6.350	2,60	1,57	1,57	98,43	58,06	2,00	0,067	2,830	0,111	0,145	0,060	0,110	11,1	99,55
4.000	6,60	3,98	5,54	94,46										99,78
2.400	13,40	8,07	13,61	86,39	59,20	2,38	0,068	2,83	0,12	0,11	0,07	0,14	9,30	0,00
1.000	11,40	6,87	20,48	79,52										0,00
0,710	5,40	3,25	23,73	76,27	58,92	2,41	0,062	2,80	0,14	0,13	0,07	0,18	9,96	100,11
0,500	5,50	3,31	27,05	72,95										99,40
0,300	7,50	4,52	31,57	68,43	59,27	2,69	0,063	3,09	0,15	0,17	0,09	0,24	8,05	0,00
0,210	4,20	2,53	34,10	65,90										0,00
0,150	3,50	2,11	36,20	63,80	53,90	4,02	0,060	3,790	0,153	0,244	0,170	0,430	13,3	99,30
0,106	3,10	1,87	38,07	61,93	54,65	3,66	0,061	3,53	0,16	0,23	0,15	0,42	12,61	99,08
0,075	3,10	1,87	39,94	60,06										0,00
0,045	4,70	2,83	42,77	57,23	54,98	3,83	0,060	3,180	0,176	0,256	0,120	0,350	13,1	99,80
-0,045	95,00	57,23	100,00	0,00	57,03	1,73	0,060	2,610	0,169	0,137	0,070	0,210	12,5	99,17
Total	166,00			Global Calculada										

ANEXO IV

Tabela 2. Análise granuloquímica das amostras de Cóirrego Feijão e Andrade.

TDCF 0353- FEIJÃO														
Microns	Massa (g)				Análise Química									
		R. Simples	R. Acum.	Pas. Acum.	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC	F.Q
8.000		0,00	0,00	100,00	68,20	0,55	0,086	0,230	0,349	0,030	0,080	0,030	0,8	99,89
6.350	3,60	1,81	1,81	98,19	67,39	2,38	0,042	0,140	0,162	0,029	0,130	0,060	0,7	100,09
4.000	7,20	3,63	5,44	94,56										99,67
2.400	8,60	4,33	9,77	90,23	68,88	0,39	0,044	0,10	0,24	0,02	0,07	0,04	0,16	0,00
1.000	16,80	8,46	18,24	81,76										0,00
0,710	7,80	3,93	22,17	77,83	68,67	0,55	0,056	0,12	0,30	0,03	0,08	0,04	0,02	
0,500	9,80	4,94	27,10	72,90										99,64
0,300	11,50	5,79	32,90	67,10	68,42	0,93	0,053	0,14	0,29	0,07	0,08	0,02	0,08	0,00
0,210	7,50	3,78	36,68	63,32										0,00
0,150	10,30	5,19	41,86	58,14	67,71	1,24	0,053	0,160	0,300	0,054	0,080	0,005	0,5	99,30
0,106	17,30	8,72	50,58	49,42	68,38	0,65	0,048	0,11	0,27	0,06	0,06	0,01	0,29	99,40
0,075	26,60	13,40	63,98	36,02										0,00
0,045	28,60	14,41	78,39	21,61	68,21	0,87	0,054	0,130	0,304	0,030	0,070	0,005	0,5	99,66
-0,045	42,90	21,61	100,00	0,00	65,39	1,44	0,177	0,490	1,054	0,042	0,130	0,050	1,9	99,34
Total	198,50			Global Calculada										
AFGO 0038- ANDRADE														
Microns	Massa (g)				Análise Química									
		R. Simples	R. Acum.	Pas. Acum.	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC	F.Q
8.000		0,00	0,00	100,00										0,00
6.350	18,70	8,68	8,68	91,32	67,82	0,16	0,170	0,680	0,046	0,014	0,090	0,030	1,0	99,38
4.000	29,50	13,70	22,38	77,62										99,83
2.400	23,70	11,00	33,38	66,62	67,78	0,09	0,270	0,91	0,05	0,05	0,08	0,04	1,06	0,00
1.000	25,30	11,75	45,13	54,87										0,00
0,710	3,80	1,76	46,89	53,11	67,12	0,29	0,362	1,42	0,07	0,04	0,08	0,02	1,89	100,62
0,500	3,40	1,58	48,47	51,53										100,57
0,300	5,10	2,37	50,84	49,16	67,46	0,68	0,286	1,16	0,07	0,06	0,07	0,02	1,38	0,00
0,210	6,50	3,02	53,85	46,15										0,00
0,150	15,60	7,24	61,10	38,90	67,99	0,64	0,141	0,590	0,051	0,055	0,070	0,020	0,7	99,62
0,106	23,50	10,91	72,01	27,99	68,60	0,54	0,066	0,42	0,04	0,08	0,07	0,01	0,33	99,73
0,075	18,60	8,64	80,64	19,36										0,00
0,045	20,70	9,61	90,25	9,75	69,33	0,39	0,061	0,470	0,044	0,070	0,070	0,010	0,4	100,71
-0,045	21,00	9,75	100,00	0,00	65,62	1,39	0,290	1,990	0,081	0,058	0,070	0,020	1,7	99,76
Total	215,40			Global Calculada										

ANEXO IV

Tabela 3. Análise granuloquímica das amostras de Capanema e Conta História.

AFCM 0027- CAPANEMA														
Microns	Massa (g)				Análise Química									
		R. Simples	R. Acum.	Pas. Acum.	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC	F.Q
8.000		0,00	0,00	100,00										0,00
6.350	14,40	7,57	7,57	92,43	65,00	1,34	0,120	0,670	0,060	0,051	0,060	0,060	5,5	100,98
4.000	19,80	10,42	17,99	82,01										100,55
2.400	18,00	9,47	27,46	72,54	64,73	1,26	0,067	0,34	0,06	0,07	0,05	0,09	5,98	0,00
1.000	29,20	15,36	42,82	57,18										0,00
0,710	4,40	2,31	45,13	54,87	63,68	1,26	0,079	0,40	0,06	0,04	0,05	0,09	5,98	99,12
0,500	8,00	4,21	49,34	50,66										100,07
0,300	10,60	5,58	54,92	45,08	64,02	1,39	0,072	0,35	0,06	0,05	0,05	0,09	6,36	0,00
0,210	8,90	4,68	59,60	40,40										0,00
0,150	10,40	5,47	65,07	34,93	63,31	2,02	0,070	0,340	0,059	0,048	0,050	0,100	6,2	99,50
0,106	11,80	6,21	71,28	28,72	63,75	2,06	0,061	0,26	0,06	0,04	0,05	0,06	5,63	99,46
0,075	11,60	6,10	77,38	22,62										
0,045	12,00	6,31	83,69	16,31	64,35	1,59	0,060	0,260	0,060	0,051	0,050	0,090	5,2	99,47
-0,045	31,00	16,31	100,00	0,00	61,33	1,62	0,117	0,760	0,113	0,059	0,050	0,150	8,5	99,20
Total	190,10			Global Calculada										
AGCT 0035- CONTA HISTÓRIA														
Microns	Massa (g)				Análise Química									
		R. Simples	R. Acum.	Pas. Acum.	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC	F.Q
8.000		0,00	0,00	100,00										0,00
6.350	10,90	5,65	5,65	94,35	61,59	9,04	0,070	0,280	0,081	0,018	0,060	0,010	2,8	100,54
4.000	16,40	8,50	14,15	85,85										99,20
2.400	12,00	6,22	20,37	79,63	61,93	7,18	0,075	0,25	0,08	0,02	0,05	0,01	2,88	
1.000	17,80	9,23	29,60	70,40										
0,710	5,40	2,80	32,40	67,60	63,41	4,82	0,077	0,28	0,08	0,04	0,09	0,01	2,97	99,15
0,500	8,00	4,15	36,55	63,45										100,81
0,300	20,50	10,63	47,17	52,83	59,45	13,36	0,052	0,18	0,07	0,01	0,06	0,02	1,98	
0,210	16,70	8,66	55,83	44,17										
0,150	22,30	11,56	67,39	32,61	32,55	52,13	0,029	0,130	0,053	0,016	0,060	0,050	1,2	100,25
0,106	24,00	12,44	79,83	20,17	25,52	62,20	0,028	0,11	0,05	0,07	0,06	0,06	1,12	100,24
0,075	17,90	9,28	89,11	10,89										
0,045	11,00	5,70	94,82	5,18	38,04	43,56	0,052	0,210	0,075	0,080	0,050	0,030	1,9	100,40
-0,045	10,00	5,18	100,00	0,00	55,40	13,49	0,113	1,650	0,165	0,089	0,060	0,070	4,1	99,09
Total	192,90			Global Calculada										

ANEXO IV

Tabela 4. Análise granulométrica das amostras de Urucum e Jangada.

SINTER FEED URUCUM														
Microns	Massa (g)				Análise Química									
		R. Simples	R. Acum.	Pas. Acum.	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC	F.Q
8.000		0,00	0,00	100,00										0,00
6.350	15,20	7,29	7,29	92,71	66,31	1,91	0,079	1,240	0,168	0,128	0,090	0,020	0,9	99,52
4.000	58,00	27,83	35,12	64,88										99,29
2.400	51,00	24,47	59,60	40,40	65,88	2,48	0,070	1,28	0,14	0,11	0,09	0,01	0,80	
1.000	46,90	22,50	82,10	17,90										
0,710	8,80	4,22	86,32	13,68	65,08	3,60	0,068	1,45	0,70	0,12	0,09	0,02	1,21	100,60
0,500	6,30	3,02	89,35	10,65										100,27
0,300	9,60	4,61	93,95	6,05	64,35	4,83	0,071	1,58	0,25	0,17	0,09	0,02	1,09	
0,210	4,60	2,21	96,16	3,84										
0,150	2,90	1,39	97,55	2,45	63,10	5,47	0,068	1,930	0,412	0,239	0,090	0,010	1,4	100,05
0,106	1,80	0,86	98,42	1,58										
0,075	0,90	0,43	98,85	1,15	63,22	5,38	0,070	1,86	0,41	0,24	0,09	0,02	1,64	100,30
0,045	0,30	0,14	98,99	1,01										
-0,045	2,10	1,01	100,00	0,00										
Total	208,40			Global Calculada										

JGD 08/2003- Jangada														
Microns	Massa (g)				Análise Química									
		R. Simples	R. Acum.	Pas. Acum.	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC	F.Q
8.000		0,00	0,00	100,00	63,46	3,09	0,133	2,070	0,323	0,060	0,060	0,040	2,3	99,03
6.350		0,00	0,00	100,00	65,53	1,92	0,128	1,780	0,109	0,069	0,050	0,030	1,9	99,84
4.000		0,00	0,00	100,00										
2.400		0,00	0,00	100,00	65,96	2,01	0,119	1,75	0,07	0,07	0,07	0,02	1,87	100,45
1.000		0,00	0,00	100,00										
0,710		0,00	0,00	100,00	64,50	2,75	0,139	1,95	0,15	0,08	0,06	0,03	2,20	99,80
0,500		0,00	0,00	100,00										99,99
0,300		0,00	0,00	100,00	64,22	3,46	0,141	1,89	0,11	0,07	0,06	0,04	2,19	0,00
0,210		0,00	0,00	100,00										0,00
0,150		0,00	0,00	100,00	63,05	5,11	0,141	1,880	0,331	0,047	0,060	0,080	2,4	100,45
0,106		0,00	0,00	100,00										99,85
0,075		0,00	0,00	100,00	63,49	4,11	0,135	1,73	0,37	0,04	0,06	0,07	2,28	0,00
0,045		0,00	0,00	100,00	65,15	2,94	0,123	1,570	0,378	0,050	0,070	0,060	2,1	100,68
-0,045		0,00	0,00	100,00	60,88	5,15	0,185	3,350	0,344	0,088	0,070	0,100	3,6	100,26
Total	0,00			Global Calculada										