

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CARACTERIZAÇÃO DE CONCENTRADOS DE *PELLET FEED* DO
COMPLEXO DE MINAS DE ALEGRIA, SAMARCO MINERAÇÃO S.A.

Katherine Kelly da Gama

Orientador: Prof. Dr. Henrique Kahn

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2011 / 27)

SÃO PAULO
2011

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CARACTERIZAÇÃO DE CONCENTRADOS DE *PELLET FEED* DO
COMPLEXO DE MINAS DE ALEGRIA, SAMARCO MINERAÇÃO S.A.

Katherine Kelly da Gama



Orientador: Prof. Dr. Henrique Kahn

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2011 / 27)

DEDALUS - Acervo - IGC



30900030344

SÃO PAULO
2011

TF
G184
Kk.c

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CARACTERIZAÇÃO DE CONCENTRADOS DE PELLET FEITO DO
COMPLEXO DE MINAS DE ALÉCRIA, SAMAÇO MINERAÇÃO S.A.



Monografia de Curso

Orlando José de Almeida

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(1975/1976)

SÃO PAULO
1976

Identificação

Projeto: TF-11/27

Título: CARACTERIZAÇÃO DE CONCENTRADOS DE *PELLET FEED* DO COMPLEXO DE MINAS DE ALEGRIA, SAMARCO MINERAÇÃO S.A.

Aluna: Katherine Kelly da Gama

Orientador: Prof. Dr. Henrique Kahn

Escola Politécnica - Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo

AGRADECIMENTOS

Principalmente aos meus pais, Adelia e Rincosa, pela educaço, amor e dedicaço
principais por todos estes anos.

A Sanebas Mineração S.A. pelo fortalecimento das estruturas para a realizaço deste
trabalho.

Ao Professor Henrique Kari pela excelente orientaço e a todos do LCT pelo apoio
e apoio em todas as etapas deste projeto.

Ao Vitor pelo acompanhamento profissional e a todos os amigos da Furbian por me
servirem como suporte de trabalho.

Aos meus colegas de trabalho pelo trabalho em momentos felizes e pela parceria nos
momentos difíceis.

Aos Irmãos, Vitor e Kátia, por sua presença e mais presentes dos valores de vida.

Aos meus amigos amigos Joyce, Flávia, Vitor, Magela, e principalmente a Mariana
por sempre estarem comigo.

Por fim, não poderia esquecer, a Deus e a natureza, pelo trabalho e amor que
realizaram ao longo de tudo.

"Education is what remains after one has forgotten everything he learned in school."

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais, Adélia e Kincas, pela educação, amor e dedicação prestados por todos estes anos.

À Samarco Mineração S.A. pelo fornecimento das amostras para a realização deste trabalho.

Ao Professor Henrique Kahn pela excelente orientação e a todos do LCT pelo auxílio e apoio em todas as etapas deste projeto.

Ao Valter pelo enriquecimento profissional e a todos os amigos da FullGeo por me fazerem amar cada dia de trabalho.

Ao meu companheiro Chuí pela presença em momentos felizes e pela paciência nos momentos difíceis.

À Josi, Naomi, Victor e Kaito, por me ensinarem o mais precioso dos valores da vida.

Aos mais lindos amigos Joyce, Flávia, Yoda, Magrela, e principalmente à Mariana, por estarem ao meu lado sempre.

E por fim, não menos importante, à Bela e à Nastenka, pela fidelidade e amor puro e verdadeiro de todos os dias.

RESUMO

O presente trabalho envolveu a conjugação de diversas técnicas de caracterização de três concentrados de *pellet feed* provenientes do Complexo de Minas de Alegria, Estado de Minas Gerais, fornecidas pela empresa Samarco Mineração S.A. procurando estabelecer correlação entre as propriedades dos concentrados com o comportamento destes na etapa de pelotização.

Na caracterização das amostras foram efetuadas análises químicas, granulométricas, morfológicas, de densidade, área de superfície específica, porosidade, composição mineralógica e associações minerais.

As amostras são constituídas essencialmente por Fe, com teores acima de 66%, SiO₂ de até 1,32%, Al₂O₃ inferior a 0,20% e P abaixo de 0,05%. Análises granulométricas indicaram que as amostras apresentam granulometria muito semelhante, sendo a Amostra 8 ligeiramente mais grossa que as demais amostras.

As análises mineralógicas indicam que hematita (+magnetita) e goethita perfazem mais de 95% em massa. As proporções de hematita (+magn.) aumentam na medida em que a granulometria diminui, à exceção da fração passante de 0,020 mm, que apresenta teores menores que a fração retida de 0,020 mm. Goethita mostra comportamento inverso. O quartzo apresenta maiores conteúdos na fração acima de 0,053 mm, chegando a 3,8 % em massa na Amostra 8 (menor grau de liberação).

Texturalmente verificou-se que a hematita pode ocorrer compacta, alterada, porosa ou associada à goethita. Goethita, por sua vez, pode ocorrer tanto em partículas homogêneas ou com variações composicionais. O ferro distribui-se principalmente na fase mineral hematita+magnetita (de 62 a 78%) e o restante na goethita. A sílica ocorre em minerais de ferro (microinclusões), quartzo e outros silicatos, estando principalmente associado à goethita (40 a 59%), da mesma forma que alumínio e fósforo estão essencialmente associados à goethita, respectivamente, 74 a 86% e 100%.

Os resultados obtidos permitiram relacionar que quanto maior o conteúdo de goethita nas amostras, maior a área de superfície específica aparente (A.S.A.) havendo comportamento inverso em relação à densidade. O comportamento metalúrgico diferenciado das amostras está também relacionado ao conteúdo de goethita. Foram verificadas relações diretas entre conteúdo deste mineral versus resiliência e resistência à compressão da pelota tanto seca como úmida; os valores de A.S.A. relacionados com as propriedades da pelota crua também mostram relação direta. Em relação à pelota queimada observou-se relação inversa entre resistência à compressão e o conteúdo de goethita.

ABSTRACT

This work comprises the combination of various techniques of characterization of three pellet feed concentrate from the Complexo de Minas de Alegria, State of Minas Gerais, Brazil, provided by the company Samarco S.A. seeking to establish correlation between the concentrate properties and their behavior on the pelletizing process.

The characterization of samples were carried out by the analysis of chemical composition, particle size, morphology, density, specific surface area, porosity, mineralogical composition and mineral assemblages.

The samples are mainly composed of Fe, with levels above 66%, up 1.32% SiO_2 , Al_2O_3 less than 0.20%, P less than 0.05%. Size analysis indicated that the samples have very similar regarding the grain size distribution despite Sample 8 is a little bit more thicker than the other.

The mineralogical analysis indicates that hematite (+ magnetite) and goethite constitutes more than 95% by weight. The proportion of hematite (+ magn.) increase as the particle size decreases, except for passing bellow 0.020 mm, fraction which shows lower Fe grades than +0.020 mm fraction. Goethite shows opposite behavior. Quartz has the greatest content in the fraction above 0.053 mm, reaching 3.8% by weight in Sample 8 (lower liberation degree).

Texturally it was found that the hematite grains may occur as compact, weathered, or associated with porous goethite. Goethite can occur in both in homogeneous particles or with compositional variations. The iron is associated mainly in the mineral phase hematite + magnetite (62 to 78%) while the remaining is in the goethite. Silica occurs in the iron forming minerals (as microinclusions), quartz and other silicates, and is mainly related to goethite (40 to 59%); in the same way aluminum and phosphorus are essentially associated to goethite, respectively, 74 to 86% and 100%.

The results attained allowed to establish a direct relation between the goethite content to the apparent specific surface area (A.S.A.) and a inverse relation with the density of the samples. The metallurgical behavior is also related to the content of goethite. There is a direct relationship between the goethite content versus resilience and resistance to compression of both dry and wet pellet, the values of A.S.A. related to the properties of the raw pellet also show a direct relationship. Regarding to the calcined iron ore pellet it was observed an inverse relationship between compressive strength and the goethite content.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS E RELEVÂNCIA DO PROJETO	2
3	LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	2
3.1	Aspectos geológicos	2
3.1.1	Geologia regional de Minas de Alegria	2
3.1.2	Tipos genéticos de depósitos	6
3.1.3	Minerais de ferro	7
3.1.4	Processos e produtos	10
3.2	Caracterização tecnológica	11
3.2.1	Análises granulométricas	13
3.2.2	Análises químicas por fluorescência de raios X	14
3.2.3	Análises mineralógicas por difração de raios X	15
3.2.4	Microscopia eletrônica de varredura	15
3.2.5	Análise de imagens	16
4	MATERIAIS E MÉTODOS	18
4.1	Homogeneização e quarteamento das amostras	18
4.2	Análises granulométricas	18
4.2.1	Peneiramento a úmido	18
4.2.2	Granulometria por difração laser	19
4.2.3	Granulometria por análise de imagem dinâmica	19
4.3	Análises químicas	19
4.4	Difração de raios X	19
4.5	Picnometria de hélio	20
4.6	Porosimetria de mercúrio	20
4.7	Confecção de seções polidas	21
4.8	Microscópio óptica por luz refletida	21
4.9	Microscópio eletrônico de varredura e MLA	21
4.10	Informações disponíveis sobre as amostras estudadas - Samarco Mineração	22
5	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	22
6	RESULTADOS OBTIDOS	23
6.1	Composição química das amostras	23
6.2	Análises granulométricas	24
6.3	Análises granuloquímicas	27
6.4	Análises de densidade real, porosimetria e área de superfície específica aparente	28
6.5	Análises mineralógicas	29
6.5.1	Associações minerais	30
6.5.2	Distribuição dos elementos	36
6.6	Relação entre propriedades da amostra e pelotização	37
7	SUMÁRIO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES	40
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

ANEXOS

Anexo 1 – Dados das amostras estudadas fornecidos pela Samarco Mineração S.A.

Anexo 2 – Difrátogramas de raios X

Anexo 3 – Fotomicrografias por microscopia óptica

Anexo 4 – Fotomicrografias por microscopia eletrônica de varredura

Anexo 5 – Associações minerais estabelecidas por MLA

Anexo 6 – Fotomicrografias por MEV & MLA

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Composição mineralógica das diferentes locos de amostra do Quadrilátero Ferrífero (Modificada de Rosière et al., 1993)	9
Tabela 2 - Cronograma das atividades realizadas no projeto	23
Tabela 3 - Composição química das amostras lávicas estudadas (% em massa)	23
Tabela 4 - Comparação entre resultados da distribuição química a partir das técnicas de espalhamento por laser (Malvern) e análise de raios X (Camebax)	25
Tabela 5 - Análise granulométrica e distribuição das principais frações do Amostra 5	27
Tabela 6 - Análise granulométrica e distribuição das principais frações do Amostra 7	27
Tabela 7 - Análise granulométrica e distribuição das principais frações do Amostra 8	27
Tabela 8 - Perfil espacial, porcentagem e área de superfície específicas	28
Tabela 9 - Composição mineralógica das frações < 63 µm (% em massa)	30
Tabela 10 - Resultados de microanálise por EDX das frações de raios X por difração de raios X (% em massa)	33

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização e imagem orbital do complexo de Minas de Alegria.....	3
Figura 2 - Mapa geológico da região do quadrilátero ferrífero.....	4
Figura 3 - Coluna estratigráfica do Supergrupo Minas. Modificado de Renger et al. (1994).....	5
Figura 4 - Diferentes formas de ocorrência de cristais de hematita.....	8
Figura 5 - Hábitos octaédrico e dodecaédrico de cristais de magnetita.....	9
Figura 6 - Resultados de análises granulométricas por peneiramento a úmido – distribuição acumulada abaixo (% em massa).	24
Figura 7 - Comparativo entre resultados de análises granulométricas por distintas técnicas.....	26
Figura 8 - Comparação entre os difratogramas das amostras tal qual analisadas.	29
Figura 9 - Associações minerais em microscopia óptica e sistema MLA.....	31
Figura 10 - Associações minerais em MEV - imagens de BSE.....	32
Figura 11 - Associações dos minerais de ferro e silicatos.....	34
Figura 12 - Espectro de liberação de minerais de ferro e silicatos.....	35
Figura 13 - Relação entre as propriedades das amostras e comportamento na pelotização.....	39

INDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Composição mineralógica dos diferentes tipos de minério do Quadrilátero Ferrífero. Modificado de Rosièrie et al., 1993.....	6
Tabela 2 - Cronograma das atividades realizadas no projeto.	23
Tabela 3 - Composição química das amostras tal qual estudadas (% em massa).....	23
Tabela 4 - Comparação entres resultados de distribuição obtidos a partir das técnicas de espalhamento luz laser (Malvern) e análise de imagens (Camsizer).....	25
Tabela 5 - Análise granuloquímica e distribuição dos principais óxidos da Amostra 6.....	27
Tabela 6 - Análise granuloquímica e distribuição dos principais óxidos da Amostra 7.....	27
Tabela 7 - Análise granuloquímica e distribuição dos principais óxidos da Amostra 8.....	27
Tabela 8 – Peso específico, porosidade e área de superfície específica.....	28
Tabela 9 - Composição mineralógica das frações e total (% em massa).....	30
Tabela 10 - Resultados de microanálise por EDS das fases de minerais portadores de ferro (% em massa).....	33

Tabela 11 - Distribuição dos elementos nas amostras estudadas.....	37
Tabela 12 - Propriedades das amostras e comportamento na pelotização	38

1 INTRODUÇÃO

O Brasil figura entre os maiores produtores de minério de ferro do mundo, onde aproximadamente 98% de toda a demanda é utilizada para a produção do aço. A crescente evolução da tecnologia da indústria do aço, sendo o minério de ferro a matéria-prima essencial na sua produção, fez com que houvesse a necessidade de um maior conhecimento de diversas características dos tipos de minérios de ferro utilizados no mercado, com a finalidade de otimização dos processos de lavra, beneficiamento e siderúrgicos.

O *pellet feed*, o *sinter feed* e o minério granulado constituem os principais concentrados de minério de ferro da carga dos alto-fornos. O *pellet feed* é um material fino ($<0,15$ mm), que possui alto teor de ferro, baixos níveis de impurezas e é utilizado em alto-fornos após o processo de pelotização – formação de pequenos aglomerados de minério.

O processo de pelotização é muito influenciado pelas características intrínsecas do *pellet feed* a ser utilizado, como composição química e mineralógica, granulometria, porosidade e densidade. Adicionalmente, tais características podem alterar o comportamento metalúrgico do material, comprometendo a qualidade química, mecânica e metalúrgica do produto final.

O presente trabalho compreende estudos químicos, mineralógicos e morfológicos em três amostras de concentrados de *pellet feed* do Complexo Minas de Alegria, Samarco Mineração, visando a caracterização geral do material destinado a processos siderúrgicos.

Análises granulométricas e morfológicas compreendem estudos sobre tamanho, forma (esfericidade e relação de aspecto), que são características de alta relevância no processo de aglomeração para a pelotização do minério.

Análises químicas e mineralógicas constituem importante ferramenta da pesquisa mineral, do processamento do minério e do controle de qualidade do concentrado. Em relação ao concentrado de *pellet feed*, possibilita o conhecimento sobre as proporções minerais, os teores de ferro e outros minerais componentes que podem influenciar no processo de redução nos alto-fornos.

Outras características dos concentrados também serão analisadas, como densidade real, porosidade e área de superfície específica, que influenciam da mesma forma os processos metalúrgicos acima citados.

2 OBJETIVOS E RELEVÂNCIA DO PROJETO

O objetivo do presente trabalho é caracterizar química, mineralógica e morfológicamente três concentrados de *pellet feed*, contribuindo para o conhecimento de características relevantes dos produtos destinados aos processos siderúrgicos.

Atualmente a evolução tecnológica da produção de aço faz com que o mercado relacionado ao minério de ferro – principal matéria-prima do aço - exija características determinadas para a produção do aço de qualidade.

Frente a essa realidade a caracterização tecnológica de matérias-primas minerais vem se tornando importante ferramenta para a indústria, que tem por objetivo obter um melhor aproveitamento do minério, ao mesmo tempo que busca a melhoria do produto final beneficiado.

3 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

3.1 Aspectos geológicos

3.1.1 Geologia regional de Minas de Alegria

As reservas de ferro exploradas pela Samarco Mineração S.A. fazem parte do Complexo de Minas de Alegria, cuja exploração iniciou-se em 1992. O Complexo localiza-se próximo da cidade de Mariana, Estado de Minas Gerais, Brasil, conforme apresentado na Figura 1.

A região encontra-se localizada na porção leste do Quadrilátero Ferrífero, fazendo parte do Sinclinal de Alegria, estrutura formada por rochas do Supergrupo Rio das Velhas e Supergrupo Minas (Costa *et al.*, 2001).



Figura 1 – Mapa de localização e imagem orbital do complexo de Minas de Alegria.

A jazida é constituída por itabiritos de baixo teor, formados principalmente por quartzo, hematita e goethita. Os minérios da jazida são resultantes da atuação de eventos tectonometamórficos Pré-Cambrianos sobre sedimentos ferríferos e posterior enriquecimento supergênico de Fe no Cenozóico, gerando assembléias variadas de martita, hematita (especularita), goethita e magnetita.

Segundo Rosièrie *et al.* (1993), o Quadrilátero Ferrífero sofreu complexa evolução durante as eras Arqueana e Proterozóica, sendo o modelo mais aceito atualmente a de que foi formação por dois eventos deformacionais principais.

A primeira fase deformacional corresponde à um evento de tectônica extensional, que culminou em soerguimento de blocos granito-gnáissicos e desenvolvimento de estruturas dômicas e megassinclinais, conferindo ao Quadrilátero Ferrífero a morfologia de domo-e-bacia.

A segunda fase deformacional corresponde à tectônica de inversão em metamorfismo fácies xisto verde a anfibolito, que desenvolveu uma extensa faixa de

dobramento e cavalgamento com vergência para Oeste. Este segundo evento é compartimentado em três fases, sendo a primeira caracterizada por desenvolvimento de cavalgamentos em condições dúcteis; a segunda fase corresponde a dobramento em condições dúctil-rúpteis, de direção Leste-Oeste, e falhas correlacionadas ao dobramento; e a terceira fase é caracterizada pela reativação de falhas pré-existentes também em condições dúctil-rúpteis com dobramentos flexurais de direção axial Norte-Sul.

Os altos do embasamento caracterizaram obstáculos à esta faixa de dobramentos, o que resultou em complexa geometria estrutural que atualmente é compartimentada em doze estruturas principais, sendo uma delas a Sinclinal de Alegria, onde localiza-se a área de estudo deste Projeto (Figura 2).

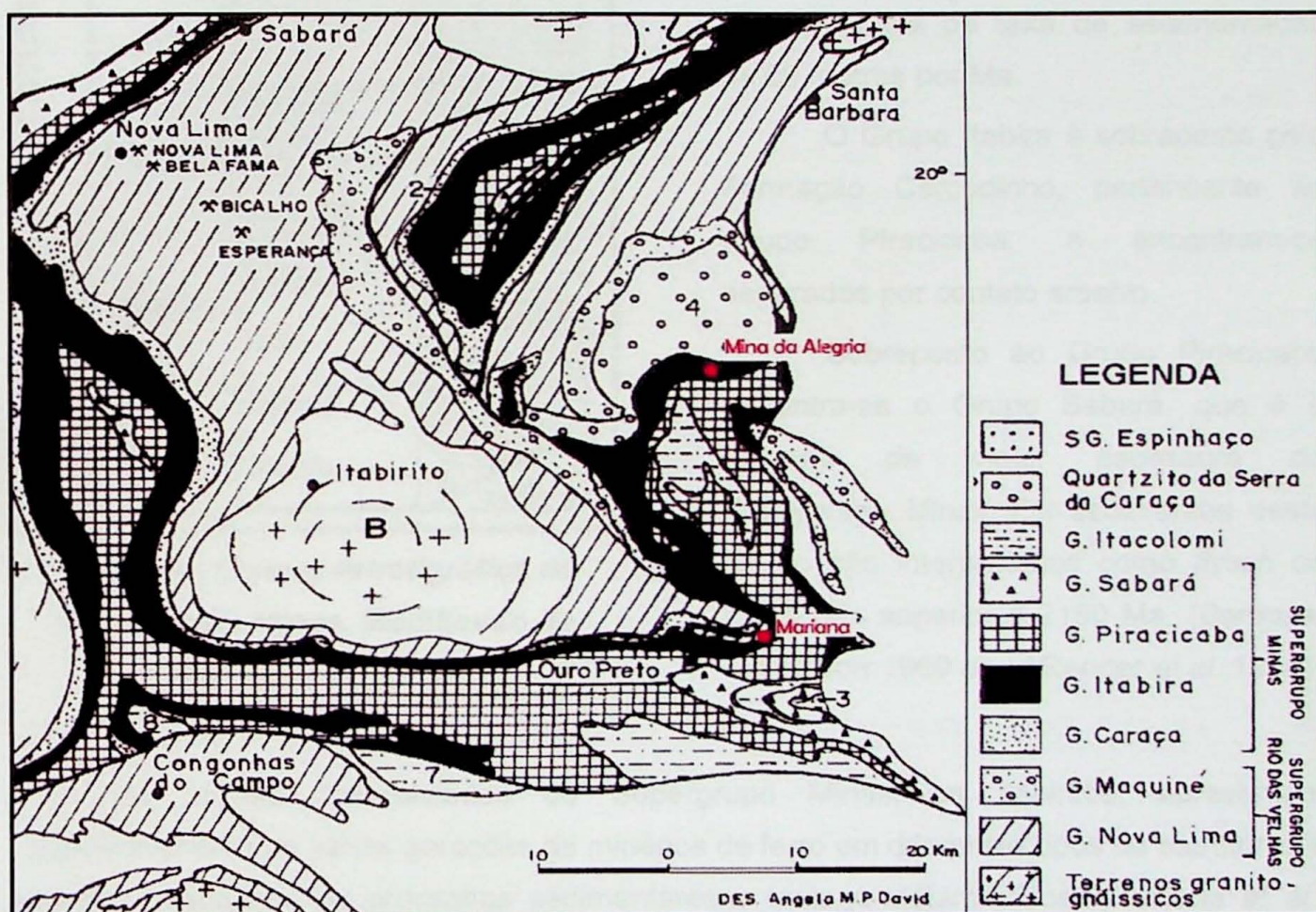


Figura 2 - Mapa geológico da região do quadrilátero ferrífero.
Modificado de Renger et al. (1994)

As formações ferríferas exploradas pela empresa Samarco Mineração S.A. encontram-se no Grupo Itabira, mais precisamente na Formação Cauê, pertencente ao Supergrupo Minas.

O Supergrupo Minas corresponde a uma sequência de rochas metassedimentares de idade proterozóica inferior, formadas em ambiente de sedimentação do tipo fluvial a marinho plataformar e metamorfoseadas principalmente em fácies xisto verde. Sotoposta à

esta sequência encontram-se rochas do embasamento de idade arqueana, que constituem os Terrenos granito-gnáissicos e do cinturão de rochas verdes Rio das Velhas (Figura 3).

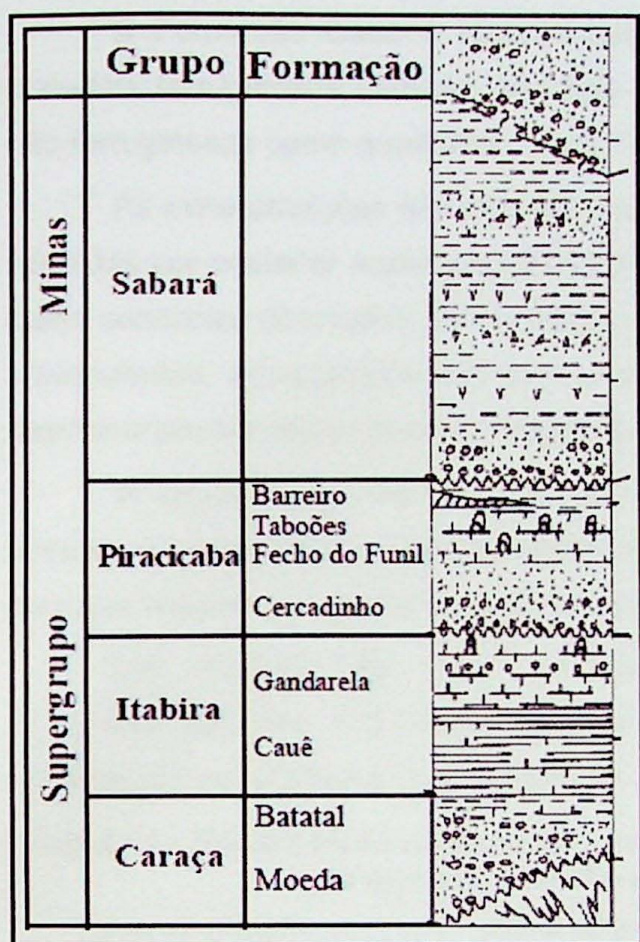


Figura 3 - Coluna estratigráfica do Supergrupo Minas. Modificado de Renger et al. (1994)

Estima-se que a sedimentação do Supergrupo Minas teve início em 2420 Ma, baseado em datações de zircões detríticos dos quartizitos da Formação Moeda, base do Grupo Caraça. Segundo Babinski *et al.* (1993), a idade de início da sedimentação da Formação Cauê, base do Grupo Itabira, é de 2520 Ma, baseada em estimativa de taxa de sedimentação de 50 metros por Ma.

O Grupo Itabira é sobreposto pela Formação Cercadinho, pertencente ao Grupo Piracicaba, e encontram-se separados por contato erosivo.

Sobreposto ao Grupo Piracicaba encontra-se o Grupo Sabará, que é a unidade de maior espessura do Supergrupo Minas. Os sedimentos deste Grupo são interpretados como *flysch* de idade não superior a 2150 Ma. (Barbosa, 1968; Dorr 1969 *apud* Renger *et al.*, 1994)

As rochas mineralizadas do Supergrupo Minas, os itabiritos, apresentam desenvolvimento de várias gerações de minérios de ferro em diferentes tipos de estruturas e texturas, resultados de processos sedimentares e tectono-metamórficos. (Rosièrie *et al.*, 1993).

Os itabiritos do Quadrilátero Ferrífero constituem depósitos ferríferos do tipo Formações ferríferas bandadas (BIF's), que notadamente são os mais importantes tipos de depósitos de minério de ferro, devido ao grande porte destas formações. Os BIF's caracterizam-se por rochas sedimentares bandadas ou laminadas, apresentando alternância de camadas de minerais de ferro e camadas de quartzo, podendo atingir dezenas ou centenas de quilômetros de extensão, além de apresentarem diversos tipos de minério de ferro, porém hematita e magnetita são dominantes (James, 1954). Existem dois tipos de BIF's: 1) tipo Algoma, que são depósitos lenticulares geralmente associados a vulcanismo

com maior desenvolvimento no Arqueano, e 2) tipo Superior, que são mais extensos, associados a depósitos de águas rasas, plataformais e desenvolvimento no Paleoproterozóico (Hutchison, 1983).

A Formação Cauê é caracterizada por diversos tipos de itabiritos, dentre outros materiais ferruginosos (cangas, brechas e hematita compactas, como também por rochas não ferruginosas como quartzitos, filitos, filitos dolomíticos, xistos e metabasitos.

As mineralizações são resultado de processos sedimentares e tectono-metamórficos seguidos por posterior superposição de processos de enriquecimento supergênico do Fe de idade cenozóica (Carvalho, 2010). Esses processos originaram itabiritos, em geral friáveis a pulverulentos, enriquecidos em ferro e apresentando assembléias mineralógicas variadas dos minerais: hematita (martita e especularita), goethita e magnetita.

A concentração do ferro na formação Cauê é resultado da remoção de quartzo e silicatos da superfície por intemperismo através do processo de lixiviação da sílica, fazendo com que houvesse a concentração dos óxidos de ferro no minério residual.

Os minérios de ferro da Formação Cauê podem ser classificados em: 1) minério itabirítico e 2) minério de alto teor (Rosièrie *et al.*, 1993). A Tabela 1 resume composição mineralógica destes tipos de minérios.

Tabela 1 - Composição mineralógica dos diferentes tipos de minério do Quadrilátero Ferrífero. Modificado de Rosièrie *et al.*, 1993.

Tipos de Minério		Mineralogia Principal	Minerais acessórios
Itabirito	Comum	quartzo e óxidos de ferro	clorita, sericita, dolomita, pirofilita e óxidos de Mn
	Dolomítico	dolomita e óxidos de ferro	quartzo, pirofilita, talco e óxidos de Mn
	Anfibolítico	tremolita/actinolita, hornblenda, grunerita e óxidos de ferro	quartzo, dolomita, anfibólios
Minério de alto teor		hematita	magnetita, quartzo e pirofilita

Segundo Carvalho (2010), os minérios de ferro das minas de Alegria são classificados em diversos tipos de minérios itabiríticos, dentre eles os principais são os itabiritos anfibolíticos, dolomíticos, silicosos friáveis do tipo “chapinha”, especularíticos, martíticos-goethíticos, magnetíticos, goethíticos, especularíticos-goethíticos e itabiritos martítico-especularítico-goethíticos. Ocorre ainda, na área da mina de Alegria 2, uma lente de hematita compacta, circundada por porções de hematita friável a pulverulenta (brechas), que aflora na mina e se estende, em profundidade, por mais de 100 m.

3.1.2 Tipos genéticos de depósitos

Os modelos genéticos de depósitos de minério de ferro são classificados em *Bog ore*, *Ironstone*, Formações ferríferas bandadas (BIF's) e Magmático e magmático-hidrotermais.

Os depósitos tipo *bog ore* correspondem a concentrações ferruginosas encontradas em pântanos, lagos ou regiões com drenagem lenta (Hutchison, 1983). São constituídos essencialmente de goethita e siderita.

Depósitos tipo *ironstone* caracterizam-se por maior distribuição geográfica e temporal, em relação aos depósitos tipo *bog ore*. O sistema deposicional é tipicamente marinho de água rasa e deltaico, sendo constituído de óxidos e hidróxidos de ferro (goethita, hematita), carbonatos (siderita) e silicatos de ferro. Depósitos *bog ore* apresentam dois tipos de minério, chamados Minette ou Lorena (idade jurássica) e tipo Clinton (idade siluriana).

As formações ferríferas bandadas (BIF's) são os mais importantes tipos de depósitos de minério de ferro, devido ao grande porte destas formações. Caracterizam-se por rochas sedimentares bandada ou laminada, com alternância de camadas de ferro de alto teor e camadas de quartzo, podendo atingir dezenas ou centenas de quilômetros de extensão, além de apresentarem diversos tipos de minério de ferro, porém hematita e magnetita são dominantes (James, 1954). Existem dois tipos de BIF's: 1) tipo Algoma, que são depósitos lenticulares geralmente associados a vulcanismo com maior desenvolvimento no Arqueano, e 2) tipo Superior, que são mais extensos, associados a depósitos de águas rasas, plataformais e desenvolvimento no Paleoproterozóico (Hutchison, 1983).

Os depósitos magmáticos são menos comuns e estão relacionados a grandes complexos intrusivos diferenciados, caracterizados por minério disseminado ou como camadas em seu interior (geralmente ilmenita e hematita). Assim como os depósitos magmáticos, os depósitos magmático-hidrotermais são pouco explorados, sendo caracterizados por mineralizações resultante de hidrotermalismo de preenchimento (deposição através dos vários tipos de cavidades existente nas rochas) e de substituição (deposição através da reação de substituição da rocha hospedeira).

3.1.3 Minerais de ferro

Os minerais mais comumente explorados como minério de ferro são os óxidos hematita (Fe_2O_3) e magnetita (Fe_3O_4), cujos teores de ferro são de 70% e 72,4% respectivamente. Goethita (HFeO_2), siderita (FeCO_3), pirita (FeS_2) e pirrotita (FeS) também são exemplos de minerais de ferro economicamente exploráveis; sulfetos não serão abordados pois não tem ocorrência no Complexo de Minas de Alegria.

Hematita e magnetita são minerais abundantes, que podem ocorrer nos mais diversos tipos de rochas, desde as ígneas, em forma de veios ou disseminadas, como também em rochas metamórficas e sedimentares.

A hematita é o mineral de ferro mais comum e sua composição química corresponde a 70% de Fe e 30% de O (Klein, 2002). Trata-se de um mineral que ocorre geralmente puro,

pertencente ao sistema hexagonal, que normalmente ocorre em formas tabulares, foliadas ou triangulares, sendo que mais raramente pode ocorrer na forma romboédrica, botroidal a reniforme e até mesmo micácea, laminada e especular (Figura 4).

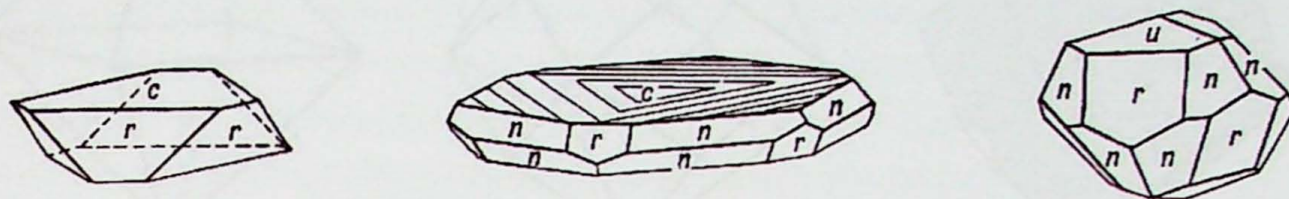


Figura 4 - Diferentes formas de ocorrência de cristais de hematita.

Cristais de hematita possuem dureza 6 na escala Mohs e densidade variando de 4,9 a 5,3 g/cm³. Apresentam em geral cor marrom-avermelhada a preta. A variedade de brilho metálico foliada é também conhecida como especularita e a forma pseudomórfica (hábito de magnetita) é conhecida como martita.

Segundo Rocha (2008), a hematita é um dos minerais de ferro mais abundantes na jazida de Alegria, ocorrendo de várias formas, como em cristais pseudomorfos da magnetita (martita) na forma octaédrica, gerados principalmente por processos supergênicos, formando minerais com diferentes graus de alteração (e de porosidade) ou por processos metamórficos, próximos às áreas de alta deformação. Outra forma de ocorrência da hematita na mina da Alegria são os cristais lamelares ou placóides (especularita), que ocorrem em duas gerações, sendo uma pertencente à fase de deformação principal associada a zonas de alta deformação geradoras da foliação principal e a outra fase, menos abundante, gerada em ambiente de menor temperatura e pressão, correspondente ao dobramento da foliação principal. Hematita na forma de concreções ou até mesmo preenchendo cavidades também são encontradas na área.

Microscopicamente os cristais de hematita podem se apresentar de diversas formas: 1) microcristalina, apresentando cristais menores que 0,01 mm, textura poros e contatos pouco desenvolvidos; 2) lobular, onde os cristais são inequidimensionais e apresentam formatos e contatos irregulares; 3) granular, que apresenta forma equidimensional e contatos retilíneos com junções tríplexes; 4) lamelar, onde os cristais são inequidimensionais, contudo tabulares e apresentando contatos retilíneos e 5) do tipo martita, hematita com hábito de magnetita e textura geralmente porosa.

A magnetita possui composição química de 72,4% de Fe e 27,6% de O, coloração cinza a preta e pertence ao sistema isométrico, geralmente ocorrendo sob forma octaédrica

ocasionalmente geminada e mais raramente sob a forma dodecaédrica (Figura 5).

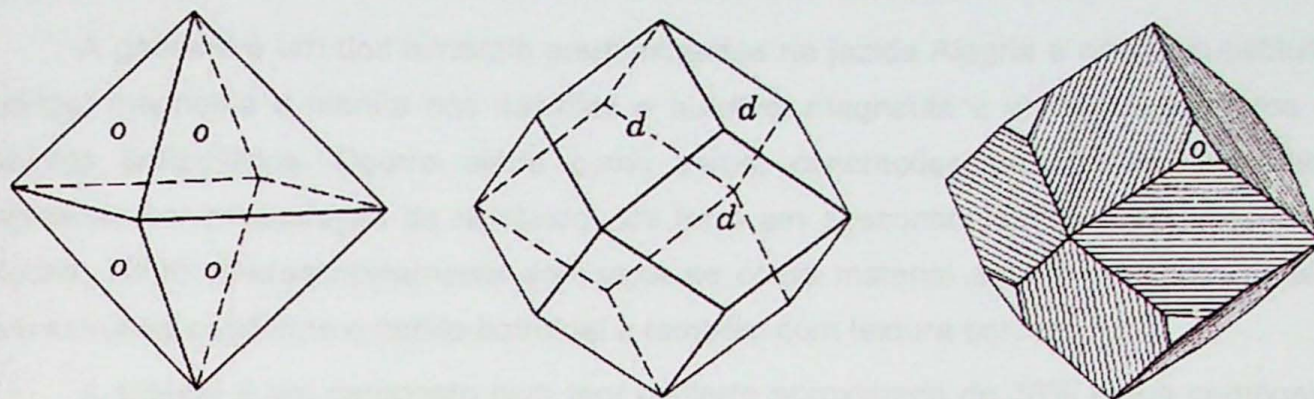


Figura 5 - Hábitos octaédrico e dodecaédrico de cristais de magnetita.

Possui dureza 5 na escala Mohs e densidade em torno de $5,2 \text{ g/cm}^3$ (Klein, 2002). A magnetita apresenta forte magnetismo, característica que facilita sua prospecção através de métodos geofísicos como também sua separação em processo de beneficiamento, através de separação magnética. A magnetita é o óxido de ferro mais estável a alta temperatura e baixa pressão de oxigênio (em relação à hematita), sendo sua deformação muito comum, pois os cristais de magnetita frequentemente são formados muito cedo. Em geral a magnetita apresenta-se na forma de cristais euédricos, isolados ou em agregados, quando observadas em microscópio.

Na jazida de Alegria, a magnetita é o óxido de ferro mais antigo presente nos minérios, ocorrendo agregado a outros minerais de ferro, em níveis ou bandas intercalados com bandas quartzosas. Os cristais apresentam-se muitas vezes martitizados, com estrutura em treliça, definindo a foliação milonítica ou sob a forma de porfiroclastos nas zonas de maior deformação (Rocha 2008).

A goethita é um hidróxido de ferro de composição química de 62,9% de Fe, 27% de O e 10,1% de H_2O , pertencente ao sistema ortorrômbico, da classe bipiramidal, apresentando cristais de forma acicular, maciço, reniforme ou em agregados fibrosos. Possui dureza 5 a 5,5 na escala Mohs e densidade $4,3 \text{ g/cm}^3$ e apresenta coloração amarelo-amarronzada a marrom escuro, com brilho adamantino a opaco por vezes sedoso (Klein, 2002). Trata-se de um mineral secundário, produto de intemperismo de minerais de ferro, como siderita, magnetita, pirita, etc, e geralmente ocorre associada a hematita e magnetita, dentre outros óxidos. A goethita é normalmente formada por condições oxidantes, acumulando-se como um precipitado direto de águas marinhas ou meteóricas.

Goethita é por vezes nomeada como limonita, que é uma goethita quimicamente impura, com consistência terrosa e com grau de hidroxilação mais elevado. Contudo o nome

limonita é atualmente mais utilizado como termo de campo ou para descrever óxidos hidratados de ferro pobremente cristalinos de identidade desconhecida.

A goethita é um dos minerais predominantes na jazida Alegria e ocorre substituindo quartzo, magnetita e martita nos itabiritos e quartzo, magnetita e anfibólios ferríferos nos itabiritos anfibolíticos. Ocorre ainda como veios, concreções ou crostas secundárias originadas por precipitação de hidróxidos de ferro em descontinuidades e espaços vazios (Rocha, 2008). Microscopicamente apresenta-se como material amorfo ou criptocristalino, com estrutura coloforme e hábito botroidal e também com textura porosa.

A siderita é um carbonato com teor de ferro aproximado de 38% e sua composição pode apresentar teores variáveis de cálcio, magnésio e manganês. Possui coloração marrom claro a marrom escuro e hábito geralmente romboédrico.

3.1.4 Processos e produtos

Recentemente a dificuldade de produzir minério de ferro ideal para processamento em altos-fornos (granulado e de alto teor) resultou na necessidade de se obter um melhor aproveitamento das frações mais finas e de teores mais baixos do minério de ferro. Atualmente, essas frações anteriormente consideradas rejeitos, são aglomeradas através de processos denominados sinterização e pelletização.

O processo de sinterização utiliza minérios entre 12,5 e 0,15 mm (fração *sinter feed*) e o processo de pelletização utiliza finos de minério abaixo de 0,15 mm (fração *pellet feed*). De acordo com sua granulometria (Castro, 1989 *apud* Takehara, 2004) os concentrados de minério de ferro são classificados em três grupos:

- Granulado (*lump ore*) - granulometria entre 12,5 a 200 mm;
- *Sinter feed* - granulometria entre 12,5 mm e 0,15 mm e
- *Pellet feed* - granulometria menor que 0,15 mm.

Pellet feed consiste em um concentrado de minério de ferro muito fino, geralmente utilizado em pequena proporção no processo de sinterização, pois diminui a permeabilidade do leito a sinterizar (Vieira *et al.*, 2003).

O *pellet feed* é comercializado conforme especificações em dois diferentes produtos: PFL (*pellet feed* de baixa sílica) e PFN (*pellet feed* de sílica normal). Além da característica em relação à sílica, o mercado de minério de ferro exige pelotas com granulometria adequada, sendo necessária a etapa de peneiramento das pelotas queimadas para a retirada dos finos (passantes na malha de 6,3 mm).

A pelletização consiste em um processo de compressão ou moldagem de um dado material na forma de um *pellet* e uma grande variedade de materiais diferentes podem

passar por tal processo, como produtos químicos, minério de ferro, ração animal composta, dentre outros. Em relação ao minério de ferro, a pelotização em partículas ultrafinas (menores que 0,15 mm) se dá através de tratamento térmico, onde duas ou mais partículas sólidas se aglutinam pelo efeito do aquecimento a uma temperatura inferior à de fusão.

Em geral a pelotização gera produto aglomerados esféricos de tamanhos entre 8 a 18 mm, com características específicas para alimentação dos altos-fornos, onde ocorre a fusão e redução do ferro, que passa de óxido à metal. Para a realização deste processo, toda carga de óxido de ferro, agentes redutores e combustíveis é adicionada anteriormente ao acendimento do forno. Como o alto-forno é abastecido antes do início da combustão, são necessários meios de entrada e circulação de ar e gases de combustão e devido a essas características do processo, são necessárias ao material alimentado características específicas.

Portanto, as partículas de combustível ou de minério de ferro devem apresentar dimensões específicas para que remanesçam lacunas entre si e possuam resistência mecânica suficiente para suportar o próprio peso da carga, para que não haja esmagamento e obstrução do alto-forno.

Tais características fazem necessário o processo de pelotização das frações finas de minério; entretanto a produção de pelotas também possibilita a adição de maior valor agregado ao produto, visto que há a possibilidade de acrescentar na pelota agentes redutores do ferro como o carvão mineral.

3.2 Caracterização tecnológica

A caracterização tecnológica é um processo que compreende a descrição e quantificação de diversas características intrínsecas do material objeto de estudo, fornecendo importantes informações sobre o bem mineral, como identidade mineral, proporção mineral, composição química e mineralógica, tamanho e forma dos grãos, associações minerais, grau de liberação, liberação e minerais de ganga e distribuição dos minerais no campo entre outros. Segundo Neumann *et al.* (2004), esses parâmetros são fundamentais para a otimização do aproveitamento de um bem mineral, pois podem fornecer informações sobre o potencial de recuperação do material, prever a resposta do material frente aos processos de beneficiamento e também podem ser empregados para resolver problemas em processos de beneficiamento já implantados.

Segundo Sant'Agostinho e Kahn (1997), a caracterização tecnológica tem por objetivo a definição das principais propriedades do material em relação à sua aplicação na indústria de transformação e compreende uma série de análises laboratoriais, conforme

sequência de procedimentos e critérios definidos em função do bem mineral ou matéria-prima em estudo.

Atualmente no Brasil o termo caracterização tecnológica de minérios é aplicado no Brasil para denominar o estudo da matéria prima mineral para fins de beneficiamento e uso final (Sant'Agostino & Kahn, 1997). Os dados requeridos a serem determinados em um estudo mineralógico de minérios variam de acordo com o tipo de minério em estudo, sendo que existem diversos métodos analíticos para obtenção destes dados, cabendo ao profissional selecionar o mais adequado para o tipo de amostra de minério e o nível de precisão exigido.

Em geral, o processo de caracterização tecnológica inicia-se a pela obtenção de informações sobre minérios similares, através do levantamento de informações sobre o bem mineral e processo(s) de beneficiamento, bem como especificações de concentrados aplicadas por estas indústrias - faixas de teores desejados e elementos deletérios. Segue-se então para o estabelecimento do método de estudo que orientará as operações em laboratório, de fundamental importância, como a preparação de amostra, cominuição, classificação granulométrica e separações minerais. Tais operações geram informações necessárias para que seja realizado o balanço metalúrgico através de análises químicas e balanço de massa dos produtos gerados.

Análises mineralógicas e formas de associações minerais também são relevantes pois fornecem informações sobre minerais portadores do elemento de interesse, a sua partição nas várias fases, e a distribuição destas fases na granulometria. A análise dos minerais de ganga também é importante para a definição de possíveis subprodutos e elementos deletérios.

Em geral, o processo de caracterização tecnológica é realizado por etapas. Segundo Neumann *et al.* (2004) existem quatro estágios, que compreendem: 1) fracionamento da amostra, realizado através de separações granulométricas (peneiramento), separações por densidade, susceptibilidade magnética, entre outros; 2) identificação das fases minerais, para a qual existem diversas técnicas, como difração de raios X, microscopia ótica e eletrônica de varredura, entre outras; 3) quantificação e distribuição das fases existentes nos grupos fracionados, como distribuição por faixa granulométrica, densitária, magnética, entre outros e 4) determinação do grau de liberação do mineral de interesse.

Henley (1983) ressalta a importância dos estágios de caracterização em relação ao empreendimento mineiro, onde a caracterização tecnológica de minérios deve abranger todas as etapas, desde a exploração do minério até o processo de operação/lavra. Os estudos devem-se iniciar com um levantamento de informações sobre a gênese do minério a ser explorado e suas implicações nos processos de beneficiamento e etapas posteriores.

A fase seguinte compreende realização de análises qualitativas das amostras, seguidas de análises quantitativas dos tipos de minérios e tipos metalúrgicos em suporte a estudos visando tanto a implantação de um empreendimento como na otimização de processos de lavra e beneficiamento de operações existentes.

Em relação à caracterização tecnológica de minério de ferro, o Brasil apresenta uma grande diversidade de recursos minerais com distintos tipos de minério de ferro. Contudo, deve-se salientar também variedades principalmente no que diz respeito às suas características microestruturais, resultado de diversas condições de tectonismo, metamorfismo e intemperismo a que foram sujeitos.

Tais características são fundamentais à definição do planejamento de lavra e dos processos de beneficiamento, bem como compreensão do comportamento metalúrgico de cada minério, tornando imprescindível a caracterização dos minérios para que haja um bom aproveitamento do minério, resultando em produtos de boa qualidade final. (Takehara, 2004; Vieira *et al.*, 2003)

Takehara (2004) ressalta a importância da caracterização do tipo de superfície dos minerais presentes no concentrado, já que tal característica é responsável pela maior ou menor aderência de partículas mais finas ao grão no processo de microaglomeração.

A análise de imagens ópticas é uma útil ferramenta para obtenção de dados sobre frações finas de minério de ferro. É possível realizar a diferenciação entre vários tipos de minério de ferro, através da análise de abundância mineral, porosidade, forma e textura das partículas, além de serem úteis para identificar porosidade em vários minerais. (Donskoi *et al.*, 2007). Os dados obtidos com este método em geral apresentam boa acurácia, sendo que os erros estão geralmente associados ao não reconhecimento de alguns minerais

3.2.1 Análises granulométricas

As análises granulométricas constituem-se importante ferramenta de caracterização tecnológica e, atualmente, existem diversas técnicas de realização de tais análises, como peneiramento a seco ou a úmido, por espalhamento de luz laser de baixo ângulo ou por análise de imagens, cabendo ao profissional a escolha da técnica mais adequada ao estudo em questão.

O peneiramento compreende operações de separação de uma população de partículas em frações de tamanhos diferentes, durante sua passagem, ou não, em uma malha de abertura fixa e pré-determinada. Cada partícula pode passar ou de ficar retida nesta malha, que podem ser grelhas de barras paralelas, telas de malhas quadradas, retangulares, alongadas, entre outras (Chaves e Peres, 2006).

O peneiramento pode ser realizado “a seco”, quando feito com o material na sua umidade natural ou “a úmido” quando o material é alimentado na forma de polpa ou recebe água adicional durante o peneiramento (Luz, 2004).

A técnica realizada através de análise de imagens também é muito utilizada na indústria mineral e consiste no uso de programas de computador que permitem a aquisição e o processamento de imagens que geram automaticamente os dados sobre as feições de interesse. Para esta técnica, denominada análises de forma estáticas, são confeccionadas amostras que são dispostas sobre uma superfície plana. A aquisição das imagens é realizada por meio de sistemas de microscopia óptica (MO) ou eletrônica de varredura (MEV) e a análise das imagens é uma atividade morosa e exaustiva, dificultando a caracterização de um número estatisticamente representativo de partículas. Contudo, mais recentemente a introdução de imagens por fluxo dinâmico, permite a análise de dezenas de milhares de partículas em poucos minutos, fornecendo estatística adequada e agilidade nas análises (Miller; Henderson, 2010). Esta técnica permite análises granulométricas de partículas que podem variar de micrometros até 1µm a 30 mm e as análises podem ser realizadas tanto em meio seco como em meio aquoso.

3.2.2 Análises químicas por fluorescência de raios X

Na técnica de análise química quantitativa por espectroscopia por fluorescência de raios X (FRX), a amostra é irradiada por um feixe primário emanado de um tubo de raios X, o que possibilita a excitação aos elementos químicos em geral ($Z > 4$) com a emissão de luz na região do espectro eletromagnético correspondente aos raios X (0,1 a 100 Å) (Formoso, 1984).

A amostra emite então uma radiação que tem energia característica dos elementos presentes na amostra. A radiação resultante apresenta intensidades proporcionais às concentrações dos elementos presentes na amostra, o que possibilita a quantificação dos mesmos. Para análise quantitativa são necessários procedimentos de calibração e comparação com padrões, podendo-se se fazer uso de espectrômetros com detector de comprimento de onda (WDS) ou de energia dispersiva (EDS).

Para análise de espectroscopia por fluorescência de raios X, deve-se pulverizar e prensar ou fundir em botões a amostra, para que seja então irradiada por raios X.

A composição química pode ser utilizada como uma estimativa dos conteúdos dos minerais presentes no *pellet feed*, cujas variações composicionais influenciam nos processos metalúrgicos. Portanto, as análises químicas por espectroscopia por fluorescência de raios X constitui-se em uma importante ferramenta analítica para o estudo em questão.

3.2.3 Análises mineralógicas por difração de raios X

A difração de raios X (DRX) é uma ferramenta amplamente utilizada na análises dos mais diversos tipos de materiais, sendo utilizada para determinação de características como estruturas cristalinas, equilíbrio de fases, medida de tamanho de partícula e determinação de orientação de um cristal, entre outras (Cullity, 1978).

Os raios X são ondas eletromagnéticas acompanhadas por um campo elétrico em flutuação periódica. O princípio da difração, desenvolvido por W.L. Bragg, consiste na emissão de raios X de comprimento de onda λ onde verifica-se então a disposição e intensidade dos planos paralelos de reflexão, relacionados às dimensões das celas unitárias e às orientações dos planos interatômicos hkl específicos do material analisado (Reynolds, 1989).

Para as análises por difração utiliza-se radiação de comprimento de onda na faixa de 0,5 a 2,5 Å. A difração de raios X pelos cristais resulta de um processo de espalhamento elástico dos raios pelos elétrons dos átomos, sem mudança do comprimento de onda, é o chamado espalhamento coerente segundo a lei de Bragg ($n\lambda = 2d \sin\theta$), onde λ corresponde ao comprimento de onda da radiação incidente, “n” a um número inteiro, “d” à distância interplanar para o conjunto de planos hkl e θ ao ângulo de incidência e reflexão do feixe de raios X.

A difração resultante é uma propriedade física fundamental do cristal, compreendendo posições e intensidades das linhas de difração, servindo tanto à identificação como ao estudo de sua estrutura. A forma e as dimensões da célula unitária determinam a posição angular das linhas de difração, e o arranjo dos átomos dentro da célula unitária determina a intensidade relativa dessas linhas (Formoso, 1984).

O *International Center for Diffraction Data* (ICDD), que possui sede nos EUA, mantém um extenso banco de dados utilizado para a identificação de fases cristalinas por sistemas computacionais através da comparação entre os dados obtidos nas análises e os dados deste banco de dados, auxiliando no processo de interpretação dos difratogramas e acelerando os processos analíticos (Reynolds, 1989).

3.2.4 Microscopia eletrônica de varredura

O microscópio eletrônico de varredura é uma ferramenta capaz de produzir imagens da superfície de uma amostra em alta resolução e com aparência tridimensional. A técnica consiste na emissão de um fino feixe de elétrons focalizado sobre a área de amostra que, ao interagir com o material analisado, perde energia por dispersão e absorção, produzindo diversos sinais que podem gerar imagens. As imagens obtidas podem ser utilizadas para

caracterizar propriedades da amostra, tais como sua composição, superfície topográfica, cristalografia, dentre outras (Brandão *et al.*, 2007).

A técnica utiliza um fino feixe de elétrons que é acelerado por uma diferença de potencial entre 0,2 a 40 kV e então convergido, através de lentes eletromagnéticas, para a superfície da amostra. As interações resultantes entre os elétrons e o material analisado são divididas em espalhamento do tipo elástico e do tipo não elástico. A primeira afeta a trajetória dos elétrons dentro da amostra sem alterar a energia cinética dos mesmos e é a responsável pelo fenômeno de elétrons retroespalhados que resulta em imagens de contraste de número atômico, bastante utilizadas em estudos de mineralógicos e de caracterização. Já o último, o espalhamento não elástico, compreende diversas interações onde há perda da energia cinética dos elétrons para os átomos da amostra, gerando elétrons secundários (imagem de topografia), elétrons Auger, raios X (microanálise e mapeamento elementar) e catodoluminescência.

Atualmente, as imagens de elétrons retroespalhados gerados pelo MEV acoplado a espectrômetros de raios X por energia dispersiva (EDS) permite a integração de sistemas de análise de imagens aliada à informação química (Chauvin, 1985; Fandrich *et al.* 2007). A associação de informações de raios X permite a discriminação de fases com base em composição química determinada pelos raios X característicos (Goldstein *et al.*, 1992).

Os sistemas comerciais de análise de imagens integrados a MEV/EDS evoluíram na área de caracterização de minérios por proporcionarem a coleta de grande quantidade de dados em curto espaço de tempo, gerando resultados estatisticamente confiáveis e precisos (Fandrich *et al.* 2007). Atualmente há dois sistemas de análise de imagens automatizada, para operação em MEV: QEMSCAN e MLA (*Mineral Liberation Analyser*). Nestes sistemas as fases presentes são identificadas e quantificadas pela integração das imagens de elétrons retroespalhados geradas em tons de cinza e a composição química pontual determinada pelo sinal de raios X.

Através destes sistemas é possível obter diversos dados, como aquisição de imagens de boa definição, análises qualitativas e quantitativas, análise multiponto e de feições, varredura por linhas e mapeamento de raios X. O sistema também permite mapear as partículas em função de sua composição química e, por consequência, avaliar associações mineralógicas do minério de ferro.

3.2.5 Análise de imagens

Análise de imagens é uma ferramenta muito utilizada para a determinação das feições morfológicas ou parâmetros avaliados na estereologia, sendo que esta última

compreende o estudo das relações entre estruturas ou feições tridimensionais de uma amostra partindo-se de imagens bidimensionais (Russ, 2007).

Para a realização da análise de imagens, inicialmente se faz necessária a digitalização das imagens, que compreende um processo de transformação da imagem numa matriz de números, o que permite o seu posterior processamento matemático segundo diferentes algoritmos e matrizes. O processamento matemático possibilita então a obtenção dos dados quantitativos de objetos, feições ou microestruturas.

As imagens podem ser obtidas através de câmeras digitais acopladas a ou microscópios ópticos ou diretamente a partir de microscópios eletrônicos digitais e os dados obtidos podem ser classificados em medidas específicas, como perímetro, área, diâmetro, ou forma; ou em medidas globais, que são relativas à amostra, como fração volumétrica, densidade superficial, densidade linear, entre outros.

3.2.5.1 MLA - *Mineral Liberation Analyser*

Atualmente o MLA (*Mineral Liberation Analyser*) é um dos principais instrumentos para análise de imagens automatizada permitindo combinar análise de imagens por elétrons retroespalhados (BSE) com identificação de minerais à partir de espectros de raios X (Gu & Napier-Munn, 1997).

As imagens obtidas por BSE permitem analisar muito mais pontos e em menos tempo em relação ao raios X, além de apresentar maior resolução - a análise BSE tem resolução entre 0,1 μm e 0,2 μm , enquanto na imagem gerada por raios X a resolução está entre 2 μm e 5 μm . A análise de imagens por BSE faz-se útil quando as fases constituintes apresentam tons de cinza bem distintos, enquanto as análises por raios X são de particular interesse para distinguir fases que possuem sobreposição de tons de cinza, mas composições químicas diferentes (p. ex magnetita e calcopirita).

Segundo Petruk (1989), os procedimentos de análise de imagens iniciam-se pela aquisição da imagem, seguido do tratamento da imagem, identificação dos minerais, segmentação das fases, desaglomeração das partículas (no caso em que é necessário determinações do grau de liberação) e por fim a manipulação dos dados e interpretação dos resultados. Os resultados possibilitam a determinação da distribuição de tamanho de partículas e forma das fases de interesse, composição mineralógica da amostra, grau de liberação do mineral de interesse e da ganga, detalhes das associações de cada mineral em partículas mistas binárias ou ternárias, distribuição dos elementos de interesse nos minerais, dentre outras características.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

As atividades descritas a seguir foram realizadas entre os meses de junho e outubro no LCT- Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP.

4.1 Homogeneização e quarteamento das amostras

A homogeneização e quarteamento das amostras têm por finalidade a obtenção de alíquotas representativas para as diversas análises aumentando assim a qualidade e confiabilidade dos resultados obtidos.

Primeiramente foi realizada a identificação de cada amostra, sendo que estas já foram encaminhadas pela Samarco Mineração S.A. nomeadas como 6, 7 e 8. Após a identificação as amostras passaram pelo processo de secagem em estufa à temperatura de 80° por 24 horas.

Para a realização do quarteamento (amostragem das alíquotas), foi utilizado o amostrador tipo Jones, que consiste em um equipamento manual que tem por finalidade a divisão das amostras em duas partes de forma o mais homogênea possível até que se atinja a alíquota desejada. Como os diversos tipos de análises propostos neste estudo necessitam de alíquotas de pesos diferenciados, o quarteamento foi realizado diversas vezes em cada amostra até que se atingisse o peso ideal para cada análise.

4.2 Análises granulométricas

4.2.1 Peneiramento a úmido

Foram utilizadas peneiras com malhas de sete aberturas distintas para a realização do peneiramento a úmido das três amostras de *pellet feed*, que compreendem: abertura 0,210 mm (malha 65), abertura 0,150 mm (malha 100), abertura 0,105 mm (malha 150), abertura 0,074 mm (malha 200), abertura 0,053 mm (malha 270), abertura 0,037 mm (malha 400) e abertura 0,020 mm (malha 635).

O peneiramento das amostras foi realizado iniciando-se pela peneira de maior abertura de forma que todo o material passante nesta etapa seja peneirado novamente pela peneira seguinte de abertura imediatamente inferior, sendo que a atividade continua desta forma até que toda a massa tenha passado por todas as peneiras.

Por se tratar de um material muito fino, o peneiramento a úmido apresentou certa dificuldade, sendo que para minimizar tal dificuldade e otimizar o processo (tempo e

qualidade), foi realizado inicialmente um corte em toda a massa da alíquota de cada amostra na peneira de menor abertura (0,020 mm).

Após o peneiramento as frações obtidas foram identificadas, secas em estufa à temperatura de 80° por 24 horas e pesadas em balança de precisão de 0,01 grama. As frações acima de 0,053 mm (retidas na malha 270) foram compostas para a realização das análises devido a pequena representatividade em relação à amostra.

4.2.2 Granulometria por difração laser

A análise de determinação do tamanho de partículas foi efetuada em equipamento da marca Malvern, modelo Mastersizer 2000 Ver. 5.54 (n° série MAL 1024504), o qual permite realizar medidas de tamanho de partículas no intervalo de 0,02 μm a 2,0 mm obtendo-se distribuição em volume, conceito distinto do empregado na análises por peneiramento (duas menores dimensões de cada partícula).

As análises foram efetuadas com dispersão das amostras em água deionizada empregando hexametáfosfato de sódio como agente para melhor dispersão das partículas, seguindo preceitos da norma ISO 13320-2009.

4.2.3 Granulometria por análise de imagem dinâmica

As amostras tal qual também foram submetidas à análises através de sistema de análise de imagens dinâmicas, realizadas em equipamento modelo Camsizer XT, marca Retcsch (1 μm a 3 mm). A análise granulométrica através de sistema de análises de imagens possibilita a obtenção dos dados de distribuição granulométrica, contudo também fornece informações relativas as morfologia (tamanho, esfericidade e relação de aspecto dos grãos) e área de superfície específica aparente.

4.3 Análises químicas

As análises químicas compreendem determinações de Fe, SiO₂, Al₂O₃ e P₂O₅ pela técnica de espectrometria por fluorescência de raios X em espectrômetro Axios da marca PANalytical a partir de perolas fundidas com tetraborato de lítio. Perda ao fogo corresponde a perda em massa pela amostra colocada em mufla a temperatura de 1050° C por uma hora.

4.4 Difração de raios X

Análises por difratometria de raios X foram efetuadas através do método do pó, mediante o emprego de difratômetro de raios X, marca PANalytical, modelo X'Pert PRO com detector X'Celerator. A identificação das fases cristalinas foi obtida por comparação do

difratograma da amostra com os bancos de dados PDF2 do ICDD - International Centre for Diffraction Data (2003) e PAN-ICSD – PANalytical Inorganic Crystal Structure Database (2007).

4.5 Picnometria de hélio

A picnometria de gás hélio é utilizada para a determinação do verdadeiro volume de um material sólido, mesmo que poroso, e, conseqüentemente a densidade deste material.

A análise consiste na determinação do volume através da variação de pressão de gás em uma câmara de volume conhecido (Webb & Orr, 1997). Para o cálculo de densidade do material, que é automaticamente calculado pelo equipamento após a análise volumétrica, é necessário informar inicialmente a massa da amostra, dado este obtido através de balança de precisão de 0,01 grama.

As análises foram realizadas duas vezes em cada amostra tal qual em equipamento Accupyc 1340, da Micromeritics.

4.6 Porosimetria de mercúrio

As análises através de porosimetria de mercúrio foram realizadas com o intuito de se determinar a porosidade do material, característica esta que muito influencia o comportamento do concentrado nos processos metalúrgicos em alto-fornos.

A análise consiste na determinação da porosidade por porosimetria com intrusão de mercúrio (Webb, 2001), realizada em equipamento AutoPore IV 9520, da Micromeritics, para as frações +0,053, +0,037 e +0,020 mm.

Para a análise, o equipamento primeiramente cria a situação de vácuo na amostra inserida. Ao atingir o vácuo o aparelho inicia então a obtenção dos dados necessários para a análise através do aumento progressivo da pressão, que faz com que o mercúrio penetre em poros sucessivamente menores das partículas, e, para cada valor de pressão, o volume de mercúrio inserido é registrado. Os dados obtidos são tratados na forma de uma curva de onde pode-se obter informações sobre a porosidade, densidade aparente e densidade envelope do material.

Análises das amostras tal qual apresentaram dificuldades por decorrência da elevada presença de finos, de forma que as determinações ficaram restritas a fração retida em 0,020 mm.

4.7 Confeção de seções polidas

As seções polidas foram confeccionadas para as observações em microscopia óptica e eletrônica, sendo que no total foram confeccionadas doze seções, uma para cada fração granulométrica.

Visando aumentar a representatividade das alíquotas estudadas, o material foi amostrado em amostrador rotativo (Microscal MSR) e distribuído na forma de maneira aleatória. Para a retirada de eventuais bolhas de ar, as amostras foram submetidas a pressão de 3 bar durante 3 minutos repetindo-se o processo por 4 vezes. Por fim, foram realizados processos de desbaste e polimento até apresentarem superfície plana e polida.

Devido à granulometria muito fina do material, foram adicionadas esferas de carbono nas frações mais finas (-0,020 mm, +0,020 mm e +0,037 mm) tendo por finalidade a separação das partículas para análise ao MEV, facilitando o posterior processamento de desaglomeração (individualização de partículas).

4.8 Microscópio óptica por luz refletida

As seções polidas das amostras das frações granulométricas foram submetidas à estudos ao microscópio óptico por luz refletida.

O microscópio óptico por luz refletida permite a observação de aspectos morfológicos de materiais que se apresentam opacos ao microscópio por luz transmitida. No caso do minério de ferro, tal ferramenta possibilita a diferenciação de minerais como magnetita, hematita e goethita, cuja identificação em microscópio de luz transmitida não é possível, além de permitir observação de aspectos texturais, de alteração, dentre outros.

Os estudos foram realizados em microscópio óptico de luz refletida com objetivas de aumento de 20x e 50x, modelo DMR-X, marca Leica. As fotomicrografias foram adquiridas através de câmera digital DP-280, marca Leica, acoplada ao microscópio.

4.9 Microscópio eletrônico de varredura e MLA

Para a realização das análises ao microscópio eletrônico de varredura, foi utilizado o microscópio Quanta 600 FEG, equipado com sistema de microanálise por EDS Quantax 4030 (tecnologia SDD, *silicon drift detector*), marca Bruker e sistema de análise de imagens MLA.

Para a realização automatizada das análises faz-se necessário o estabelecimento de uma rotina de configuração do MLA para coleta e tratamento das imagens geradas, onde são configuradas as condições de aquisição do microscópio e do MLA, como brilho e

contraste que influenciam na identificação & discriminação de fases por BSE, de modo que se forme um padrão a ser seguido no projeto.

Fandrich *et al.* 2007 descreve procedimentos para a identificação das fases mineralógicas através de análise por raios X realizada através de um banco de dados de padrões minerais, que deve ser elaborado antes de iniciar uma rotina automatizada de análise. Para a elaboração do banco de dados faz-se necessária a coleta de uma série de espectros de raios X de cada espécie mineral identificada.

No projeto foi empregado o modo de análises XBSE onde para cada região de uma partícula onde há variação de tom de cinza é realizada apenas uma coleta de espectro de raios X por nível de cinza na imagem de BSE - elétrons retroespalhados. A tentativa de distinção entre hematita e magnetita, que apresentam número atômico e composições bastante próximas, foi efetuada mediante ampliação do sinal de contraste das imagens e discriminação por tons de cinza (devido a ruídos anômalos no sinal da imagem esta discriminação foi prejudicada - defeito do equipamento quando da coleta das imagens).

Por fim é realizada a classificação mineralógica das partículas através da comparação de espectros de raios X coletados com aqueles do banco de dados. As partículas então são classificadas de acordo com o tom de cinza e espectro de raios X por EDS, gerando uma imagem digital da seção onde cada fase é representada por uma cor. As interpretações finais são realizadas com base nestas imagens onde se podem obter informações sobre as proporções de cada fase, suas respectivas formas de associação, grau de liberação, etc.

4.10 Informações disponíveis sobre as amostras estudadas - Samarco Mineração

Os dados das amostras estudadas disponibilizados pela Samarco Mineração S.A. são apresentados no Anexo 1.

5 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

O desenvolvimento do projeto ocorreu de maneira contínua, sendo que as atividades laboratoriais iniciaram-se em junho, quando do recebimento das amostras pela Samarco Mineração S.A. As amostras foram quarteadas e preparadas com o auxílio de pesquisadores do LCT.

Foram encontradas dificuldades na realização dos ensaios de peneiramento a úmido, devido à granulometria muito fina do material, o que acarretou em maior tempo necessário do que o previsto para realização destes ensaios. A Tabela 2 demonstra o período de realização das atividades desenvolvidas neste projeto.

Tabela 2 - Cronograma das atividades realizadas no projeto.

Atividade	Mês/2011									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Elaboração do Projeto Inicial										
Revisão bibliográfica										
Amostragem										
Análise química										
Análise granulométrica										
Análise morfológica										
Análise mineralógica										
Picnometria de hélio										
Porosimetria de mercúrio										
Tratamento e análise resultados										
Relatório de progresso										
Monografia										

6 RESULTADOS OBTIDOS

6.1 Composição química das amostras

Os resultados das análises químicas obtidos das amostras tal qual são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química das amostras tal qual estudadas (% em massa)

	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
Fe	66,1	66,6	67,3
SiO ₂	1,32	0,98	1,03
Al ₂ O ₃	0,15	0,16	0,20
P	0,05	0,05	0,04
Mn	<0,10	<0,10	<0,10
TiO ₂	<0,10	<0,10	<0,10
CaO	<0,10	<0,10	0,12
MgO	<0,10	<0,10	<0,10
Na ₂ O	0,12	0,12	0,15
K ₂ O	<0,10	<0,10	<0,10
Perda ao fogo	4,73	3,75	3,03

A partir dos dados obtidos, observa-se que Fe é o elemento predominante, alcançando concentrações de 67,3% na amostra 8. Também foram identificadas concentrações de SiO₂ de até 1,32% na amostra 6. Outros elementos e óxidos, como Al₂O₃, Na₂O e P ocorrem como traços.

A amostra 06 apresentou a maior perda ao fogo, enquanto a amostra 08, a menor.

6.2 Análises granulométricas

Para a realização das análises granulométricas foram utilizadas as técnicas de peneiramento manual a úmido, análise granulométrica por espalhamento de luz laser de baixo ângulo (Malvern) e granulometria através de análise de imagens (Camsizer).

Os dados obtidos na realização dos ensaios granulométricos por peneiramento a úmido na forma de curvas acumuladas no passante são apresentados na Figura 6 e detalhados no Anexo 2. Os resultados demonstraram que a amostra 8 apresenta granulometria ligeiramente maior que as demais amostras, fato também comprovado pelas demais técnicas empregadas.

Comparação entre resultados de distribuição obtidos a partir das técnicas empregadas, cada qual medindo um diâmetro distinto, é apresentado na Tabela 4 e na Figura 7.

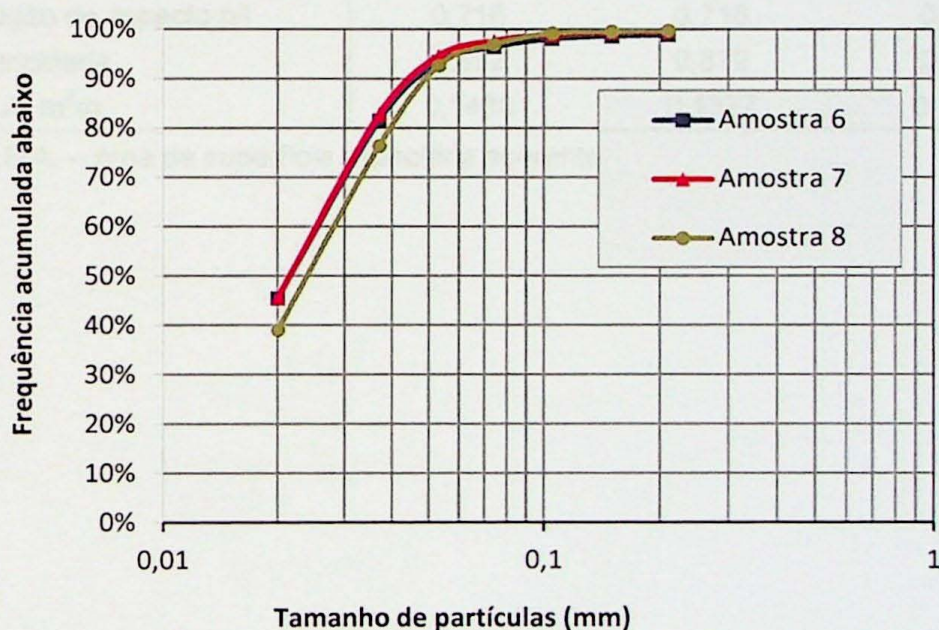


Figura 6 - Resultados de análises granulométricas por peneiramento a úmido – distribuição acumulada abaixo (% em massa).

Tabela 4 - Comparação entres resultados de distribuição obtidos a partir das técnicas de espalhamento luz laser (Malvern) e análise de imagens (Camsizer)

Propriedade	Amostra		
	6	7	8
MALVERN			
d ₉₀ Malvern (μm)	60,0	58,7	61,4
d ₅₀ Malvern (μm)	22,6	20,9	26,0
d ₁₀ Malvern (μm)	2,5	3,8	4,0
D _[3,2] (μm)	5,6	8,2	8,4
D _[4,3] (μm)	27,8	27,5	30,1
A.S.A. m ² /g	0,22	0,15	0,15
CAMSIZER			
d90 Camsizer Xmin (μm)	36,9	38,6	49,9
d50 Camsizer Xmin (μm)	14,1	14,2	18
d10 Camsizer Xmin (μm)	4,1	4,1	4,6
d90 Camsizer X_area (μm)	41,5	43,7	55,3
d50 Camsizer X_area (μm)	16,2	16,2	20,1
d10 Camsizer X_area (μm)	4,7	4,8	5,1
Relação de aspecto b/l	0,716	0,716	0,728
Esfericidade	0,882	0,879	0,889
A.S.A. m ² /g	0,1430	0,1377	0,1168

Nota: A.S.A. – área de superfície específica aparente

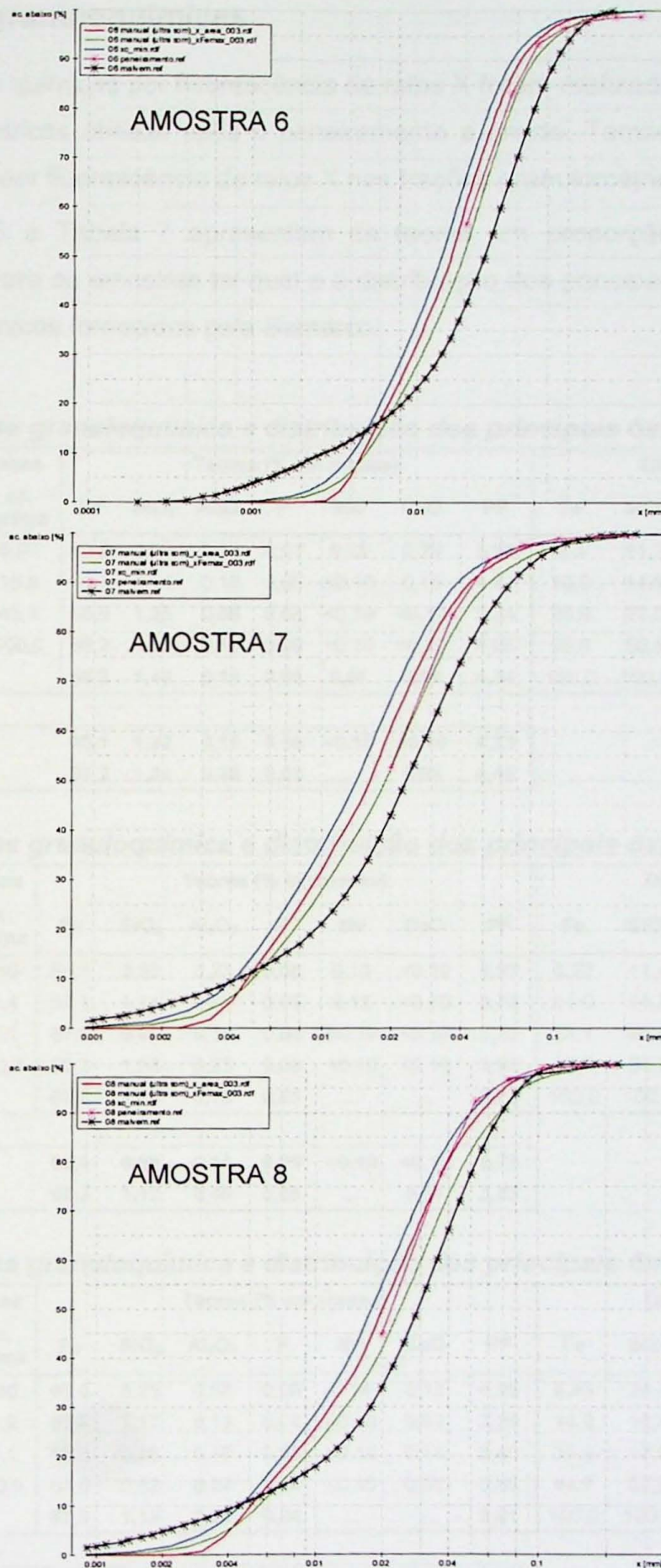


Figura 7 - Comparativo entre resultados de análises granulométricas por distintas técnicas

6.3 Análises granulométricas

As análises químicas por fluorescência de raios X foram realizadas nas amostras das frações granulométricas obtidas após o peneiramento a úmido. Também foram realizadas análises químicas por fluorescência de raios X nas frações granulométricas.

A Tabela 5 a Tabela 7 apresentam os teores em proporção para cada fração granulométrica e para as amostras tal qual e a distribuição dos principais óxidos juntamente com os dados químicos fornecidos pela Samarco.

Tabela 5 - Análise granulométrica e distribuição dos principais óxidos da Amostra 6

Fração	% em massa		Teores (% em massa)							Distribuição (%)				
	retida	ac. acima	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	PF	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	PF
+0,053 mm	6,57	6,57	63,5	2,57	0,34	0,07	0,15	0,29	5,65	6,3	11,7	17,4	7,9	8,6
+0,037 mm	10,1	16,6	65,7	2,14	0,16	0,06	<0,10	0,16	4,61	10,0	14,9	12,6	10,4	10,7
+0,020 mm	26,6	43,3	66,9	1,25	0,06	0,05	<0,10	<0,10	3,24	26,9	23,0	12,5	22,9	19,9
-0,020 mm	56,7	100,0	66,3	1,29	0,13	0,06	<0,10	<0,10	4,65	56,8	50,5	57,5	58,7	60,8
Total	100,0		66,2	1,45	0,13	0,06	0,01	0,04	4,34	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Total LCT - tal qual	66,1	1,32	0,15	0,05	<0,10	<0,10	4,73
Total Samarco	67,2	1,34	0,35	0,06	...	0,03	4,45

Tabela 6 - Análise granulométrica e distribuição dos principais óxidos da Amostra 7

Fração	% em massa		Teores (% em massa)							Distribuição (%)				
	retida	ac. acima	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	PF	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	PF
+0,053 mm	5,40	5,40	64,8	2,33	0,23	0,08	0,13	<0,10	3,97	5,22	11,4	6,68	8,90	5,77
+0,037 mm	11,0	16,4	67,1	1,14	0,08	0,05	0,12	<0,10	3,73	11,0	11,3	4,7	11,3	11,0
+0,020 mm	30,7	47,1	67,9	0,92	0,14	0,04	<0,10	<0,10	3,23	31,1	25,6	23,1	25,3	26,7
-0,020 mm	52,9	100,0	66,7	1,08	0,23	0,05	<0,10	<0,10	3,97	52,7	51,7	65,5	54,5	56,5
Total	100,0		67,0	1,10	0,19	0,05	...	...	3,72	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Total LCT - tal qual	66,6	0,98	0,16	0,05	<0,10	<0,10	3,75
Total Samarco	67,2	1,12	0,40	0,05	...	0,11	3,83

Tabela 7 - Análise granulométrica e distribuição dos principais óxidos da Amostra 8

Fração	% em massa		Teores (% em massa)							Distribuição (%)				
	retida	ac. acima	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	PF	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	PF
+0,053 mm	7,40	7,40	63,0	5,25	0,88	0,06	0,14	0,13	4,93	6,93	34,7	28,9	11,6	12,1
+0,037 mm	14,8	22,2	67,2	1,17	0,13	0,04	<0,10	0,43	3,25	14,8	15,5	8,6	15,5	16,0
+0,020 mm	32,9	55,1	68,6	0,58	0,10	0,03	<0,10	0,14	2,40	33,6	17,0	14,6	25,8	26,2
-0,020 mm	44,9	100,0	67,0	0,82	0,24	0,04	<0,10	0,55	3,06	44,7	32,9	47,9	47,0	45,7
Total	100,0		67,3	1,12	0,23	0,04	...	...	3,01	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Total LCT - tal qual	67,3	1,03	0,20	0,04	<0,10	0,12	3,03
Total Samarco	67,2	1,17	0,36	0,04	...	0,09	2,89

Todas as amostras analisadas apresentam teores de Fe predominantes em todas as frações granulométricas (maior que 63%) sendo que os maiores teores foram identificados na fração +0,020 mm. Sílica apresenta teores entre 1,0 e 2,0%, principalmente nas frações granulométricas mais grossas, sendo que foi identificado teor de até 5,25% na fração acima de 0,053 mm da Amostra 8. Nesta mesma fração também ocorre o maior teor de Al_2O_3 (0,88%). Também ocorrem, em menores proporções (menor que 0,5%), CaO, P e Mn. Perda ao fogo apresenta-se entre 2,40 (fração +0,020 mm da Amostra 8) a 5,65 (fração +0,053 mm da Amostra 6).

A comparação dos resultados entre as amostras demonstrou os maiores teores de Fe na Amostra 8, sendo que os menores teores ocorrem na Amostra 6. De maneira geral, é possível observar que os teores de Fe aumentam gradativamente nas três amostras na medida em que as frações granulométricas apresentem-se mais finas até a fração retida de 0,020mm, sendo que sua fração passante apresenta teor ligeiramente menor que as demais. Os resultados de perda ao fogo mostram comportamento inverso.

Em relação aos outros elementos analisados, os maiores teores de Al_2O_3 , Mn e P foram identificados nas frações de maior granulometria das três amostras e CaO foi observado em maior proporção na Amostra 8. Também foram identificadas pequenas diferenças nas análises de perda ao fogo.

6.4 Análises de densidade real, porosimetria e área de superfície específica aparente

Os resultados de densidade real, porosimetria e área de superfície específica aparente são apresentados na Tabela 8, juntamente com os dados fornecidos pela Samarco Mineração S.A (peso específico e área de superfície específica aparente por Blaine).

Tabela 8 – Peso específico, porosidade e área de superfície específica

	AMOSTRA 06	AMOSTRA 07	AMOSTRA 08
Peso específico (g/cm^3) LCT	4,681	4,804	4,864
Peso específico (g/cm^3) Samarco	4,703	4,778	4,946
Porosimetria de mercúrio			
Diâmetro médio de poros (vol - μm)	4,09	6,00	5,81
Porosidade (%)	22,3	23,2	18,2
Superfície específica (m^2/g)			
Camsizer	0,143	0,138	0,117
Malvern	0,22	0,15	0,15
Blaine (Samarco)	0,208	0,187	0,152

6.5 Análises mineralógicas

Os resultados obtidos nas análises mineralógicas por difração de raios X são apresentados na Figura 8 e no Anexo 3.

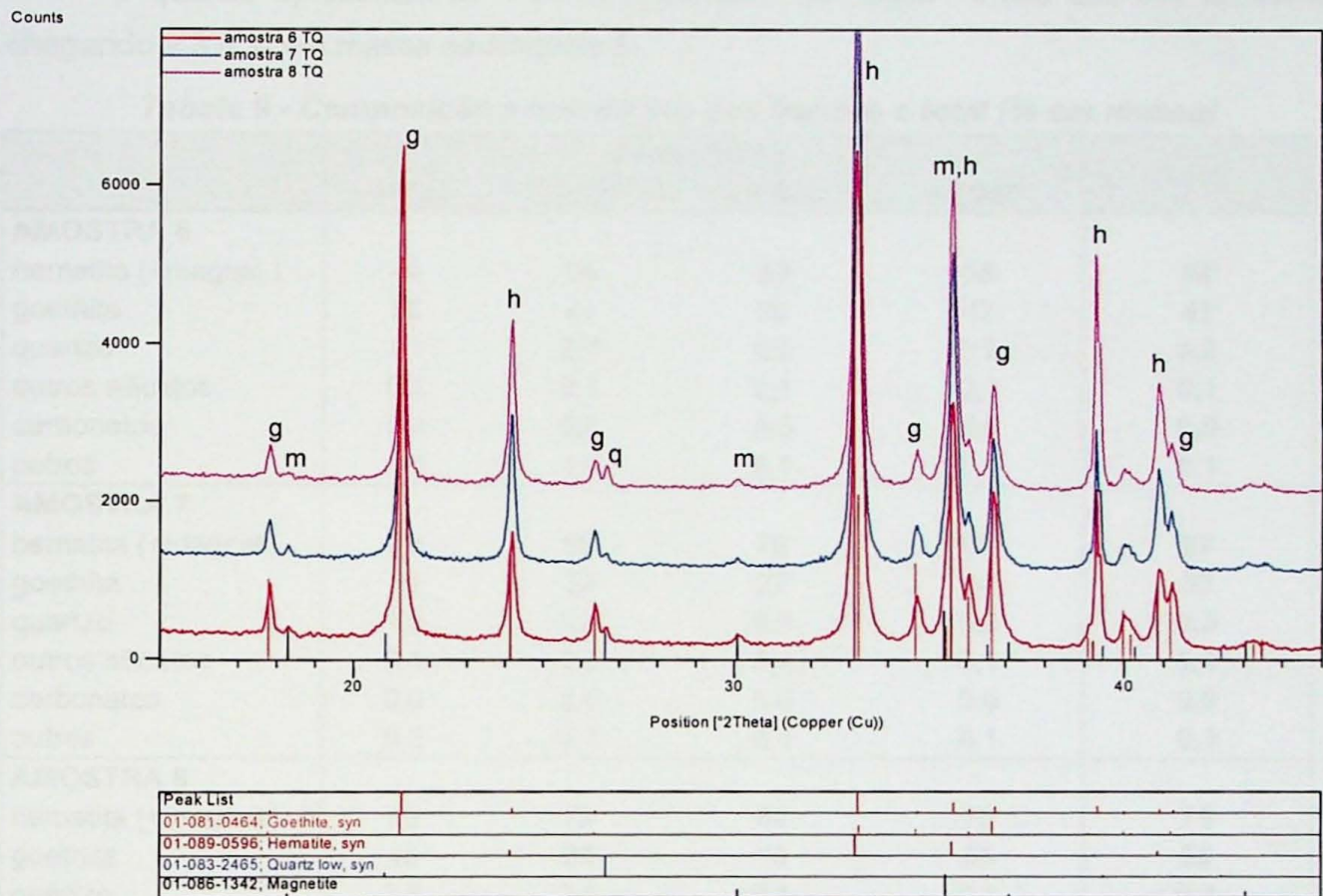


Figura 8 - Comparação entre os difratogramas das amostras tal qual analisadas.

Os resultados obtidos demonstram a ocorrência de hematita (h), goethita (g), magnetita (m) e quartzo (q) em diferentes proporções nas três amostras analisadas. É possível observar, principalmente, a maior quantidade de goethita na Amostra 6. A Amostra 8, por sua vez, apresenta maior quantidade de hematita. Magnetita e quartzo ocorrem em menores proporções.

Análises mineralógicas quantitativas foram efetuadas por fração granulométrica através do sistema MLA estando os resultados apresentados na Tabela 9. Para as análises mineralógicas realizadas por MLA, foi considerada a fase hematita (+magnetita) devido às limitações do sistema em diferenciar eficientemente estes dois minerais.

Hematita (+magnetita) e goethita perfazem mais de 95% em massa. As maiores proporções de hematita (+magnetita) foram observadas na Amostra 8 sendo que as menores proporções destes minerais ocorrem na Amostra 6.

As proporções de hematita (+magn.) crescem na medida em que a granulometria diminui, à exceção da fração passante de 0,020 mm, que apresenta teores menores que a fração retida de 0,020 mm; as proporções de goethita apresentam comportamento inverso.

O quartzo apresentou as maiores proporções na fração +0,053 das três amostras, chegando a 3,8 % em massa na Amostra 8.

Tabela 9 - Composição mineralógica das frações e total (% em massa)

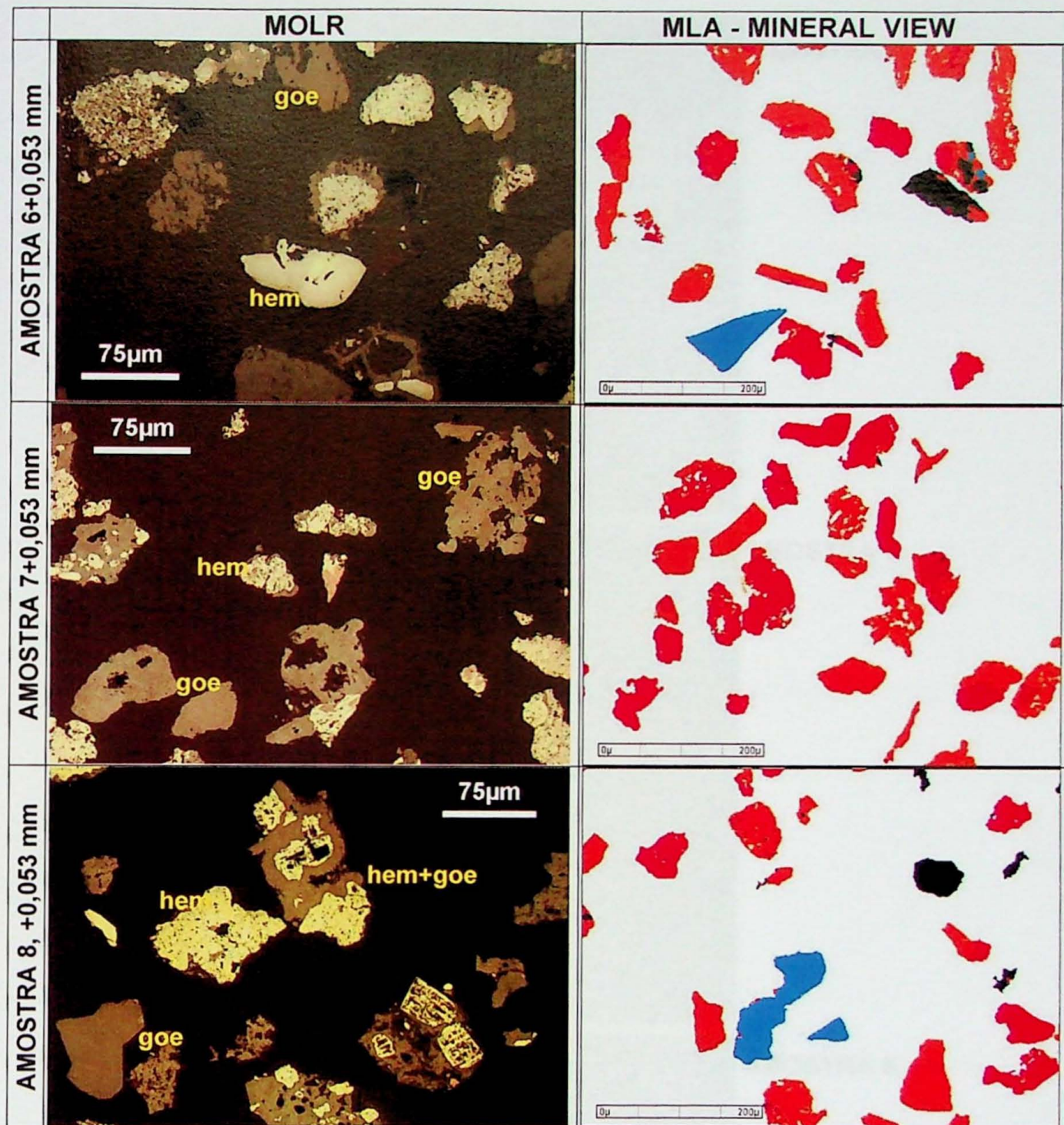
	Fração (mm)				Total
	+0,053	+0,037	+0,020	-0,020	
AMOSTRA 6					
hematita (+magnet.)	44	58	63	58	58
goethita	55	41	36	42	41
quartzo	1,1	0,4	0,2	0,2	0,3
outros silicatos	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
carbonatos	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
outros	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1
AMOSTRA 7					
hematita (+magnet.)	49	68	72	65	67
goethita	50	32	27	34	33
quartzo	1,0	0,4	0,3	0,2	0,3
outros silicatos	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
carbonatos	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
outros	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
AMOSTRA 8					
hematita (+magnet.)	50	73	80	75	75
goethita	45	26	19	25	25
quartzo	3,8	0,1	0,1	0,1	0,4
outros silicatos	0,7	0,2	0,0	0,1	0,1
carbonatos	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
outros	0,2	0,1	0,1	0,0	0,1

Outros minerais: gibbsita-Fe, fluorita, ilmenita, TiO₂ e óxidos de Mn.

6.5.1 Associações minerais

A Figura 9 apresenta as fotomicrografias das principais associações minerais encontradas obtidas através de microscopia óptica por luz refletida e imagens digitais pelo sistema MLA. O Anexo 3 apresenta outras fotomicrografias por microscopia óptica com nicóis paralelos e cruzados das frações granulométricas de todas as amostras estudadas.

A Figura 10 e o Anexo 4 apresentam imagens BSE obtidas ao MEV das associações minerais presentes nas amostras. Através destas imagens é possível identificar diversos aspetos e texturas de partículas de hematita e goethita.

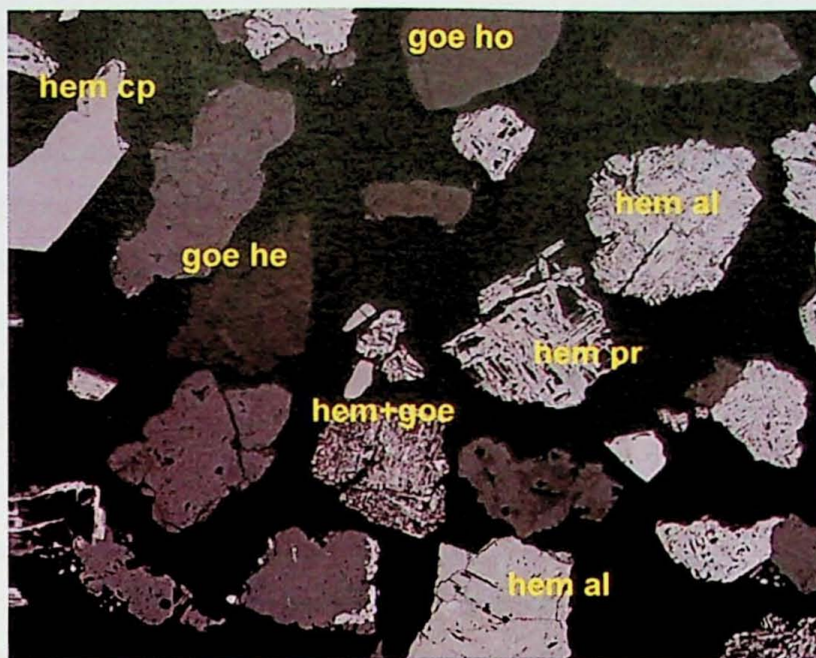


Legenda MLA:

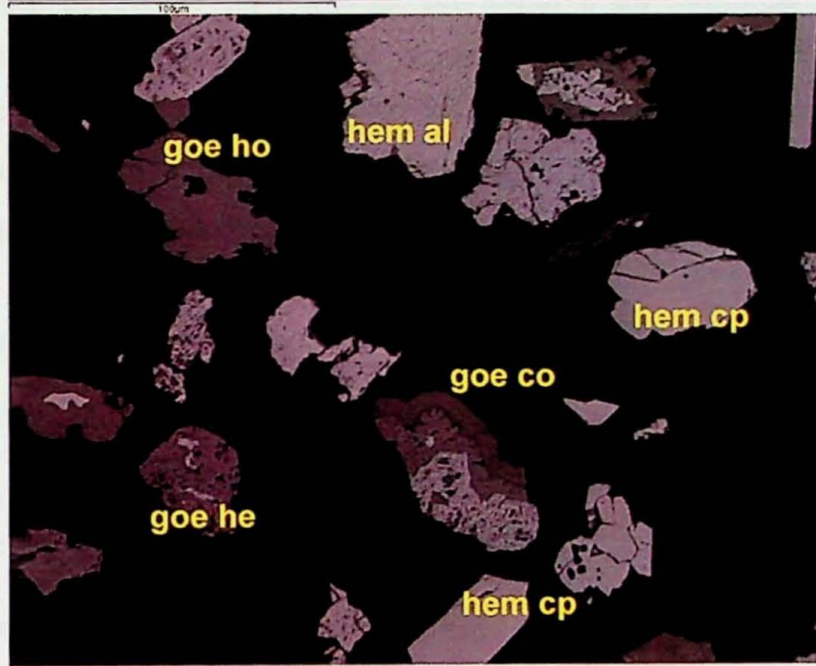


Figura 9 - Associações minerais em microscopia óptica e sistema MLA

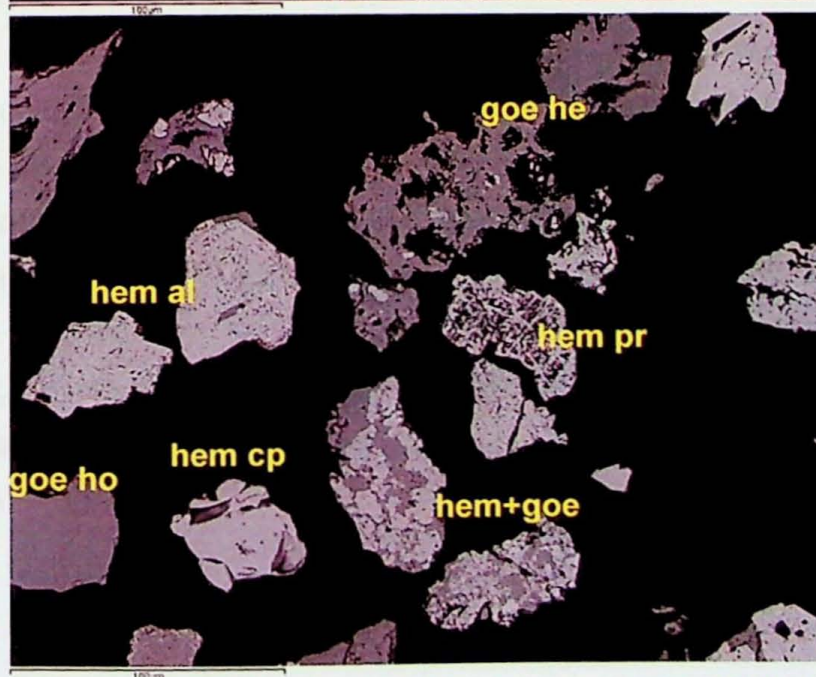
Hematita ocorre na forma de hematita compacta, alterada, porosa ou associada à goethita. A primeira trata-se de partículas compactas e homogêneas, por vezes alongadas (especularita). A hematita alterada apresenta diversos graus de alteração além de certa porosidade e microinclusões de sílica. A hematita porosa apresenta texturas reliquiares na forma de lamelas referentes a anteriores processos de martitização além de microinclusões de sílica e intercrescimento de goethita, conferindo às partículas alta porosidade.



AMOSTRA 6



AMOSTRA 7



AMOSTRA 8

LEGENDA

- hem cp: hematita compacta
- hem al: hematita alterada
- hem pr: hematita porosa
- goe ho: goethita homogênea
- goe he: goethita heterogênea
- hem+goe: hematita+goethita

Figura 10 - Associações minerais em MEV - imagens de BSE

Hematita associada à goethita é relativamente comum, onde podemos observar em uma mesma partícula porções compostas por goethita e porções compostas por hematita.

Em relação à goethita, foi verificada, em menor proporção, a existência de goethita homogênea, sem alteração composicional. Outra forma de goethita, a heterogênea, apresenta diferentes níveis de alteração composicional, gerando diferentes tons de cinza nas imagens além de diferentes texturas, como textura porosa, coloforme, etc. A goethita heterogênea em geral apresenta grande quantidade de microinclusões de sílica (pontos escuros nas partículas).

A Tabela 10 apresenta valores médios de resultados das microanálises por EDS realizadas em áreas selecionadas das fases minerais portadoras de minerais de ferro (incluindo eventuais microinclusões), onde pode-se observar que os maiores proporções de ferro nas partículas de hematita compacta e as menores proporções nas partículas de goethita. Goethita apresenta-se como principal mineral com sílica associada, alumínio e fósforo; sílica também ocorre em até 1% em massa nas partículas de hematita, hematita compacta e hematita associada à goethita.

Tabela 10 - Resultados de microanálise por EDS das fases de minerais portadores de ferro (% em massa)

	Goethita				Hematita				Hm compacta				Hemat+Goet			
	AM6	AM7	AM8	Média	AM6	AM7	AM8	Média	AM6	AM7	AM8	Média	AM6	AM7	AM8	Média
Fe	58,7	59,1	58,9	58,9	69,4	69,4	69,4	69,4	72,6	71,8	71,6	72,0	64,5	65,2	64,8	64,8
SiO ₂	1,85	2,05	2,05	1,98	0,46	0,33	0,50	0,43	0,68	0,27	0,31	0,42	0,28	0,48	0,51	0,43
Al ₂ O ₃	0,74	0,35	0,41	0,50	0,09	0,09	0,03	0,07	0,10	0,04	0,02	0,05	0,00	0,24	0,06	0,10
P ₂ O ₅	0,28	0,18	0,46	0,31	0,02	0,01	0,06	0,03	0,00	0,04	0,00	0,01	0,24	0,05	0,05	0,11

Nota: média de análises semiquantitativas em áreas selecionadas – valores não normalizados

As associações de fases minerais são classificadas em: 1) partículas livres, quando estas contem mais de 95% do mineral de interesse; 2) partículas mistas binárias, quando ocorre mineral de interesse e outro mineral e 3) partículas mistas ternárias (ou >>), quando ocorrem mineral de interesse e duas ou mais fases de outros minerais em uma mesma partícula. A Figura 11 apresenta os gráficos de associações minerais de ferro e silicatos e a Figura 12 o espectro de liberação de minerais de ferro e silicatos, baseado em medidas em área (2D) realizadas através do sistema MLA. No Anexo 5 apresenta os dados de associações minerais obtidos por MLA e o Anexo 6 apresenta as fotomicrografias por MEV & MLA.

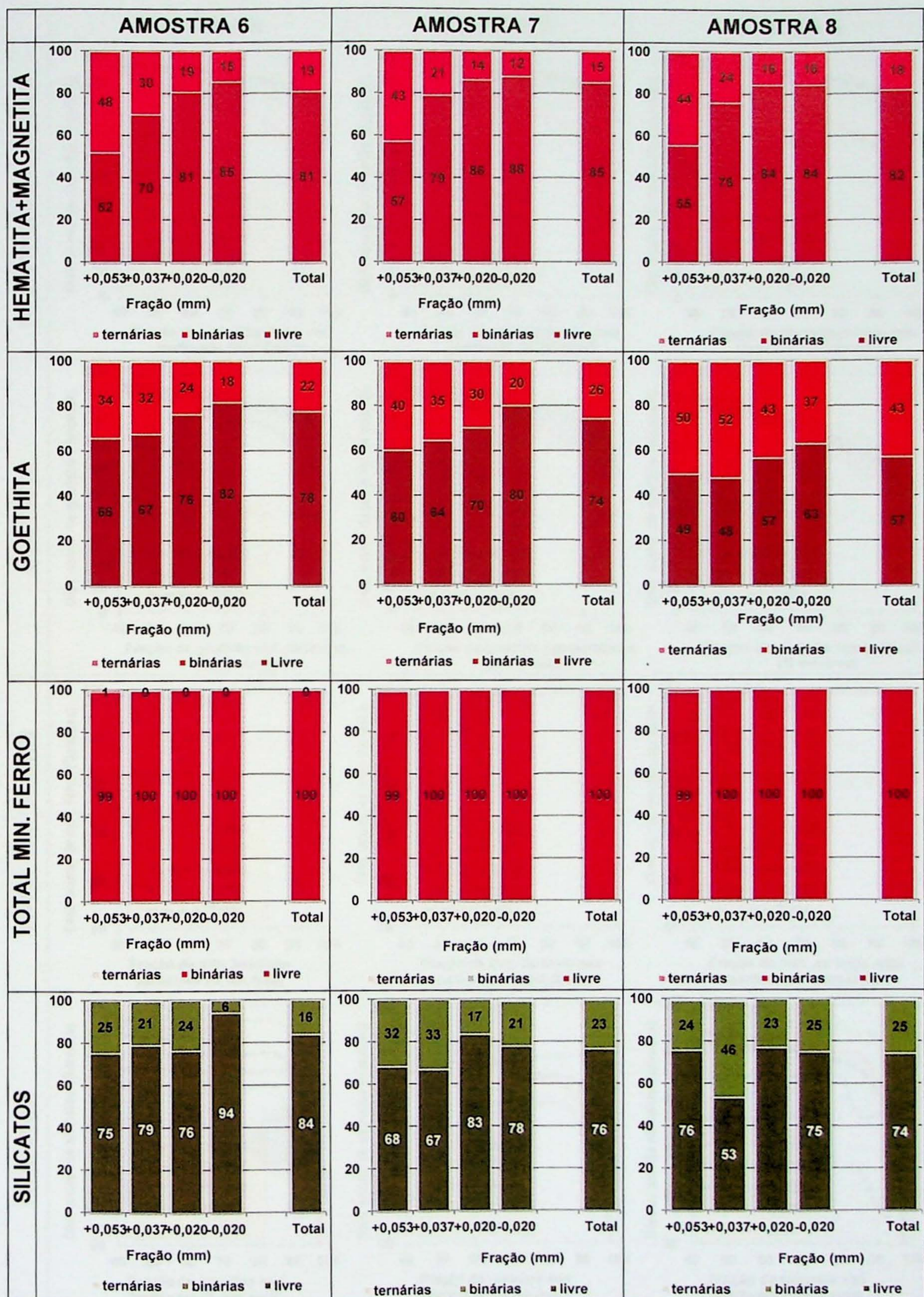
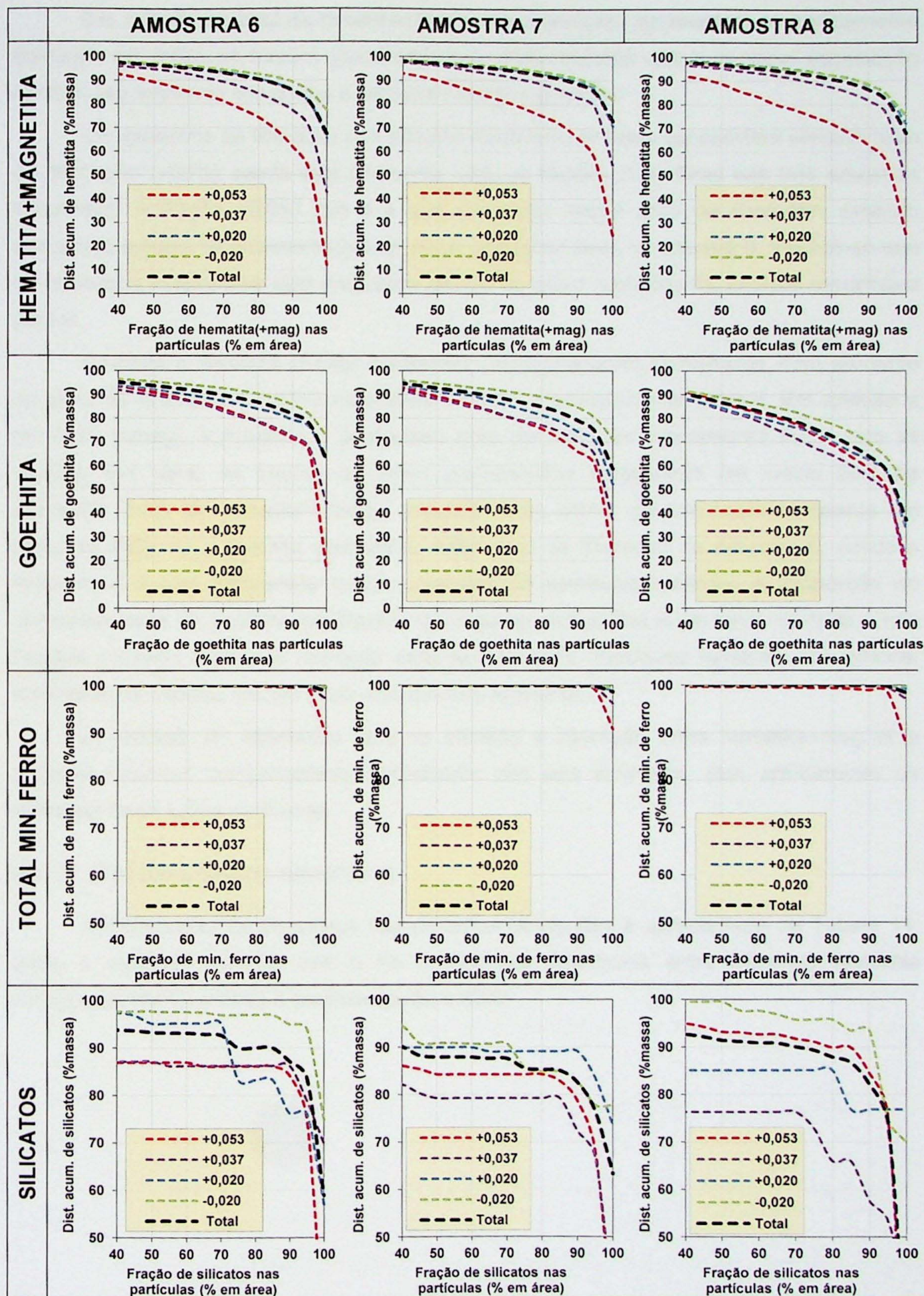


Figura 11 - Associações dos minerais de ferro e silicatos



**Figura 12 - Espectro de liberação de minerais de ferro e silicatos
(medidas em área - 2D)**

Em relação ao total de minerais de ferro, as partículas apresentam-se praticamente liberadas em todas as frações granulométricas, demonstrando que a principal associação mineral das amostras estudadas é hematita (+mag) + goethita.

Os espectros de liberação dos silicatos mostram que estes apresentam elevado grau de liberação (>80%) sendo este crescente para as frações mais finas nas três amostras estudadas. A fração +0,053 mm é a que apresenta menor grau de liberação, estando associada a estas os maiores teores de sílica, particularmente na amostra 8. Verifica-se que os espectros mostram-se algo irregulares devido ao baixo conteúdo de silicatos (estatística pobre).

Goethita e hematita (+mag) apresentam comportamento semelhante, com aumento do grau de liberação gradativo na medida em que a granulometria diminui. Em relação à hematita (+mag), a Amostra 7 apresentou grau de liberação ligeiramente maior que as demais. Em geral, as frações de maior granulometria apresentam em média 50% de partículas livres de hematita (+mag), enquanto a de menor granulometria apresenta em torno de 85%. Já a goethita apresentou maior grau de liberação na Amostra 6, sendo a Amostra 8 a que apresentou maior proporção de partículas binárias. A proporção de partículas livres de goethita nas frações de maior granulometria é em torno de 60% e nas frações menores o grau de liberação varia de 63 a 82%. Partículas ternárias são minoria, ocorrendo no máximo 1% em cada uma das três amostras.

A exemplo do observado para os silicatos a liberação entre hematita+magnet e goethita mostram comportamento semelhante nas três amostras, com crescimento da liberação nas frações mais finas.

6.5.2 Distribuição dos elementos

A distribuição de elementos nas amostras analisadas é apresentada na Tabela 11, onde é possível verificar que o Fe encontra-se distribuído entre minerais hematita +magnetita (de 62 a 78%) e goethita (de 22 a 38%).

Tabela 11 - Distribuição dos elementos nas amostras estudadas

	Mineral	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	P ₂ O ₅ (%)
AMOSTRA 6	hematita (mag)	62	17	8	...
	goethita	38	59	86	100
	quartzo	...	22	...	...
	outros silicatos	...	3	5	...
	carbonatos	...	...	...	...
	outros	...	...	1	...
AMOSTRA 7	hematita (mag)	70	21	11	...
	goethita	30	51	82	100
	quartzo	...	25	...	...
	outros silicatos	...	3	6	...
	outros	...	...	1	...
AMOSTRA 8	hematita (mag)	78	24	14	...
	goethita	22	40	74	100
	quartzo	...	31	...	...
	outros silicatos	...	4	12	...
	outros	...	...	1	...

Outros: calcita, dolomita, gibbsita-Fe, fluorita, ilmenita, TiO₂ e óxidos de Mn.

A Amostra 8 apresenta a maior proporção de Fe na fase mineral hematita+magnetita, enquanto a Amostra 6 apresenta a menor. Sílica esta presente em minerais de ferro (microinclusões), quartzo e outros silicatos, contudo encontra-se principalmente associada à goethita (de 40 a 59%). Na hematita+magnetita a sílica considerada refere-se a pequenas microinclusões de quartzo.

O Al₂O₃ associa-se essencialmente à goethita, chegando a 86%, ocorrendo em menores proporções na hematita+magnetita (microinclusões) e outros silicatos. O P₂O₅, por sua vez, esta associado à goethita.

6.6 Relação entre propriedades da amostra e pelotização

Os dados das propriedades das amostras utilizados para a avaliação de correlações com a pelotização encontram-se na Tabela 12 e os gráficos que apresentaram relação entre as características da amostras e a dados de pelotização fornecidos pela Samarco são apresentados na Figura 13.

Os resultados obtidos no Malvern não foram considerados, pois não apresentaram-se coerentes.

Foi verificada relação direta entre o conteúdo de goethita e os valores de área de superfície específica aparente (A.S.A.) obtidos tanto via Camsizer e como Blaine.

O gráfico que relaciona porosidade com a presença de goethita não mostra uma clara relação, porém apresenta uma tendência de aumento da porosidade com aumento do conteúdo de goethita.

Tabela 12 - Propriedades das amostras e comportamento na pelotização

		AMOSTRA		
		AM 6	AM 7	AM 8
CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS				
Goethita (% massa)		41,0	33,0	25,0
Porosidade +0,020 mm (%)		22,9	23,2	18,2
A.S.A. (m ² /g)	Camsizer	0,143	0,138	0,117
	Malvern	0,220	0,150	0,150
	Blaine	0,208	0,187	0,152
PROPRIEDADES NA PELOTIZAÇÃO				
Pelotamento	Resiliência (nº quedas/pelota)	6,7	4,9	3,8
	Compressão pelota úmida (gf/pelota)	2496	2244	1979
	Compressão Pelota Seca (gf/pelota)	12111	9981	8693
Resistência pelota queimada	Compressão (kgf/pel)	264	267	318
	Tamboramento (%)	92,6	94,9	94,1
	Abrasão (%)	5,70	4,30	4,70

Nota: A.S.A. - área de superfície específica aparente.

As relações verificadas entre propriedades da amostra e o comportamento da pelota crua referem-se ao conteúdo de goethita versus resiliência e resistência à compressão da pelota tanto seca como úmida, todas mostrando relação direta.

Em relação à pelota queimada observa-se que há relação inversa entre resistência à compressão e conteúdo de goethita, contudo não se verifica clara tendência entre o conteúdo deste mineral e tamboramento.

Os valores de A.S.A. obtidos pelo Camsizer e Blaine com as propriedades da pelota crua - resiliência e a compressão tanto da pelota seca ou úmida - mostram relação direta. Tendência semelhante também é verificada em relação à porosidade.

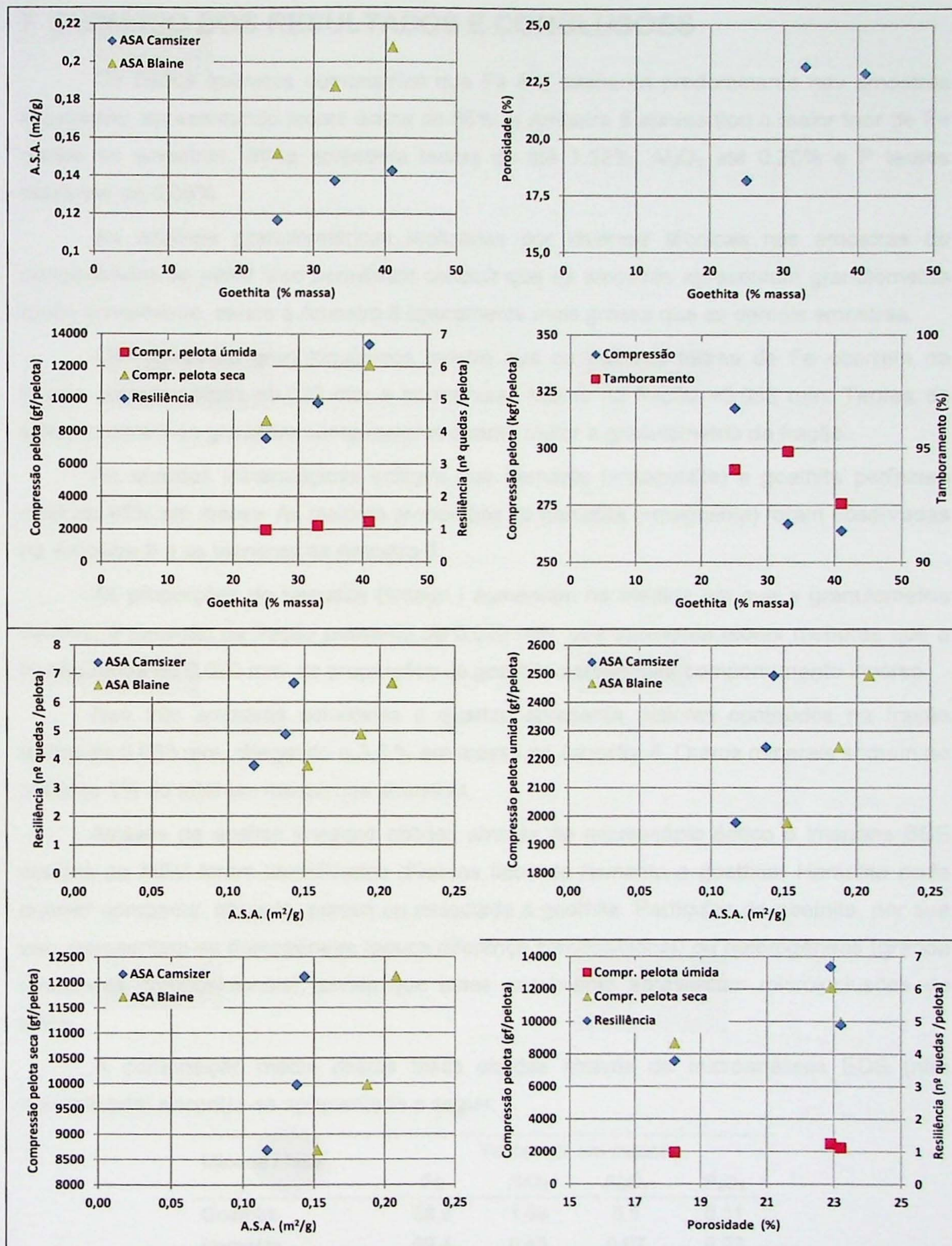


Figura 13 - Relação entre as propriedades das amostras e comportamento na pelletização

7 SUMÁRIO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os dados químicos demonstram que Fe é o elemento predominante nas amostras estudadas, apresentando teores acima de 66%; a Amostra 8 apresentou o maior teor de Fe dentre as amostras. Sílica apresenta teores de até 1,32%, Al_2O_3 até 0,20% e P teores máximos de 0,05%.

As análises granulométricas realizadas por diversas técnicas nas amostras de concentrados de *pellet feed* permitiram concluir que as amostras apresentam granulometria muito semelhante, sendo a Amostra 8 ligeiramente mais grossa que as demais amostras.

Os resultados granuloquímicos mostra que os maiores teores de Fe ocorrem na fração granulométrica +0,020 mm e os menores teores na fração +0,053 mm. Teores de sílica mostram-se gradativamente maiores quanto maior a granulometria da fração.

As análises mineralógicas indicam que hematita (+magnetita) e goethita perfazem mais de 95% em massa. As maiores proporções de hematita (+magnetita) foram observadas na Amostra 8 e as menores na Amostra 6.

As proporções de hematita (+magn.) aumentam na medida em que a granulometria diminui, à exceção da fração passante de 0,020 mm, que apresenta teores menores que a fração retida de 0,020 mm; as proporções de goethita apresentam comportamento inverso.

Nas três amostras estudadas o quartzo apresenta maiores conteúdos na fração acima de 0,053 mm, chegando a 3,8 % em massa na Amostra 8. Outros minerais somam no máximo 1% do total em massa nas amostras.

Através de análise imagens obtidas através de microscópio óptico e imagens BSE obtidas ao MEV foram identificados diversos tipos de hematita e goethita. Hematita pode ocorrer compacta, alterada, porosa ou associada à goethita. Partículas de goethita, por sua vez, apresentam-se homogêneas (pouca diferença composicional) ou heterogêneas (grande diferenças composicionais), sendo que estas geralmente apresentam microinclusões de sílica.

A composição média destas fases obtidas através de microanálises EDS (não normalizada) encontra-se apresentada a seguir:

Mineral / fase	Teores (% em massa)			
	Fe	SiO_2	Al_2O_3	P_2O_5
Goethita	58,9	1,98	0,5	0,31
Hematita	69,4	0,43	0,07	0,03
Hm compacta	72,0	0,42	0,05	0,01
Hemat+goethita	64,8	0,43	0,10	0,11

Os resultados obtidos em relação ao grau de liberação das partículas de interesse demonstraram que, quando considerado o total dos minerais de ferro, as partículas apresentam praticamente liberadas. Os espectros de liberação dos silicatos mostram que estes apresentam elevado grau de liberação (>80%) sendo este crescente para as frações mais finas nas três amostras estudadas. A fração +0,053 mm é a que apresenta menor grau de liberação, estando associada a estas os maiores teores de sílica.

Nos dados obtidos em relação à distribuição de elementos verifica-se que o Fe distribui-se principalmente na fase mineral hematita+magnetita (de 62 a 78%), sendo o restante presente na goethita. A sílica distribuí-se em minerais de ferro (microinclusões), quartzo e outros silicatos, contudo encontra-se principalmente na goethita (40 a 59%). O alumínio também está associado essencialmente a goethita (74 a 86%) e fósforo encontra-se totalmente associado a este mineral.

Os resultados obtidos permitiram relacionar que quanto maior o conteúdo de goethita nas amostras, maior a área de superfície específica aparente e menor a densidade das amostras. A porosidade apresenta tendência de aumento com aumento do conteúdo de goethita.

Foram verificadas relações diretas entre conteúdo de goethita versus resiliência e resistência à compressão da pelota tanto seca como úmida. Os valores de A.S.A. relacionados com as propriedades da pelota crua - resiliência e resistência à compressão tanto da pelota seca ou úmida – também mostram relação direta.

Em relação à pelota queimada observou-se relação inversa entre resistência à compressão e conteúdo de goethita (perda de água de cristalização, gerando maior porosidade da pelota calcinada e, consequentemente, menor resistência).

Os resultados permitem concluir que o comportamento metalúrgico diferenciado das amostras analisadas está diretamente relacionado ao conteúdo de goethita nos concentrados de *pellet feed* estudados.

As técnicas utilizadas neste estudo constituíram em importantes ferramentas para a caracterização de concentrados de minérios de ferro, pois têm capacidade de gerar dados representativos e confiáveis de características relevantes ao seu processamento industrial e siderúrgico.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Babinski, M; Chemale JR., F.; Van Schmus, W.R. 1993. A idade das formações ferríferas bandadas do Supergrupo Minas e sua correlação com aquelas da África do Sul e da Austrália. Simp. Cráton São Francisco, 2. Salvador. *Anais*. Salvador, SBG-BA,SE/SGM, p. 152-153.
- Brandão, P. R. G. *et al.* 2007. *Caracterização mineralógica e tecnológica. (Introdução ao tratamento de minérios)*. Belo Horizonte.
- Chaves, A. P.; Peres, A. E. C. 2006. *Britagem, peneiramento e moagem*. 3. ed. São Paulo: Editora Signus.
- Chauvin, W. J. 1985. Quantitative energy dispersive X-ray microanalysis. *Short Course in Applications of Electron Microscopy in the Earth Sciences*: Mineralogical Association of Canada. p. 189-213.
- Costa, A.G.D.; Costa, F.J.O.; Bonfioli, L.E.; Rodrigues, M.L. 2001. Geologia de Mina na Samarco Mineração: Um suporte ao planejamento de curto prazo/controlado de qualidade, com ênfase no controle mineralógico e na previsibilidade do comportamento dos tipos de minério no processo. *Brasil Mining Site*, <http://www.brasilminingsite.com.br>.
- Cullity, B.D. 1978. *Elements of x-ray diffraction*. 2 Ed. Addison-Wesley Reading, MA. p.466
- Donskoi, E.; Suthers, S.P; Fradd, S.B.; Young, J.M.; Campbell, J.J.; Raynlyn, T.D.; Clout, J.M.F. 2007. Utilization of optical image analysis and automatic texture classification for iron ore particle characterisation. *Minerals Engineering* 20, p. 461-471. Science Direct, Australia.
- Fandrich, R.; Gu, Y.; Burrows, D.; Moeller, K. 2007. Modern SEM-based mineral liberation analysis. *International Journal of Mineral Processing* [S.l.], v. 84, p. 310-320.
- Formoso, M. L. L. 1984. Difractometria de raios-X. In: GOMES, C. B. (Ed.). *Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia*. São Paulo: Blucher/Pró-Minério. p. 1-43.
- Goldstein, J. *et al.* 1992 *Scanning electron microscopy and X-ray analysis*. 2. ed. New York: Plenum Press.
- Gu, Y., Napier-Munn, T., 1997. *JK/Philips mineral liberation analyser – an introduction*. Minerals Processing '97 Conf. Cape Town, SA, p. 2.
- Henley K.J. 1983. Ore dressing mineralogy - A review of techniques, applications and recent developments. *Spec. Publ. geol. Soc.S.Afr.*, 7(1983), 175-200.
- Hutchison, C.S. 1983. *Economic deposits and their tectonic setting*. MacMillan Publ. Ltd., London – UK.
- James, H.L. 1954. Sedimentary facies of iron formation. *Econ. Geology*, V.49: 235-293.

- Klein, C. 2002. *The Manual of Mineral Science*. New York: John Wiley & Sons. p. 646.
- Luz, A. B. et al. 2004. *Tratamento de Minérios*. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM-MCT.
- Miller, N.A.; Henderson, J.J. 2010. Quantifying sand particle shape complexity using a dynamic, digital imaging technique. *Agronomy Journal*, v. 102, n. 5, p. 1407-1414.
- Neuman R., Schneider C.L., Neto A.A. 2004. Caracterização tecnológica de minérios. In: Luz A.B., Sampaio J.A., Almeida S.L.M. *Tratamento de Minérios*, 4ª ed-CETEM. pg: 55-109.
- Petruk, W. 1989. *Short Course on Image Analysis Applied to Mineral and Earth Sciences*. Ottawa: Mineral Association of Canada.
- Renger F.E., Noce C.M., Romano A.W., Machado N. 1994. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Revista Geonomos* 2, pg. 1-11. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.
- Reynolds, R.C., Jr. 1989 - Principles of Powder Diffraction. In: BISH, D.L. & POST, J.E.. *Modern Powder Diffraction*. Washington, vol.20, p.1-17.
- Rocha, J.M.P. 2008. *Definição da Tipologia e Caracterização Mineralógica e Microestrutural dos Itabiritos Anfíbolíticos das Minas de Alegria da Samarco Mineração S.A. – Minas Gerais*. Tese de doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Rosière, C.A.; Chemale Jr. F; Guimarães, M.L.V. 1993. Um modelo para a evolução microestrutural dos minérios de ferro do quadrilátero ferrífero. Parte I – estruturas e recristalização. *Revista Geonomos* 1(1), pg. 65-84. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.
- Russ, J.C. 1986. *Practical stereology*. Plenum. 185p.
- Sant'agostinho, L.M.; Kahn, H. 1997. Metodologia para a caracterização tecnológica de matérias primas minerais. *BT/PMI/069*, São Paulo.
- Takehara, L. 2004. *Caracterização Geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros – Fração sinter feed*. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Vieira, C.B.; Rosière, C.A.; Pena, E.Q.; Seshadri, V.; Assis, P.S. 2003. Avaliação técnica de minérios de ferro para sinterização nas siderúrgicas e minerações brasileiras - Uma análise crítica. *Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, MG.
- Webb, P.A., 2001. An introduction to the physical characterization of materials by mercury intrusion porosimetry with emphasis on reduction and presentation of experimental data. *Micromeritics Instrument Corp.*, USA.
- Webb, P.A., Orr, C. 1997. Analytical Methods in Fine Particle Technology. *Micromeritics Instrument Corp.*USA.

ANEXOS

Anexo 1 – Dados das amostras estudadas fornecidos pela Samarco Mineração S.A.

Anexo 2 – Difrátogramas de raios X

Anexo 3 – Fotomicrografias por microscopia óptica

Anexo 4 – Fotomicrografias por Microscopia Eletrônica de Varredura

Anexo 5 – Associações minerais estabelecidas por MLA

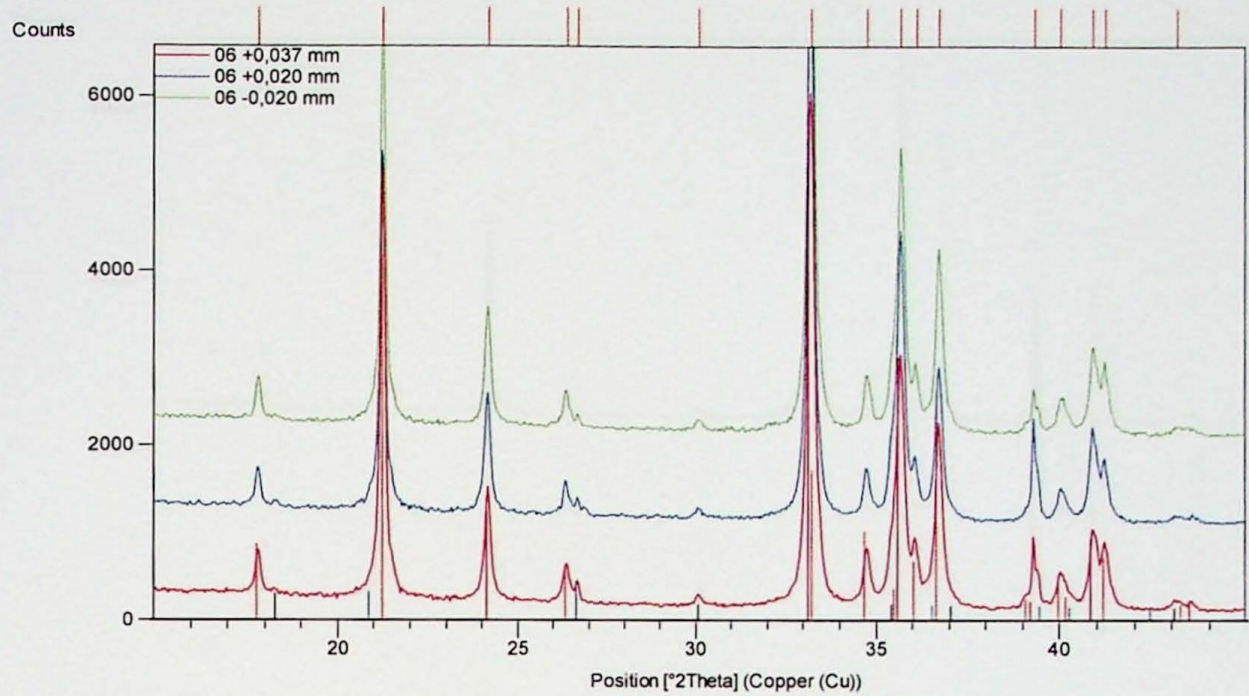
Anexo 6 – Fotomicrografias por MEV & MLA

**ANEXO 1 – DADOS DAS AMOSTRAS ESTUDADAS FORNECIDOS PELA SAMARCO
MINERAÇÃO S.A.**

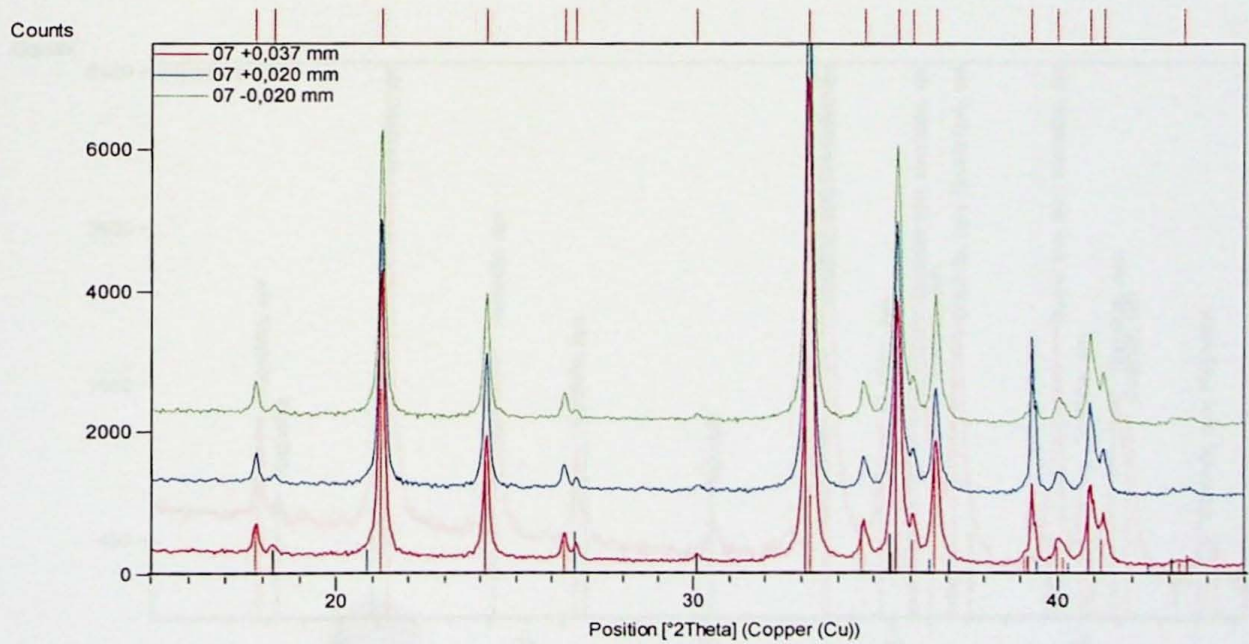
Etapas	Parâmetros		Amostra 06	Amostra 07	Amostra 08
Caracterização do Pellet Feed	Químicos	Fe (%)	65,54	65,99	66,69
		FeO (%)	1,62	0,81	1,09
		SiO ₂ (%)	1,34	1,12	1,17
		CaO (%)	0,03	0,11	0,09
		MgO (%)	0,03	0,03	0,03
		Al ₂ O ₃ (%)	0,35	0,4	0,36
		P (%)	0,056	0,048	0,04
		PPC (%)	4,45	3,83	2,89
	Físicos	Peso Específico (g/cm ³)	4,703	4,778	4,946
		< 325 # (%)	87,4	91,6	88,4
		< 325 # após HPGR (%)	90,4	92,6	91
		Superfície Específica (cm ² /g)	2080	1874	1520
		Blaine após HPGR (cm ² /g)	2589	2347	2050
	Mineralógicos	Hematita Especular (%)	18,6	28	36,5
		Hematita Porosa (%)	35,3	41	39,9
		Goethita (%)	40,4	27	20,5
		Magnetita (%)	4,3	2,1	2,7
Pelotamento	Umidade Ideal Pellet Feed (%)		11,2	10,6	10
	Resiliência (nº quedas/pelota)		6,7	4,9	3,8
	Compressão Pelota Úmida (gf/pelota)		2496	2244	1979
	Compressão Pelota Seca (gf/pelota)		12111	9981	8693
	Umidade Pelota Crua (%)		9,87	9,42	8,84
Análise da Pelota	Análise Química da Pelota Queimada	FeT (%)	66,43	66,57	66,44
		FeO (%)	1,61	1,78	0,59
		SiO ₂ (%)	2,2	2,15	2,14
		Al ₂ O ₃ (%)	0,5	0,53	0,54
		CaO (%)	1,71	1,78	1,85
		MgO (%)	0,2	0,21	0,21
		P (%)	0,06	0,05	0,044
		Basicidade - B2	0,78	0,83	0,86
	Resistência Física	Compressão (kgf/pel)	264	267	318
		Tamboramento (%)	92,6	94,9	94,1
		Abrasão (%)	5,7	4,3	4,7

ANEXO 2 – DIFRATOGRAMAS DE RAIOS X

DIFRATOGRAMAS INDIVIDUAIS E COMPARATIVOS – FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS



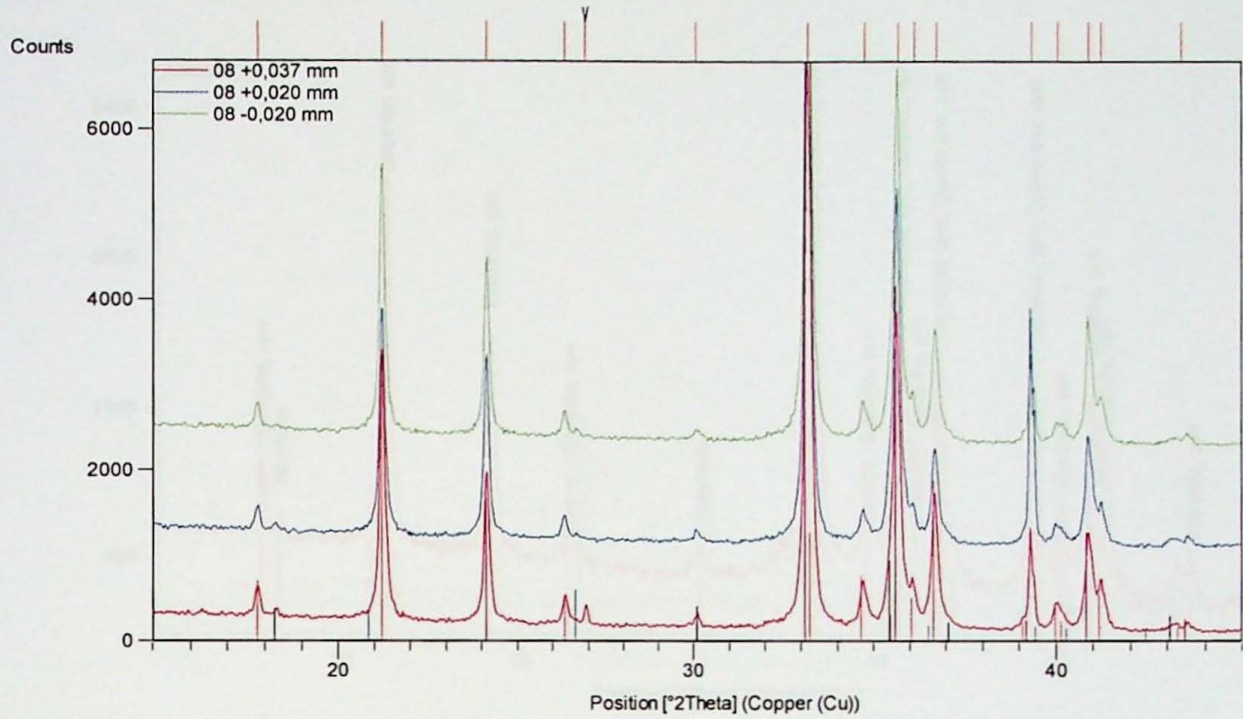
Peak List
Hematite, syn
Goethite, syn
Quartz low, syn
Magnetite



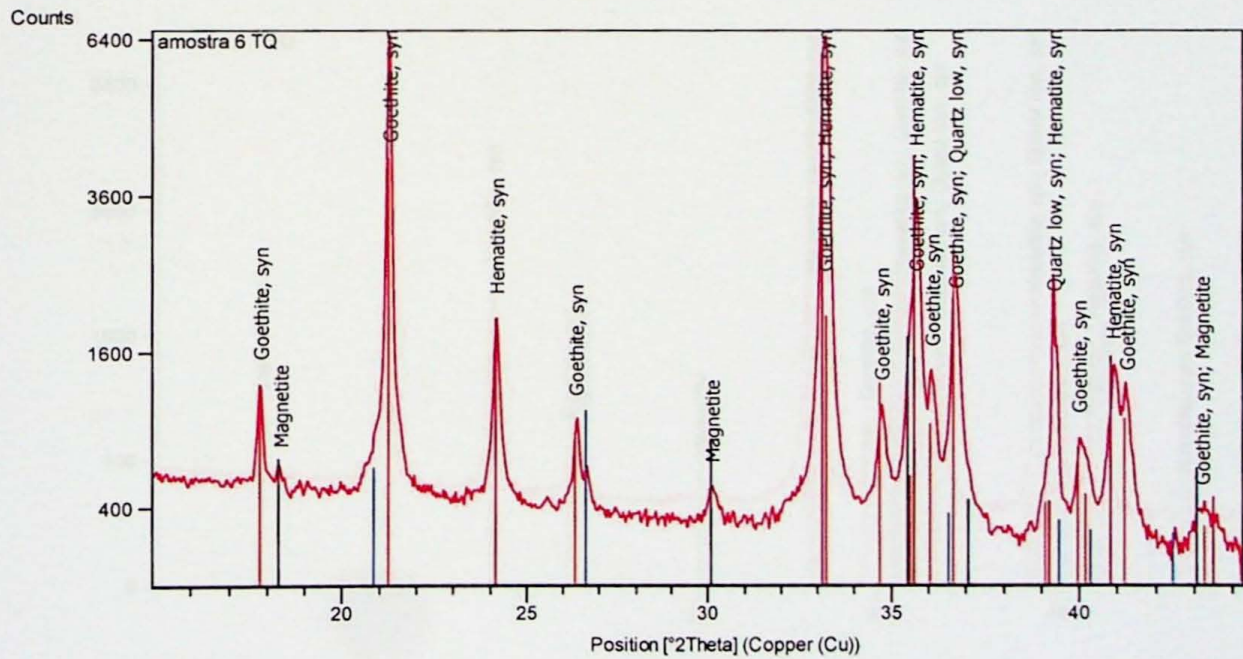
Peak List
Goethite, syn
Quartz low, syn
Magnetite
Hematite, syn

ANEXO 2 – DIFRATOGRAMAS DE RAIOS X

DIFRATOGRAMAS INDIVIDUAIS E COMPARATIVOS – FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS



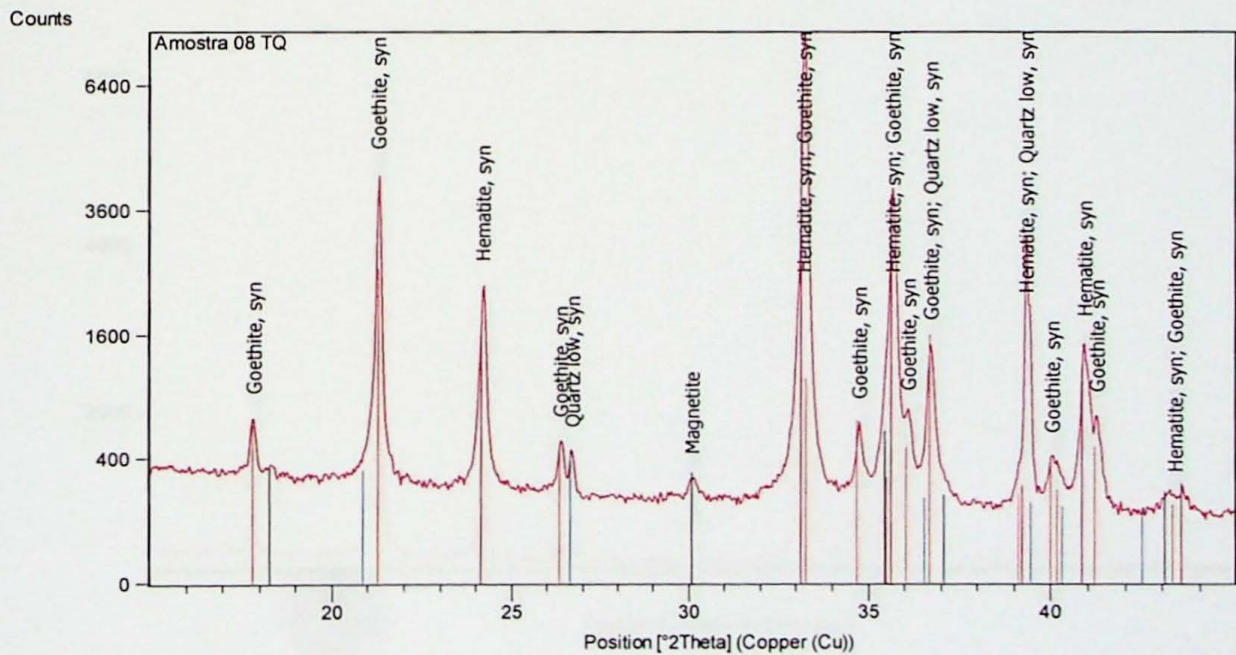
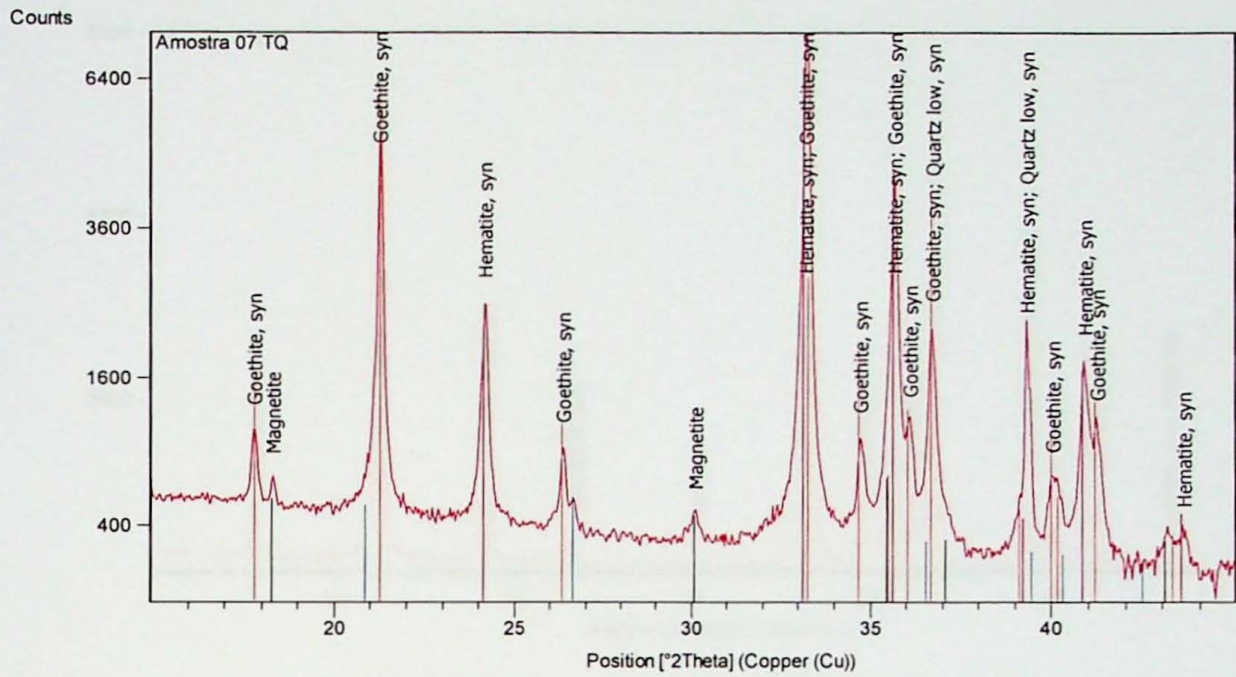
Peak List
Goethite, syn
Quartz low, syn
Magnetite
Hematite, syn



Peak List
Goethite, syn
Quartz low, syn
Magnetite
Hematite, syn

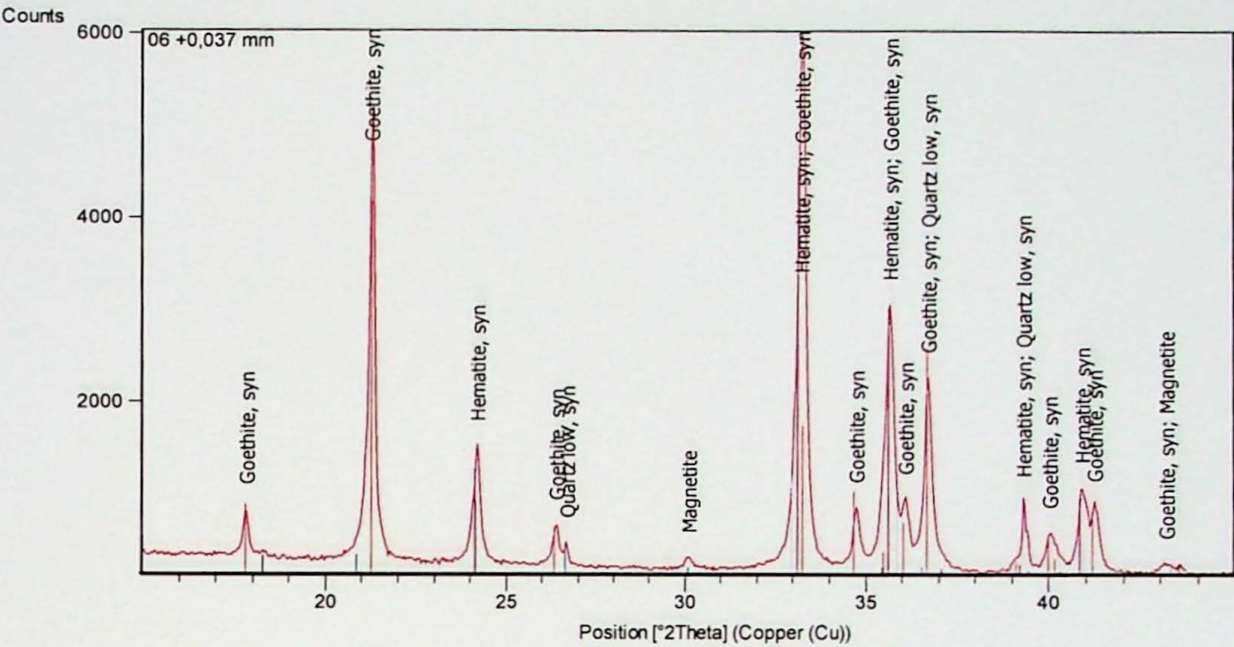
ANEXO 2 – DIFRATOGRAMAS DE RAIOS X

DIFRATOGRAMAS INDIVIDUAIS E COMPARATIVOS – FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS

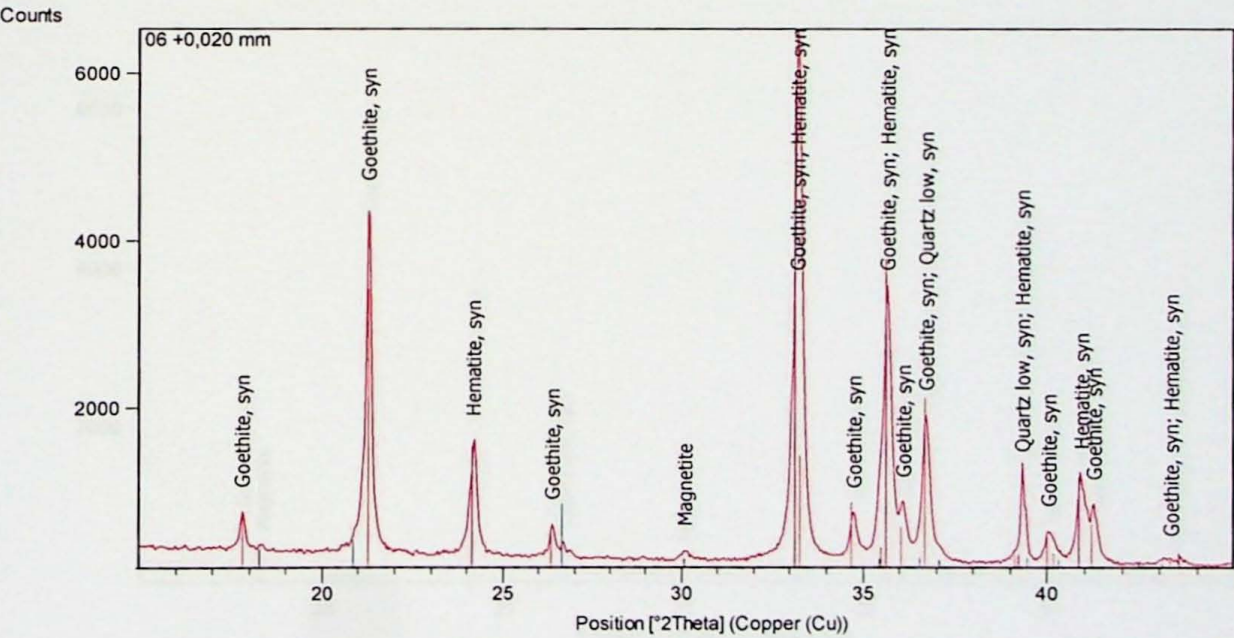


ANEXO 2 – DIFRATOGRAMAS DE RAIOS X

DIFRATOGRAMAS INDIVIDUAIS E COMPARATIVOS – FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS



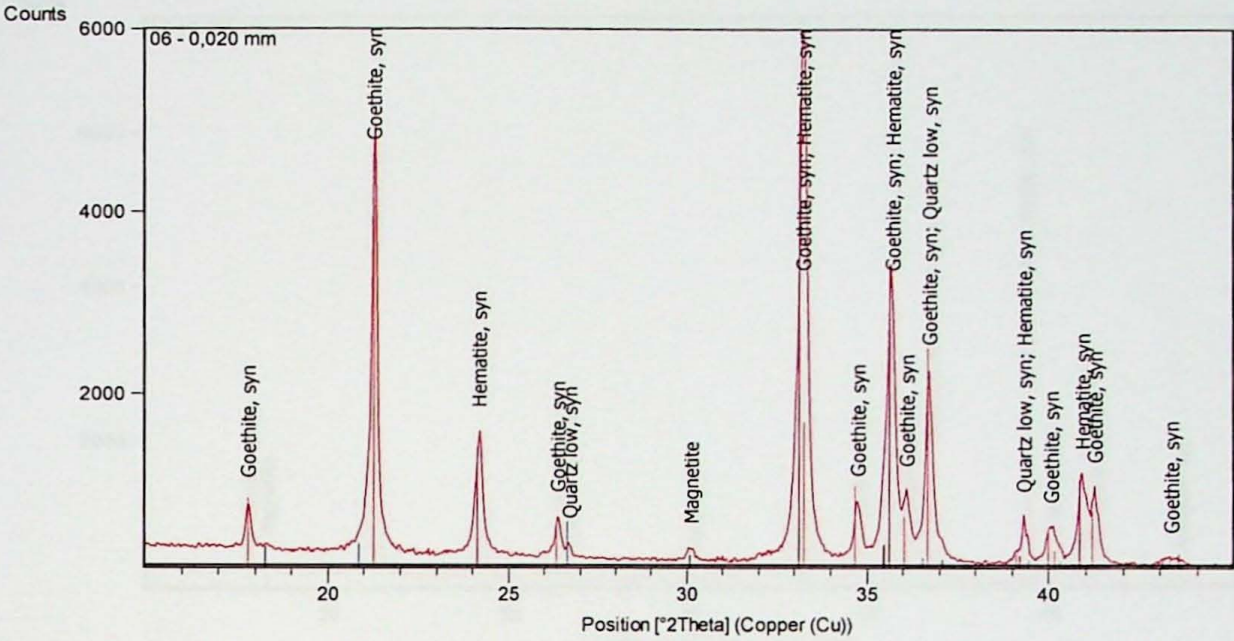
Peak List	
Hematite, syn	
Goethite, syn	
Quartz low, syn	
Magnetite	



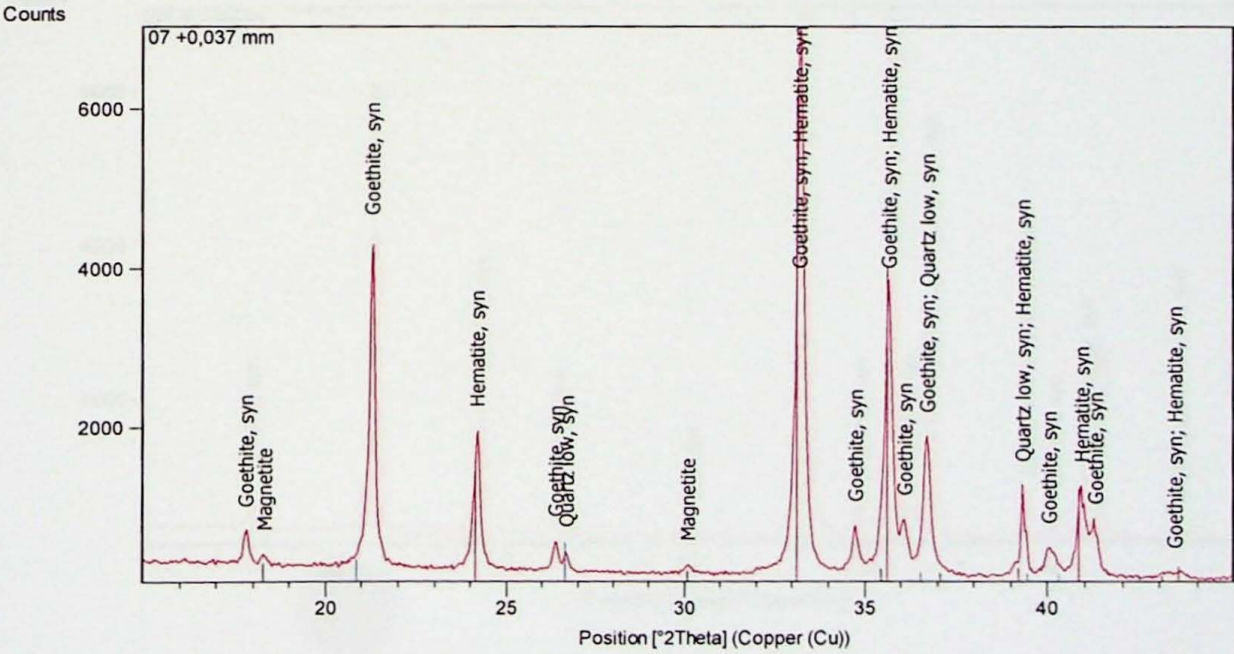
Peak List	
Goethite, syn	
Quartz low, syn	
Magnetite	
Hematite, syn	

ANEXO 2 – DIFRATOGRAMAS DE RAIOS X

DIFRATOGRAMAS INDIVIDUAIS E COMPARATIVOS – FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS



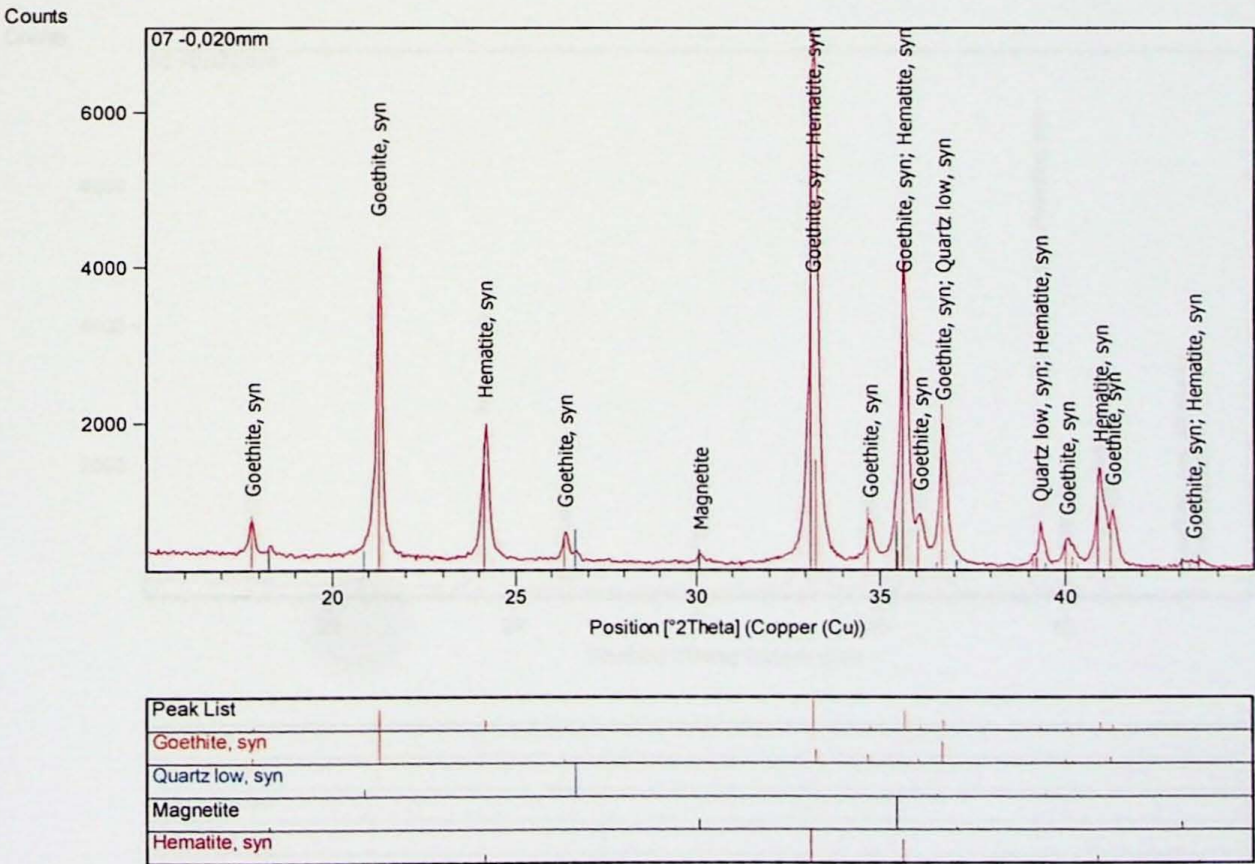
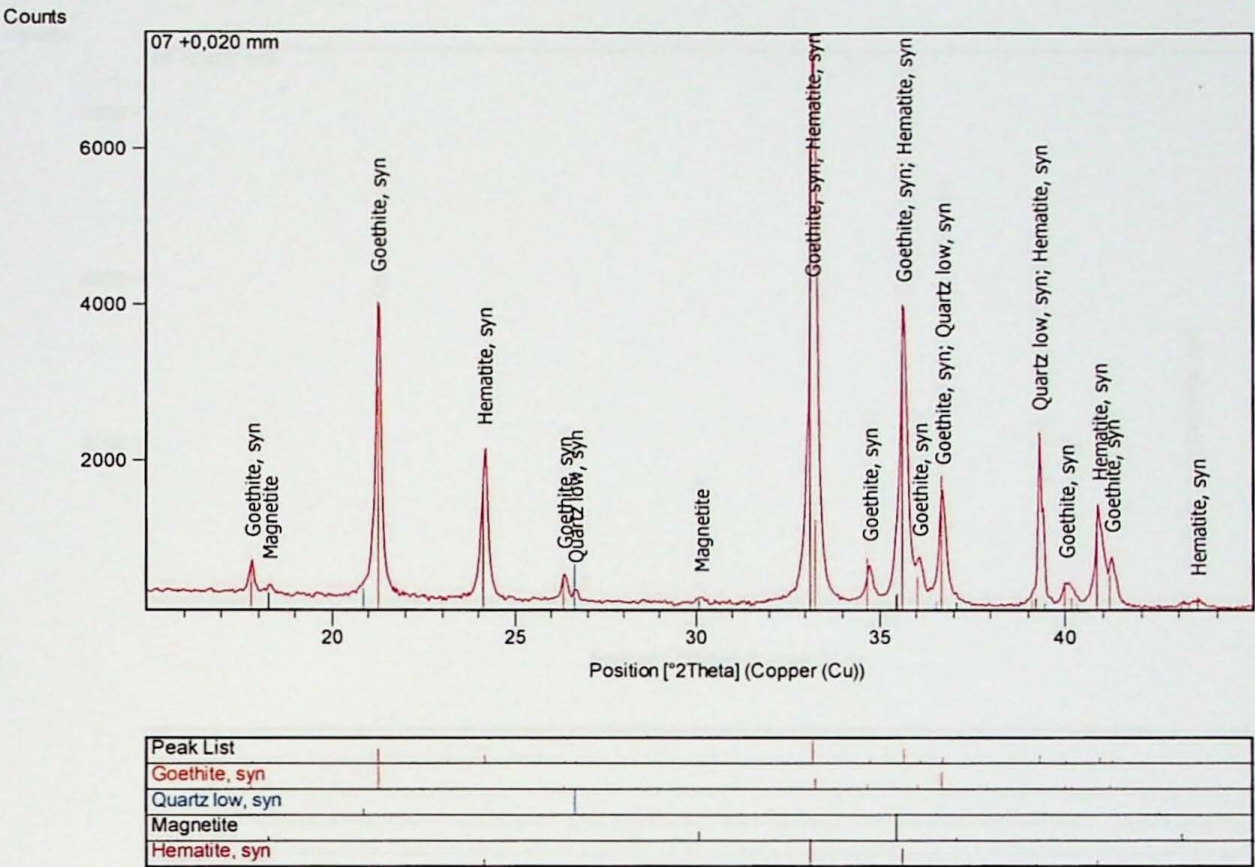
Peak List	
Goethite, syn	
Quartz low, syn	
Magnetite	
Hematite, syn	



Peak List	
Quartz low, syn	
Magnetite	
Hematite, syn	

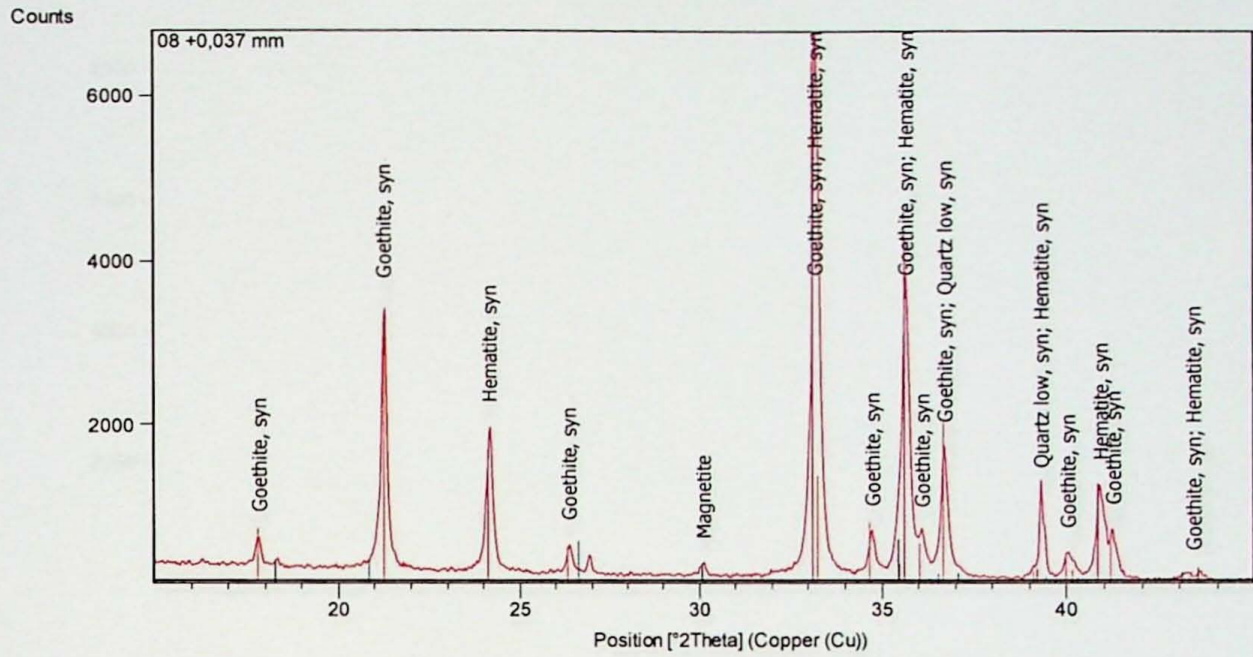
ANEXO 2 – DIFRATOGRAMAS DE RAIOS X

DIFRATOGRAMAS INDIVIDUAIS E COMPARATIVOS – FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS

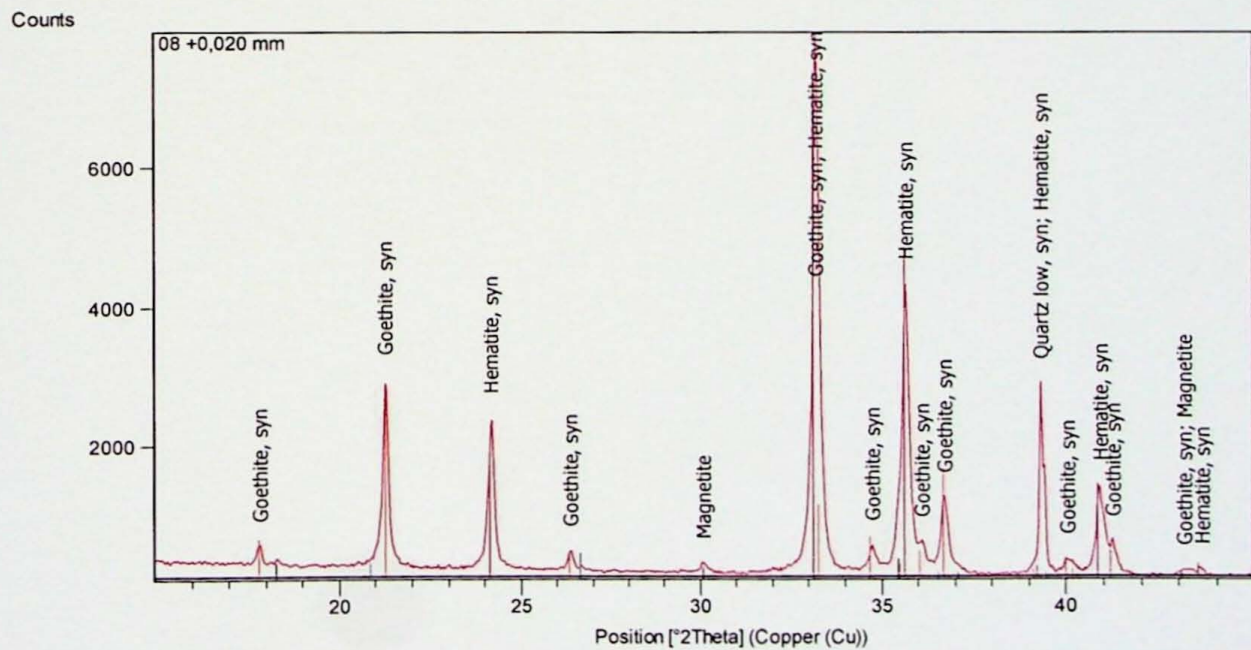


ANEXO 2 – DIFRATOGRAMAS DE RAIOS X

DIFRATOGRAMAS INDIVIDUAIS E COMPARATIVOS – FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS



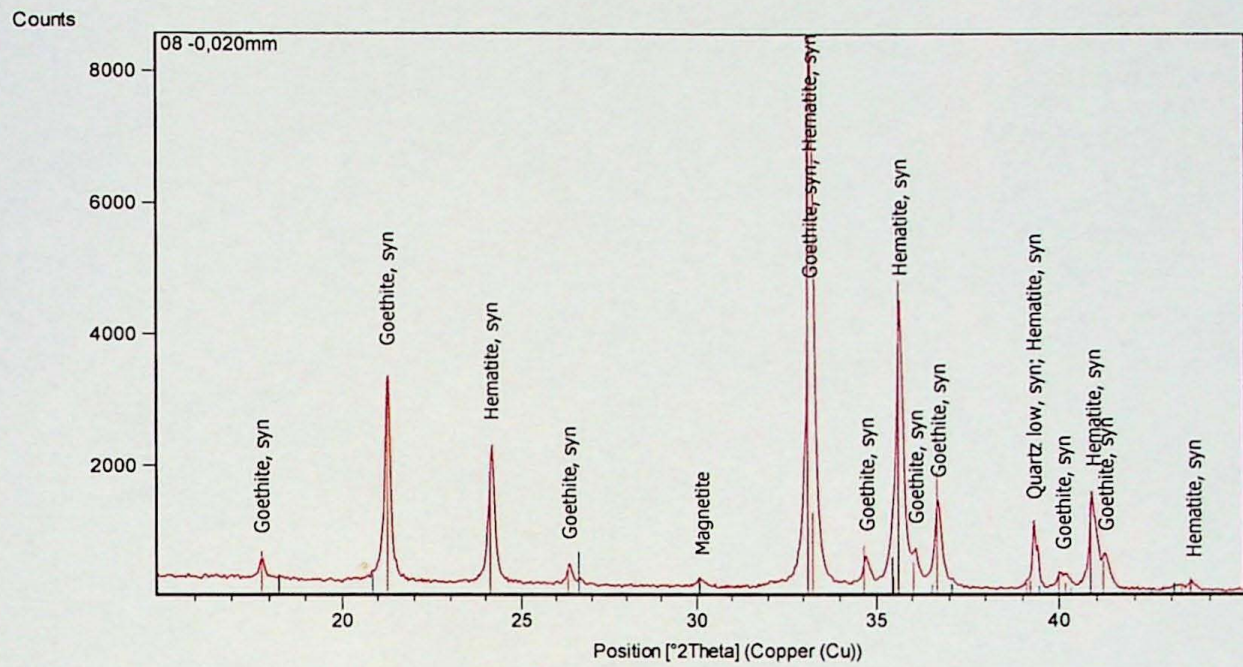
Peak List	
Goethite, syn	
Quartz low, syn	
Magnetite	
Hematite, syn	



Peak List	
Goethite, syn	
Quartz low, syn	
Magnetite	
Hematite, syn	

ANEXO 2 – DIFRATOGRAMAS DE RAIOS X

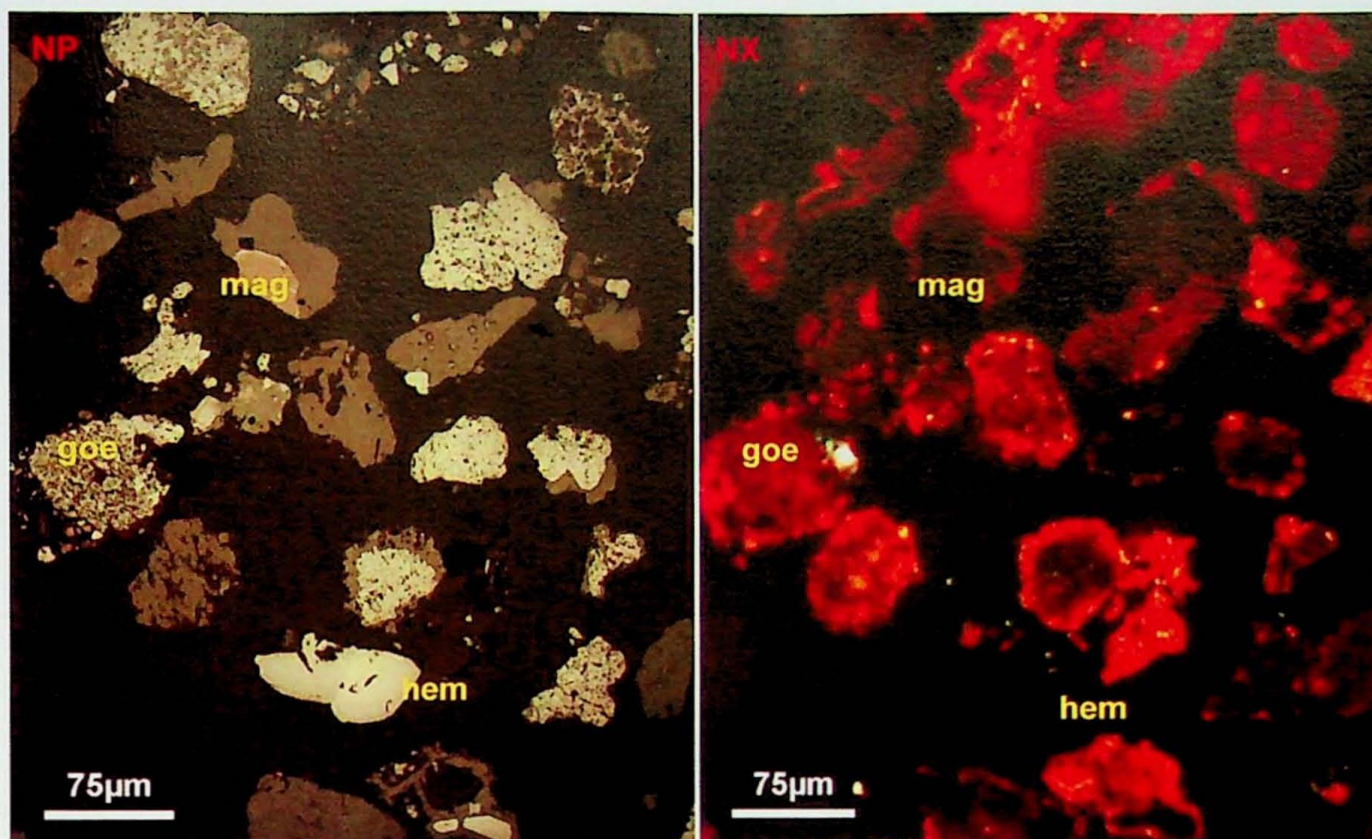
DIFRATOGRAMAS INDIVIDUAIS E COMPARATIVOS – FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS



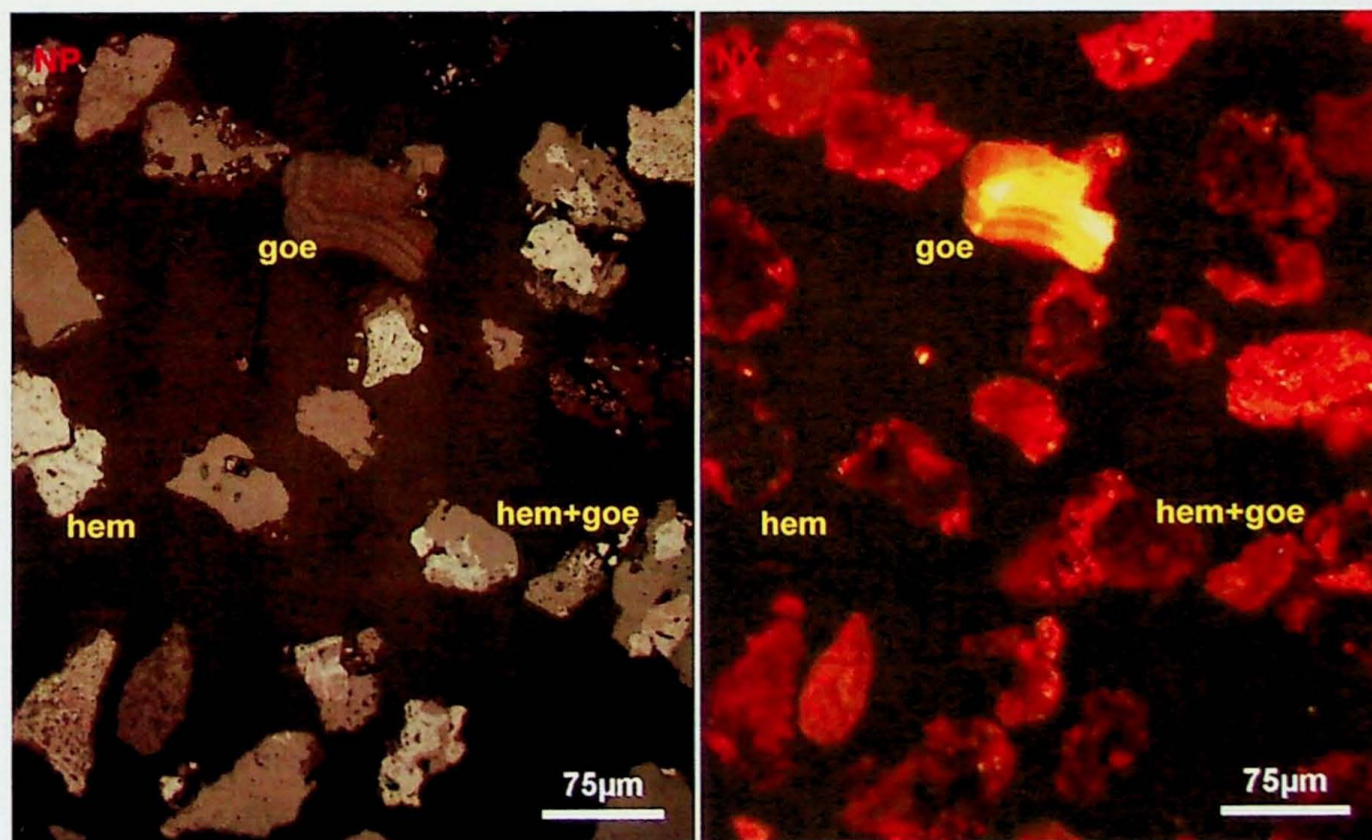
Peak List	
Goethite, syn	
Quartz low, syn	
Magnetite	
Hematite, syn	

ANEXO 3 – FOTOMICROGRAFIAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA

AMOSTRA 6



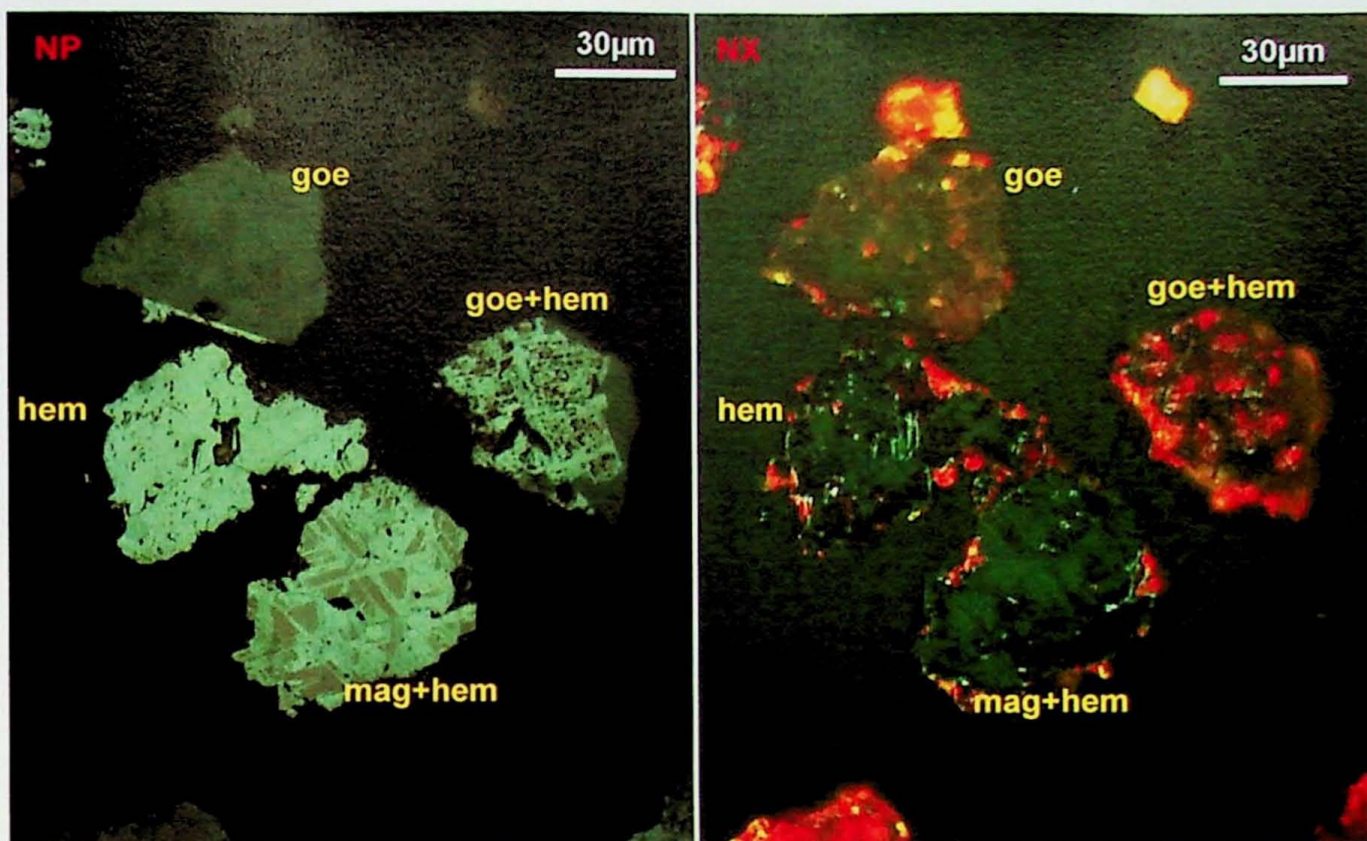
AMOSTRA 6 – FRAÇÃO +0,053MM.



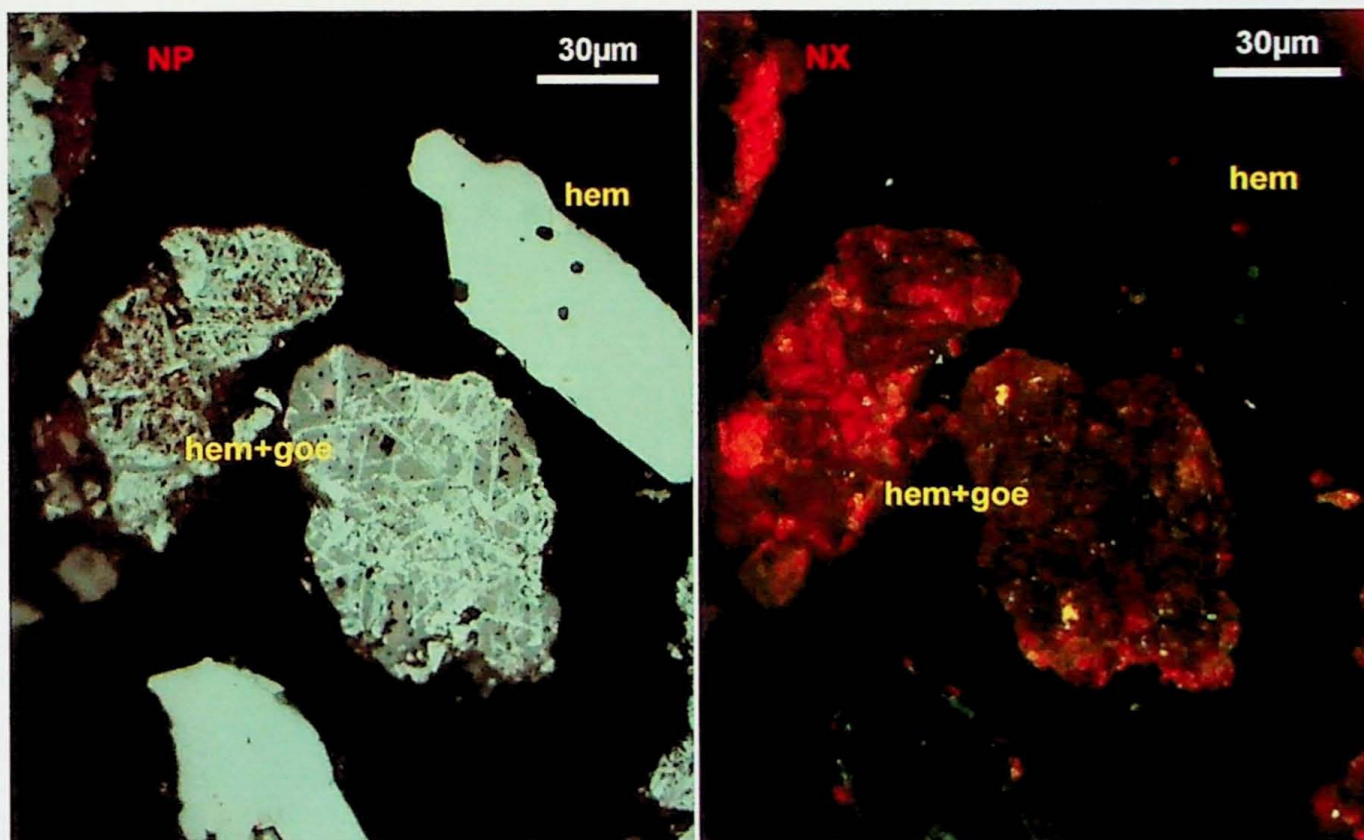
AMOSTRA 6 – FRAÇÃO +0,053MM.

ANEXO 3 – FOTOMICROGRAFIAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA

AMOSTRA 6



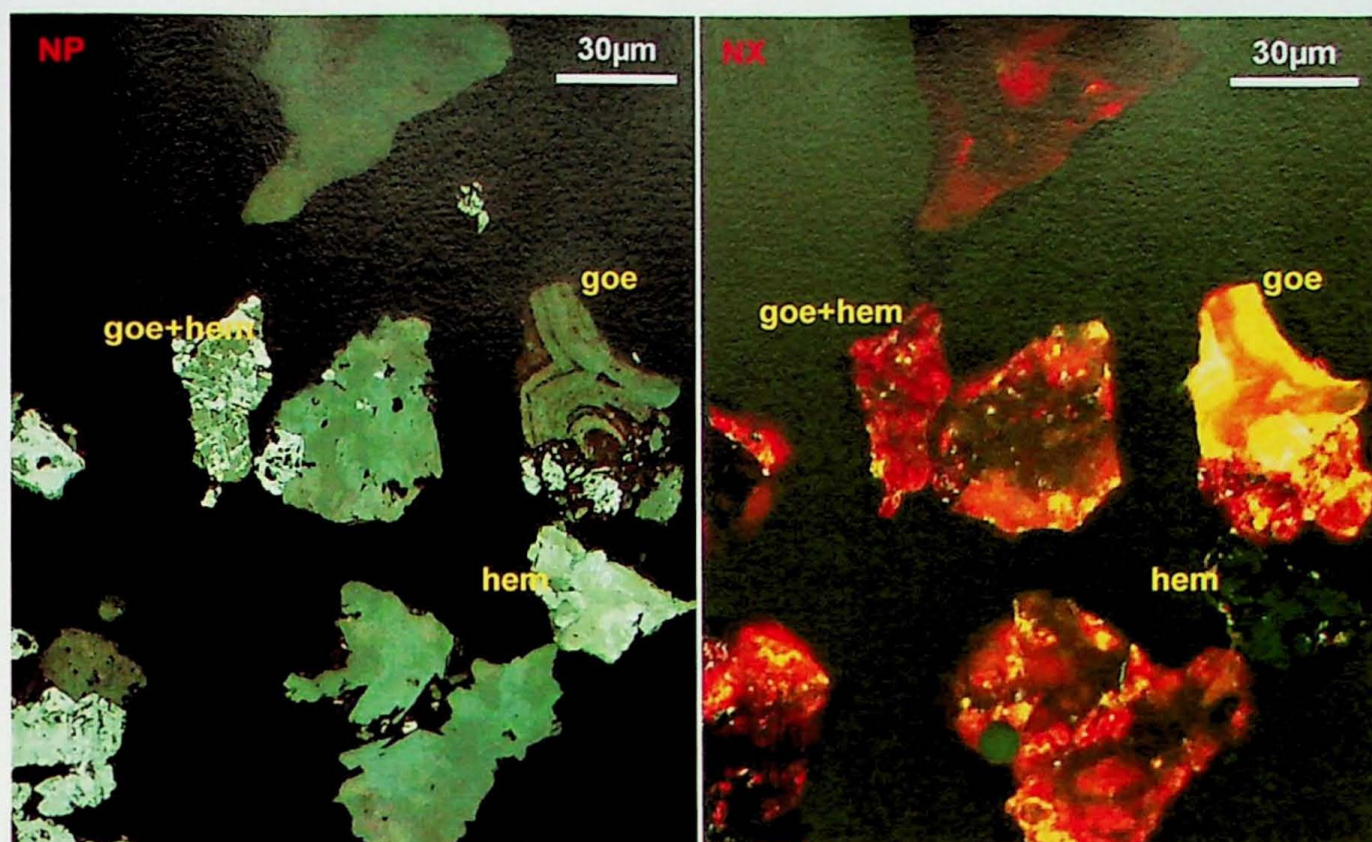
AMOSTRA 6 – FRAÇÃO +0,053MM.



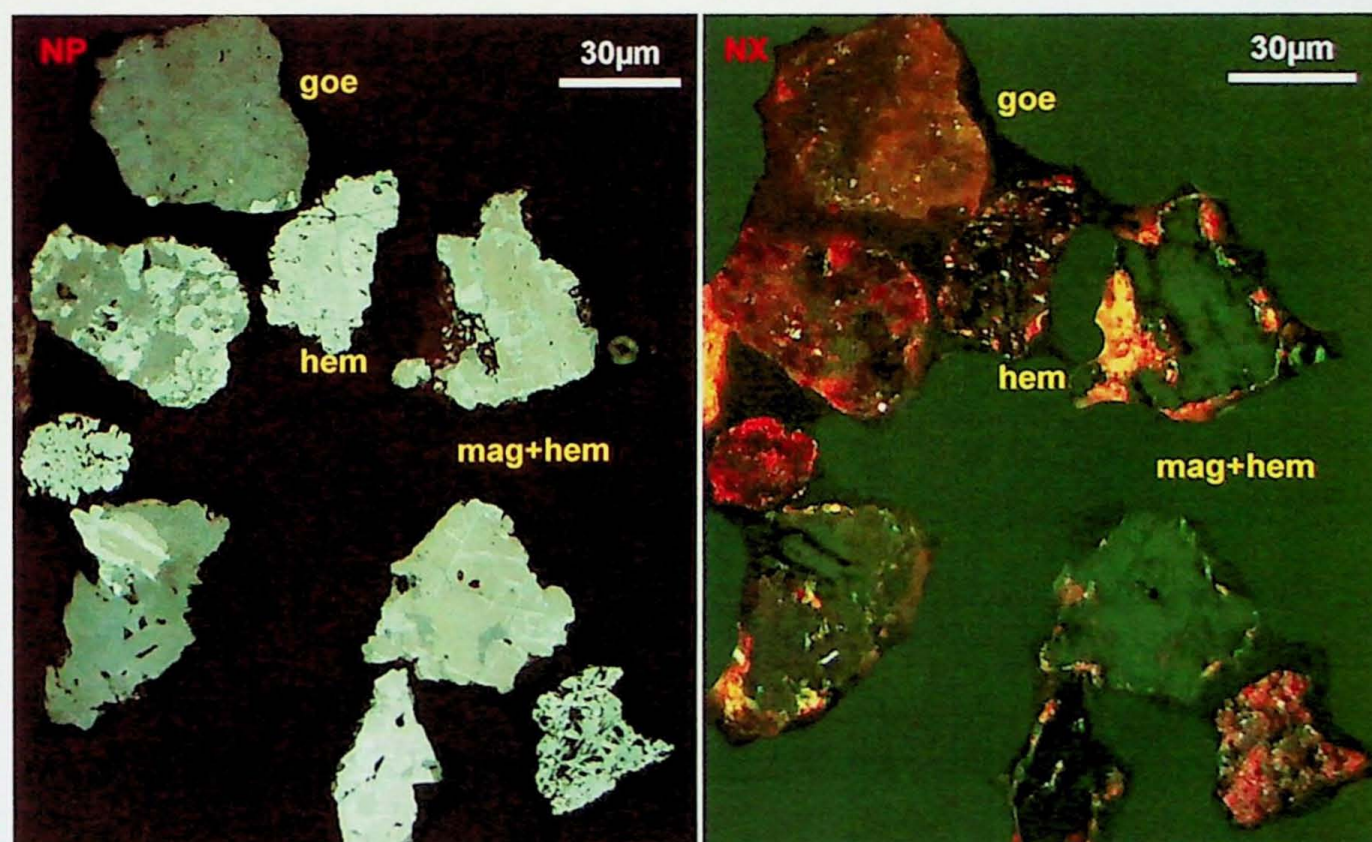
AMOSTRA 6 – FRAÇÃO +0,053MM.

ANEXO 3 – FOTOMICROGRAFIAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA

AMOSTRA 6



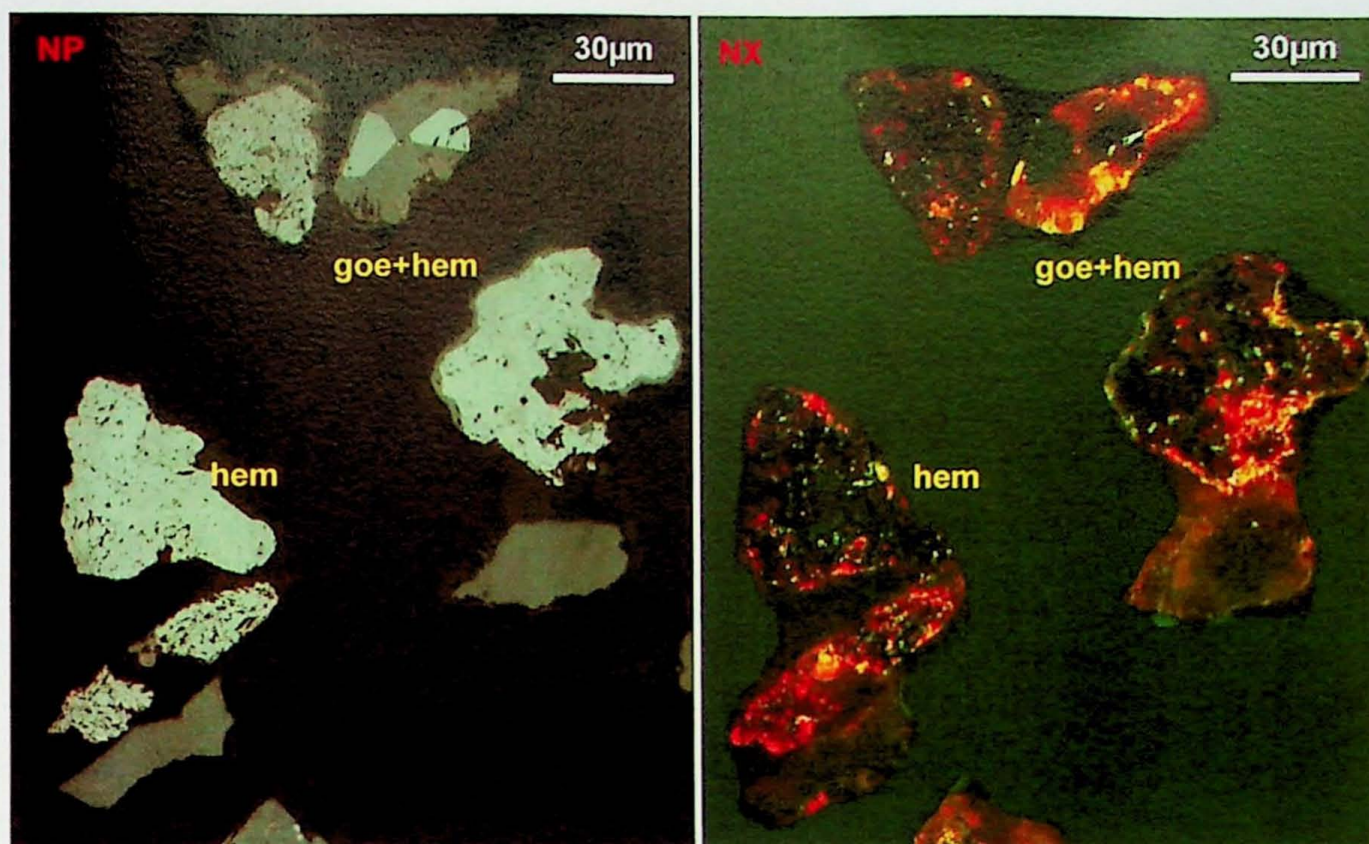
AMOSTRA 6 – FRAÇÃO +0,037MM.



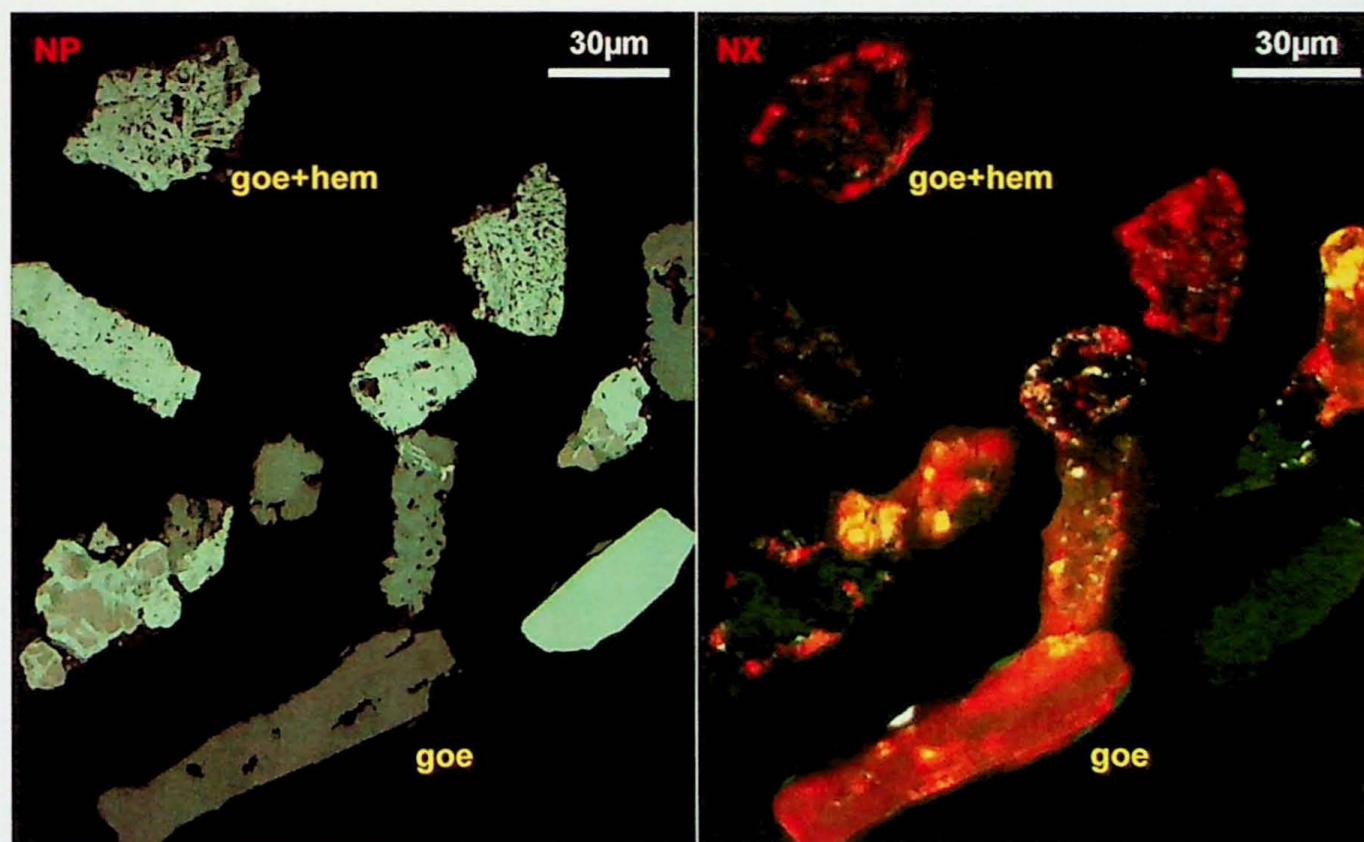
AMOSTRA 6 – FRAÇÃO +0,037MM.

ANEXO 3 – FOTOMICROGRAFIAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA

AMOSTRA 6



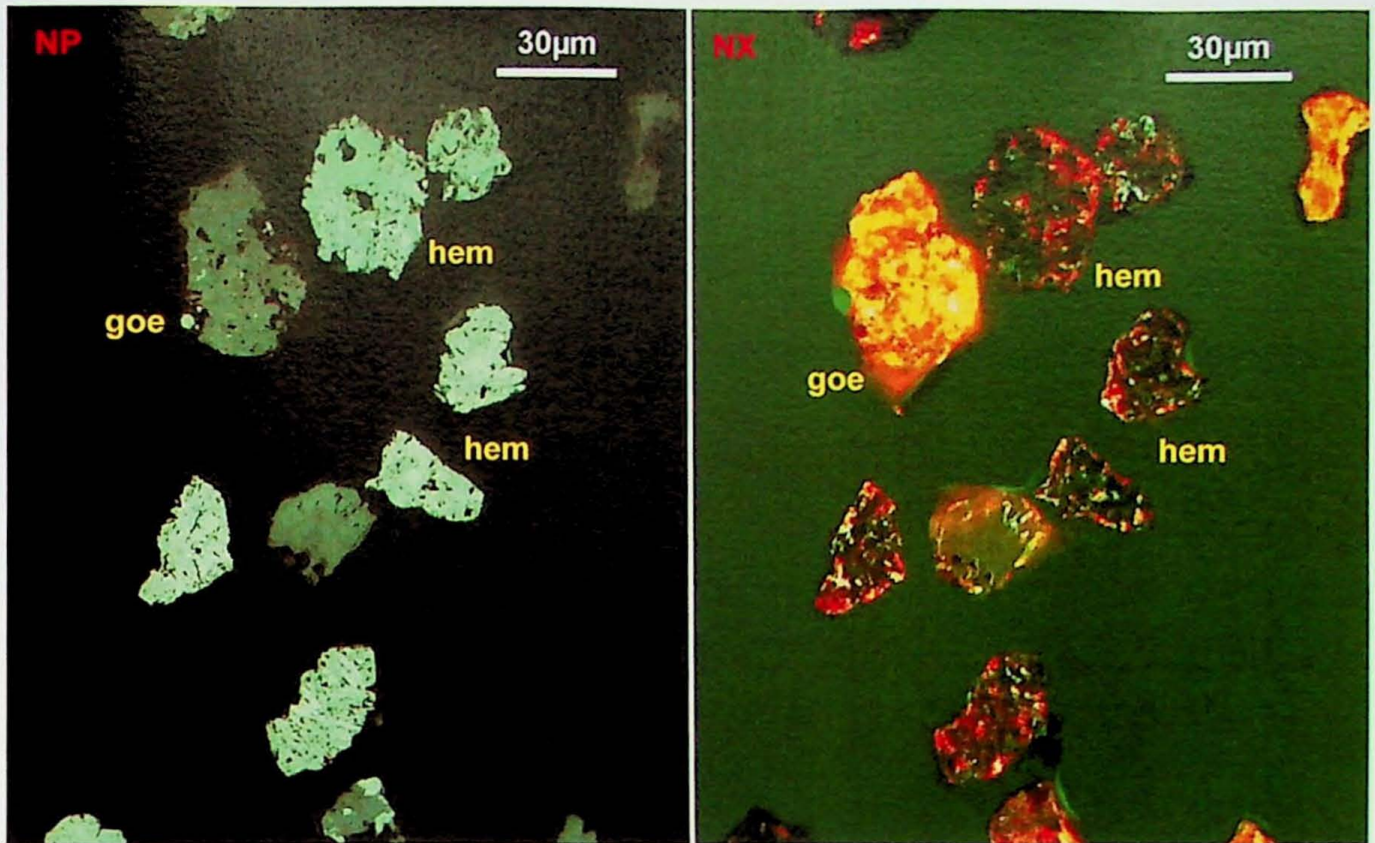
AMOSTRA 6 – FRAÇÃO +0,037MM.



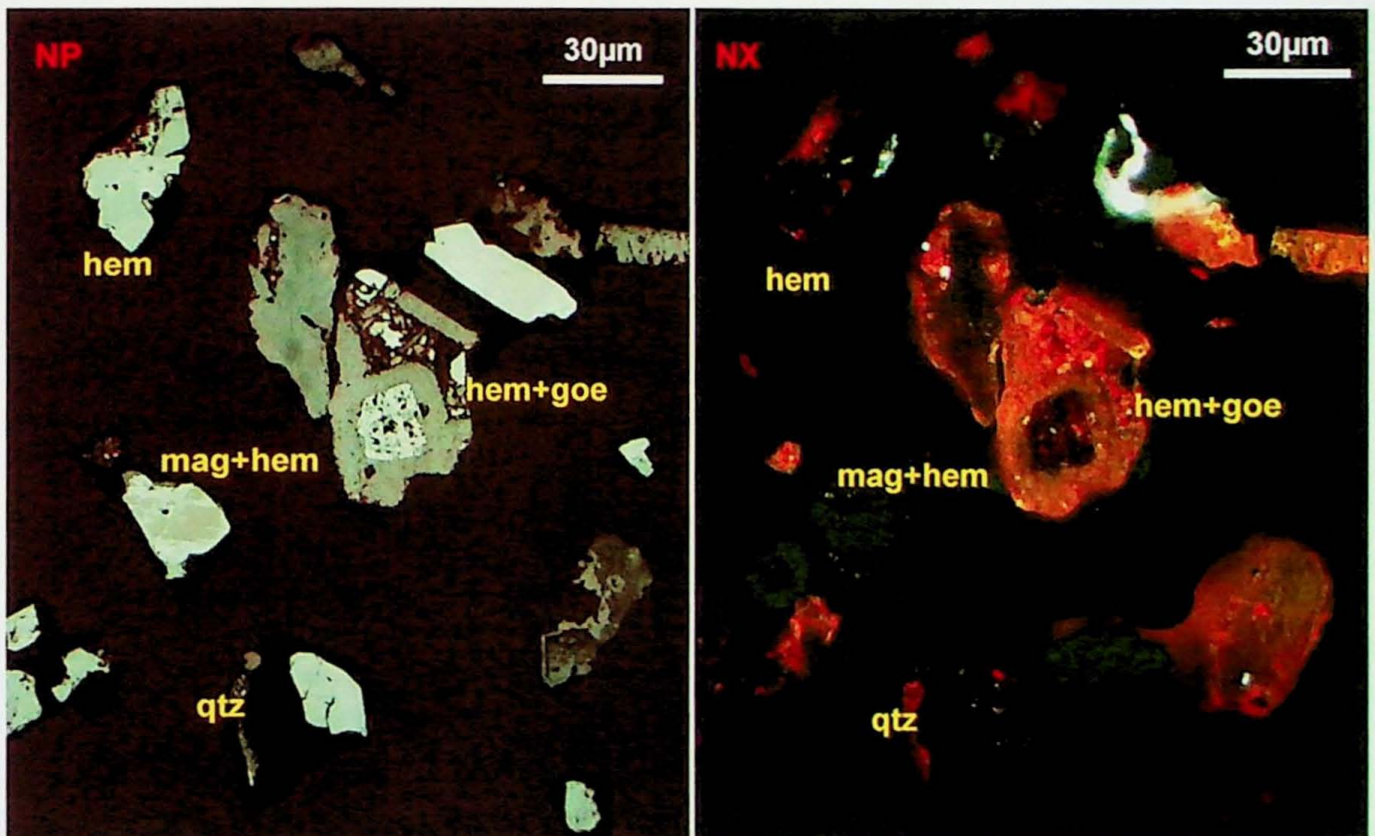
AMOSTRA 6 – FRAÇÃO +0,037MM.

ANEXO 3 – FOTOMICROGRAFIAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA

AMOSTRA 6



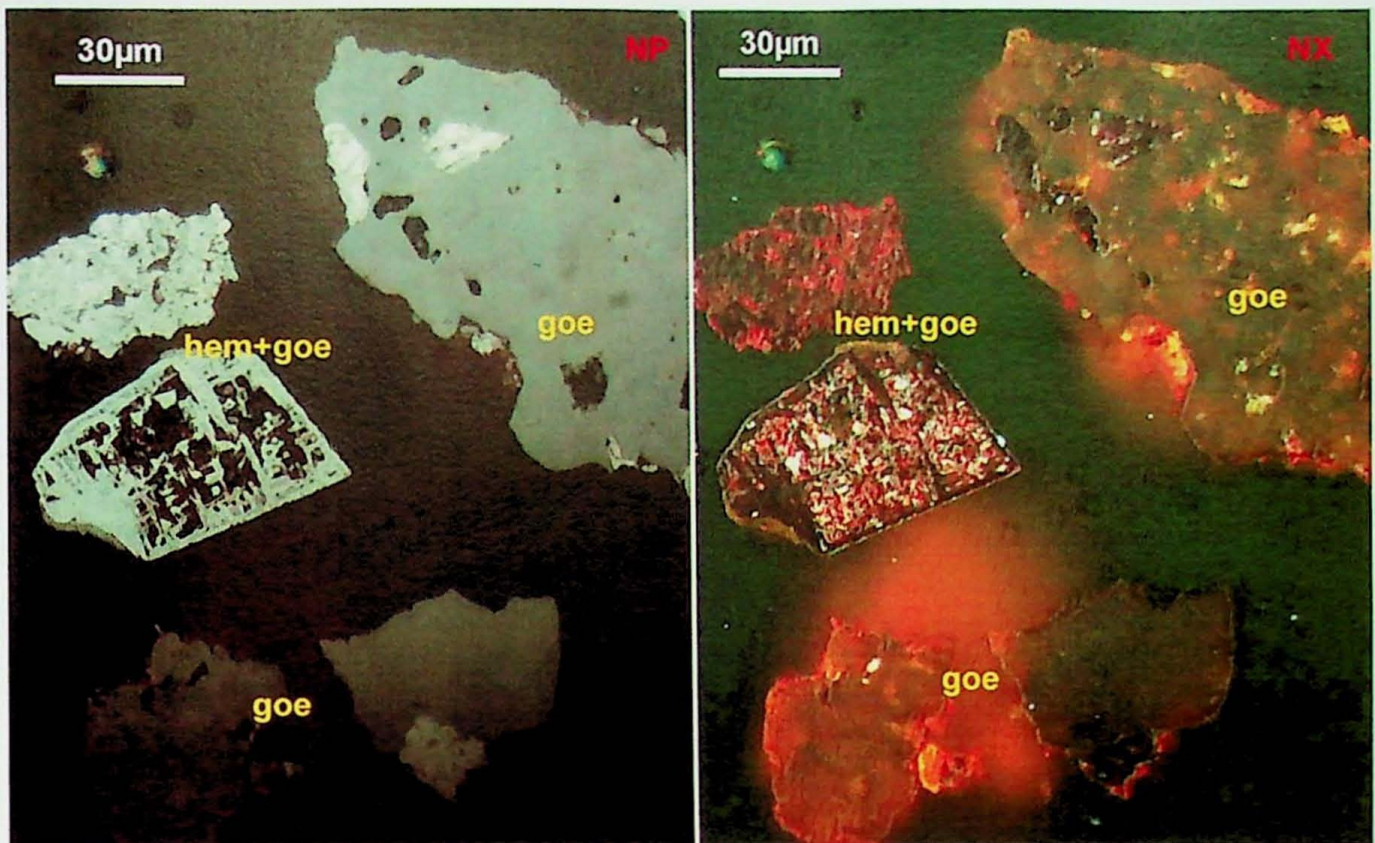
AMOSTRA 6 – FRAÇÃO +0,020MM.



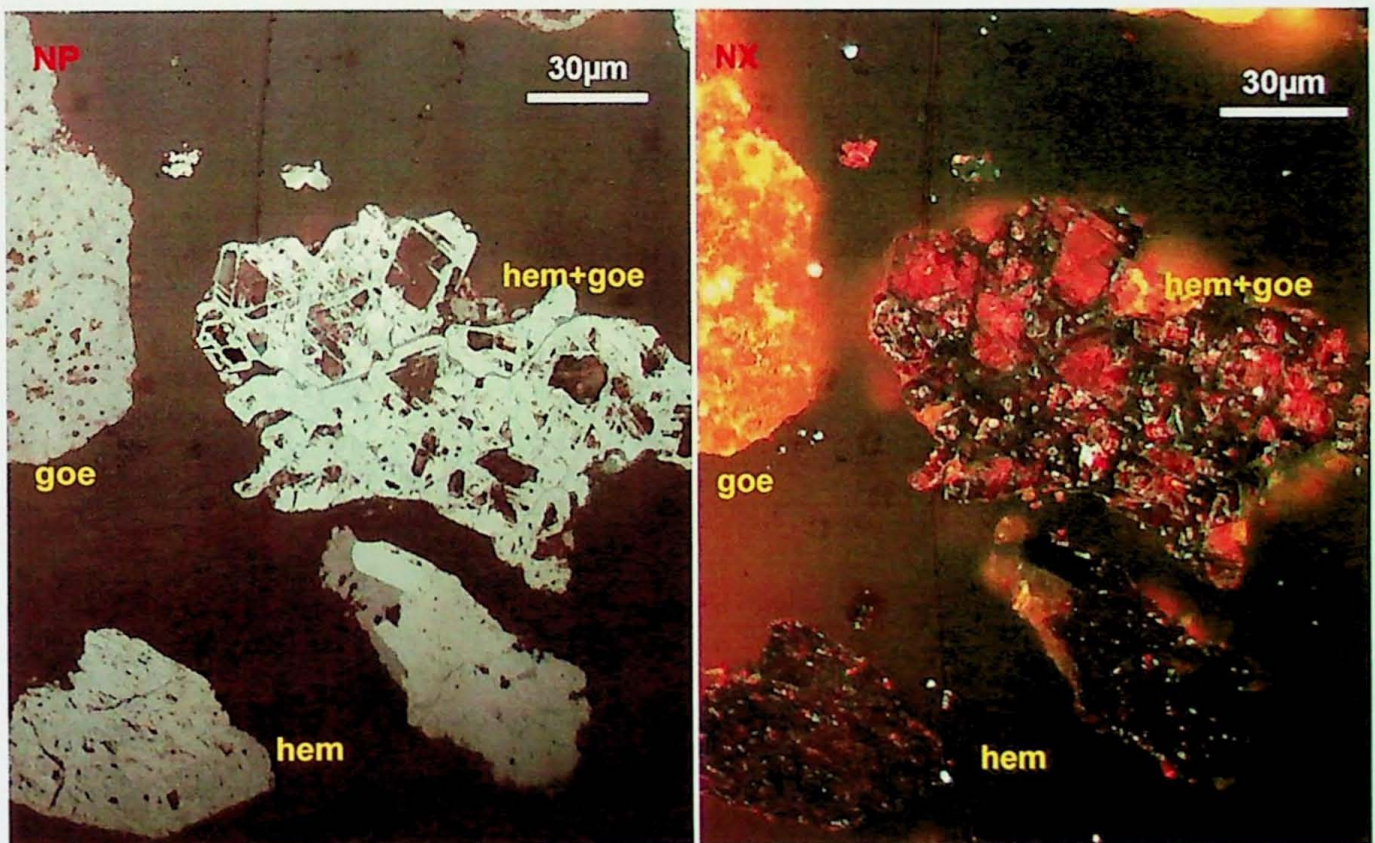
AMOSTRA 6 – FRAÇÃO +0,020MM.

ANEXO 3 – FOTOMICROGRAFIAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA

AMOSTRA 7



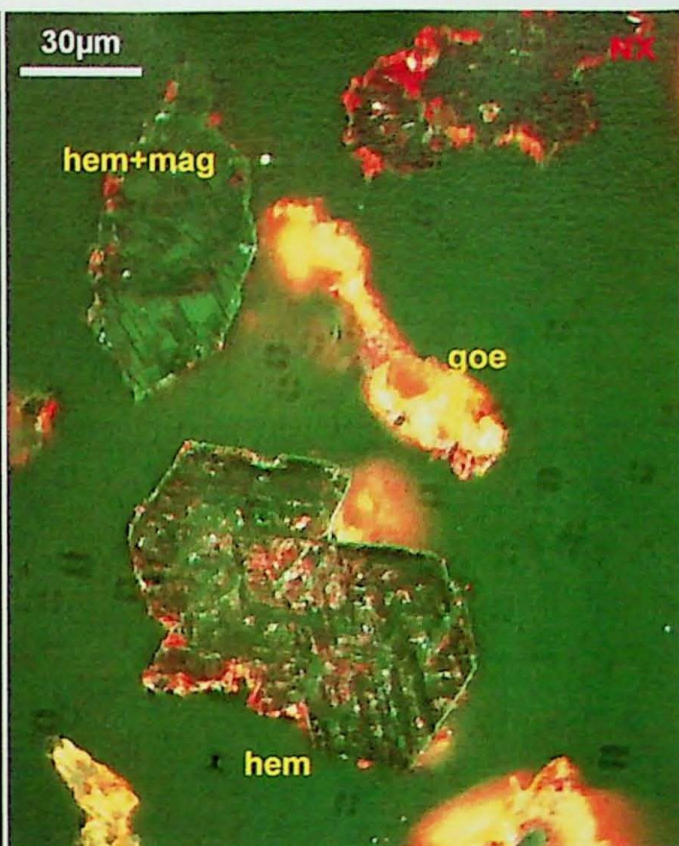
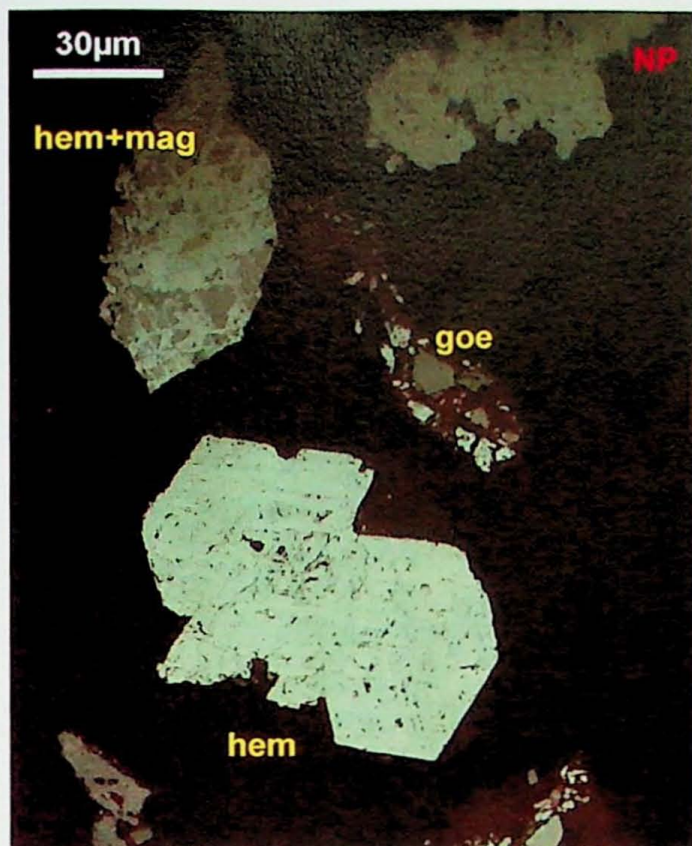
AMOSTRA 7– FRAÇÃO +0,053MM.



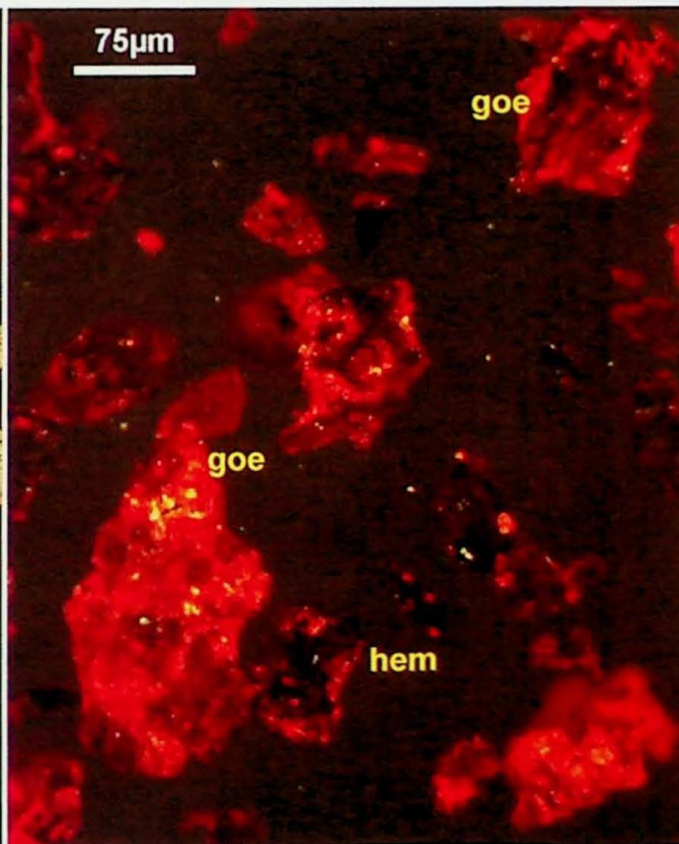
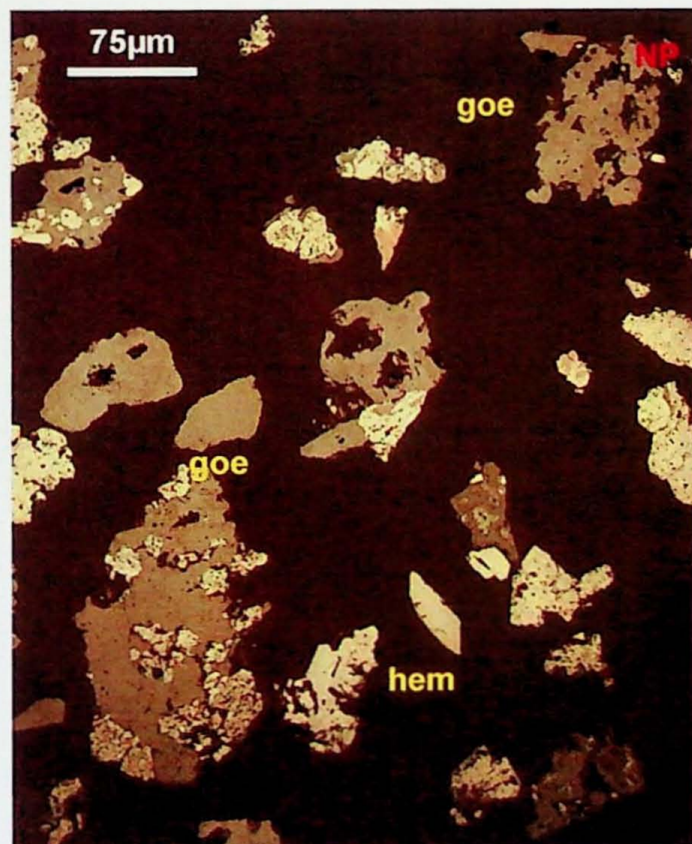
AMOSTRA 7– FRAÇÃO +0,053MM.

ANEXO 3 – FOTOMICROGRAFIAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA

AMOSTRA 7



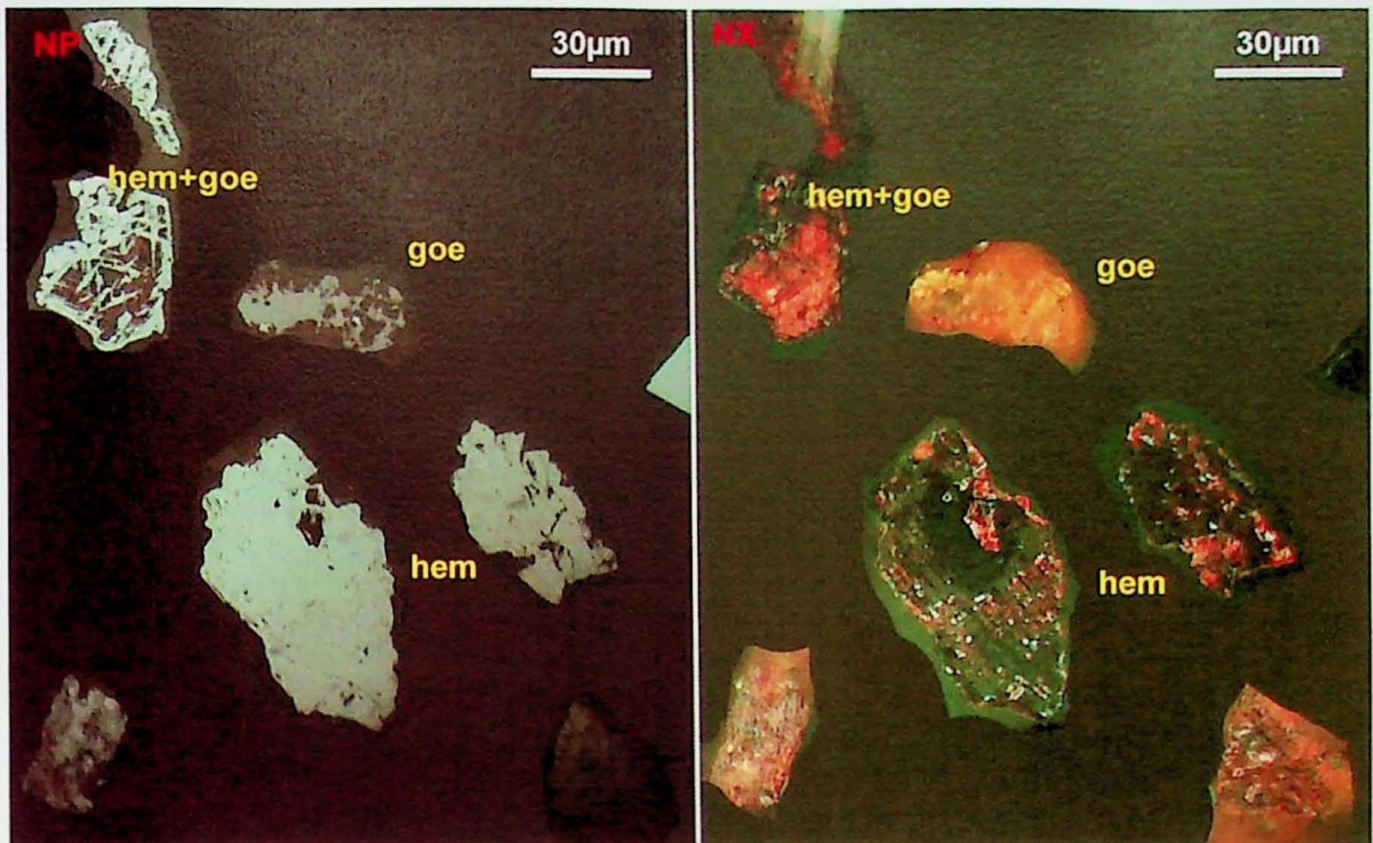
AMOSTRA 7– FRAÇÃO +0,053MM.



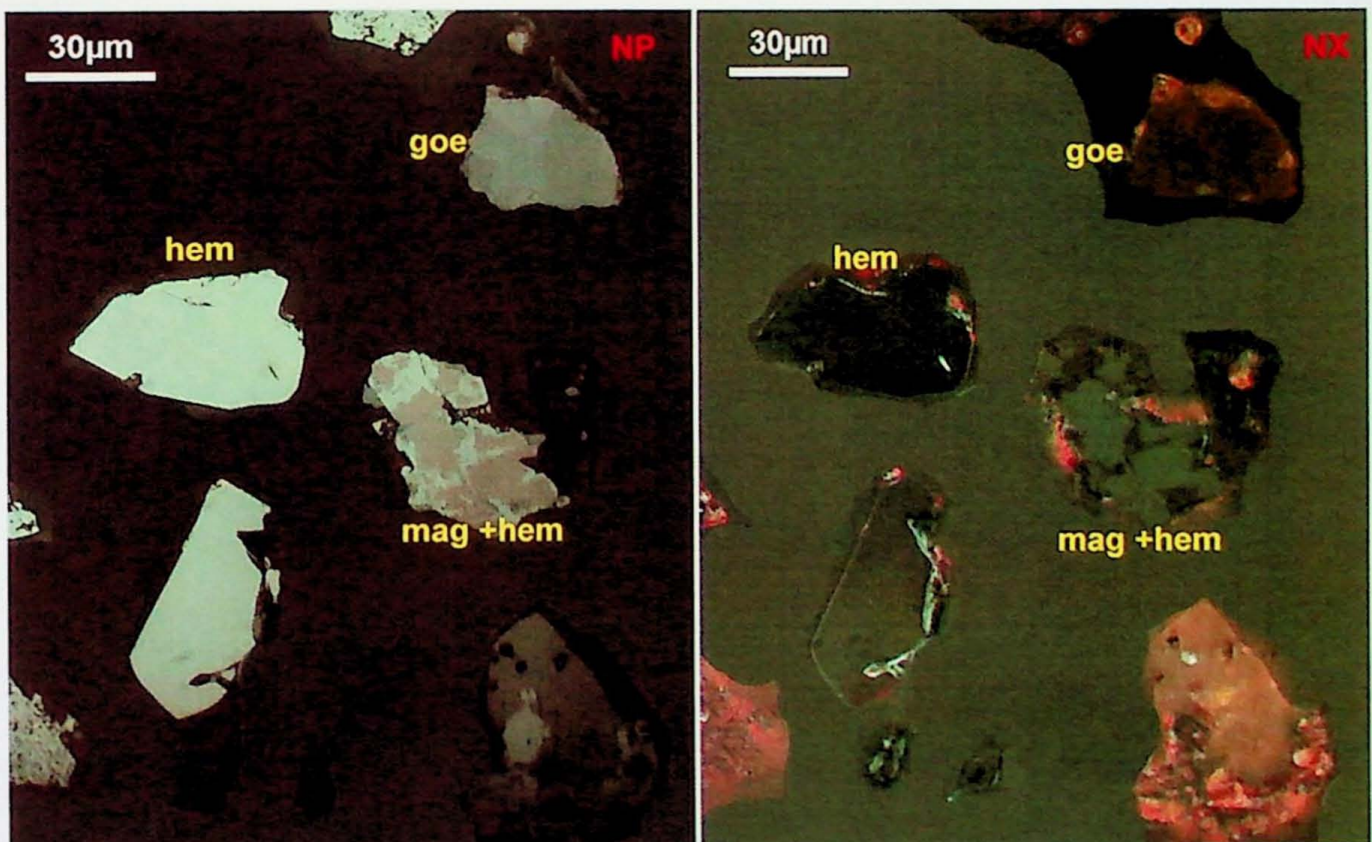
AMOSTRA 7– FRAÇÃO +0,053MM.

ANEXO 3 – FOTOMICROGRAFIAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA

AMOSTRA 7



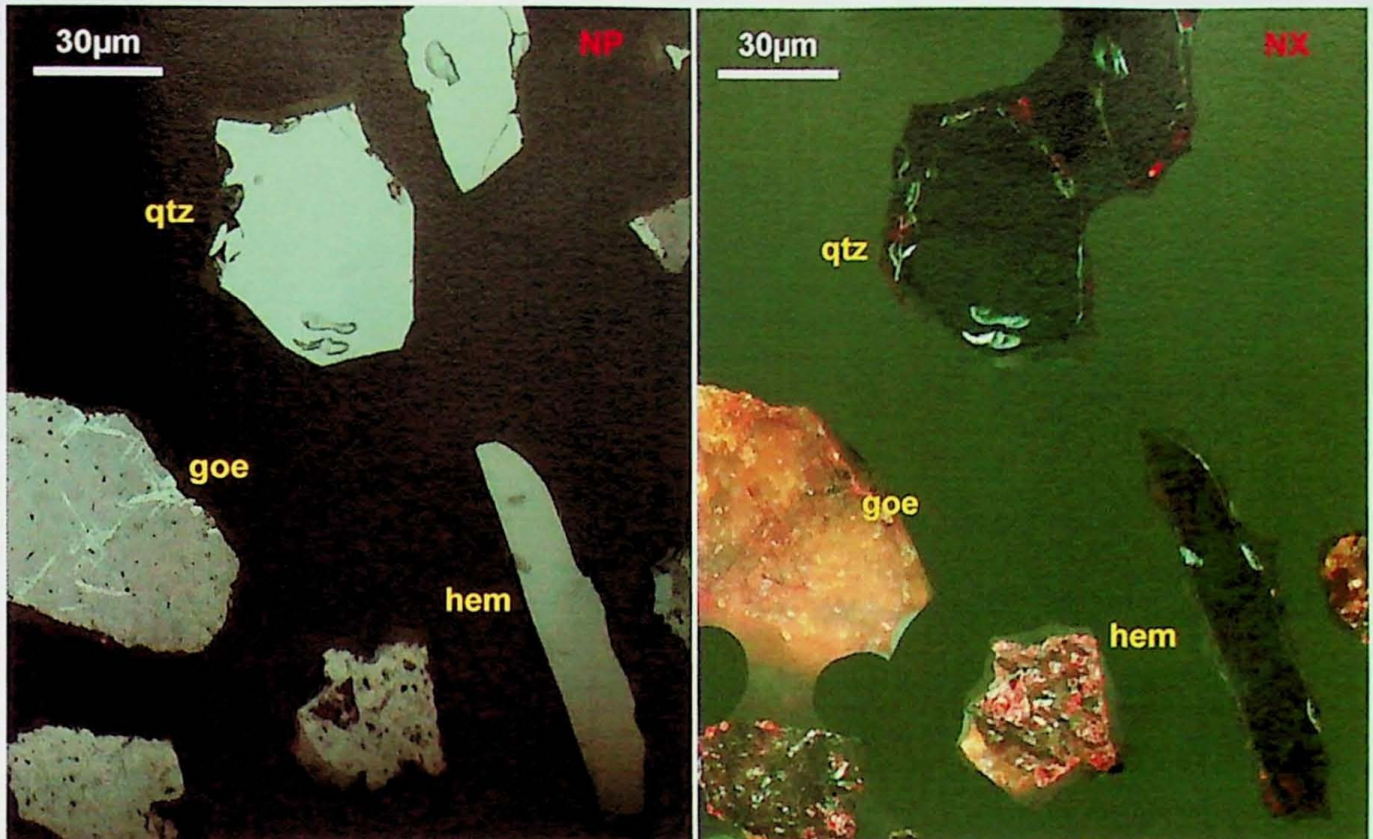
AMOSTRA 7– FRAÇÃO +0,037MM.



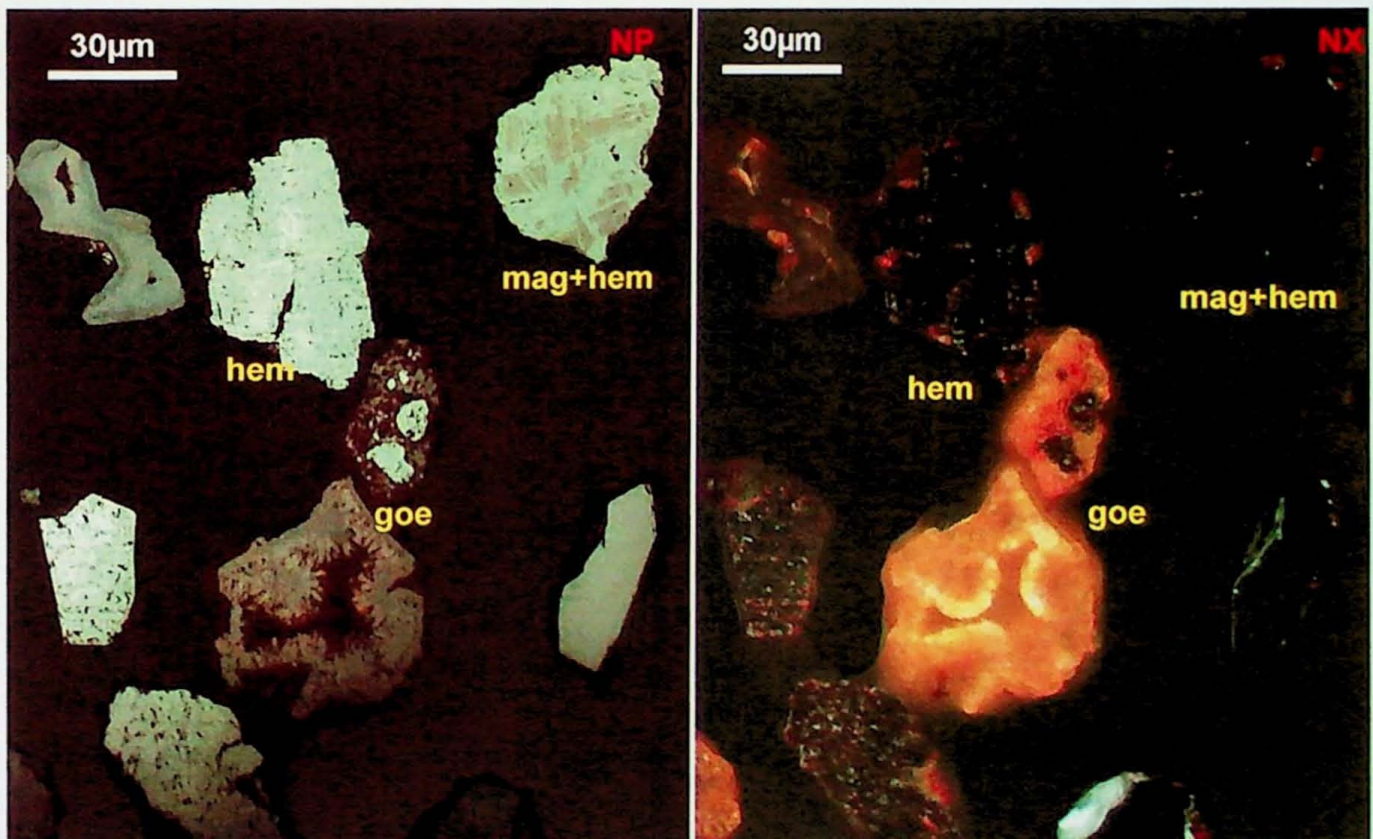
AMOSTRA 7– FRAÇÃO +0,037MM.

ANEXO 3 – FOTOMICROGRAFIAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA

AMOSTRA 7



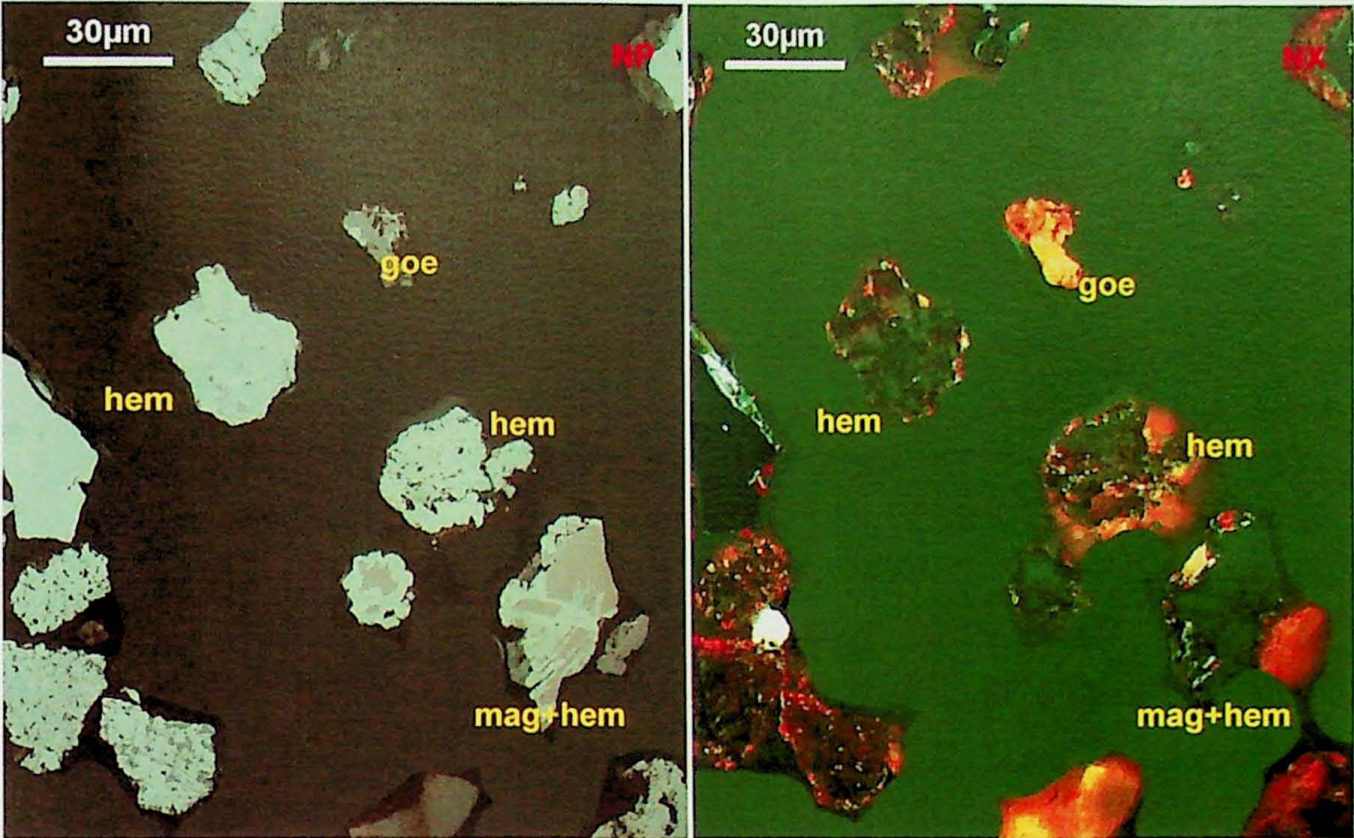
AMOSTRA 7– FRAÇÃO +0,037MM.



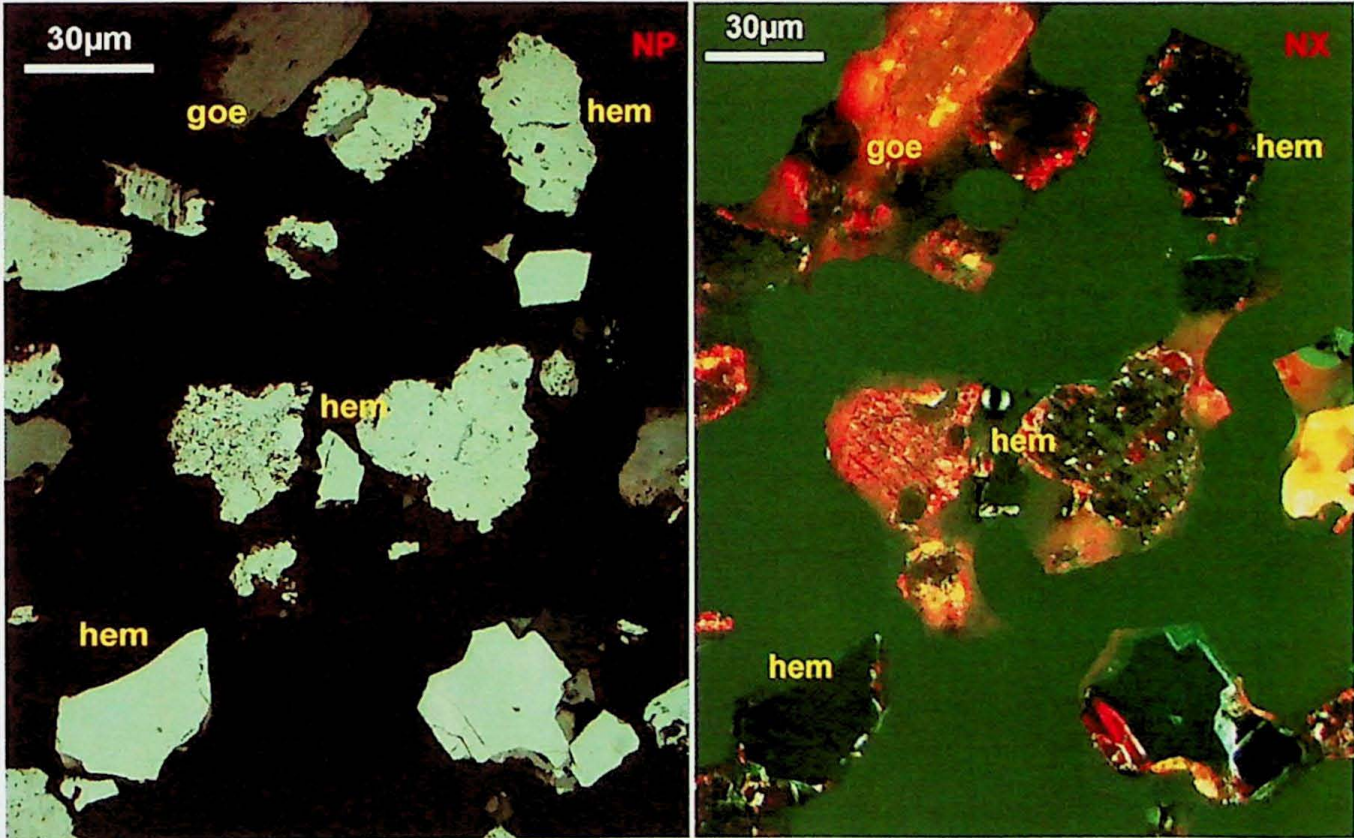
AMOSTRA 7– FRAÇÃO +0,037MM.

ANEXO 3 – FOTOMICROGRAFIAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA

AMOSTRA 7



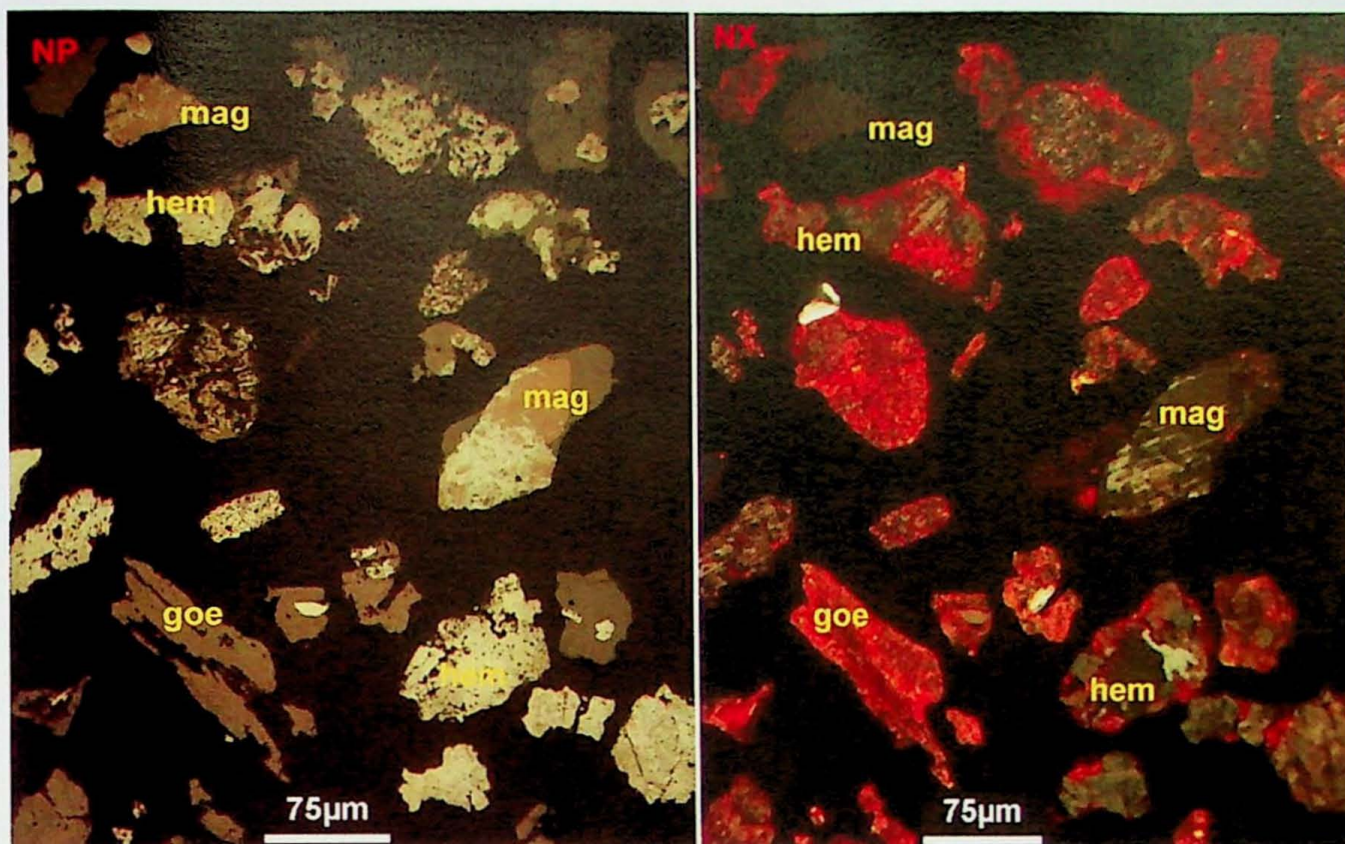
AMOSTRA 7- FRAÇÃO +0,020MM



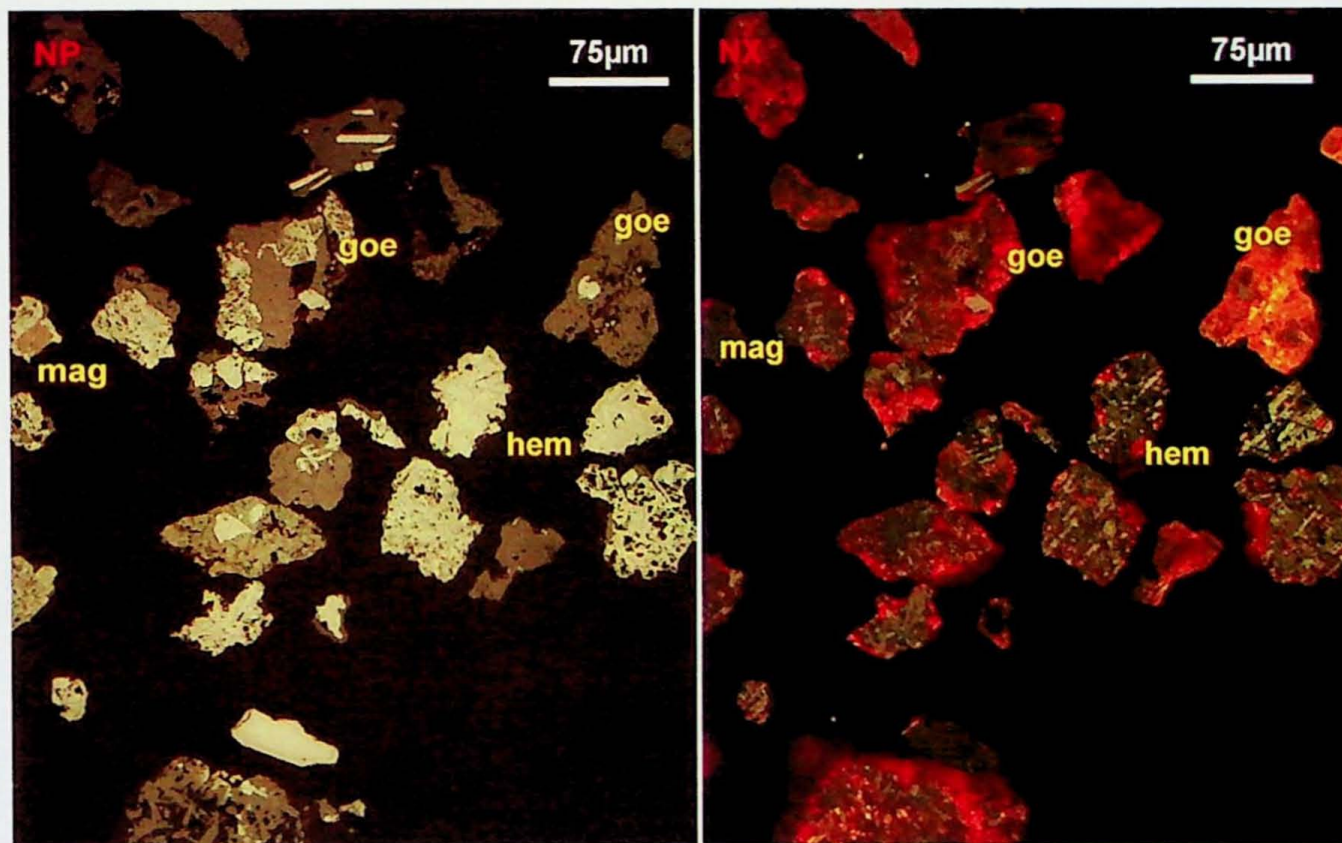
AMOSTRA 7- FRAÇÃO +0,020MM

ANEXO 3 – FOTOMICROGRAFIAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA

AMOSTRA 8



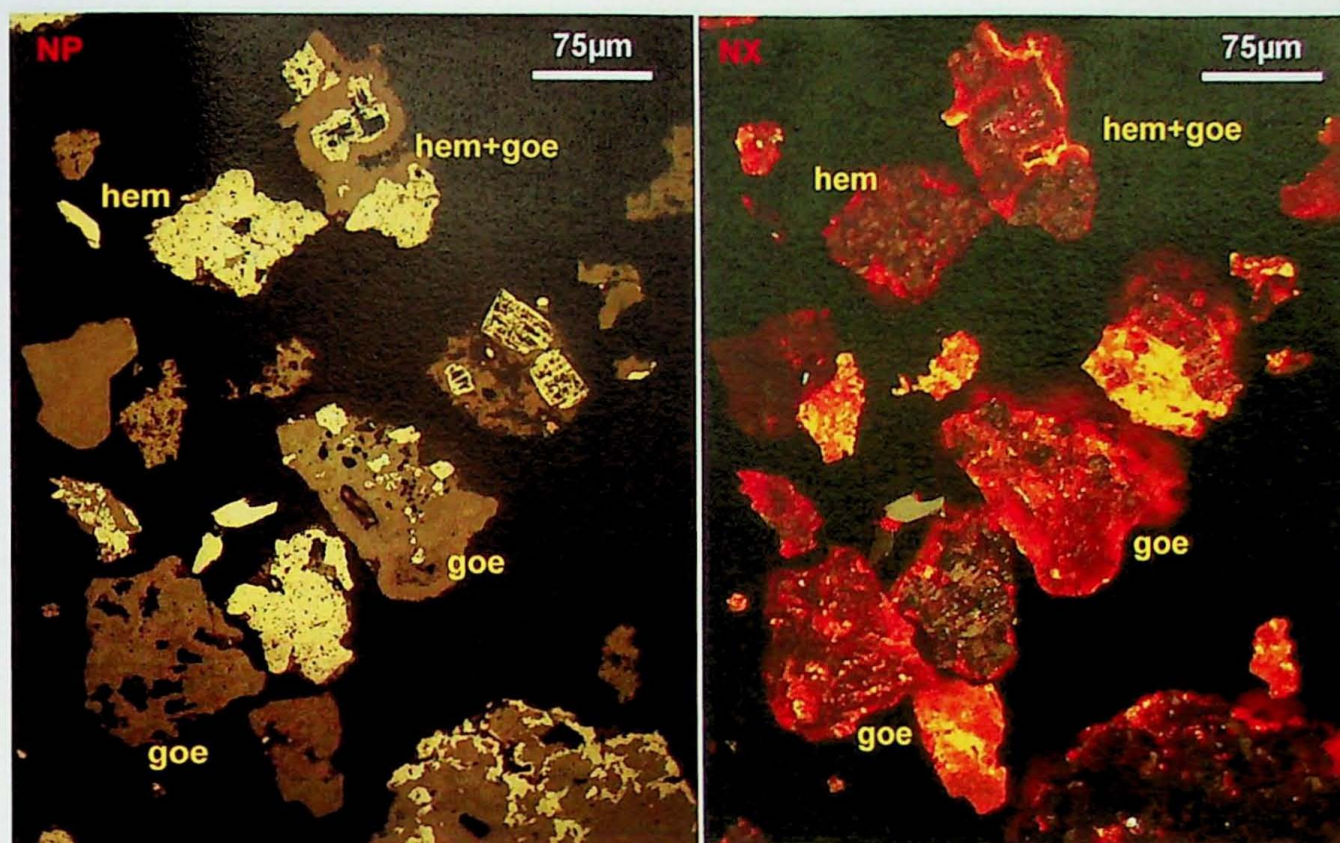
AMOSTRA 8 – FRAÇÃO +0,053MM



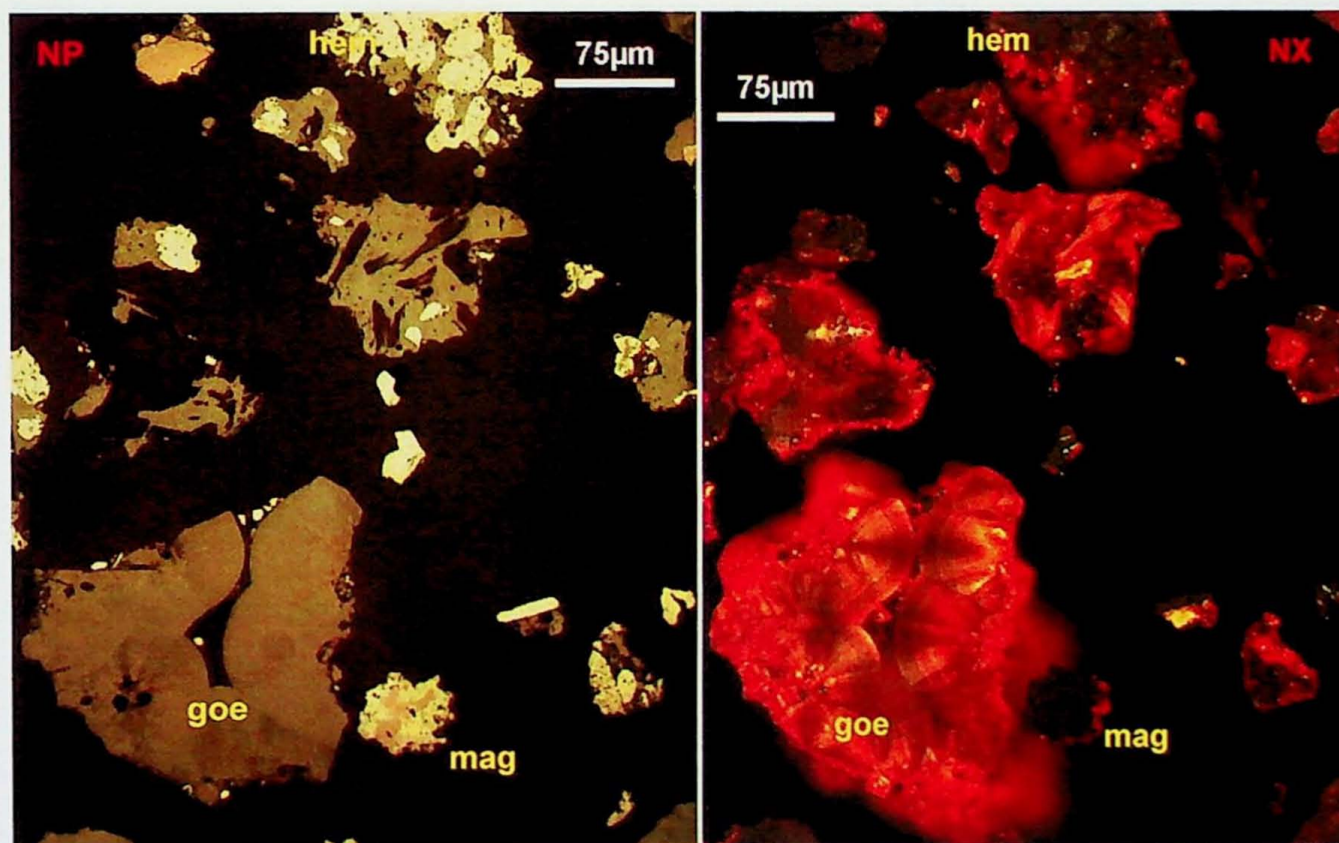
AMOSTRA 8 – FRAÇÃO +0,053MM

ANEXO 3 – FOTOMICROGRAFIAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA

AMOSTRA 8



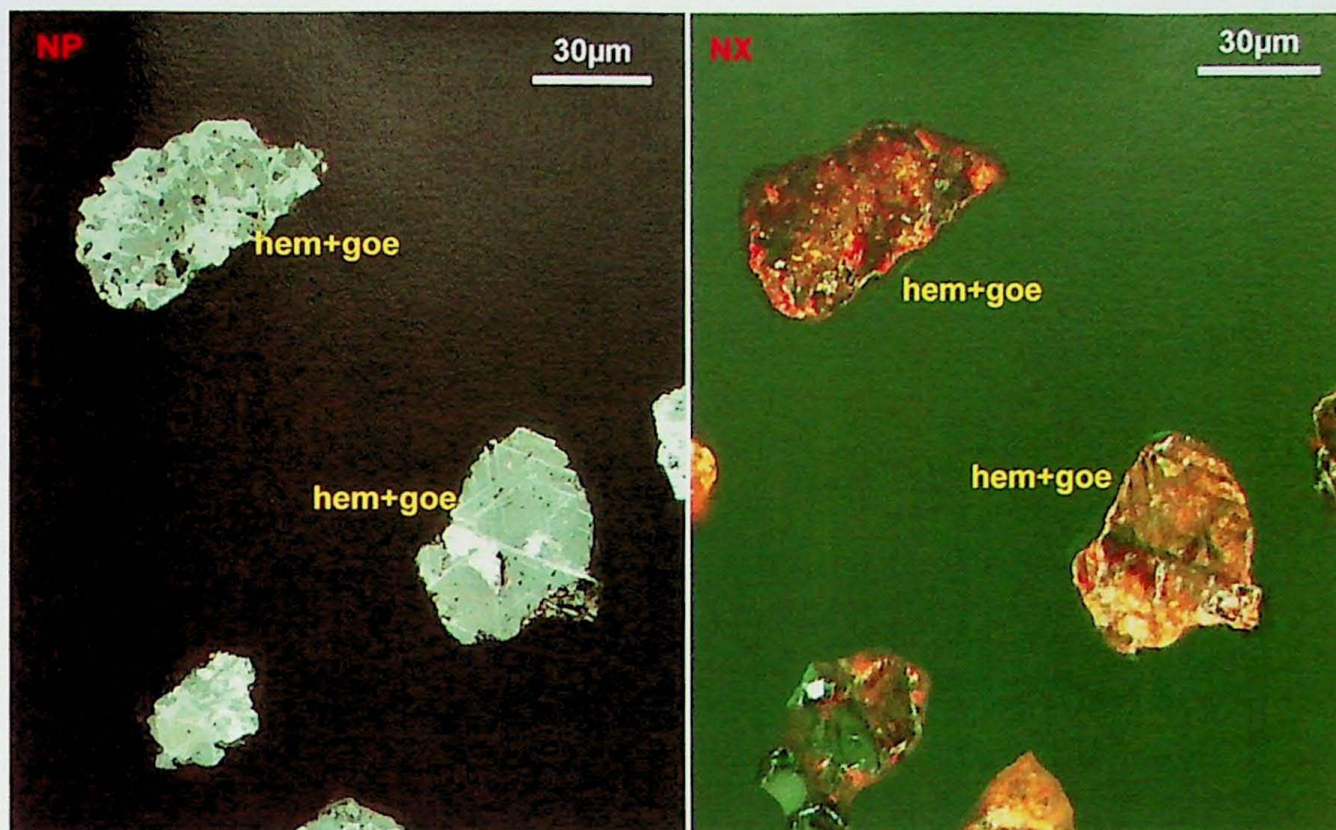
AMOSTRA 8 – FRAÇÃO +0,053MM



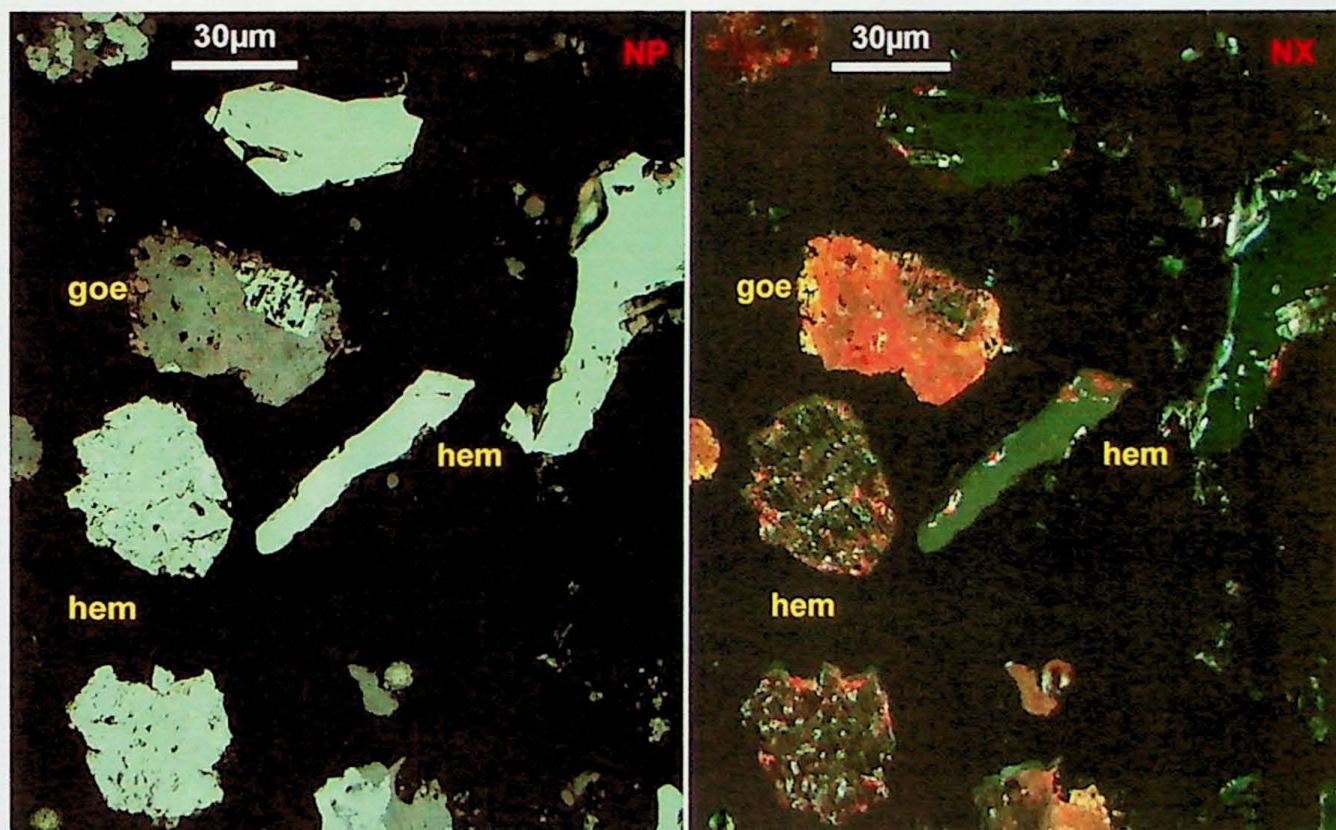
AMOSTRA 8 – FRAÇÃO +0,053MM

ANEXO 3 – FOTOMICROGRAFIAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA

AMOSTRA 8



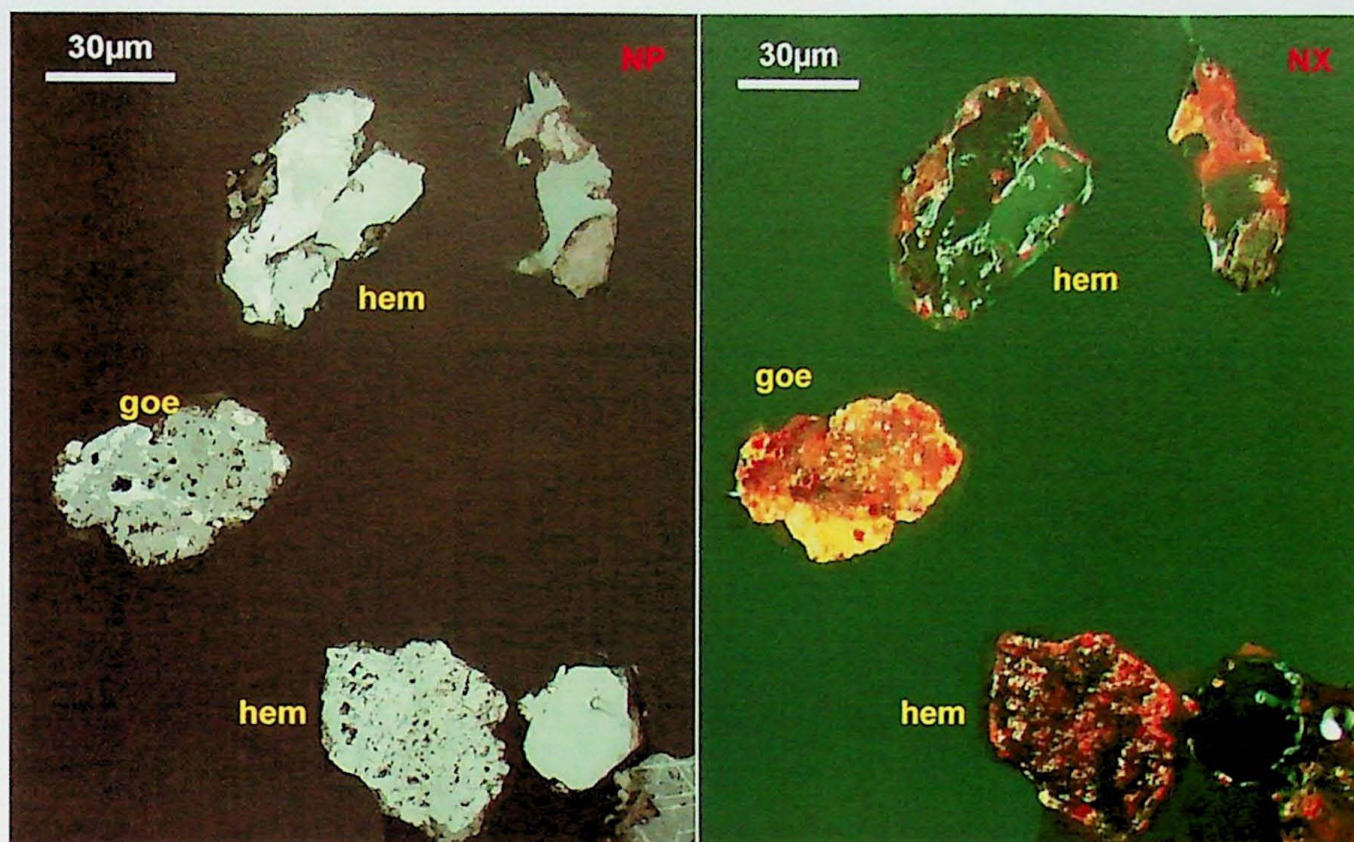
AMOSTRA 8 – FRAÇÃO +0,037MM



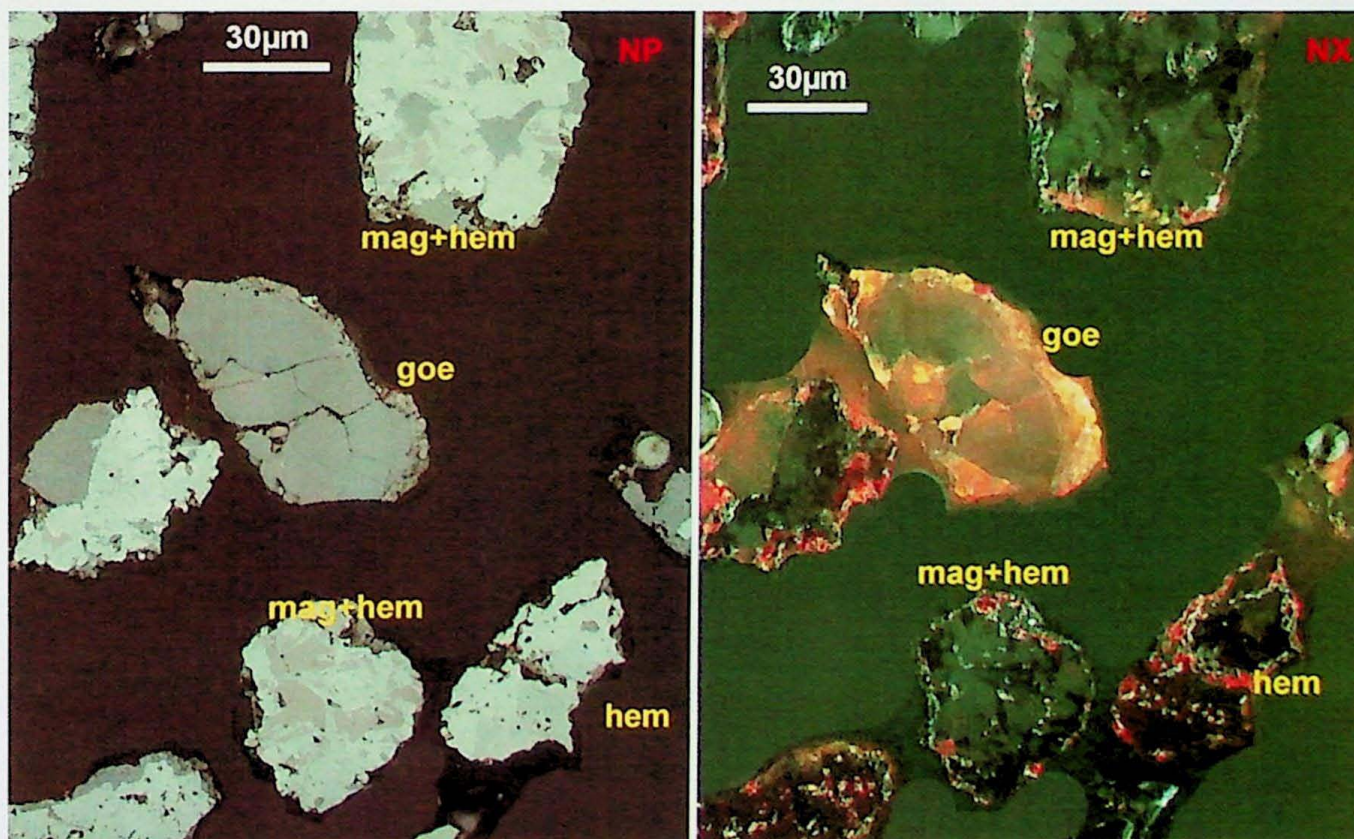
AMOSTRA 8 – FRAÇÃO +0,037MM

ANEXO 3 – FOTOMICROGRAFIAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA

AMOSTRA 8



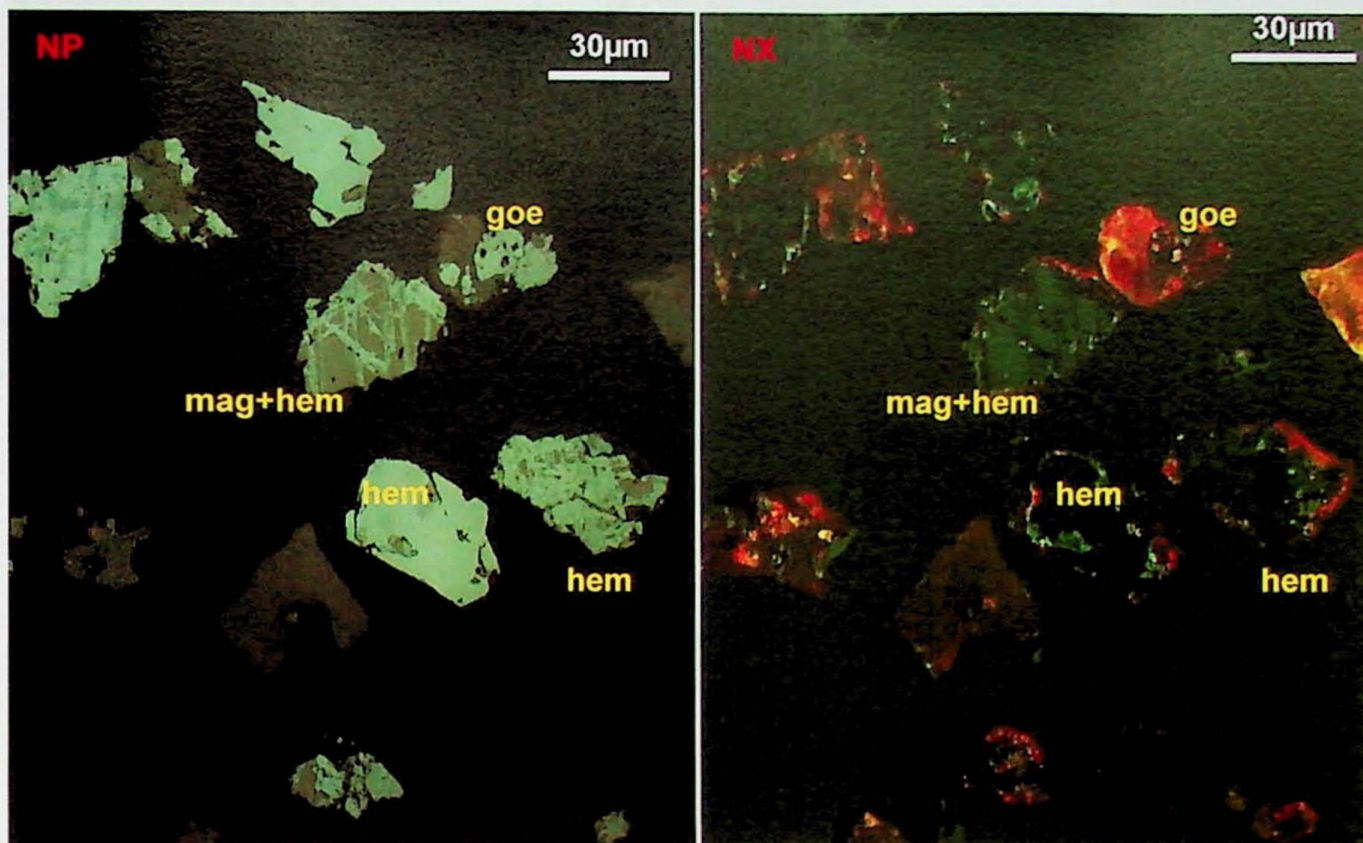
AMOSTRA 8 – FRAÇÃO +0,037MM



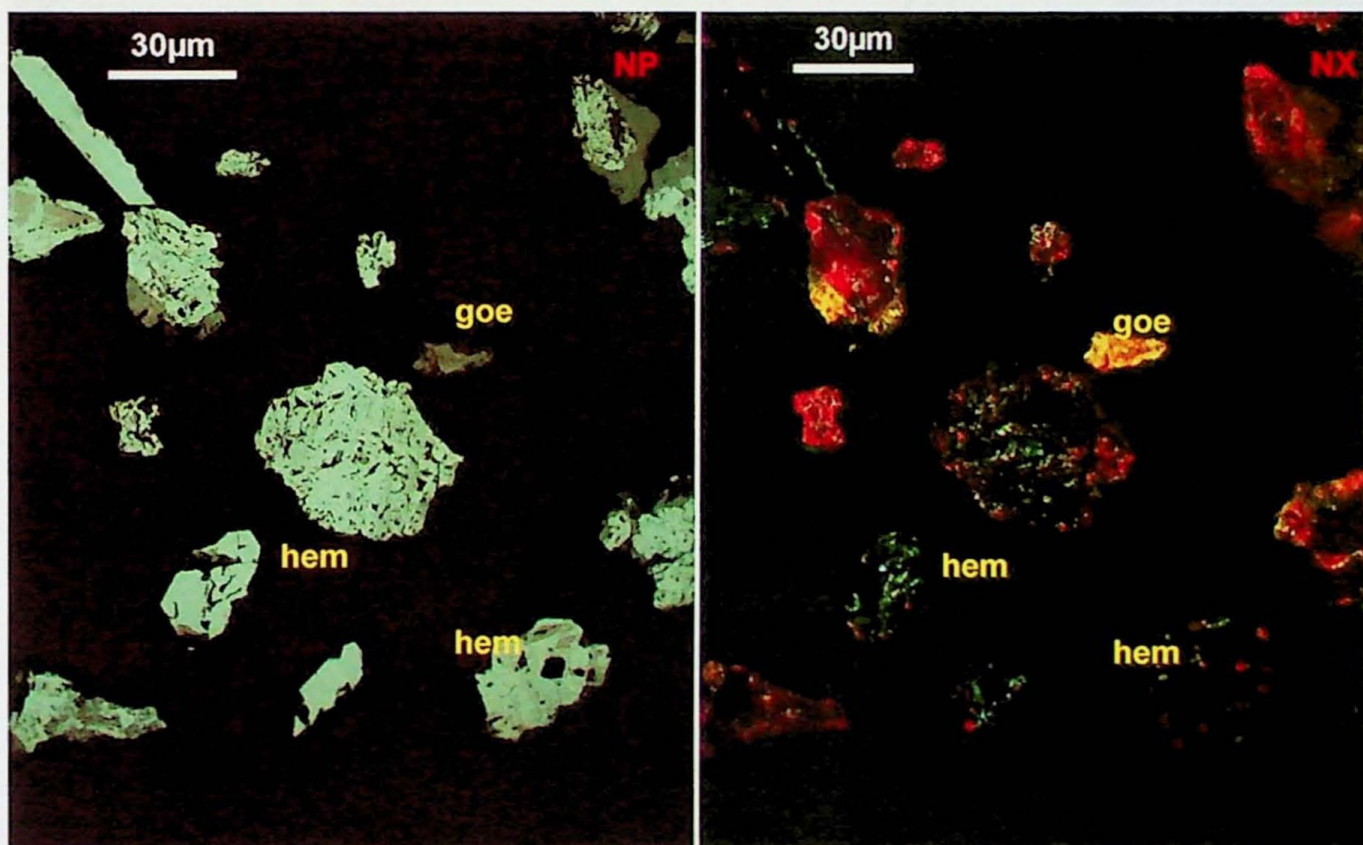
AMOSTRA 8 – FRAÇÃO +0,037MM

ANEXO 3 – FOTOMICROGRAFIAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA

AMOSTRA 8

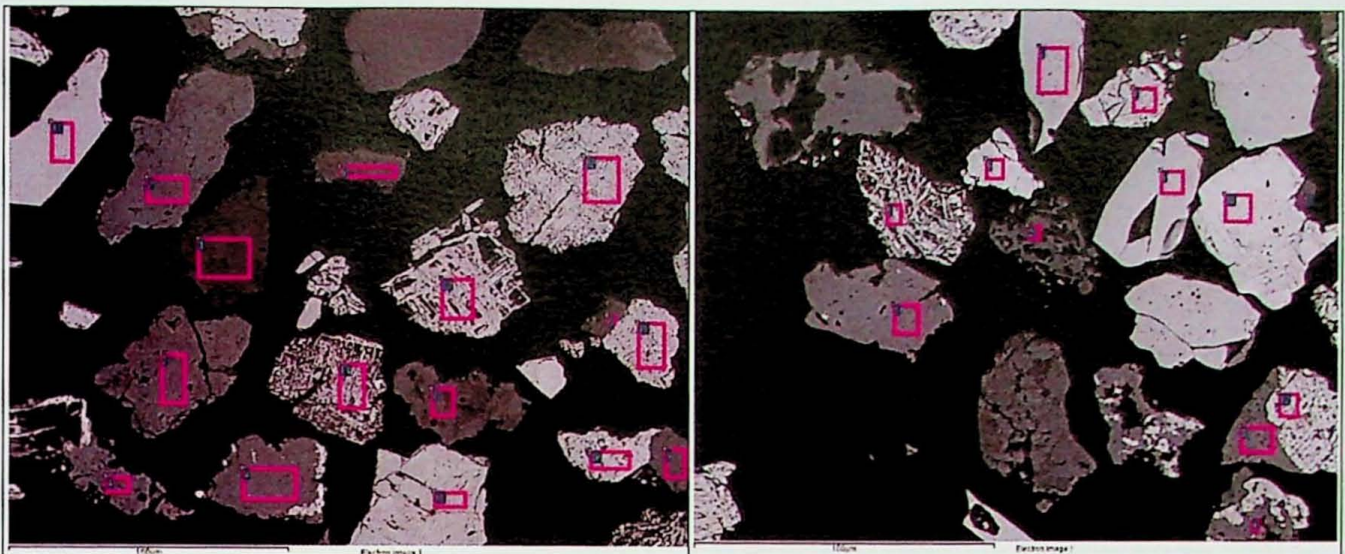


AMOSTRA 8 – FRAÇÃO +0,020MM

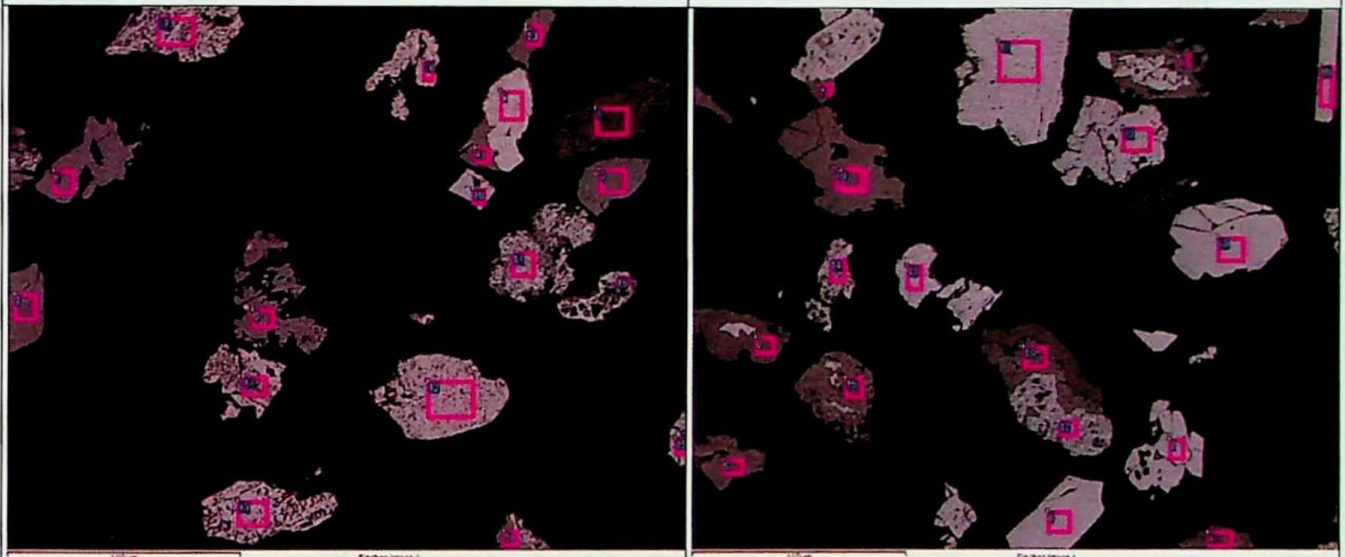


AMOSTRA 8 – FRAÇÃO +0,020MM

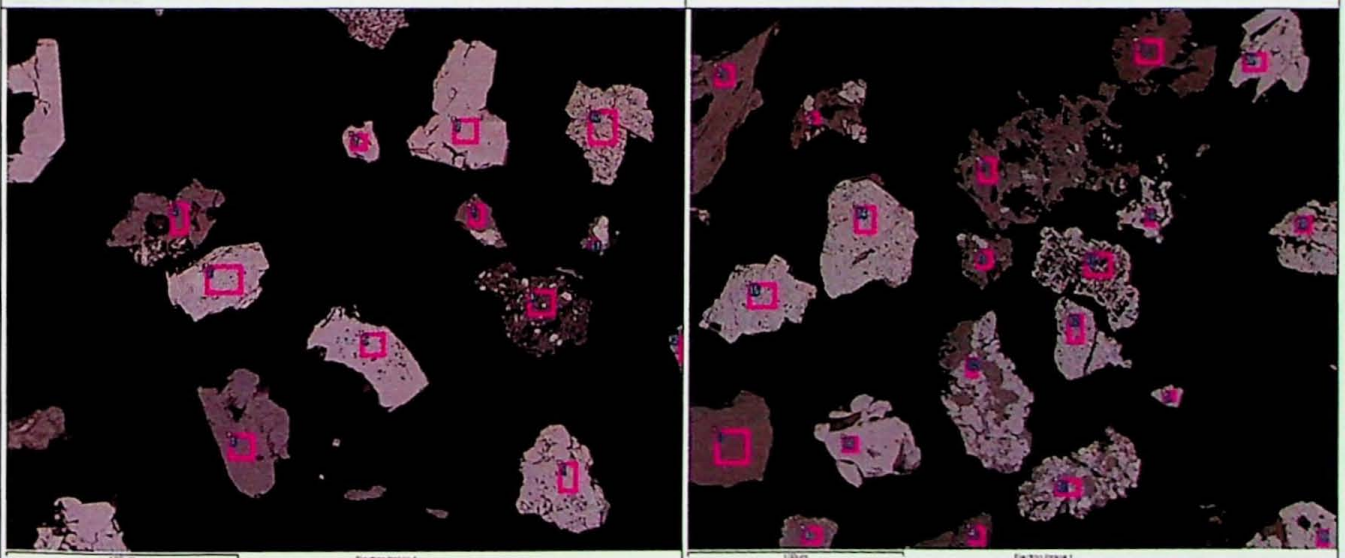
ANEXO 4 – FOTOMICROGRAFIAS POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA
ASSINALANDO ÁREAS OBJETO DE MICROANÁLISE POR EDS



AMOSTRA 6



AMOSTRA 7



AMOSTRA 8

Nota: foram selecionados aleatoriamente 3 a 4 campos por amostra com microanálises químicas das fases portadoras de ferro (áreas assinaladas em magenta)

ANEXO 5 – ASSOCIAÇÕES MINERAIS ESTABELECIDAS POR MLA

AMOSTRA 6

HEMATITA (+MAGNETITA)

Fração (mm)	Livre (%)	Mista em binárias (%)						Mista em ternárias (%)				
		total	goethita	quartzo	out.sil.	carbon.	outros	total	goethita	quartzo	out.sil.	outros
+0,053	52	48	48	0,2	<0,1	<0,1	<0,1	0,2	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
+0,037	70	30	30	0,2	<0,1		0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
+0,020	81	19	19	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1
-0,020	85	15	14	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1
Total	81	19	19	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

GOETHITA

Fração (mm)	Livre (%)	Mista em binárias (%)						Mista em ternárias (%)					
		total	hm+mg	quartzo	out.sil.	carbon.	outros	total	hm+mg	quartzo	out.sil.	carbon.	outros
+0,053	66	34	33	0,6	0,2	<0,1	0,1	0,4	0,2	0,1	<0,1		<0,1
+0,037	67	32	32	0,2	<0,1		0,1	0,3	0,2	<0,1	0,1		<0,1
+0,020	76	24	23	0,1	<0,1		0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		<0,1
-0,020	82	18	18	0,1	<0,1		0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1
Total	78	22	22	0,2	<0,1	<0,1	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

ÓXIDOS DE FE

Fração (mm)	Livre (%)	Mista em binárias (%)				Mista em ternárias (%)		
		total	silicatos	outros	mica	total	silicatos	mica
+0,053	99	0,9	0,8	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
+0,037	100	0,4	0,3	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
+0,020	100	0,1	0,1	<0,1				
-0,020	100	0,1	<0,1	0,1	<0,1			
Total	100	0,2	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

SILICATOS

Fração (mm)	Livre (%)	Mista em binárias (%)			Mista em ternárias (%)		
		total	hm+mg	mica	total	hm+mg	mica
+0,053	75	25	21	4,2			
+0,037	79	21	21		0,3	0,2	0,1
+0,020	76	24	24				
-0,020	94	6,1	5,1	1,0			
Total	84	16	15	1,4	<0,1	<0,1	<0,1

ANEXO 5 – ASSOCIAÇÕES MINERAIS ESTABELECIDAS POR MLA

AMOSTRA 7

HEMATITA (+MAGNETITA)

Fração (mm)	Livre (%)	Mista em binárias (%)					Mista em ternárias (%)				
		total	goethita	quartzo	out.sil.	outros	total	goethita	quartzo	out.sil.	outros
+0,053	57	43	42	0,3	0,1	<0,1	0,3	0,2	0,1	<0,1	<0,1
+0,037	79	21	21	0,2	<0,1	0,1	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
+0,020	86	14	13	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
-0,020	88	12	12	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Total	85	15	15	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

GOETHITA

Fração (mm)	Livre (%)	Mista em binárias (%)					Mista em ternárias (%)				
		total	hm+mg	quartzo	out.sil.	outros	total	hm+mg	quartzo	out.sil.	outros
+0,053	60	40	38	0,9	0,1	0,3	0,2	0,2	<0,1	<0,1	<0,1
+0,037	64	35	35	0,3	<0,1	0,1	0,2	0,2	<0,1	<0,1	<0,1
+0,020	70	30	29	0,1	0,2	<0,1	<0,1	<0,1			<0,1
-0,020	80	20	20	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Total	74	26	25	0,1	0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

ÓXIDOS DE FE

Fração (mm)	Livre (%)	Mista em binárias (%)				Mista em ternárias (%)		
		total	silicatos	outros	mica	total	silicatos	mica
+0,053	99	0,9	0,7	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
+0,037	100	0,5	0,3	0,2	<0,1			
+0,020	100	0,2	0,1	<0,1	0,1			
-0,020	100	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Total	100	0,2	0,2	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

SILICATOS

Fração (mm)	Livre (%)	Mista em binárias (%)			Mista em ternárias (%)			
		total	hm+mg	mica	total	hm+mg	outros	mica
+0,053	68	32	31	0,8	0,3	0,2	0,1	<0,1
+0,037	67	33	33					
+0,020	83	17	17					
-0,020	78	21	21		1,0	0,1		0,9
Total	76	23	23	0,1	0,4	0,1	<0,1	0,3

ANEXO 5 – ASSOCIAÇÕES MINERAIS ESTABELECIDAS POR MLA

AMOSTRA 8

HEMATITA (+MAGNETITA)

Fração (mm)	Livre (%)	Mista em binárias (%)						Mista em ternárias (%)					
		total	goethita	quartzo	out.sil.	carbon.	outros	total	goethita	quartzo	out.sil.	carbon.	outros
+0,053	55	44	43	0,3	0,8	0,1		0,4	0,2	0,1	<0,1	<0,1	0,1
+0,037	76	24	24	0,1	0,2	0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1		<0,1
+0,020	84	16	16		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
-0,020	84	16	16	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		<0,1		
Total	82	18	18	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

GOETHITA

Fração (mm)	Livre (%)	Mista em binárias (%)					Mista em ternárias (%)					
		total	hm+mg	quartzo	out.sil.	outros	total	hm+mg	quartzo	out.sil.	carbon.	outros
+0,053	49	50	49	0,9	0,4	0,4	0,3	0,2	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
+0,037	48	52	52	0,4	<0,1	<0,1	0,3	0,2	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
+0,020	57	43	43	0,3	0,1	<0,1	0,2	0,1		<0,1	<0,1	<0,1
-0,020	63	37	37	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		<0,1		
Total	57	43	42	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

ÓXIDOS DE FE

Fração (mm)	Livre (%)	Mista em binárias (%)				Mista em ternárias (%)		
		total	silicatos	outros	mica	total	silicatos	mica
+0,053	99	1,4	1,1	0,2	0,1	0,1	<0,1	<0,1
+0,037	100	0,5	0,3	0,1	<0,1			
+0,020	100	0,1	0,1	0,1				
-0,020	100	0,1	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Total	100	0,2	0,2	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

SILICATOS

Fração (mm)	Livre (%)	Mista em binárias (%)				Mista em ternárias (%)			
		total	hm+mg	outros	mica	total	hm+mg	outros	mica
+0,053	76	24	23	0,1		0,8	0,6		0,1
+0,037	53	46	42		3,5	1,2	0,7	<0,1	0,5
+0,020	77	23	23						
-0,020	75	25	25						
Total	74	25	25	0,1	0,3	0,6	0,5	<0,1	0,1

ANEXO 6 – FOTOMICROGRAFIAS POR MEV & MLA

Imagens de elétrons retroespalhados - BSE

Imagens das fases minerais discriminadas no sistema MLA - Mineral view

LEGENDA DE CORES DOS MINERAIS NO MLA



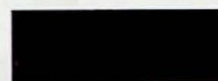
Goethita



Hematita



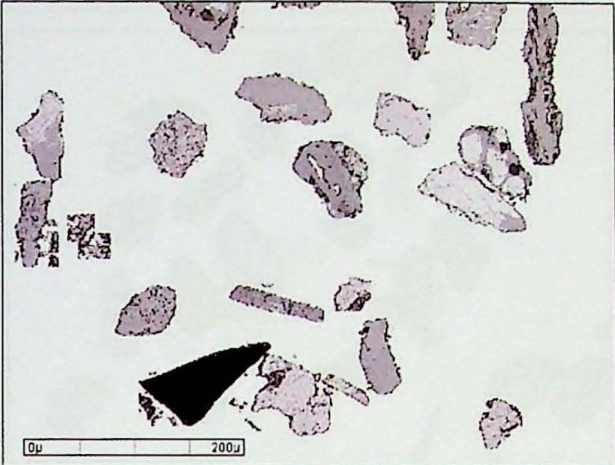
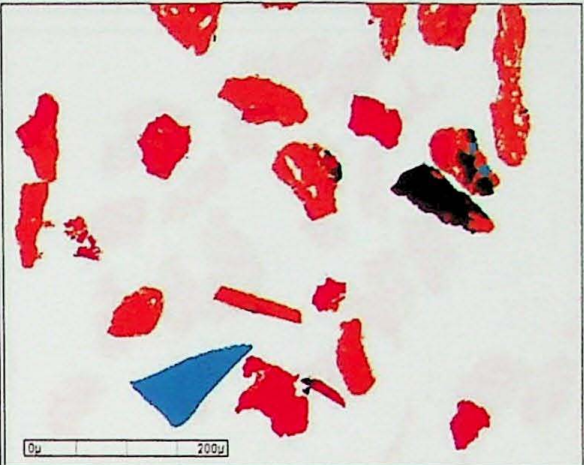
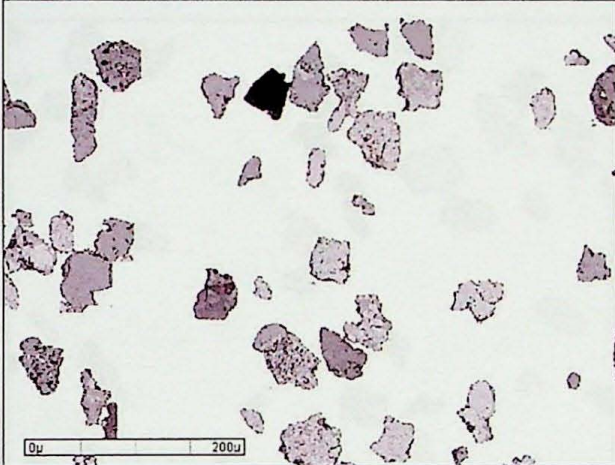
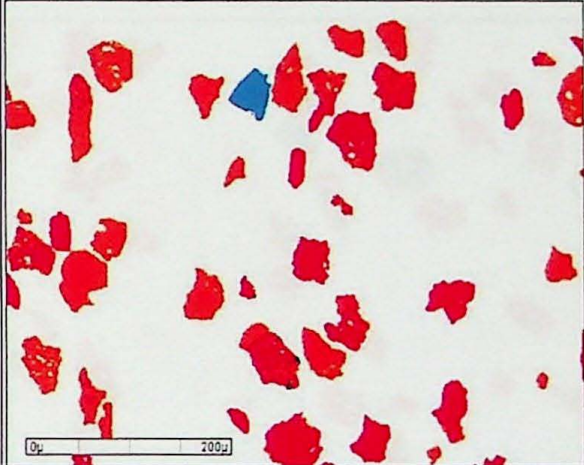
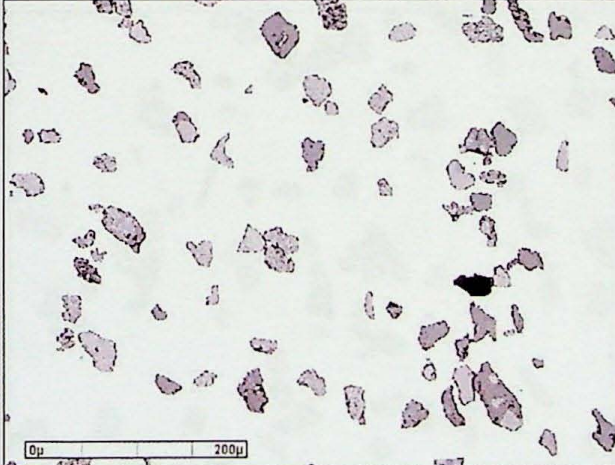
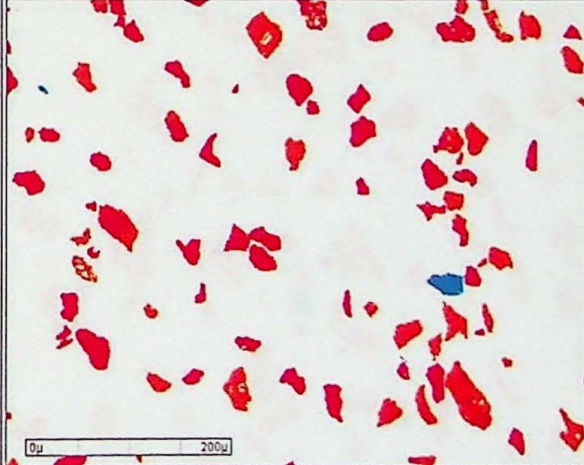
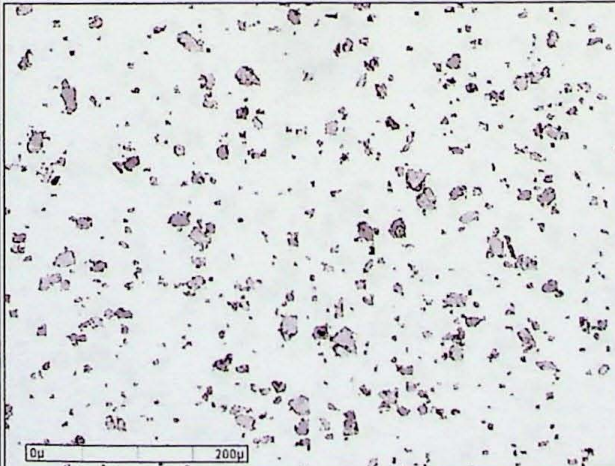
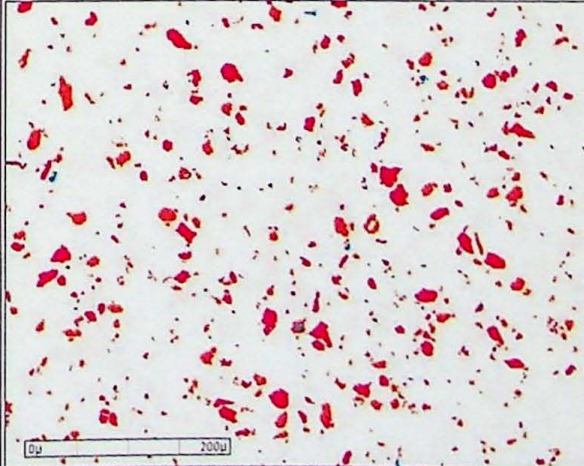
Quartzo



Magnetita

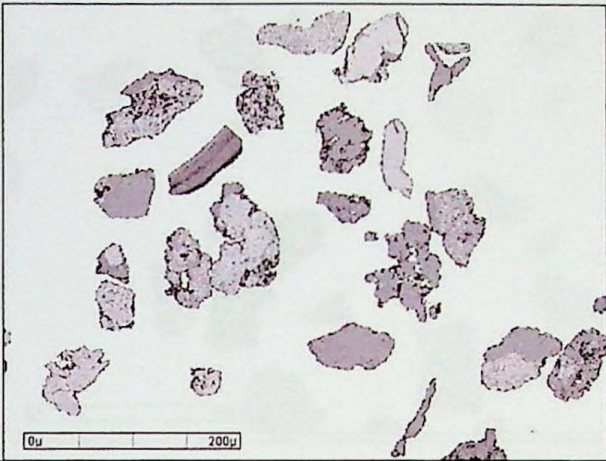
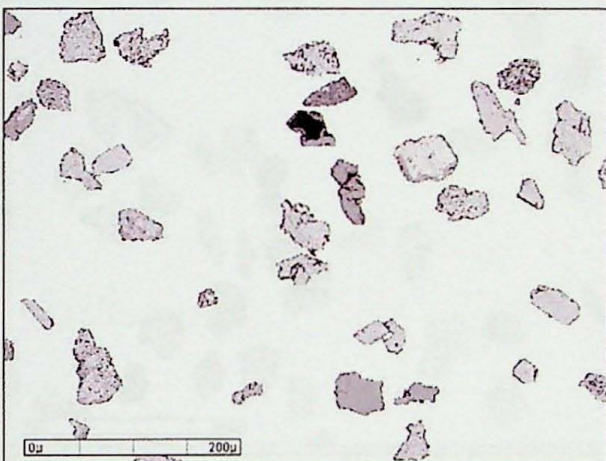
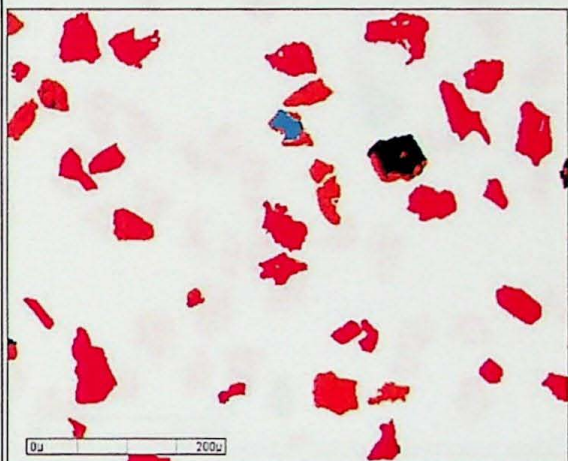
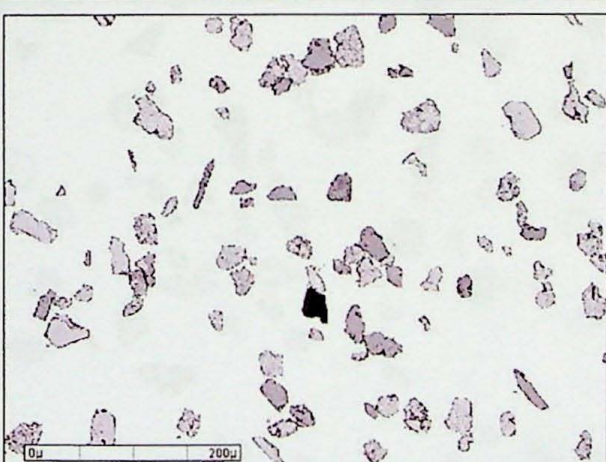
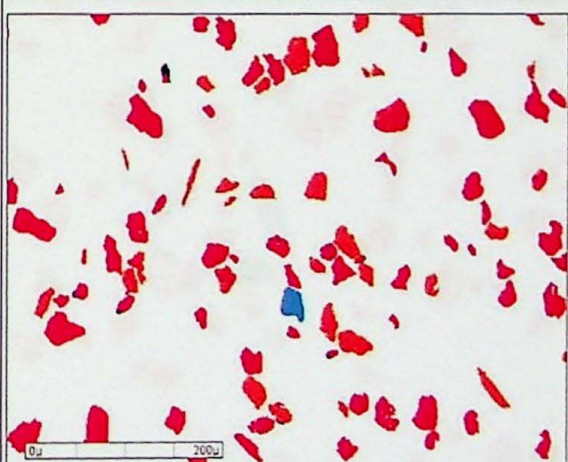
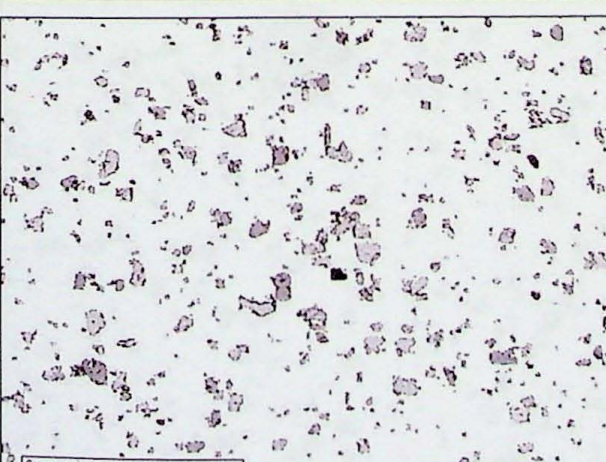
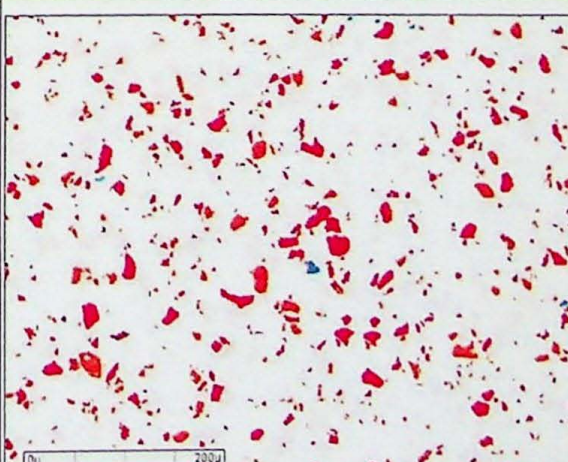
ANEXO 6 – FOTOMICROGRAFIAS POR MEV & MLA

AMOSTRA 6

	BSE	MLA - MINERAL VIEW
Fração +0,053 mm		
Fração +0,037 mm		
Fração +0,020 mm		
Fração -0,020 mm		

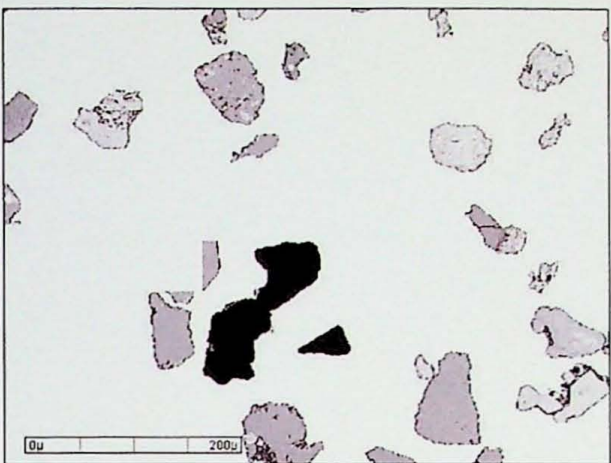
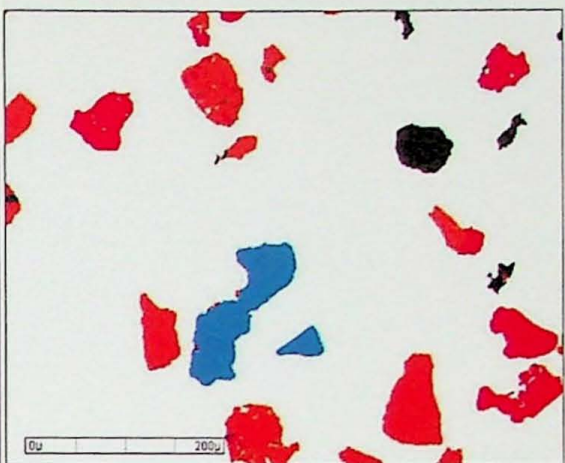
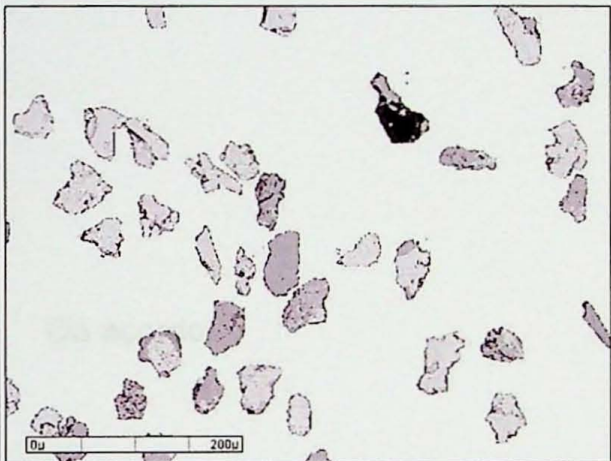
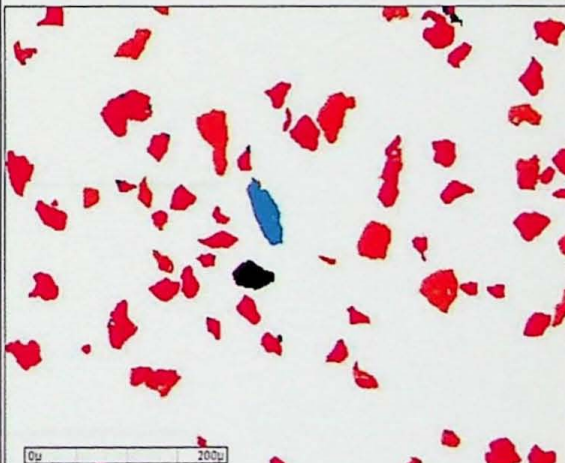
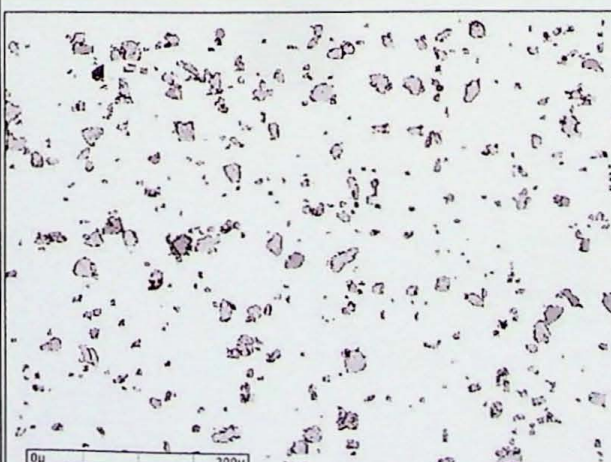
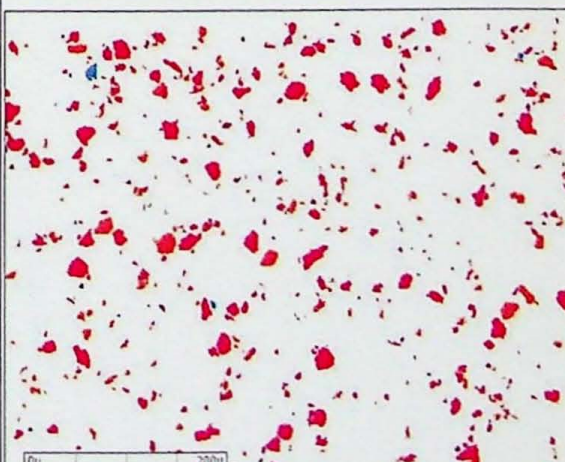
ANEXO 6 – FOTOMICROGRAFIAS POR MEV & MLA

AMOSTRA 7

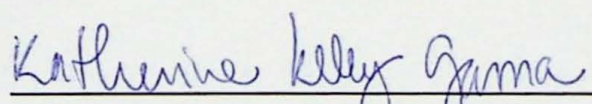
	BSE	MLA - MINERAL VIEW
Fração +0,053 mm		
Fração +0,037 mm		
Fração +0,020 mm		
Fração -0,020 mm		

ANEXO 6 – FOTOMICROGRAFIAS POR MEV & MLA

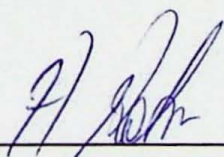
AMOSTRA 8

	BSE	MLA - MINERAL VIEW
Fração +0,053 mm		
Fração +0,037 mm		
Fração +0,020 mm		
Fração -0,020 mm		

De acordo,



Katherine Kelly da Gama (discente)



Prof. Dr. Henrique Kahn (orientador - Poli-USP)



DOAÇÃO
IGC-USP
Data: 02/02/12

