



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**DETERMINAÇÃO DE MAGNETITA RESIDUAL EM CONCENTRADO DE
MINÉRIO DE FERRO A PARTIR DE TRATAMENTO DE IMAGENS DE
MICROSCOPIA ÓPTICA**

Matheus Batista de Paula Carvalho

MONOGRAFIA (II)

Ouro Preto, julho de 2021

**DETERMINAÇÃO DE MAGNETITA RESIDUAL EM
CONCENTRADO DE MINÉRIO DE FERRO A PARTIR DE
TRATAMENTO DE IMAGENS DE MICROSCOPIA ÓPTICA**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. Issamu Endo

Vice-Diretor

Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. Edison Tazava

MONOGRAFIA

DETERMINAÇÃO DE MAGNETITA RESIDUAL EM CONCENTRADO DE MINÉRIO DE FERRO A PARTIR DE TRATAMENTO DE IMAGENS DE MICROSCOPIA ÓPTICA

Matheus Batista de Paula Carvalho

Orientador

Prof. Dr. Leonardo Martins Graça

Co-Orientador

Caio César Silveira

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2021/1.

OURO PRETO

2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C331d Carvalho, Matheus Batista de Paula.
Determinação de magnetita residual em concentrado de minério de ferro a partir de tratamento de imagens de microscópio óptico.
[manuscrito] / Matheus Batista de Paula Carvalho. - 2021.
204 f.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Martins Graça.

Coorientador: Caio César Silveira.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Mineralogia. 2. Minério de ferro. 3. Caracterização mineralógica. 4. Determinação mineralógica. 5. Estatística. I. Graça, Leonardo Martins. II. Silveira, Caio César. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 553.311

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526

Ficha de Aprovação

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: Determinação de magnetita residual em concentrado de minério de ferro a partir de tratamento de imagens de microscopia óptica

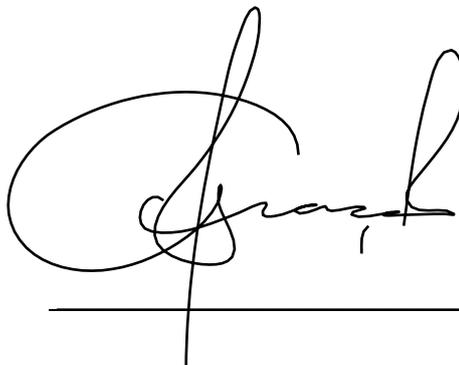
AUTOR: MATHEUS BATISTA DE PAULA CARVALHO

ORIENTADOR: Leonardo Martins Graça

Aprovada em: 29/07/2021

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Leonardo Martins Graça



DEGEO/UFOP

Prof. Dr. Ricardo Augusto Scholz Cipriano



DEGEO/UFOP

Profa. Dr. Gilberto Henrique Tavares Álvares da Silva



DEGEO/UFOP

Ouro Preto, 29/07/2021

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	APRESENTAÇÃO	1
1.2	LOCALIZAÇÃO	2
1.3	OBJETIVOS	3
1.4	JUSTIFICATIVA	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	MINERALOGIA	5
2.2	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA	6
2.3	MICROSCOPIA ÓPTICA	7
2.4	TÉCNICA DE CONTAGEM DE PONTOS	7
2.5	TÉCNICA DE DETERMINAÇÃO DE ÁREA DOS GRÃOS	8
3	MATERIAS E MÉTODOS	11
3.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	11
3.2	CONTAGEM DE PONTOS	13
3.3	DETERMINAÇÃO DE ÁREAS	14
4	RESULTADOS	15
5	DISCUSSÕES	23
6	CONCLUSÃO	27
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29
8	APÊNDICE 1	32
9	APÊNDICE 2	206

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Localização da área de retiradas das amostras do estudo.	2
Figura 3. 1 - A esquerda é apresentada a imagem base original e a direita a imagem como resultado da separação dos grãos representados por hematita, goethita e magnetita.....	12
Figura 4. 1- Imagem exemplo de uma seção polida utilizada para a caracterização mineralógica.....	15
Figura 4. 2 – Gráficos Boxplot para contagem de pontos, valores mínimos (Min), quartis, medianas, valores máximos (Max), médias, valores do teste anova e p-valor. A) para hematita mais goethita B) para magnetita.	20
Figura 4. 3 – Gráficos Boxplot para determinação de áreas, valores mínimos (Min), quartis, medianas, valores máximos (Max), médias, valores do teste anova e p-valor. A) para hematita mais goethita B) para magnetita.	21
Figura 5. 1- Imagem 9 da pastilha 1 (P1-9) representando as áreas de magnetita destacados de preto.....	25

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4. 1- Resultado da quantificação por contagem de pontos para cada imagem das amostras P1, P2 e P3, médias e desvio padrão.....	16
Tabela 4. 2 - Resultado da quantificação por determinação de áreas para cada imagem das amostras P1, P2 e P3, médias e desvio padrão.....	18
Tabela 4. 3- Valores de desvio padrão das imagens das amostras P1, P2 e P3.	19

Resumo

A caracterização mineralógica de concentrados de minério de ferro com auxílio de microscópio óptico é amplamente utilizada para determinação das fases minerais para auxiliar no controle de processo. A partir da técnica de contagem de pontos torna-se possível determinar as fases minerais de uma amostra. Porém, a técnica suscita incertezas diante de fases minerais residuais de difícil separação, como é o caso da magnetita transformada em hematita. A partir disso, o presente trabalho propõe o uso da determinação de áreas por meio do tratamento de imagens de microscópio óptico, visando minimizar as incertezas nos percentuais obtidos. Além disso, realizar uma análise estatística a fim de se ter confiança estatísticas nos resultados obtidos. Foram geradas 29 imagens para cada uma de 3 pastilhas de *pellet feed* através de uma câmera acoplada ao microscópio óptico. Por intermédio do tratamento das imagens, aplicação das técnicas de contagem e de determinação de áreas, foram determinados os percentuais por pontos e por área das fases minerais hematita, goethita e magnetita. Ademais, foram utilizados tratamento estatístico e teste Anova para correlacionar os resultados das amostras (3 pastilhas) em cada método: tanto a contagem de pontos quanto a determinação das áreas. Com tratamento estatístico tornou-se possível comparar os resultados obtidos das amostras investigadas para os dois métodos. Os resultados do método de contagem de pontos revelaram em média para as três amostras um percentual de 70,39 % (11,97) de hematita junto a goethita e 29,46 % (11,97) de magnetita. A determinação de áreas possibilitou uma determinação mais próxima da realidade quando são comparados os valores obtidos com as áreas selecionadas nas imagens, que resultou em 96,86% (2,29) para a hematita mais goethita e 3,14% (2,29) para magnetita residual.

Palavras chave: Caracterização mineralógica, determinação de áreas, microscópio óptico, estatística.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

O minério de ferro é uma *commodity* essencial para a economia mundial. O Brasil é um de seus maiores produtores ocupando um papel fundamental no cenário econômico mundial. Suas reservas são representadas principalmente pelas formações ferríferas do Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais) e Serra dos Carajás (Pará). Certas propriedades são intrínsecas a cada minério variando de região a região devido ao seu processo de formação. As variações das características dos minérios geram uma necessidade de definição individualizada destes, visto que morfologia do grão, sua estrutura, tamanho e composição, interferem no seu beneficiamento. Resultados obtidos a partir de técnicas qualitativas, quantitativas e semiquantitativas de caracterização mineralógica do minério auxiliam na previsibilidade industrial e tornam possíveis tomadas de decisões que impactam diretamente na eficiência e resultados dos processos do beneficiamento mineral (Dwarapudi *et al.* 2008, Graça. 2015).

Uma técnica utilizada para analisar o conteúdo mineralógico de uma amostra é o método de contagem de pontos com auxílio de microscópio óptico de luz refletida. O método se trata de uma análise estatística modal aplicada após a contagem de número de pontos, em grãos equidimensionais de uma amostra. Utilizando o microscópio óptico com luz refletiva, estima-se a porcentagem de cada constituinte da amostra com intuito de contabilizar um número de pontos que ofereça certa confiabilidade estatística. O objetivo de tal análise é de determinar o conteúdo mineralógico de uma amostra. (Glangolev 1934; Miller 1939; Graça *et al.* 2015; Bjarne S.G. Almqvist 2019).

Atualmente, têm sido desenvolvidas novas metodologias baseadas em microscopia óptica com análise de imagens para a caracterização do minério de ferro. Métodos como esses têm o intuito de suportar o controle do processo de produção e colaborar com a eficiência da produção. Isso ocorre com a possibilidade de automatizar etapas, como a de aquisição de imagem no microscópio óptico, identificação e descrição de minerais, determinação de fase, de textura mineral e porosidade (Da costa *et al.* 2009; Takehara et al 2009; Iglesias *et al.* 2016; Graça *et al.* 2015; Iglesias *et al.* 2018).

No entanto, existe grande divergência quando se trata de metodologias para determinar a quantidade de pontos equidimensionais a serem contados. Tal fato ganha particular relevância se considerar que, do ponto de vista prático, é necessário obter um resultado estatisticamente satisfatório e correto. No presente trabalho pretende-se apresentar uma comparação entre os métodos de caracterização por meio da contagem de pontos e o de determinação de área. A comparação tem como

foco os resultados alcançados pela contagem de pontos e determinação da área da magnetita (Graça *et al.* 2015). Apesar de existirem outros métodos como, por exemplo, a espectroscopia de Mossbauer, existem dificuldades na determinação consistente da magnetita. Fases como as de óxidos de ferro são dificilmente separadas devido a oxidação do ferro ser diferente. Métodos como estes, em alguns casos, enfrentam desafios como tempo de análise e exatidão, o que não atende à demanda industrial. O método de cálculo por determinação de área, com enfoque na determinação da porcentagem de magnetita residual, é pouco encontrado na literatura. Dessa forma, busca-se aperfeiçoar e aumentar a eficiência da caracterização mineralógica pela técnica de determinação de área e assim tornar possível uma comparação estatística com o método de contagem de pontos.

1.2 LOCALIZAÇÃO

A região de origem das amostras é a borda leste do Quadrilátero Ferrífero. Este está localizado aproximadamente na porção central do Estado de Minas Gerais. Situa-se a 151 km de Belo Horizonte, a capital do estado. Sua via de acesso é através da BR-356, rodovia dos Inconfidentes até a MG129 no Município de Mariana (Figura 1.1). A região se encontra a sudeste de Belo Horizonte e Noroeste de Mariana. As coordenadas do ponto de coleta das amostras são: 20°11'00'' Sul 43°29'33'' Oeste.

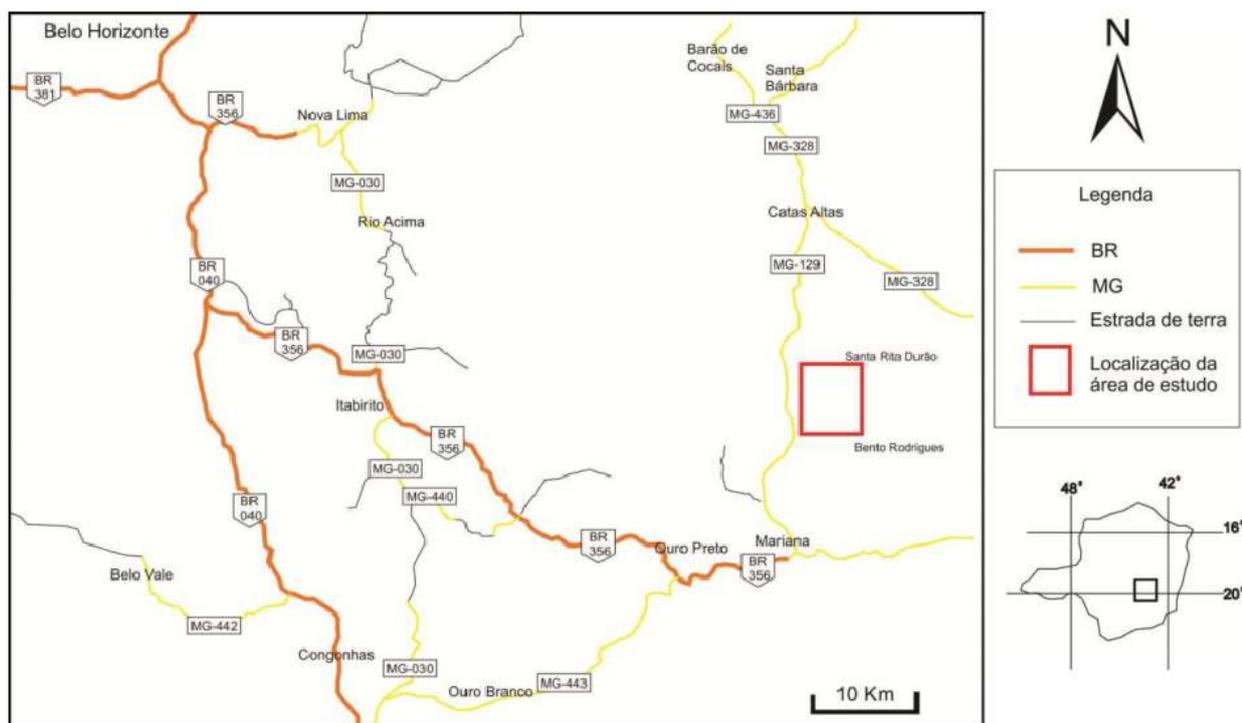


Figura 1.1 - Localização da área de retiradas das amostras do estudo. Fonte: Rossi (2014)

1.3 OBJETIVOS

O objetivo primordial deste trabalho é determinar o percentual de magnetita em amostra de concentrado de minério de ferro por cálculo das áreas dos grãos e por contagem do número de pontos. Para alcançar o proposto, tem-se como objetivos específicos: a caracterização e determinação do conteúdo das fases minerais hematita, goethita e magnetita; confecção de tabelas com os resultados percentuais das fases minerais, a partir de imagens de microscopia óptica de uma amostra de concentrado de minério de ferro, por meio da contagem de pontos e determinação de áreas; aplicação do teste Anova e o cálculo do desvio padrão para consolidar os resultados para análise e comparação das metodologias.

1.4 JUSTIFICATIVA

Conhecer o conteúdo mineralógico de amostras de minério é de suma importância para um eficiente controle de processos unitários. No beneficiamento de minério de ferro, conhecer o teor de magnetita, bem como dos tipos morfológicos a ela associados permite prever a eficiência deste no processo industrial (Dwarapudi *et al.* 2008, Graça *et al.* 2015). Para adquirir esse conhecimento, a técnica de contagem de pontos em imagens de microscópio óptico tem sido utilizada para fazer a determinação mineralógica (Da Costa *et al.* 2009, Lu, Donskoi & Manoel 2016, Iglesias 2018). Contudo, determinar o conteúdo de magnetita é um desafio, uma vez que esta encontra-se associada a fase hematita no tipo morfológico caracterizado como hematita martítica. Além disso, a análise por meio da contagem de pontos acumula erros relativos a subjetividade de cada operador, já que a magnetita muitas vezes encontra-se como porções não transformadas em hematita. Nessa situação, diferentes operadores podem estimar diferentes percentuais e conseqüentemente obter diferentes resultados finais. A partir disso, o estudo propõe determinar as fases minerais com enfoque na magnetita residual por contagem de pontos e determinação de áreas. Com isso comparar os resultados obtidos pelos métodos e apresentar suas eficiências para determinação dos resultados do conteúdo apresentado no *pellet feed* (Glanglolev 1934; Miller 1939; Graça *et al.* 2015).

Carvalho, M.B. 2021, Determinação de magnetita residual em concentrado de minério de ferro...

2.1 MINERALOGIA

Os minérios de ferro são, via de regra, compostos principalmente por associações minerais de hematita, goethita e magnetita. Também é possível observar fases minerais de transição como maghemite, hidrohematita e kenomagnetita (Lu 2015).

A hematita possui característica de ser um óxido simples, com fórmula química Fe_2O_3 além de ser considerada a mais importante fonte de ferro. Possui o sistema cristalino trigonal. Em escala macroscópica, a hematita é caracterizada por ser um mineral opaco, com brilho de metálico a submetálico e é paramagnético. Apresenta, na maioria dos casos, hábito tabular, agregados botrioidais e traço vermelho de claro a escuro (Deer *et al.* 1992, Klein & Dutrow 2013). No microscópio óptico de luz refletida aparece com cor cinza, podendo apresentar tonalidades azuladas e possibilidade de ocorrências de reflexões internas avermelhadas.

A hematita ainda pode apresentar pseudomorfos octaédricos ou dodecaédricos, sendo estes resultados do processo de martitização. A martitização consiste no processo de redução que transforma magnetita em hematita (Barbosa & Lagoeiro 2012). A hematita martítica manifesta microestrutura característica e preserva relictos de magnetita. É possível aparecer com estrutura em treliça, vestígios dos planos de cristalização da magnetita. Por fim, ainda pode ocorrer preservação do hábito octaédrico da magnetita ou ser irregular com cristais anédricos (Ferreira 2013, Graça *et al.* 2015).

A goethita é um hidróxido com fórmula química $\text{FeO}(\text{OH})$. Possui sistema cristalino ortorrômbico. Em escala macroscópica é caracterizada por ser um mineral opaco, com brilho vítreo, terroso, adamantino e sedoso, e é diamagnético. Ocorre em forma de agregados aciculares de forma radial ou como agregados botrioidais. A goethita está ligada à hidratação de óxidos de ferro como resultado de processos oriundos de intemperismo (Deer *et al.* 1992, Klein & Dutrow 2013). Em microscópio óptico apresenta cor cinza azulada, podendo manifestar tonalidades mais escuras. Ocasionalmente, aparece com cores de tonalidades marrons e avermelhadas quando houver grau de hidratação mais elevado e consistência terrosa. Seus grãos aparecem com contorno irregular ou serrilhado (Ferreira 2013, Graça *et al.* 2015).

A magnetita é caracterizada por ser um óxido múltiplo com fórmula química $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$. Possui sistema cristalino cúbico. Em escala macroscópica é caracterizada por ser um mineral opaco com brilho metálico, possui cor preta, traço preto e é ferromagnético. Ocorre principalmente com hábito octaédrico.

(Deer *et al.* 1992, Klein & Dutrow 2013). Em microscópio óptico, apresenta cor rósea a cinza amarronzado sem reflexões internas. Pode aparecer na forma de relictos em hematita, originando o tipo morfológico hematita martítica quando isso ocorrer (Ferreira 2013, Graça *et al.* 2015).

As características das fases minerais são importantes para o processamento mineral, assim como as características morfológicas. Essas características são relacionadas a tipos de microestruturas pertencentes aos minerais. Microestrutura é o termo usado para fazer a descrição do espaço entre os grãos de uma rocha como foliações, orientação preferencial dos cristais e bandamento, tudo em escala microscópica. Está relacionada à textura, porém a textura abrange aspectos geométricos dos cristais como seu tamanho e geometria (Barbosa 2012, Ávila *et al.* 2015).

As características texturais e microestruturais dos grãos dos minerais influenciam diretamente na eficiência de processos industriais. É com base nessas características que se define o tipo morfológico de um grão ou agregado. O tipo morfológico engloba grãos e agregados com atributos de textura e microestrutura parecidos e que geram resultados equivalentes nos processos unitários que forem submetidos (Graça 2015, Donskoi *et al.* 2016).

2.2 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

A caracterização mineralógica permite obter informações específicas de minérios essenciais para o controle e eficiência dos processos unitários da rota de beneficiamento. Tal investigação consiste no estudo das características físico-químicas das fases minerais e dos dados qualitativos e quantitativos das microestruturas. Dados sobre as quantidades percentuais de diferentes tipos morfológicos de minério de ferro e a composições químicas são imprescindíveis para controlar o processamento do minério de ferro (Miller 1939, Clout 1998, Box *et al.* 2002).

A caracterização mineralógica foi inventada por Bruckner na Alemanha em 1876 e teve um dos primeiros registros de utilização com minérios nos EUA, em 1905. Esta é uma etapa crucial para o aproveitamento potencializado de um recurso mineral por fornecer informações específicas do minério. Dados mineralógicos como morfologia dos grãos, fases minerais presentes e microestruturas como a porosidade são essenciais à rota de beneficiamento (Da Luz, Sampaio e França 2010). Outros dados como conteúdo de óxidos e hidróxidos de ferro, distribuição granulométrica, grau de liberação e classificação da assembleia mineralógica são medidos e, portanto, podem ser controlados nos processos de concentração mineral (Berubé *et al.* 1984, Da Costa *et al.* 2009, Graça *et al.* 2015, Poliakov & Donskoi 2019).

Para controlar a qualidade do minério de ferro, torna-se necessário, portanto, a caracterização mineralógica. Uma das técnicas de caracterização mineralógica mais aplicadas consiste no uso do microscópio óptico de luz refletida. A técnica pode reduzir o tempo consumido em etapas como

reconhecimento de fases minerais, medição de frações de fase, determinação de textura mineral e porosidade. Esses benefícios são advindos através do uso de microscopia óptica na fase de caracterização microscópica (Iglesias *et al.* 2018, Castellanos *et al.* 2018).

2.3 MICROSCOPIA ÓPTICA

A caracterização mineralógica a partir do microscópio óptico tem aplicações como, por exemplo, na determinação mineral a partir da contagem de pontos. A microscopia óptica é uma das técnicas empregadas para análise visual de seções polidas ou lâminas delgadas. Os minerais contidos nas imagens obtidas por microscópio óptico têm que apresentar aparência microscópica suficiente para permitir fácil reconhecimento e separação a fim de posteriormente conhecer outras características (Miller 1939, Donskoi *et al.* 2020, Graça *et al.* 2020). Por meio de análises ópticas é possível distinguir as refletividades, forma do grão, grau de liberação, graus de oxidação, cor, porosidade, textura e morfologia de óxidos de ferro e hidróxidos diferentes entre si. Essa distinção é um dos meios a diferenciação de tipos de minerais de minério de ferro. Outros meios, como o uso de metodologias indiretas, pressupõem que os minerais do minério são estequiométricos, como testes de diagnóstico de lixiviação e cálculo de mineralogia de ensaios. Já os métodos diretos utilizam o microscópio óptico para análise óptica de imagens, difração de raios X e análise de imagem automatizada baseadas em microscopia eletrônica (Donskoi *et al.* 2007, Donskoi *et al.* 2017).

A microscopia óptica tornou-se técnica muito utilizada para quantificação de minérios de ferro através da visualização das características ópticas de fases minerais, principalmente hematita, goethita e magnetita. Essa quantificação pode ser feita através de técnicas que se baseiam na contagem de pontos de minerais no microscópio. A contagem tem o intuito de quantificar os teores composicionais do minério (Da Costa *et al.* 2009, Graça *et al.* 2015, Lu, Donskoi & Manoel 2016, Iglesias 2018).

2.4 TÉCNICA DE CONTAGEM DE PONTOS

A início, o método de contagem de pontos consistiu em considerar que o total de áreas dos grãos contidos em uma superfície plana é proporcional ao volume verdadeiro descrito por estes grãos (Delesse 1847 apud Miller 1939). Rosiwal's (1898) propôs um fator de correção para a determinação das áreas. Sua estratégia baseou-se em traçar vários retângulos de igual tamanho sobre um vidro transparente que foi posto sobre a superfície analisada. As interseções dos vértices dos retângulos com os grãos eram contadas e comparadas ao comprimento total das linhas que formavam os lados de cada retângulo. Feito isso foi ponderado o peso específico dos constituintes minerais com o valor percentual de grãos interceptados, e assim tornou-se possível calcular o percentual em massa de cada fase mineral.

Murdock (1916) descreveu o passo a passo para a contagem e a preparação de superfícies planas para este tipo de análise. Esta preparação de amostras traz a utilização de um material recipiente macio no qual, são embutidos os grãos e uma superfície plana é moldada e polida. A meticulosidade na preparação das amostras continua até os trabalhos recentes e foi de vital importância para o desenvolvimento do material de embutimento, utilizando uma resina a base de fenol desenvolvida por Head (1921).

A partir da microscopia óptica é possível aplicar a técnica de contagem de pontos que permite a determinação do conteúdo de fases minerais. Com a determinação do conteúdo, e tendo em mãos os valores de cada fase, torna possível fazer um tratamento estatístico nos resultados e obter uma relevância estatística. Porém o método de contagem de pontos pode apresentar erros. Com isso, fez-se necessária a busca de um método que desse segurança estatística. Foi constatado que o erro estatístico está relacionado ao número de pontos a serem considerados na contagem. Assim, quanto mais elevada for a contagem de pontos, maior a segurança estatística. (Glagolev 1934, Miller 1939)

A análise de contagem de pontos pode dar resultados insatisfatórios por dois motivos (Bayly 1959). Primeiramente a amostra a ser estudada pode não apresentar representatividade da composição total do minério em questão, ocasionando um erro amostral. O segundo motivo seria o número de pontos considerados na contagem não atenderem o mínimo para ser consistente. Lumsden (1979) também observou os erros gerados pela contagem de pontos em suas amostras. Com uma comparação feita entre os métodos de raios X e a técnica de contagem de pontos, o raio X trouxe resultados mais confiáveis para suas amostras. A contagem manual de pontos também pode apresentar erros por se tratar da subjetividade dos mineralogistas. A subjetividade está relacionada ao fato que diferentes mineralogistas podem determinar limites diferentes entre as fases minerais (Lu, Donskoi & Manoel 2016).

Uma comparação entre contagem de pontos e áreas foi feita em amostras de *pellet feed* (Graça *et al.* 2015). Foram comparados os resultados da estimativa da contagem de pontos obtidos por esses dois métodos diferentes de contagem citados. Em seu trabalho, o autor separou os tipos morfológicos presentes na amostra e aplicou a técnica de contagem de pontos. Foram comparados os resultados obtidos com os atingidos pela determinação de área, que se mostraram mais eficientes por trazerem maior exatidão na caracterização.

2.5 TÉCNICA DE DETERMINAÇÃO DE ÁREA DOS GRÃOS

Atualmente existem meios de se quantificar as fases minerais, porém apresentam problemas. Métodos como microscopia eletrônica, por exemplo, para diferenciar os tipos de óxidos e hidróxidos de ferro aumentam significativamente o tempo de análise, tornando-se, às vezes, economicamente inviável (Da Costa *et al.* 2002, Donskoi *et al.* 2007).

Da Costa *et al.* (2009) buscou a espectroscopia de reflectância difusa para caracterização e separação dos tipos morfológicos de minério de ferro vindos de toda parte do Brasil para fazer a quantificação percentual de cada fase. Cada tipo morfológico respondia diferentemente ao espectro e apresentava uma característica própria. Porém, com uso do critério estatístico de razão de desempenho, calculada pela divisão do desvio padrão pelo erro padrão de validação, foram inferidos resultados a partir das diferenças nos espectros de reflectância difusa utilizados para este método. O método trouxe resultados medianos para hematita, especularita e hematita martítica, trazendo bons resultados apenas para fase goethita. Takehara (2009) buscou comparar métodos para investigar a confiabilidade da contagem de pontos por microscópio óptico. Utilizou espectroscopia de Mossbauer, difração de raios X com o perfil completo de Rietveld e análises termogravimétricas. A magnetita se apresentou em concentrações muito baixas, de modo que, em todos os métodos, demonstrou valor abaixo de 2% em todas frações. Devido ao baixo teor, não se pôde obter dados suficientes para gerar uma confiabilidade na quantificação de magnetita.

Visto a necessidade de buscar uma forma de quantificar fases minerais que apresentam química semelhante, a análise de imagem de microscopia óptica se torna altamente efetiva no quesito de separação das fases minerais hematita, goethita e magnetita. O método de análise de imagem por microscopia óptica baseia-se na separação dos grãos na imagem obtida e, após, uso de software de cálculo de área, para fazer a determinação da área (Graça *et al.* 2015). Iglesias *et al.* (2016) utiliza um processo semelhante para fazer este cálculo dos tipos morfológicos diferentes. Baseou-se na classificação de texturas e formas cristalográficas da hematita para discriminar a forma dos grãos. Foi apontado na classificação que, em imagem de microscopia óptica, foi segmentada das demais fases através de tratamento de imagem. Assim, conseguiu determinar o teor dos tipos morfológicos referentes às fases consideradas, como a hematita e magnetita. Utilizando microscópio de luz refletida (RLM) em campo claro modo (BF) para adquirir as imagens, foi possível diferenciar as fases minerais do minério de ferro mais comuns como hematita, goethita e magnetita (Iglesias 2018). Porém este método é mais utilizado pelo autor com ênfase nos diferentes tipos morfológicos da hematita e não foca na determinação da magnetita residual presente no tipo morfológico hematita martítica. O método se baseia em montar uma imagem colorida falsa, discriminá-los, mudando as características de brilho e cor da mesma para que a hematita martítica se destaque. Há outros métodos possíveis de separação que encontram barreiras, como o utilizado por Carioca (2018). Por exemplo o sistema de aquisição e análise de imagens que pode ser utilizado é o MLA (Mineral Liberation Analyzer). A principal dificuldade do MLA é distinguir fases minerais que possuam número atômico médios e composições químicas semelhantes, como, por exemplo, hematita e magnetita.

Carvalho, M.B. 2021, Determinação de magnetita residual em concentrado de minério de ferro...

CAPÍTULO 3

MATERIAS E MÉTODOS

Para alcançar o proposto, foram obtidas imagens de microscópio óptico do concentrado de minério de ferro. Os grãos expostos nas imagens, bem como as áreas que representam a magnetita residual não transformada em hematita, foram selecionados. A seleção não considerou os grãos que tocam nas bordas das imagens. Determinou-se o valor em percentual das áreas selecionadas. Por fim, os resultados percentuais obtidos, por contagem de pontos e determinação de áreas, foram relacionados e analisados para interpretação.

3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

A amostra utilizada consiste em concentrado de minério de ferro, tipo *pellet feed*, com origem na borda leste do Quadrilátero Ferrífero, localizado no Estado de Minas Gerais, Brasil. Uma massa do minério totalizada em 10kg foi obtida por amostragem, sendo submetida a homogeneização e quarteamento. O quarteamento resultou em uma massa de cerca de 100g que foi submetida a peneiramento a seco. A fração correspondente ao intervalo granulométrico de [-106 +45] μm foi selecionada para embutimento. Foram confeccionadas em resina epóxi 3 pastilhas aqui denominadas P1, P2 e P3. As pastilhas foram submetidas aos abrasivos de 500# e 3000# e posteriormente polidas com pasta de alumina de 0,3 μm para análise no microscópio óptico.

A partir das 3 amostras confeccionadas foram obtidas 29 imagens base de microscopia óptica para cada pastilha. As imagens foram obtidas no microscópio óptico Zeis (AxioCam MRc5) com câmera acoplada AxioCam (MRc5) e auxílio de software Zen (Versão) do laboratório de microscopia da pós-graduação DEGEO/UFOP. As imagens base foram tratadas no programa Adobe Photoshop (Versão CC 2018). O tratamento consistiu em separar as fases minerais hematita junto a goethita e magnetita. A separação consiste na diferenciação por característica como contorno de grão, cor e textura. A hematita apresenta contorno de grãos variáveis nas amostras indo de retilíneos, sinuosos e serrilhados. A cor passa pelos tons de cinza azulado, cinza branco, cinza aço. A textura, porosidade, pode variar de sem porosidade até com poros completamente martitizados. A goethita apresenta contorno dos grãos serrilhados. A cor passa pelos tons cinza amarelado e cinza. Apresenta porosidade alta em seus grãos. A magnetita apresenta o fenômeno de transformação em hematita nas amostras, apresenta cor rósea a cinza amarronzado, sendo classificada como tipo morfológico hematita martítica (Klein & Dutrow 2012,

Graça *et al.* 2015). A partir dessas informações foram distinguidas as fases minerais de interesse para quantificação, hematita, goethita e magnetita, conforme ilustrado na figura 3.1.

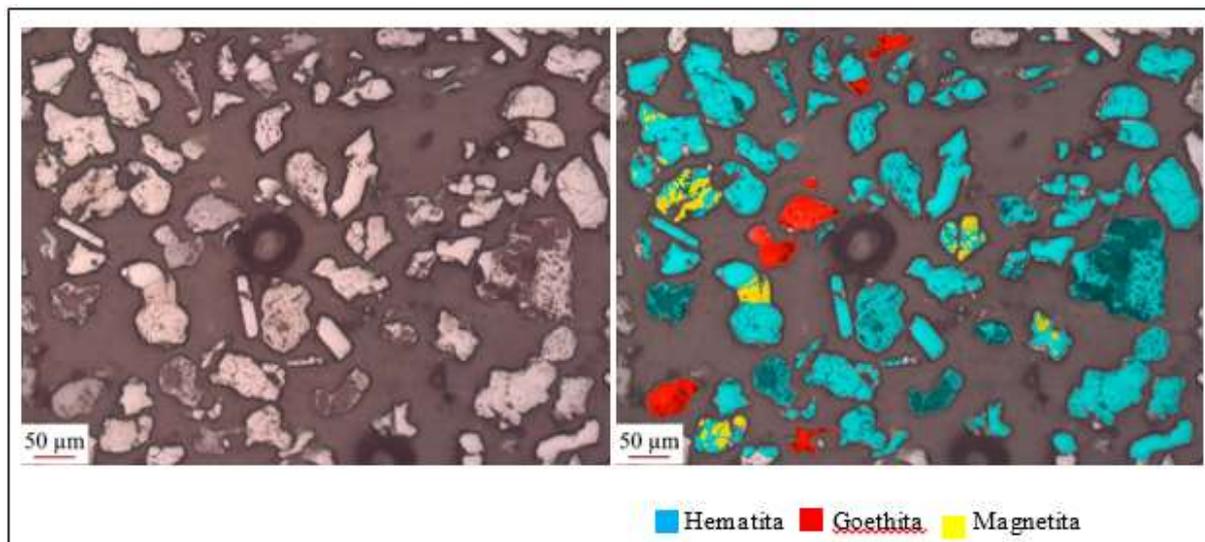


Figura 3. 1 - A esquerda é apresentada a imagem base original e a direita a imagem como resultado da separação dos grãos representados por hematita, goethita e magnetita.

Após a separação das fases minerais pertencentes às amostras, foram individualizadas as áreas referentes aos relictos de magnetita que estão presentes no tipo morfológico hematita martítica, o foco do estudo. A separação por tipos morfológicos leva em conta a forma, a aparência externa e a configuração dos minerais. A hematita martítica com relictos de magnetita apresenta características que são vestígios da transformação de magnetita para hematita, tais como arranjos triangulares marcando planos octaédricos da magnetita. Em geral, seus grãos possuem superfícies rugosas. Por vezes, é possível observar restos de magnetita ainda não transformados para hematita, que é, chamada de martítica em pseudomorfos octaédricos sobre a magnetita (Klein & Dutrow 2012, Graça *et al.* 2015).

A fim de melhorar a identificação das magnetitas residuais, foram necessários ajustes e tratamentos nas imagens base. As imagens foram ajustadas ao tamanho da tela sem utilizar a ferramenta de zoom, visto que altera a escala da imagem. Foi aplicado um brilho de -9 e contraste de 100. A próxima etapa foi a separação da magnetita residual dos demais grãos com o uso da ferramenta de corte, que transformou a imagem em segmentos/camadas. Como resultado foram obtidas duas camadas de imagens resultantes. Uma imagem resultante comportava todos os grãos presentes sem os espaços vazios. A segunda imagem comportando apenas as áreas de magnetita residual que estão presentes no tipo morfológico hematita martítica. Utilizando o comando Ctrl U, que permite mudar a cor da parte da imagem selecionada, no Adobe Photoshop (CC 2018), foram modificadas as duas imagens resultantes para cada uma das 30 imagens base das 3 pastilhas. Uma pintando de preto todos os grãos da imagem resultante que entrariam na contagem, e outra destacando de preto apenas as áreas de magnetita residual.

Este procedimento é um passo importante para que o ImageJ funcione com excelência, visto que o programa se baseia em uma cor em destaque para serem feitas as contagens. Como a primeira-imagem resultante abarcaria os grãos totais a serem contados, apresentando um resultado do valor total do número de grãos contados e da área, bastou fazer uma subtração do valor apresentado pela segunda imagem resultante que trouxe resultados apenas para magnetita residual.

Após a classificação das áreas referentes aos grãos em fases minerais, seguiu-se para a etapa de quantificação. Foi definido que os resultados obtidos pelas contagens de pontos e determinações das áreas das fases hematita e goethita (Hem + Ght) seriam somados e contabilizados juntos, e em separado apenas os resultados da magnetita residual (Mgt). Esse processo foi realizado para comparar a diferença de valores que pode ocorrer no cálculo da magnetita nos métodos de contagem. Foram confeccionadas tabelas para o registro dos resultados (Apêndice 1). Na tabela estão dispostos os resultados da contagem de pontos, determinação de áreas, suas porcentagens, média de valores e o desvio padrão dos resultados.

3.2 CONTAGEM DE PONTOS

A técnica de contagem de pontos foi aplicada nas 29 imagens das pastilhas P1, P2 e P3, com auxílio do software ImageJ (Schneider- Rasband & Eliceiri, 2012). Cada área classificada foi contada e considerada como um ponto de mesmo peso, independentemente do tamanho. Com auxílio da ferramenta *analyse particles*, foi gerado o número de pontos contados em cada imagem.

O primeiro passo foi abrir a imagem base no programa. A partir da imagem, foi definido pelo software Zeis o valor de 1:50 μm para a escala. Feito isso, foi necessário passar essa informação para o programa que fez a conversão de 50 μm em pixels na imagem. Para converter, no comando *line* traçou-se uma linha na distância conhecida. Esta linha foi tomada como escala no programa. Na aba *analyze*, com o comando *set scale*, obteve-se o tamanho da linha em pixels, e com a distância conhecida de 50 μm preenchida, chegou-se a razão de 3,65pixels/ μm , utilizada como parâmetro de cálculo no programa para áreas.

Ao abrir a imagem base, com os grãos de interesse destacados, descartando os que tocam as bordas das imagens, foi necessário configurá-la para formato de 8-Bit na aba *image* e depois *type*. Com a imagem aberta, foram definidos os grãos de interesse para a contagem. O processo de definição foi feito na aba *image*, clicou-se em *adjust, Threshold* e, por fim, *apply*. Para concluir e fazer a contagem de grãos após esses passos, utilizando dos comandos *analyze* e *analyze particles*, considerou-se o intervalo das áreas dos grãos de 0 a infinito para que todos fossem contabilizados. Após esses passos o programa forneceu o número de grãos presentes na imagem.

A partir da razão do somatório do número de pontos (n) de hematita junto a goethita com o de magnetita e o total de pontos contados (x) de cada um em separado, foram obtidas as porcentagens (P) totais dos grãos em questão equação (I). (Larson e Farber, 2019).

$$P = x/n \text{ (Equação I)}$$

3.3 DETERMINAÇÃO DE ÁREAS

A técnica de determinação de áreas foi aplicada nas 29 imagens base das pastilhas P1, P2 e P3, com o auxílio do software ImageJ (Schneider- Rasband & Eliceiri, 2012). As determinações das áreas das fases minerais também foram obtidas com auxílio da equação (I) (Larson e Farber, 2019). Neste caso, n corresponde ao somatório do tamanho das áreas dos grãos de hematita junto a goethita e magnetita e x o somatório do tamanho de todas as áreas da fase mineral. Desta forma foi possível obter as porcentagens (P) da hematita junto a goethita e a porcentagem da magnetita.

Concluídas as contagens de pontos e as determinações das áreas para dos grãos de hematita junto a goethita e da magnetita residual presentes nas amostras, foi feito o desvio padrão (Dp) para os resultados das amostras. O cálculo do Dp se baseou na raiz quadrada do somatório das porcentagens obtidas pela equação I para cada amostra subtraindo deste a média dos valores de P (Mp) ao quadrado e dividindo todo somatório pelo número de amostras (A). Isso tudo representado pela equação (II) (Larson e Farber, 2019).

$$Dp = \sqrt{(\sum (P - Mp)^2/A)} \text{ (Equação II)}$$

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

A partir das imagens de microscopia obtidas da P1, P2 e P3, foi possível quantificar o conteúdo das fases minerais hematita, goethita e magnetita. A quantificação foi feita pelo método de contagem de pontos e por determinação de áreas referentes aos pontos contados, na fração granulométrica $[-0,106 +0,045]$ mm de uma amostra de *pellet feed*. Foram contados 6524 pontos de hematita + goethita (Hem + Ght) e 2951 pontos de magnetita (Mgt), totalizando um universo amostral de 9475 pontos.

A figura 4.1 exemplifica a divisão considerada para realizar as quantificações. Em verde foram destacados os grãos de hematita e goethita e em amarelo as áreas de magnetita. Os resultados da quantificação mineralógica são exibidos no Apêndice 1. No apêndice, estão dispostas três tabelas que expõem os resultados das quantificações para as 29 imagens das amostras P1, P2 e P3. As tabelas mostram os resultados percentuais para contagem de pontos e para determinação de áreas em cada imagem de cada pastilha. Está exposto nas tabelas 4.1 e 4.2 a média desses resultados e o seu desvio padrão para a hematita junto a goethita e magnetita.

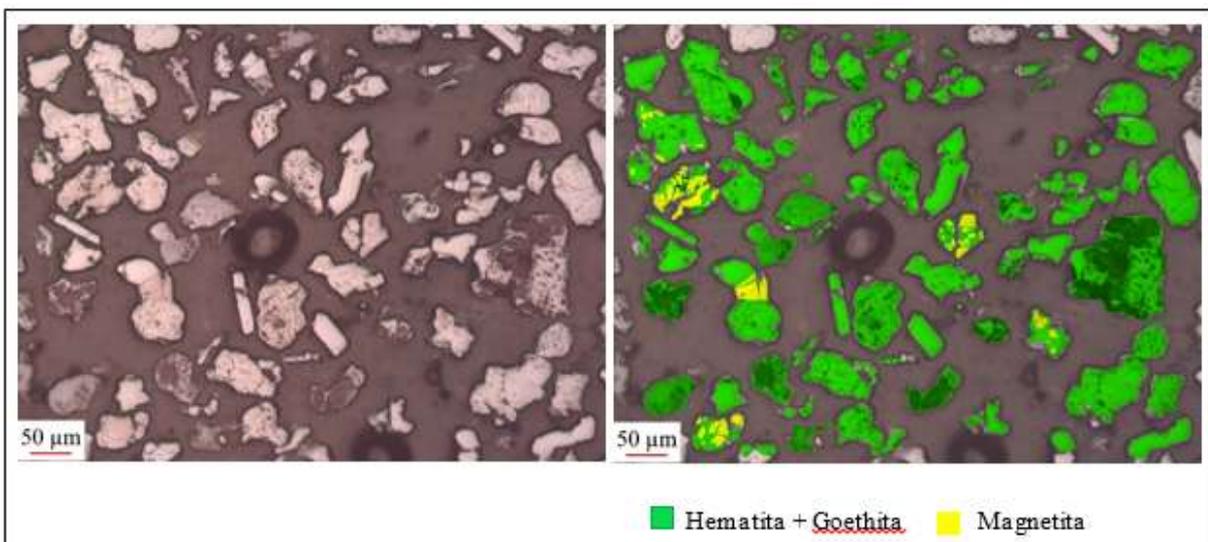


Figura 4. 1- Imagem exemplo de uma seção polida utilizada para a caracterização mineralógica.

A contagem de pontos resultou na média de 65,78% para os grãos de hematita e goethita e 33,77% para magnetita residual considerando todas imagens da P1. Na P2, os pontos de hematita e goethita resultaram em 77,35% e os de magnetita 22,65%. Por fim, na P3 a hematita e goethita registraram 68,05% e a magnetita 31,95%. Na tabela 4.1, encontram-se todos os percentuais de cada uma das variáveis para as 87 imagens obtidas e tratadas bem como seus desvios padrões de cada variável. Como

pode ser observado, os percentuais de Hem + Ght varia entre 65,78% a 68,05% em média com desvio padrão de 11,36 a 13,18. No que se refere a magnetita a média foi de 22,65% a 33,77% com desvio padrão de 11,36 a 13,18.

Tabela 4. 1- Resultado da quantificação por contagem de pontos para cada imagem das amostras P1, P2 e P3, médias e desvio padrão.

N° da Imagem	Contagem de pontos para cada imagem					
	P1		P2		P3	
	Hem+Ght (%)	Magnetita (%)	Hem+Ght (%)	Magnetita (%)	Hem+Ght (%)	Magnetita (%)
1	66,25	33,75	66,92	33,08	49,61	50,39
2	51,52	48,49	80,73	19,27	55,48	44,52
3	61,11	38,89	87,23	12,77	72,09	27,91
4	74,47	25,53	99,01	0,99	84,85	15,15
5	82,31	17,69	87,62	12,38	77,97	22,03
6	86,79	13,21	69,29	30,71	74,07	25,93
7	60,00	40,00	76,32	23,68	73,97	26,03
8	61,42	38,58	90,79	9,21	80,00	20,00
9	43,53	56,47	60,18	39,82	46,36	53,64
10	67,68	32,32	53,03	46,97	68,00	32,00
11	70,00	30,00	65,59	34,41	77,27	22,73
12	69,07	30,93	75,28	24,72	51,79	48,21
13	66,09	33,91	92,41	7,59	61,33	38,67
14	47,15	52,85	78,85	21,15	73,26	26,74
15	54,86	45,14	81,63	18,37	62,99	37,01
16	51,39	48,61	83,50	16,51	80,20	19,80
17	72,92	27,08	95,12	4,88	79,78	20,23
18	65,08	34,92	68,53	31,47	66,98	33,02
19	70,55	29,55	79,86	20,14	66,06	33,95
20	64,93	35,08	78,00	22,00	46,22	53,78
21	76,36	23,64	55,37	44,63	59,40	40,60
22	64,34	35,66	74,56	25,44	72,22	27,78
23	73,83	26,17	77,94	22,06	77,11	22,89
24	40,00	60,00	73,68	26,32	62,89	37,11
25	70,21	29,79	81,65	18,35	100,00	0,00
26	60,33	25,50	74,44	25,56	60,91	39,09
27	81,52	19,48	75,58	24,42	84,51	15,49
28	74,56	25,44	92,50	7,50	45,76	54,24
29	79,37	20,64	67,57	32,43	62,28	37,72
Média	65,78%	33,77%	77,35%	22,65%	68,05%	31,95%
Desvio Padrão	11,37	11,38	11,36	11,36	13,18	13,18

Para quantificação por determinação de áreas, na tabela 4.2, estão dispostos os resultados percentuais obtidos para hematita junto a goethita e magnetita para cada pastilha. Estão apresentados também as médias dos valores e seu desvio padrão. A média dos valores das áreas das imagens representadas por hematita mais a goethita é de 96,83% e 3,17% para a magnetita na P1. A P2 apresenta média de 96,89% para hematita mais goethita e 3,11% para a magnetita. Por fim, a P3 apresenta para hematita mais goethita um valor médio de 96,71% e para magnetita 3,29%. Neste método os resultados foram mais constantes e variaram pouco em todas imagens das três pastilhas. Por apresentarem uma variação baixa, o desvio padrão respeitou um valor aproximado de 2.

Tendo em vista que o desvio padrão é uma medida que expressa o grau de dispersão de um conjunto de dados com relação à média, foram analisados os resultados das médias para ambos os métodos. Especificamente, foi feita uma comparação do desvio padrão entre os resultados do método de contagem de pontos e o de determinação de área. Nota-se uma grande diferença do desvio padrão entre os métodos (Tabela 4.3). Na tabela 4.3 estão apresentados os valores de desvio padrão para hematita junto a goethita e magnetita, pelo método de contagem de pontos e determinação de áreas para as 3 pastilhas. Por contagem de pontos os valores de desvio padrão, para hematita e goethita e magnetita foi de aproximadamente 11 a 13. Enquanto para o método de determinação de área foi em torno 2. Desta forma, pode-se observar uma maior variação nos valores de contagem de pontos em relação a determinação de áreas.

Tabela 4. 2 - Resultado da quantificação por determinação de áreas para cada imagem das amostras P1, P2 e P3, médias e desvio padrão.

Nº da Imagem	Determinação de áreas					
	P1		P2		P3	
	Hem+Ght (%)	Magnetita (%)	Hem+Ght (%)	Magnetita (%)	Hem+Ght (%)	Magnetita (%)
1	96,30	3,70	97,38	2,62	94,66	5,34
2	97,39	2,61	98,70	1,30	96,35	3,65
3	96,62	3,38	97,79	2,21	96,50	3,51
4	99,11	0,89	99,00	1,00	98,97	1,03
5	98,83	1,17	98,60	1,41	93,50	6,50
6	99,68	0,32	95,27	4,73	98,43	1,57
7	98,00	1,97	97,37	2,63	98,77	1,23
8	98,29	1,71	99,56	0,44	98,33	1,68
9	89,31	10,69	92,54	7,46	94,80	5,20
10	98,35	1,65	98,58	1,42	95,27	4,73
11	94,05	5,95	94,02	5,98	99,08	0,92
12	99,05	0,95	98,02	1,98	92,97	7,03
13	97,66	2,34	98,26	1,74	99,00	1,00
14	97,04	2,96	98,70	1,30	98,14	1,86
15	97,25	2,75	96,84	3,16	93,57	6,43
16	97,52	2,48	97,72	2,28	99,05	0,95
17	98,69	1,31	99,23	0,77	97,22	2,78
18	96,78	3,22	95,84	4,16	97,57	2,43
19	99,20	0,80	98,19	1,81	98,63	1,37
20	98,71	1,29	93,58	6,42	94,15	5,85
21	98,65	1,36	89,73	10,27	95,53	4,47
22	94,72	5,28	97,10	2,90	94,72	5,28
23	98,45	1,55	96,41	3,59	99,23	0,77
24	94,12	5,88	99,18	0,83	95,85	4,16
25	93,52	6,48	93,36	6,64	100,00	0,00
26	93,85	6,15	95,93	4,07	94,17	5,83
27	96,45	3,55	99,32	0,68	99,11	0,89
28	95,82	4,18	99,00	1,00	94,83	5,17
29	99,36	0,64	94,64	5,36	96,22	3,78
Média	96,99%	3,01%	96,89%	3,11%	96,71%	3,29%
Desvio Padrão	2,32	2,33	2,42	2,42	2,14	2,14

Tabela 4. 3- Valores de desvio padrão das imagens das amostras P1, P2 e P3.

	P1		P2		P3	
	Hematita + Goethita	Magnetita	Hematita + Goethita	Magnetita	Hematita + Goethita	Magnetita
Desvio Padrão Contagem de Pontos	11,37	11,38	11,36	11,36	13,18	13,18
Desvio Padrão Determinação de Áreas	2,32	2,33	2,42	2,42	2,14	2,14

A partir das porcentagens das fases minerais determinadas nas 87 imagens da P1, P2 e P3 foram produzidos gráficos box plot. O gráfico caracteriza os parâmetros estatísticos por variável mineralógica e a partir do teste Anova foi testada a igualdade entre os resultados de contagem de pontos e determinação de áreas da P1, P2 e P3.

No que se refere aos métodos de caracterização mineral, as figuras 4.2 A e B mostram as porcentagens apresentadas pelo método de contagem de pontos para Hem + Ght e Mgt. Neste método os gráficos apresentaram grande intervalo entre os valores de máximo e mínimo nas três pastilhas, com diferenças de 46,79% a 54,24% para Hem + Ght e 46,79% a 54,24% para Mgt. Os demais parâmetros estatísticos apresentam diferenças entre os resultados da P1, P2 e P3, registrando valores de primeiro quartil, terceiro quartil, mediana e média com variações de até 12% tanto para Hem + Ght quanto para Mgt. A partir dos parâmetros estatísticos caracterizados em cada uma das 87 imagens o teste Anova foi utilizado para avaliar a igualdade entre os resultados das três pastilhas para este método. A hipótese nula H_0 afirma que para p -value superior a 0,05, os parâmetros estatísticos comparados podem ser considerados iguais. Para Hem + Ght e Mgt o p -value indicou não aceitar H_0 , caracterizando a não igualdade entre as três pastilhas pelo método de contagem de pontos.

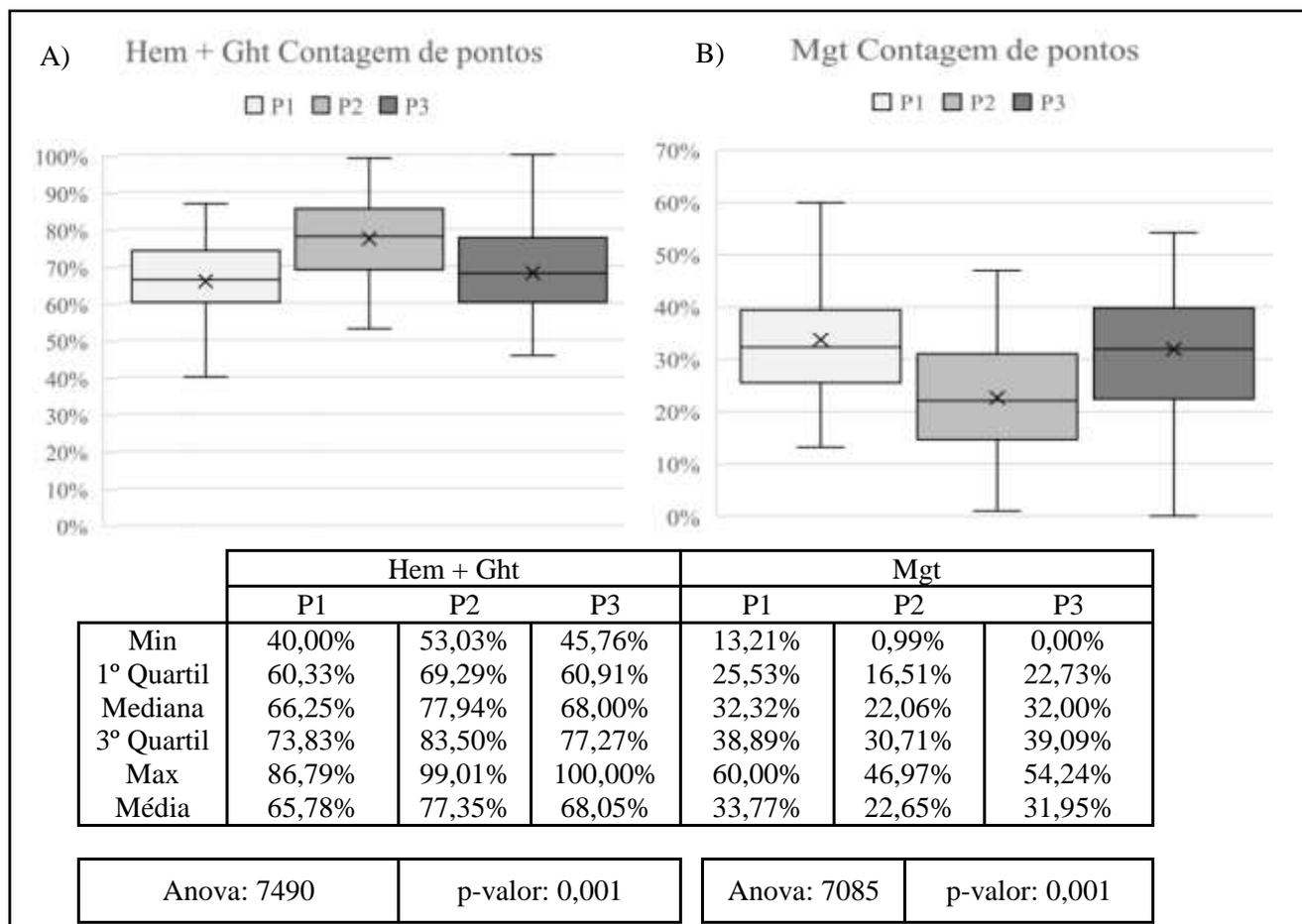


Figura 4. 2 – Gráficos Boxplot para contagem de pontos, valores mínimos (Min), quartis, medianas, valores máximos (Max), médias, valores do teste anova e p-valor. A) para hematita mais goethita B) para magnetita.

Os gráficos relativos à determinação de áreas estão apresentados pelas figuras 4.3 A e B e mostram as porcentagens de Hem + Ght e Mgt. Neste método os gráficos apresentaram um intervalo entre os valores de máximo e mínimo nas três pastilhas muito menor que o método de contagem de pontos, com diferenças de no apenas 3% para Hem + Ght e para Mgt. Os demais parâmetros estatísticos apresentam igualdade entres os resultados da P1, P2 e P3, registrando valores de primeiro quartil, terceiro quartil, mediana e média pequenas variações, tanto para Hem + Ght quanto para Mgt. A partir do dos parâmetros estatísticos caracterizados em cada uma das 87 imagens o teste Anova foi utilizado para avaliar a igualdade entre os resultados das três pastilhas para este método. Para Hem + Ght e Mgt o *p-value* indicou aceitar H_0 , caracterizando a igualdade entre as três pastilhas para o método de determinação de áreas.

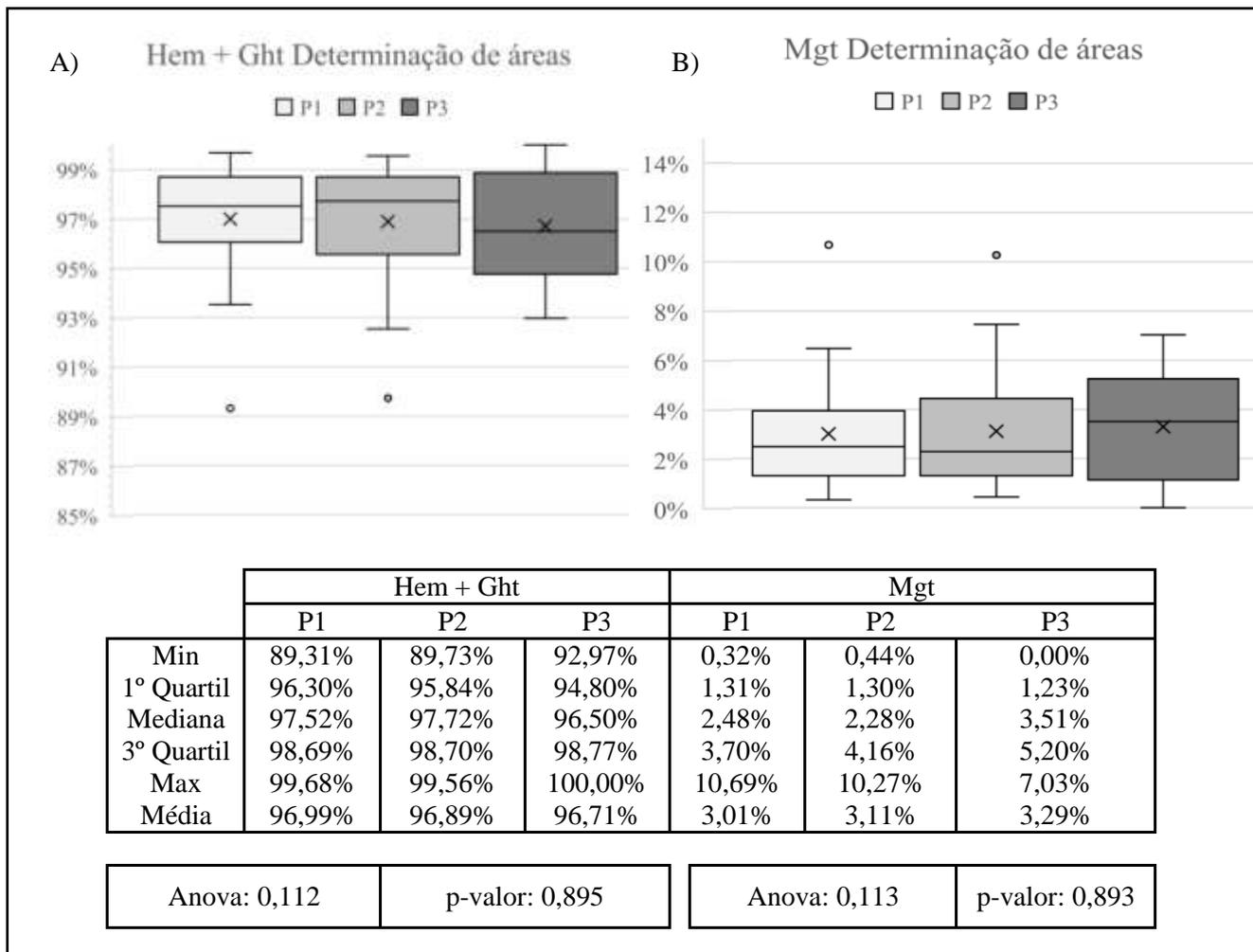


Figura 4.3 – Gráficos Boxplot para determinação de áreas, valores mínimos (Min), quartis, medianas, valores máximos (Max), médias, valores do teste anova e p-valor. A) para hematita mais goethita B) para magnetita.

A partir dos parâmetros estatísticos, foi testada a igualdade entre os resultados de P1, P2 e P3 onde H_0 foi aceito, conforme é mostrado pelos *p-values* das figuras 4.3 A e B. Com esses resultados é demonstrada a correlação estatística entre os resultados do método de determinação de áreas, o que não ocorreu para o método de contagem de pontos.

Carvalho, M.B. 2021, Determinação de magnetita residual em concentrado de minério de ferro...

CAPÍTULO 5

DISCUSSÕES

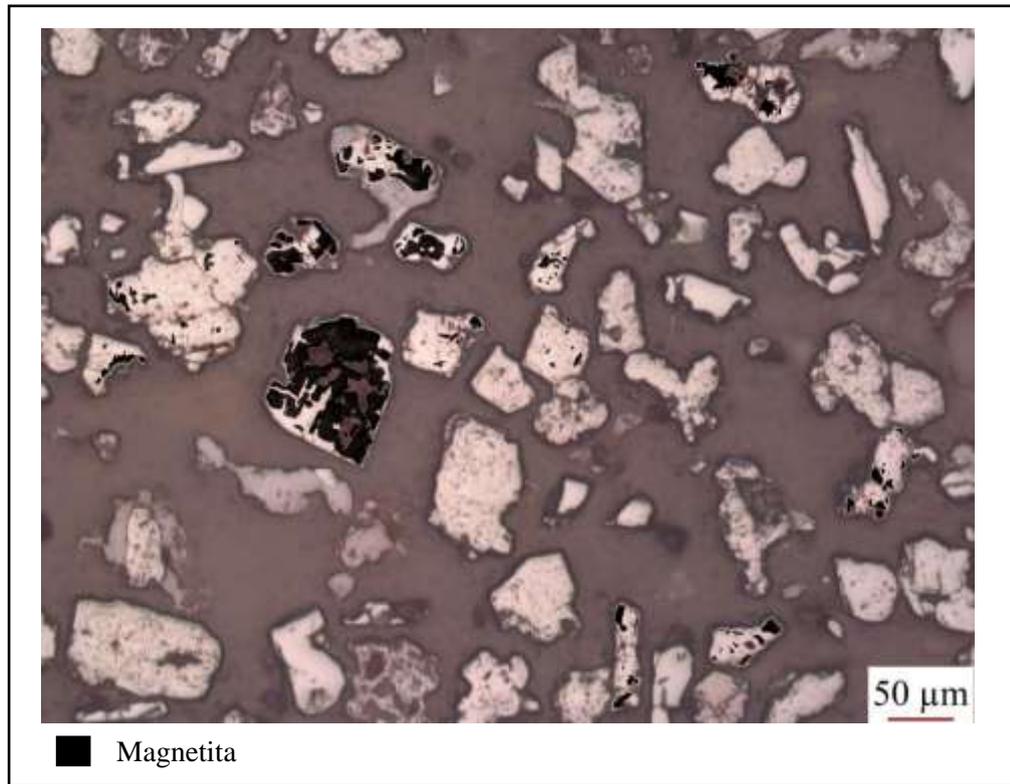
A partir das imagens das seções polidas das amostras P1, P2 e P3 foi possível determinar a mineralogia por contagem de pontos e determinação de áreas. Foram obtidos resultados percentuais de hematita junto a goethita e magnetita. Os resultados alcançados por contagem de pontos apresentaram alta variação, indicada pelo desvio padrão entre 11 a 13. Além disso, os testes Anova não revelaram nenhuma relação estatística entre as três amostras. Por outro lado, o método de determinação de áreas apresentou resultados com baixa variação, atestada a partir do desvio padrão em torno de 2. Nesse método, os testes Anova revelaram correlação estatísticas entre as 3 amostras analisadas.

A partir da análise dos resultados, pode-se fazer o seguinte questionamento: por que os dois métodos de quantificação utilizados geraram resultados tão distintos, mesmo sendo utilizados nas mesmas imagens? Para que essa pergunta seja respondida é necessário considerar e analisar dois pontos. O primeiro é que os resultados foram obtidos a partir de seções polidas, ou seja, representando apenas de forma 2D a representação mineral. A fim de ser contornado este problema, poderia ser aplicada a correção estereológica para o estudo em 3D abordando o volume. É possível estimar o volume total da mineralogia de uma amostra através da soma das áreas dos grãos expostas em uma superfície plana. Através das descrições de Delesse (1848) surgiram os preceitos da estereologia que idealizaram o princípio de que a densidade de volume da mineralogia em uma rocha é proporcional à densidade de área. Assim, a medição com precisão da composição mineralógica por análise de imagem exige um método confiável para o cálculo da correção estereológica. Esta correção deve ser aplicada à distribuição da mineralogia, que é medida a partir da seção linear e da área (King & Schneider 1998). Porém não se faz necessário saber a proporção real dos constituintes minerais para o controle do processo, basta ter uma baixa variabilidade nos resultados e que este seja proporcional ao percentual real das fases minerais que estão sendo quantificadas (Bouffard 2015; Engström & Esbensen 2018). O segundo problema é que, além do fato de ser analisada apenas uma seção aleatória dos grãos, eles são de tamanhos diferentes e isso gera um problema na contagem de pontos clássica. A diferença apresentada pelos métodos vem do fato que a contagem de pontos considera grãos de tamanhos diferentes como se tivessem o mesmo peso. Assim, as diferenças de tamanho dos grãos, devido a condição do seu produto, é uma fonte de erro a ser levada em consideração para este método. Principalmente no caso da magnetita residual que se encontra no tipo morfológico hematita martítica, que apresenta pequenos grãos dentro dele. O método de determinação de áreas para o cálculo das proporções das fases minerais, principalmente da magnetita residual, tem como objetivo minimizar essa incerteza. Neste método, o tamanho da seção mineral

exposta e considerada é ponderado e faz com que a incerteza no resultado do efeito de diferentes tamanhos de grãos/característica mineral de interesse diminua. Isso pode ser visto nos resultados apresentados e na análise estatística, conforme registro dos valores de desvio padrão para cada variável considerada.

Os métodos de análise óptica de imagens mostram resultados confiáveis para distinção de óxidos e hidróxidos de ferro. Essa técnica óptica pode ser usada para discriminar a magnetita da hematita, visto que em métodos como o uso do microscópio eletrônico de varredura, por exemplo, essas duas fases dificilmente são distinguíveis (Donskoi *et al.* 2007; Castellanos *et al.* 2018; Iglesias 2018). Assim, fazendo a caracterização mineralógica com intuito de comparar os métodos de análise óptica de contagem de pontos e determinação de áreas, obteve-se resultados bem diferentes entre os métodos para caracterização das amostras de *pellet feed*. A diferença é mostrada na estatística, os parâmetros obtidos pela contagem de pontos apresentaram uma considerável variação entre as três amostras. Essa variação fez com que o teste Anova referente a essas variáveis rejeitasse a hipótese nula H_0 . Já os parâmetros estatísticos apresentados pelo método de determinação de áreas registraram baixas variações. Com isso, o teste Anova referente a essas variáveis aceitaram H_0 . A partir disso, o método de determinação de áreas se apresentou mais exato para quantificação de magnetita residual. Visto que essa fase mineral presente no tipo morfológico hematita martítica apresenta um considerável número de pontos, porém tem uma área pequena. A figura 5.1 é um bom exemplo para comparação dos métodos visto o contraste entre o número de grãos e a área de magnetita em relação a hematita e goethita. Nessa figura foram contados 74 pontos de Hem + Gth e 96 pontos de Mgt, por contagem de pontos a Hem + Gth representaram 43,53% do total de grãos e a Mgt 56,47%. Já por determinação de áreas, a Hem + Gth representaram 89,31% e a Mgt 10,69%.

A partir da contagem de pontos obteve-se 2951 pontos de magnetita no total das três amostras, porém, em área, representava apenas 3,14%, fazendo a média das 3 amostras, em área no *pellet feed*. Entretanto se fosse utilizado o método de contagem de pontos esse valor de pontos contados no total de 9475 (6524 pontos de hematita e goethita mais 2951 pontos de magnetita) representaria um valor de aproximadamente 30%. Com base nesses resultados, a determinação de área por tratamento de imagens de microscópio óptico indica resultados mais próximos do real sendo um caminho promissor para aplicação como ferramenta no controle de processo.



5. 1- Imagem 9 da pastilha 1 (P1-9) representando as áreas de magnetita destacados de preto.

Carvalho, M.B. 2021, Determinação de magnetita residual em concentrado de minério de ferro...

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

A determinação de magnetita residual em concentrado de minério de ferro a partir de tratamento de imagens de microscopia óptica feita pelo método de contagem de pontos e por determinação de áreas tornou possível realizar uma comparação entre os resultados percentuais. A determinação de áreas mostrou-se uma técnica significativa para o estudo comparada à contagem de pontos, principalmente para caracterização da magnetita residual nas amostras de *pellet feed*. A determinação de áreas possibilitou a estimativa da porcentagem de magnetita residual nas imagens de microscópio óptico de forma mais exata e próxima da realidade, comparada a contagem de pontos, com o valor de 3,14% (2,29). Isso aconteceu para a hematita e goethita da mesma forma, resultando no valor de 96,86% (2,29).

A interpretação e a análise detalhada dos resultados e dos dados estatísticos, forneceram base para o método de determinação de áreas se mostrar mais próximo da realidade. A precisão é mostrada pelo teste Anova feito entre os resultados das 3 pastilhas para ambos os métodos. Os resultados do método de contagem de pontos caracterizaram correlação entre as 3 pastilhas com registro de p-valor de 0,001 para hematita + goethita e magnetita o que indica rejeitar a hipótese nula (H_0). Já para a determinação de áreas mostrou forte correlação com registro de p-valor de 0,895 para hematita + goethita e 0,893 para magnetita leva a aceitar a hipótese nula (H_0). Desta forma, a análise estatística realizada sugere que a melhor alternativa, que conduz a resultados mais próximos da realidade, para a determinação de variáveis com oscilação na dimensão, como no caso da magnetita residual, é aquela obtida a partir das áreas das variáveis.

Carvalho, M.B. 2021, Determinação de magnetita residual em concentrado de minério de ferro...

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almqvist, B. S. G., Björk, A., Mattsson, H. B., Hedlund, D., Gunnarsson, K., Malehmir, A., ... Marsden, P. (2019). Magnetic characterisation of magnetite and hematite from the Blötberget apatite-iron-oxide deposits (Bergslagen), south-central Sweden. *Canadian Journal of Earth Sciences*

Ávila, C. F. et al. 2015. EBSD analysis of rhombohedral twinning in hematite crystals of naturally deformed iron formations. *Journal of Applied Crystallography*, **48(1)**:212-219.

Barbosa, P. F. 2012. Investigação dos processos formadores de bandamento composicional em formações ferríferas do Quadrilátero Ferrífero. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Tese de doutoramento, p1-19.

Baylyl, M. B. 1959 Modal analysis by point-counter-the choice of sample area. *Journal of Geology Society*, v. 16, p. 119-129.

Berubé M. A. 1984. Influence de la composition minéralogique du minerai sur les performances desprocedes de broyage et de flottation au concentrateur n. 1 de Mines Gaspé (Murdochville, Québec). *Traintement du mineral*, 77(872):54-62.

Bouffard, SC (2015). Benefícios dos sistemas de controle de processo em circuitos de moagem de processamento mineral. *Minerals Engineering*, 79, 139-142.

Carioca A. C., Brandão P. R. G, 2018. Caracterização mineralógica de minérios de ferro itabiríticos principalmente por mineral liberation analyzer (MLA). *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, São Paulo, v. 15, n. 4, p. 415-421.

Castellanos R. M., Iglesias, J. C. Á., Gomes, O. da F. M., Augusto, K. S., & Paciornik, S. (2018). Characterization of iron ore pellets by multimodal microscopy and image analysis. *REM - International Engineering Journal*,

Da Costa G.M., Resende, V.G., Torfbio, N.M., 2002. Quantitative phase analysis of iron ore concentrates. *Revista da Escola de Minas* 55, 263–266.

Da Costa G. M., Barrón, V., Mendonça Ferreira, C., & Torrent, J. (2009). The use of diffuse reflectance spectroscopy for the characterization of iron ores. *Minerals Engineering*, 22(14), 1245-1250.

Da luz A. B., Sampaio J. A., França S. C. A. (2010). *Tratamento de minérios* 5ª edição p. 8, 85-94.

David N. Lumsden. (1979). Discrepancy Between thin-section and x-ray estimates of dolomite in limestone. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, Vol. 49.

Deer, W. Howie, R. A. Zussman, J. 1992. *An introduction to the rock-forming minerals*: Essex. England: Longman Scientific and Technology., 45p.

Delesse A., 1848. Procède mecanique pour determiner la composition des roches. *Comptes Rendus*, XXV, pages 544-545.

Donskoi, E. *et al.* 2016. Iron ore textural information is the key for prediction of downstream process performance. *Minerals Engineering*, **86**: 10-23.

Donskoi, E. et al. 2017. Mineral4/Recognition4: a universal optical image analysis package for iron ore, sinter and coke characterization. *J. Energy Power Eng.*, **11**: 16-30.

DONSKOI, E. et al. Automated optical image analysis of goethitic iron ores. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, p. 1-11, 2020.

Dwarapudi S; Devi T. U.; Mohan Rao S; Ranjan M. 2008. Influence of Pellet Size on Quality and Microstructure of Iron Ore Pellets. *ISIJ International*, vol. 48 (2008), No. 6, pp. 768-776.

Carvalho, M.B. 2021, Determinação de magnetita residual em concentrado de minério de ferro...

E. Donskoi, S.P. Suthers, S.B. Fradd, J.M. Young, J.J. Campbell, T.D. Raynlyn, J.M.F. Clout 2006. Utilization of optical image analysis and automatic texture classification for iron ore particle characterisation. *Minerals Engineering* 20 (2007) 461–471.

Engström, K., & Esbensen, K. H. (2018). Evaluation of sampling systems in iron ore concentrating and pelletizing processes – Quantification of Total Sampling Error (TSE) vs. process variation. *Minerals Engineering*, 116, 203–208.

Ferreira, R. Estudo de liberação das fases minerais em minério de ferro. Tese (Dissertação de mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia Mineral. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral, p. 34. 2013.

Glagolev A, A., 1934. Quantitative analysis with the microscope by the Point Method. *Engineering and Mining Journal*, pages 135, 399.

Graça, L. M. Implicações das propriedades mineralógicas e microestruturais do minério de ferro no processo industrial de pelotização. 2015. 178 f. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

Graça, L. M. *et al.* 2020. Toward the influence of iron oxide morphology on the grinding and filtration processes and on the cold crushing strength (CCS) of heat-treated iron ore pellets review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, **76**:1-9.

Iglesias JC, et al. Automatic characterization of iron ore by digital microscopy and image analysis. *J Mater Res Technol.* 2018.

Iglesias JC, et al 2018. Characterization of iron ore pellets by multimodal microscopy and image analysis. *REM, Int. Eng. J.*, Ouro Preto, 71(2), 209-215

King, R., & Schneider, C. (1998). Stereological correction of linear grade distributions for mineral liberation, 98 (1), 21–37.

Klein, C. Dutrow, B. 2012. *Manual de Ciências dos Minerais (23ª edição)*. Tradução e revisão técnica: Rualdo Menegat. Editora Bookman, Porto Alegre, Brasil.

K.S. Augusto, J.C.A. Iglesias, L.D. Durand, O.Gomes, D. Pirotte, A.L.A. Domingues, M.B. Vieira and Paciornik, S. 2016. 14th International Congress for Stereology and Image Analysis Liège, July 7-10, 2015

Larson, Ron; Farber, Betsy. *Elementary statistics*. Pearson Education Canada, p. 98-330, 2019.

Lu, L. 2015. *Iron Ore: Mineralogy, processing and environmental sustainability*. Amsterdam, Elsevier Science Publishing Company Inc., 46p.

L. Takehara, M. A. Z. Vasconcellos, R. Hinrichs, J. B. M. da Cunha and F. Chemale Jr 2009. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy (Trans. Inst. Min. Metall. C)* 2009 Vol 118 N° 3

Miller, A. N., 1939. Correction factors in quantitative microscopic analysis of mineral mixtures. Massachusetts Institute of Technology.

Murdock J., 1916. *Microscopical determination of the opaque minerals*. John Wiley & Sons. (IN Miller 1939)

Pires K. S., Mendes J. J., Figueiredo V. C., Silva F. L., Von Krüger F. L., Vieira C. B., Araújo F. G. S. 2019. Mineralogical Characterization of Iron Ore Tailings from the Quadrilátero Ferrífero, Brazil, by Electronic Quantitative Mineralogy p. 1-3.

Poliakov, A. Donskoi, E. 2019. Separation of touching particles in optical image analysis of iron ores and its effect on textural and liberation characterization. *European Journal of Mineralogy*, **31**: 485-505

Rosiwal A., 1898. Ein einfacher Ueber geometrische gesteinsanalyse. Ein einfacher weg zur ziffermässigen feststellung des quantitativverhältnisses - Der Mineralbestandtheile Gemengter Gesteine. *Verhandlungen Der K.K. Geologischen reichsanstalt, Wien*, pages 143. (IN MILLER 1939)

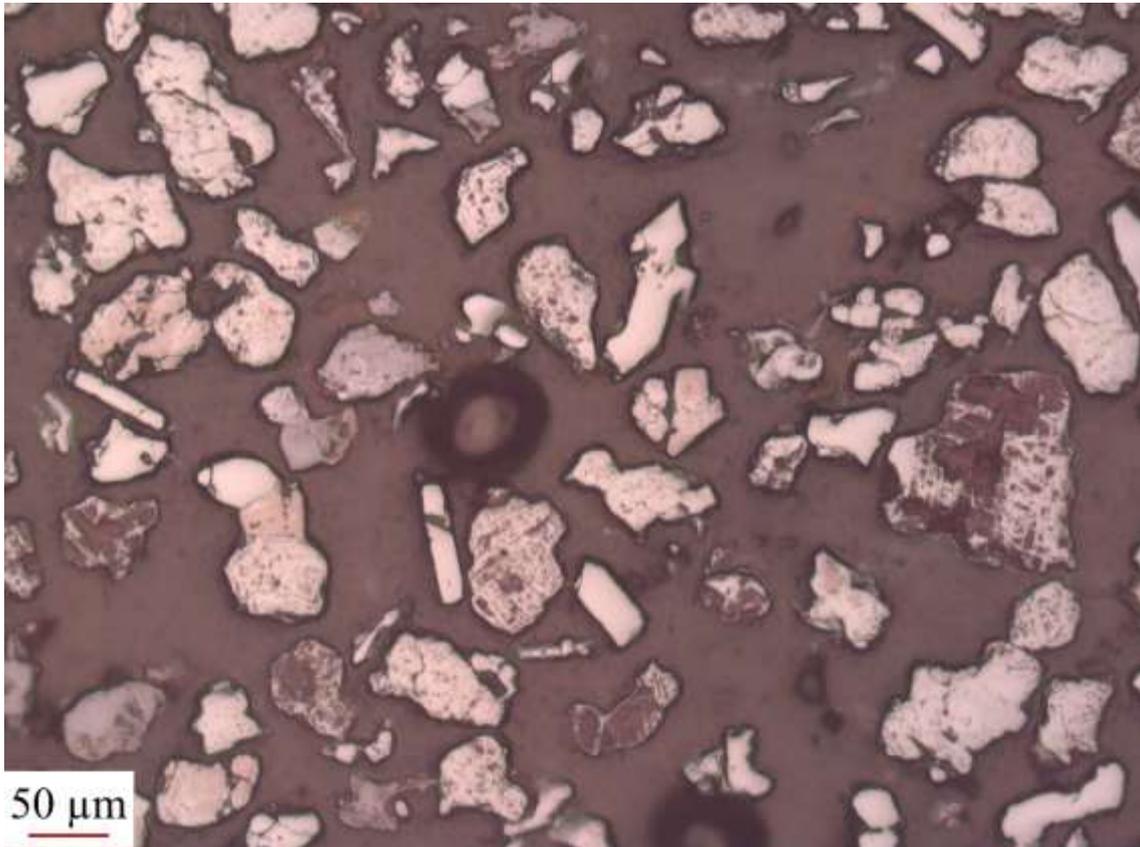
Rossi, Q. D. Estratigrafia e arcabouço estrutural da região de fábrica nova, quadrilátero ferrífero, Minas Gerais. Tese (Dissertação de mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Geologia. Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, p.5. 2014

Schneider, C., Rasband, W. & Eliceiri, K. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nat Methods* **9**, 671–675 (2012).

S. Hapugoda, L. Lu, E. Donskoi & J. Manuel (2016). *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy: Section C*.

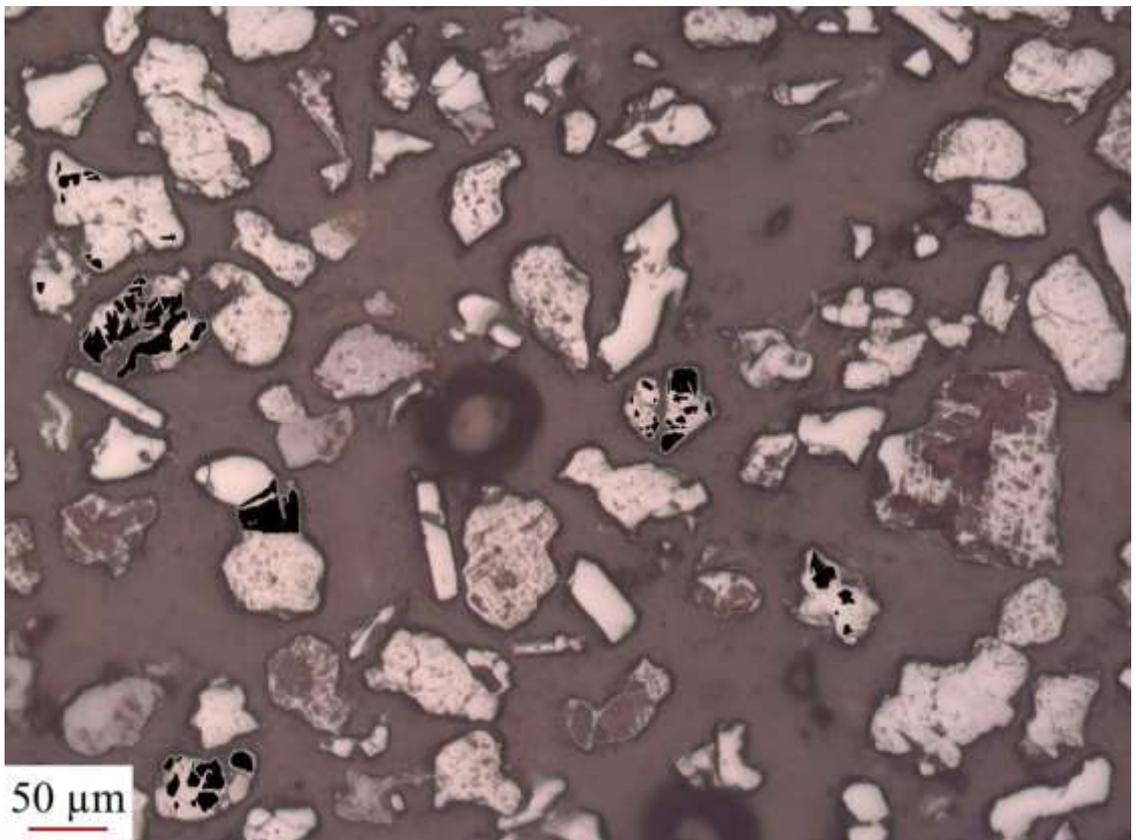
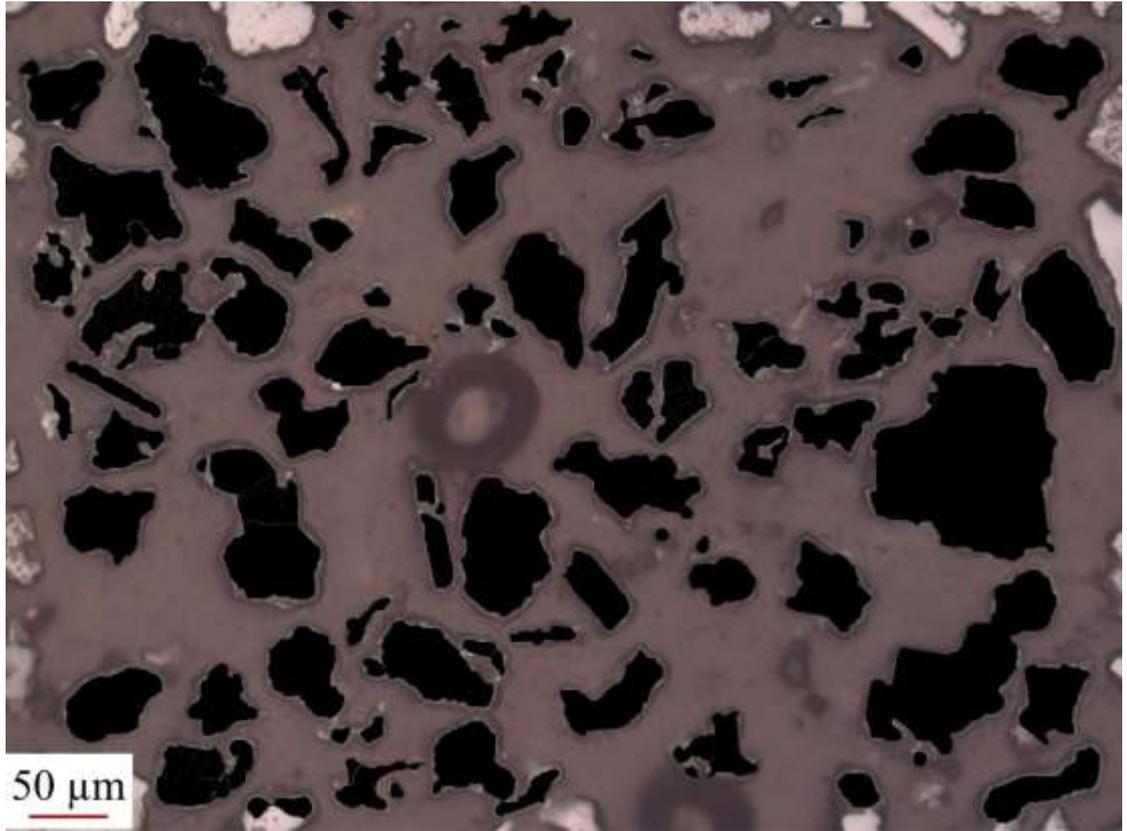
APÊNDICE 1

P1-1

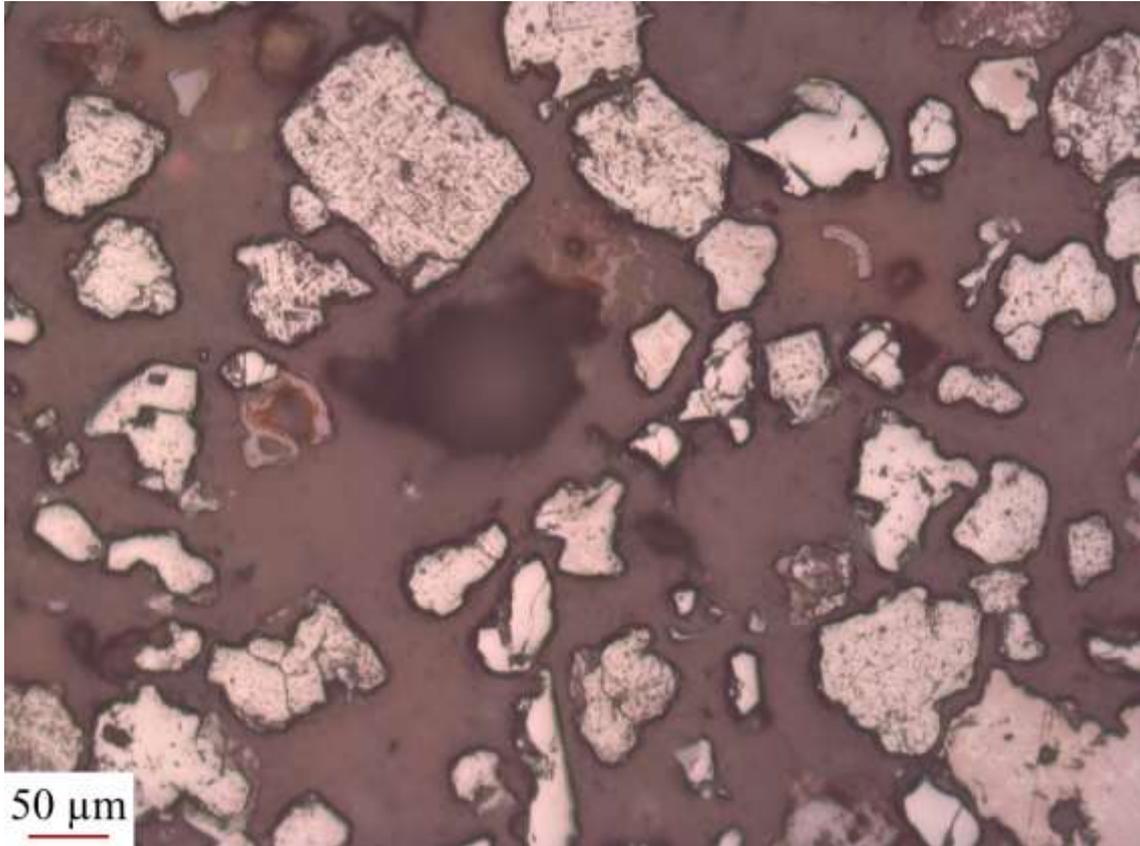


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	106	54
Área dos grãos (μm^2)	108355,574	55512

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	66,250%	33,750%
Determinação de áreas	96,302%	3,698%

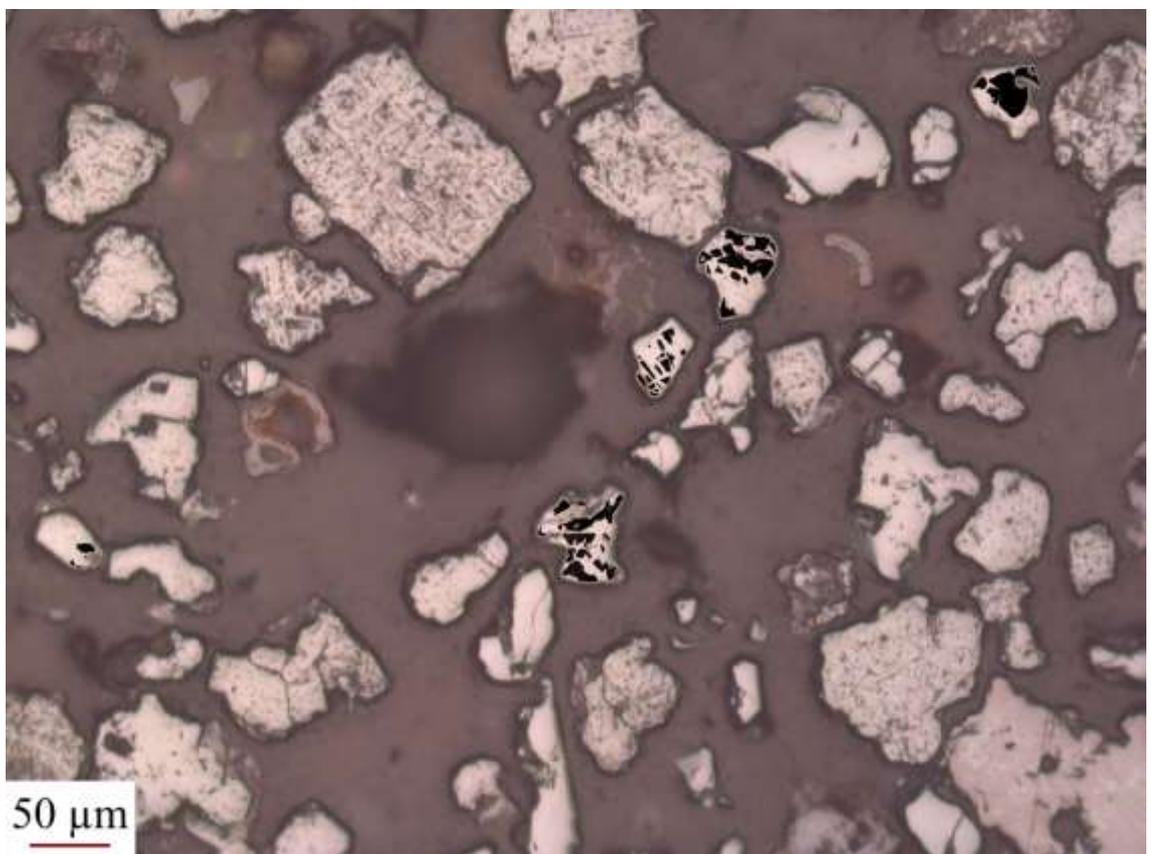
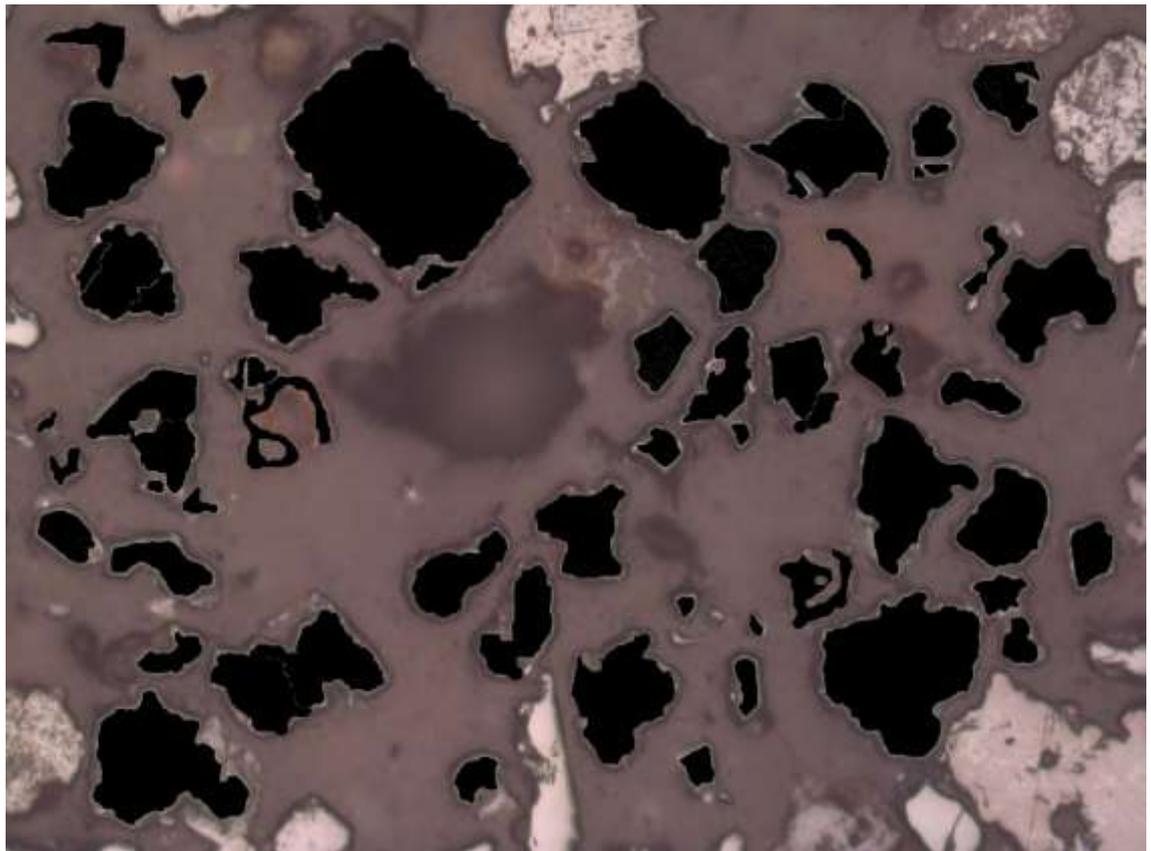


P1-2

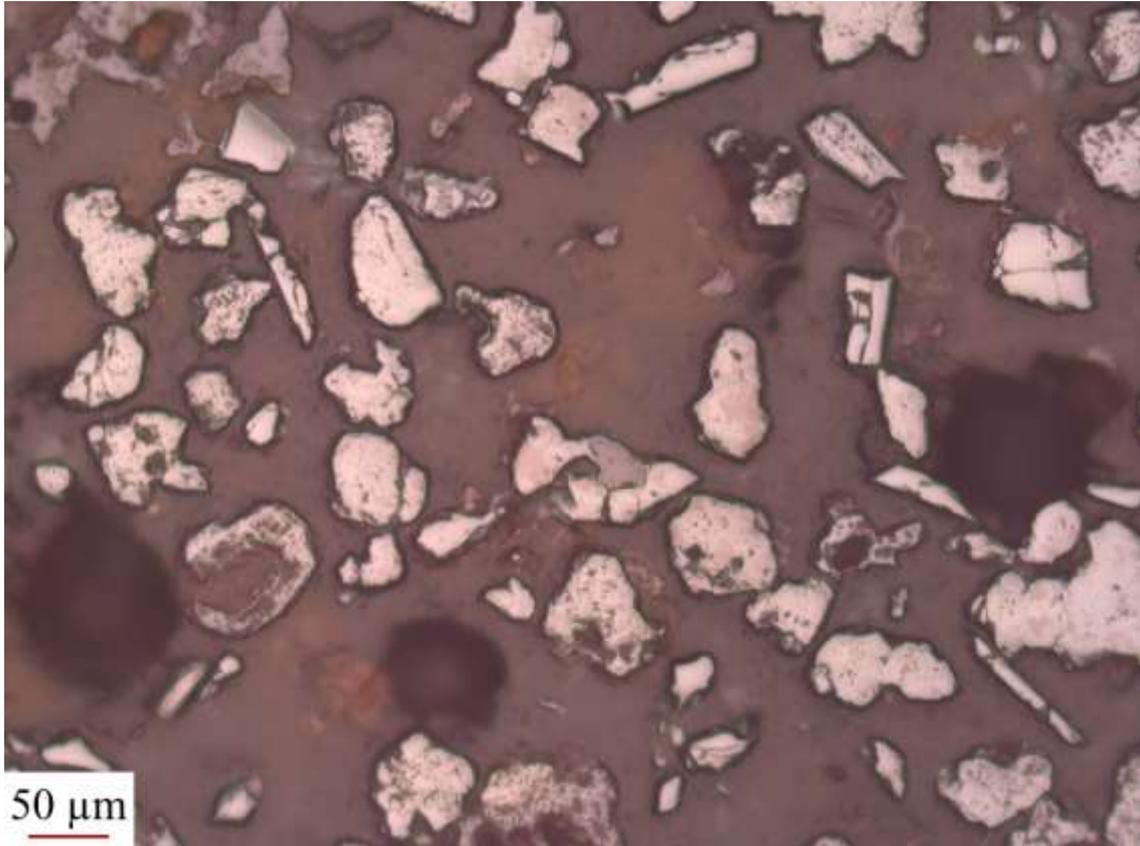


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	51	48
Área dos grãos (µm ²)	1179622	31684,000

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	51,515%	48,485%
Determinação de áreas	97,386%	2,614%

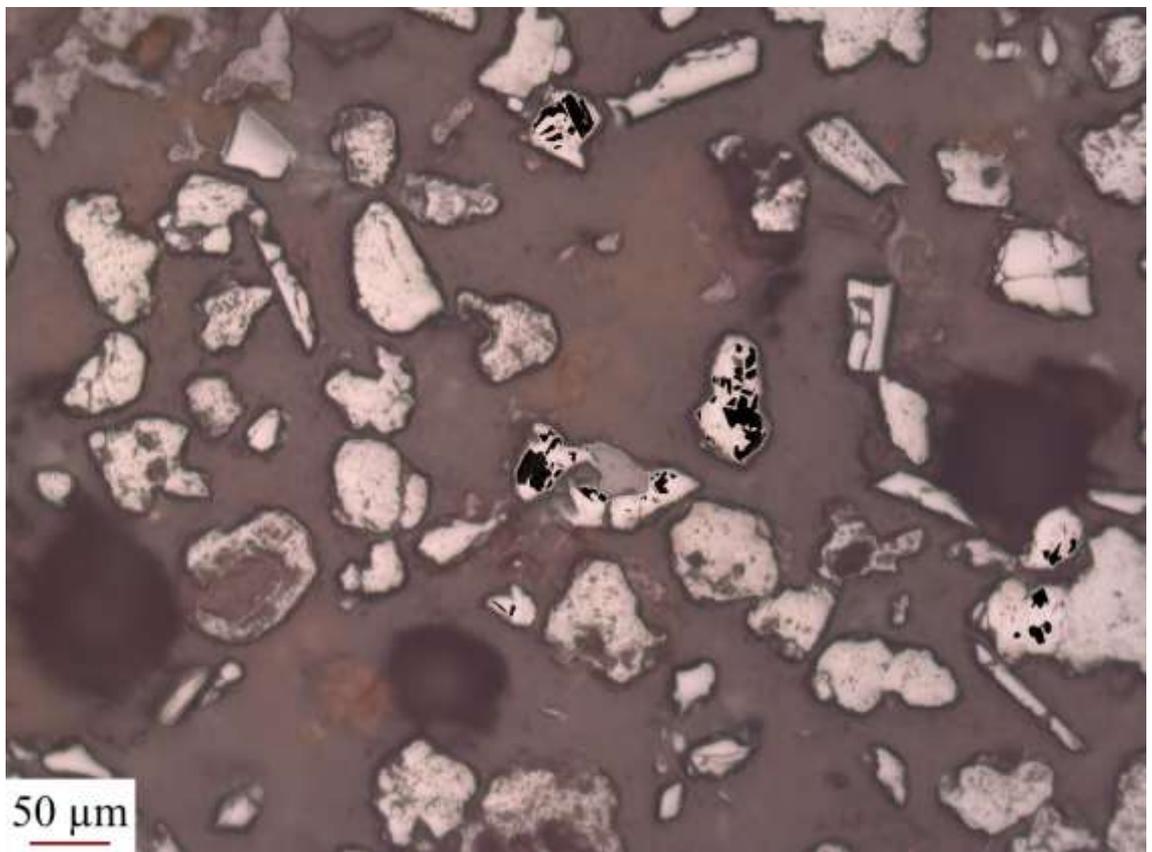
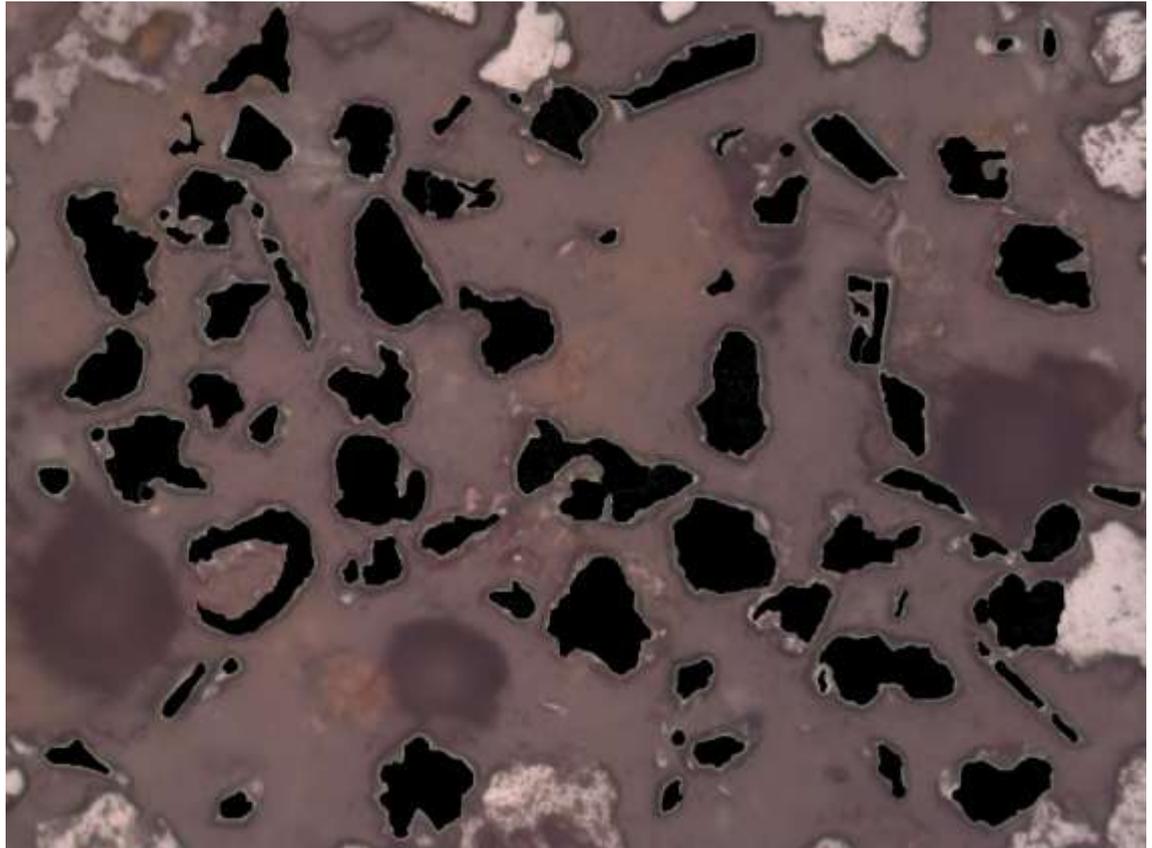


P1-3

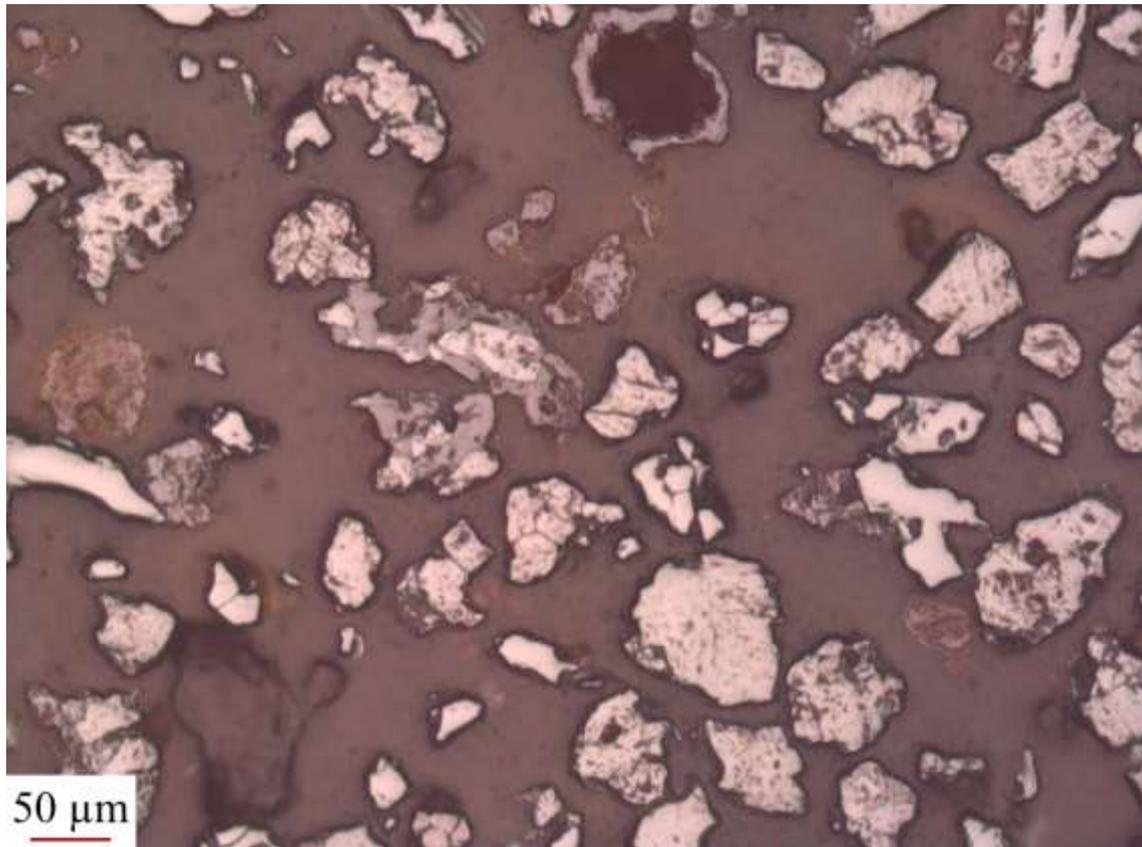


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	77	49
Área dos grãos (μm ²)	11230,221	30226

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	61,111%	38,889%
Determinação de áreas	96,624%	3,376%

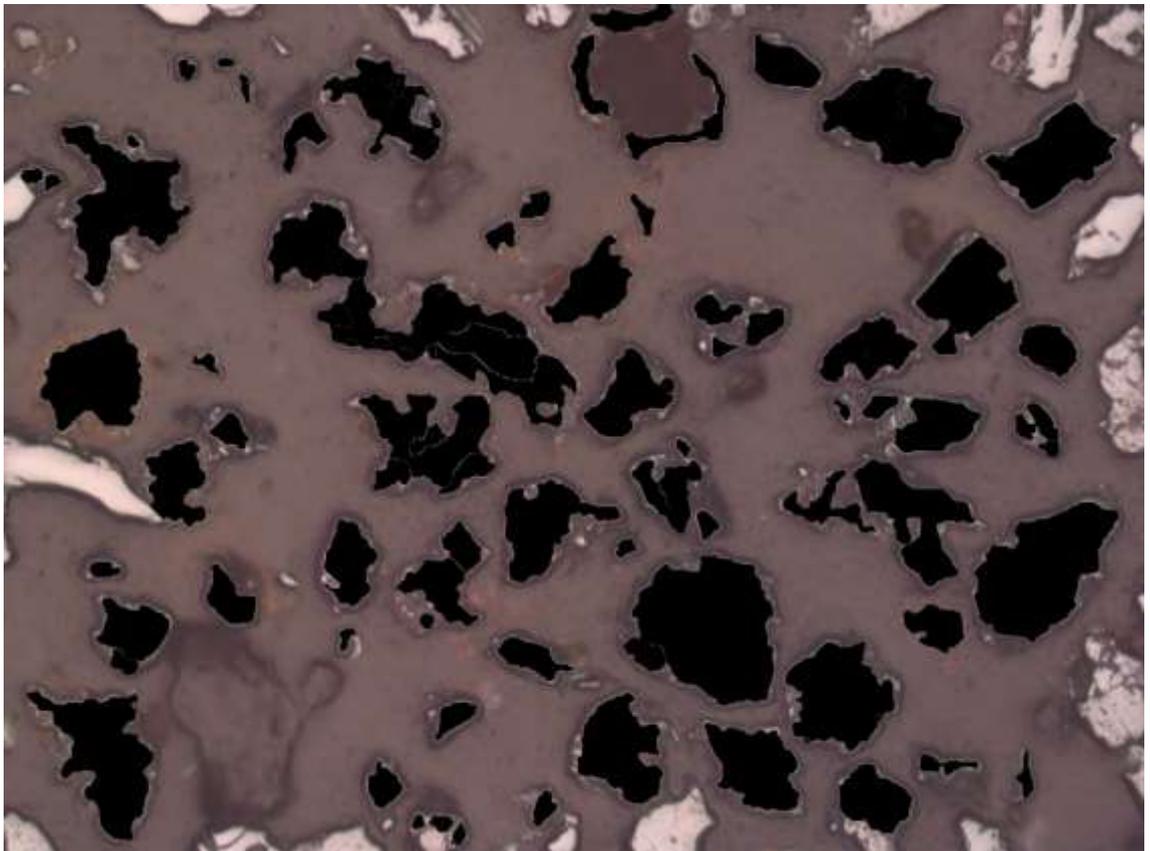
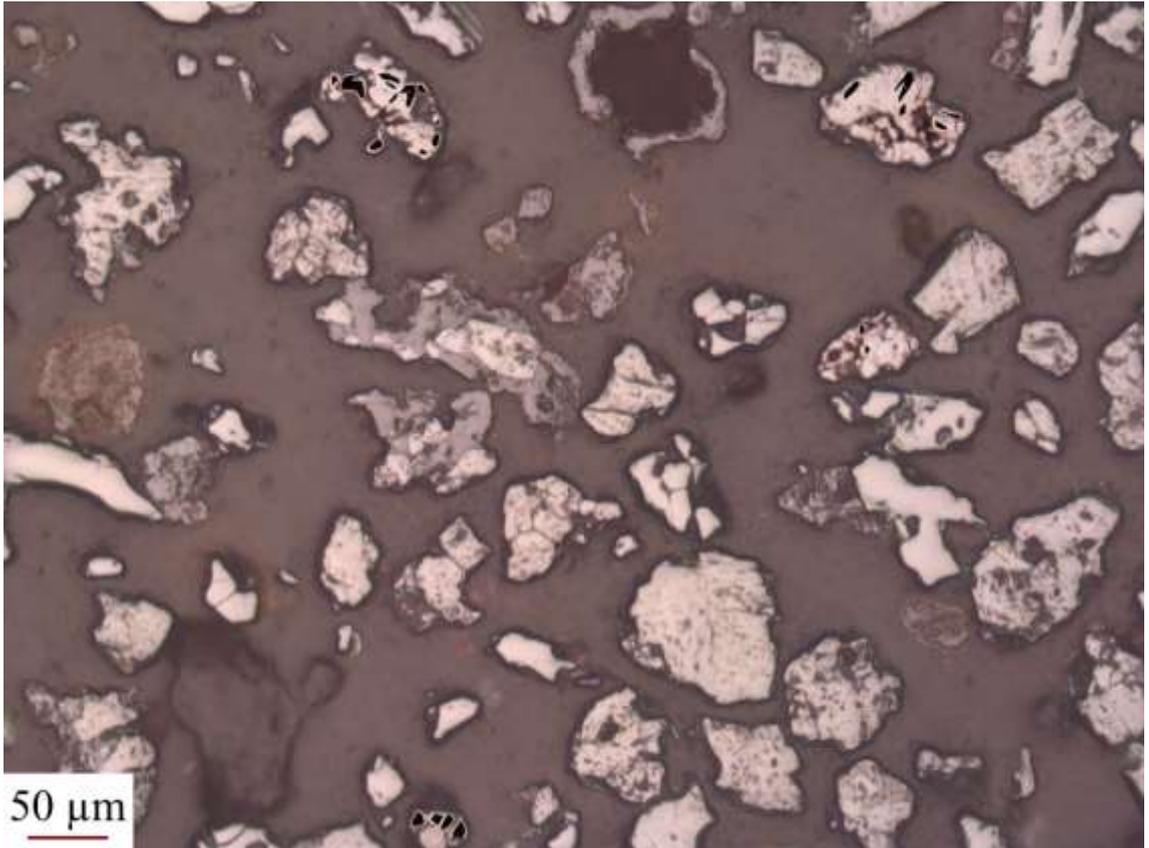


P1-4

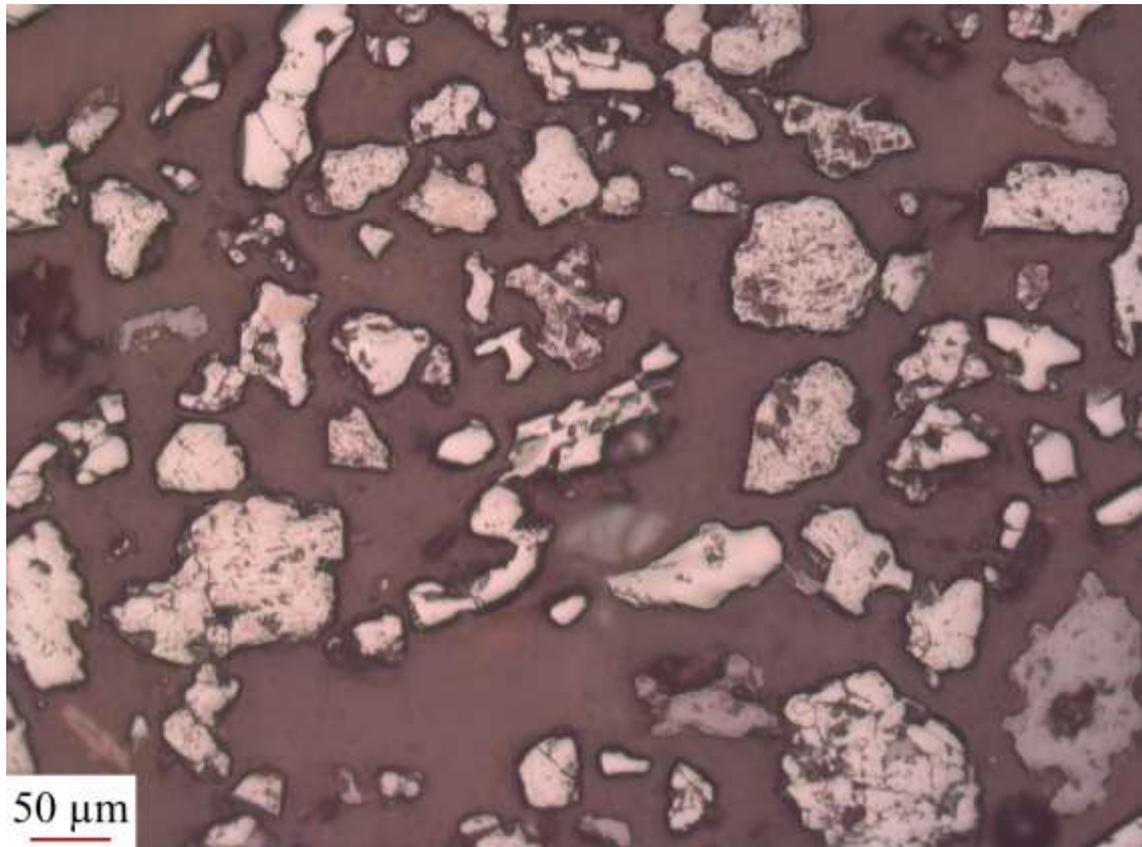


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	70	24
Área dos grãos (µm ²)	15323,643	9665

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	74,468%	25,532%
Determinação de áreas	99,108%	0,892%

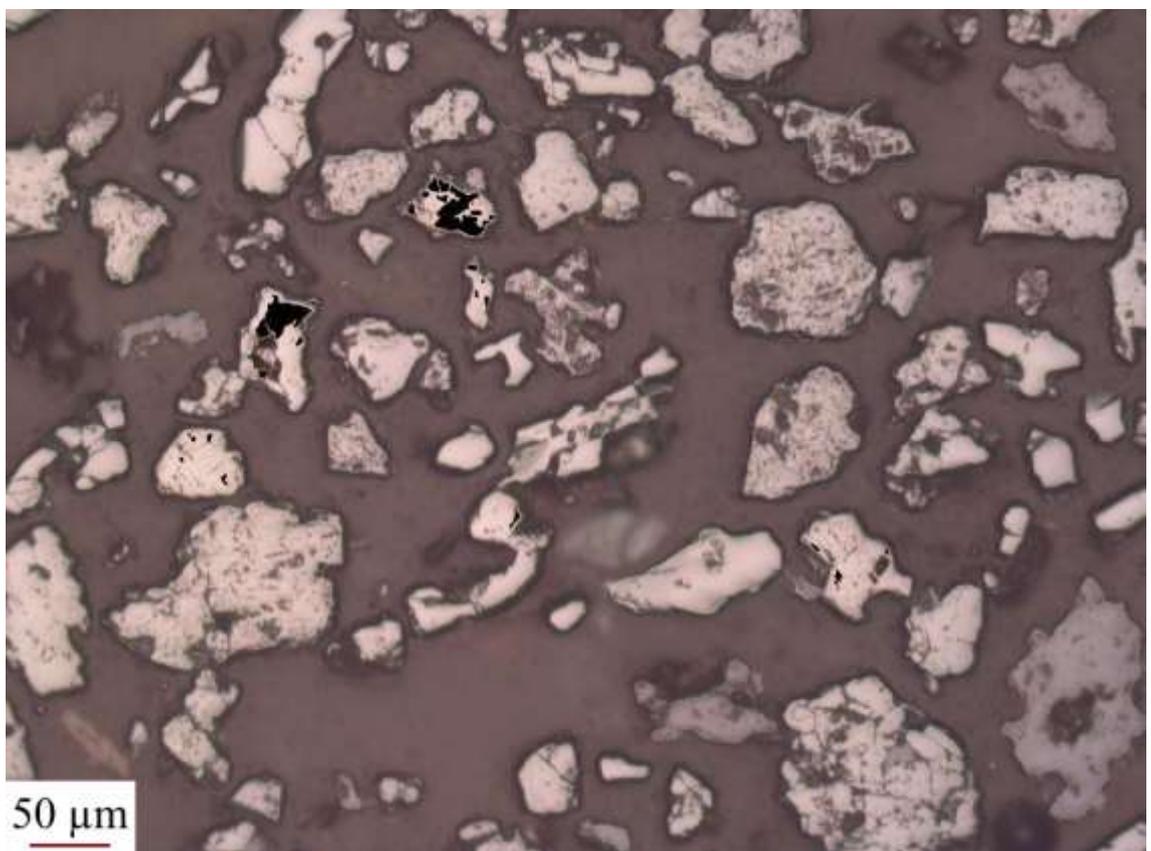
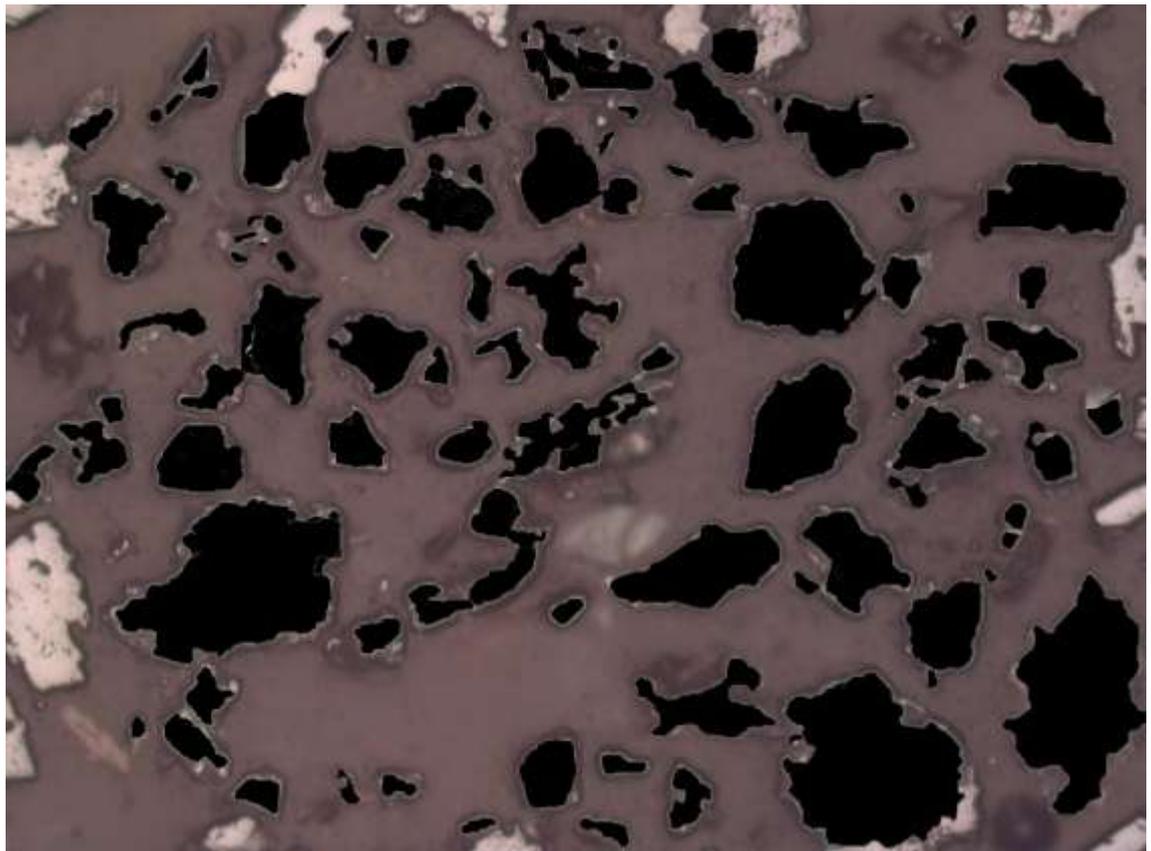


P1-5

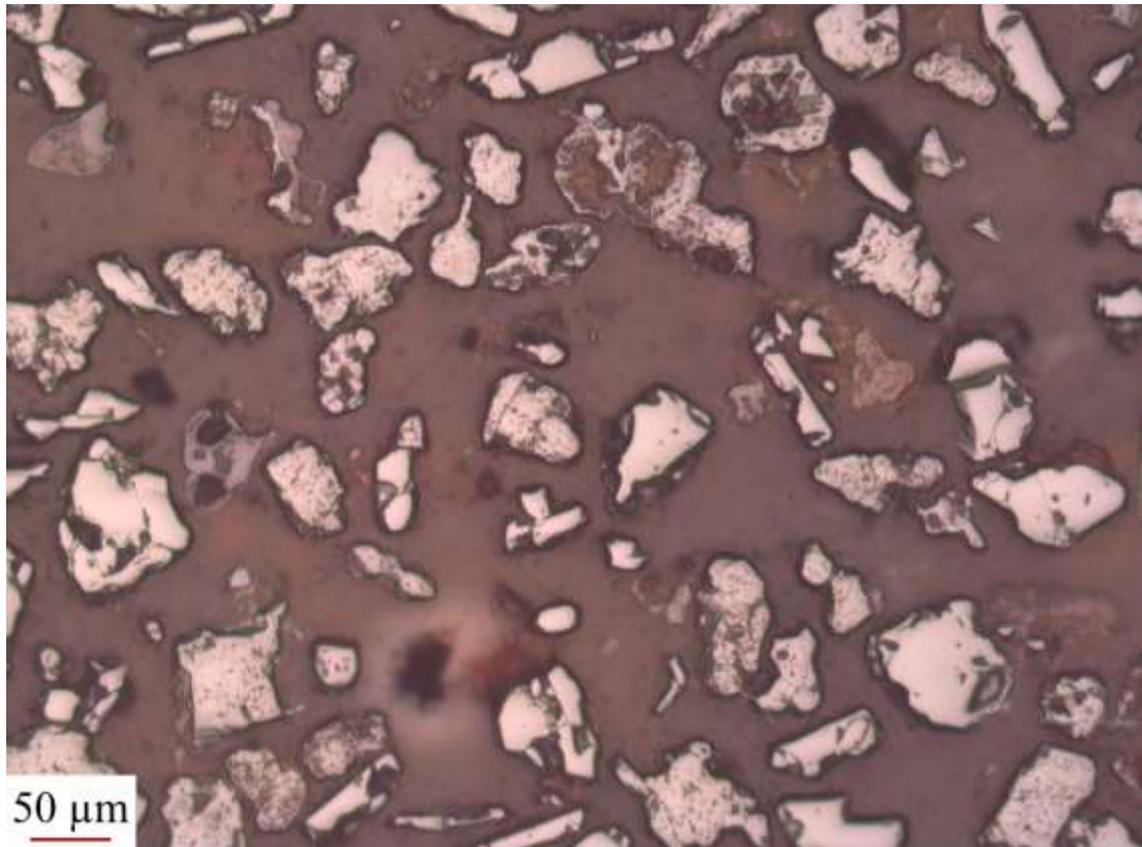


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	121	26
Área dos grãos (μm ²)	1283687	17012

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	82,313%	17,687%
Determinação de áreas	98,829%	1,171%

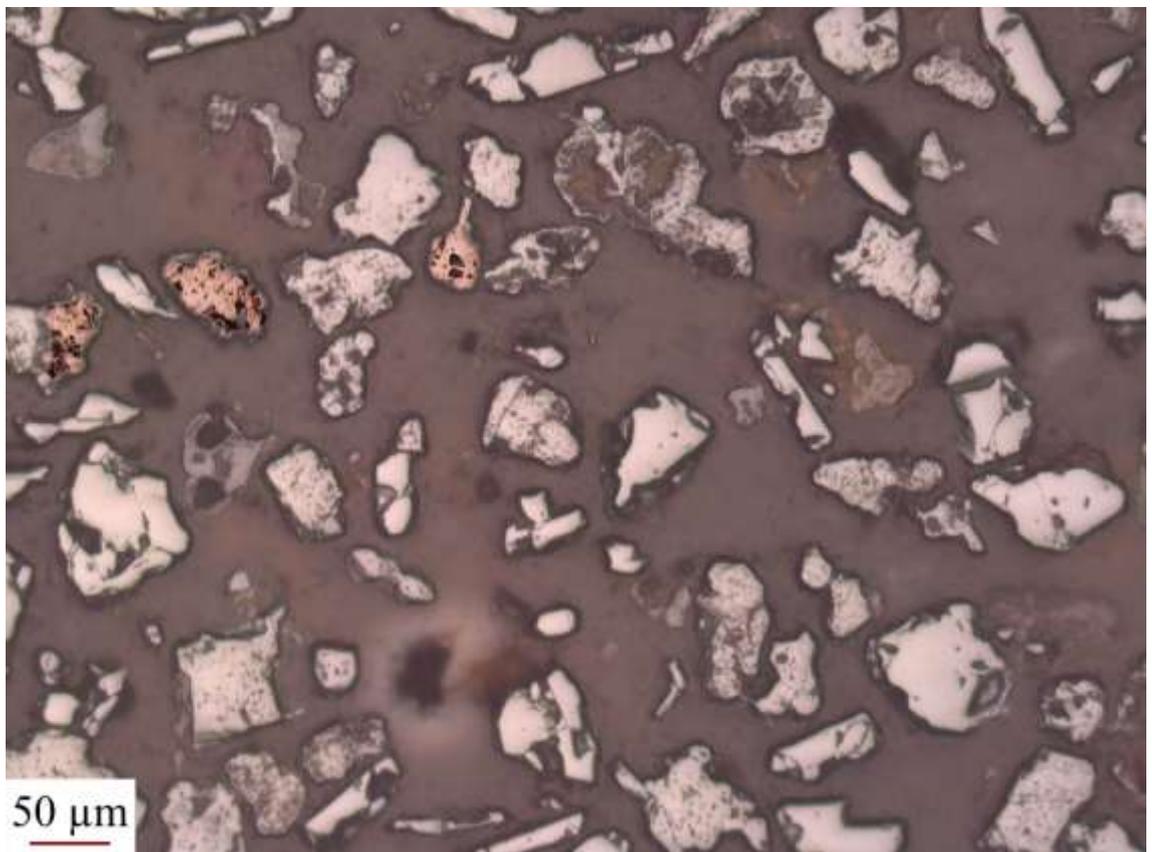
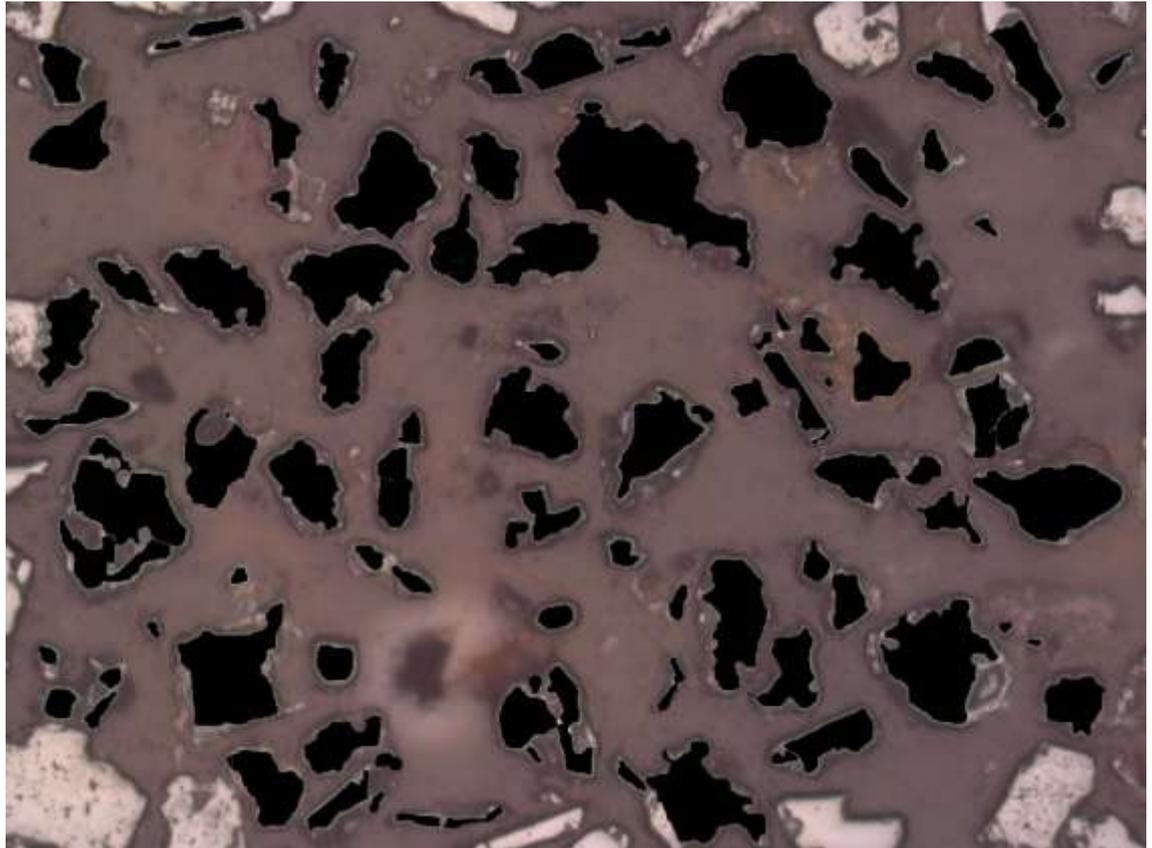


P1-6

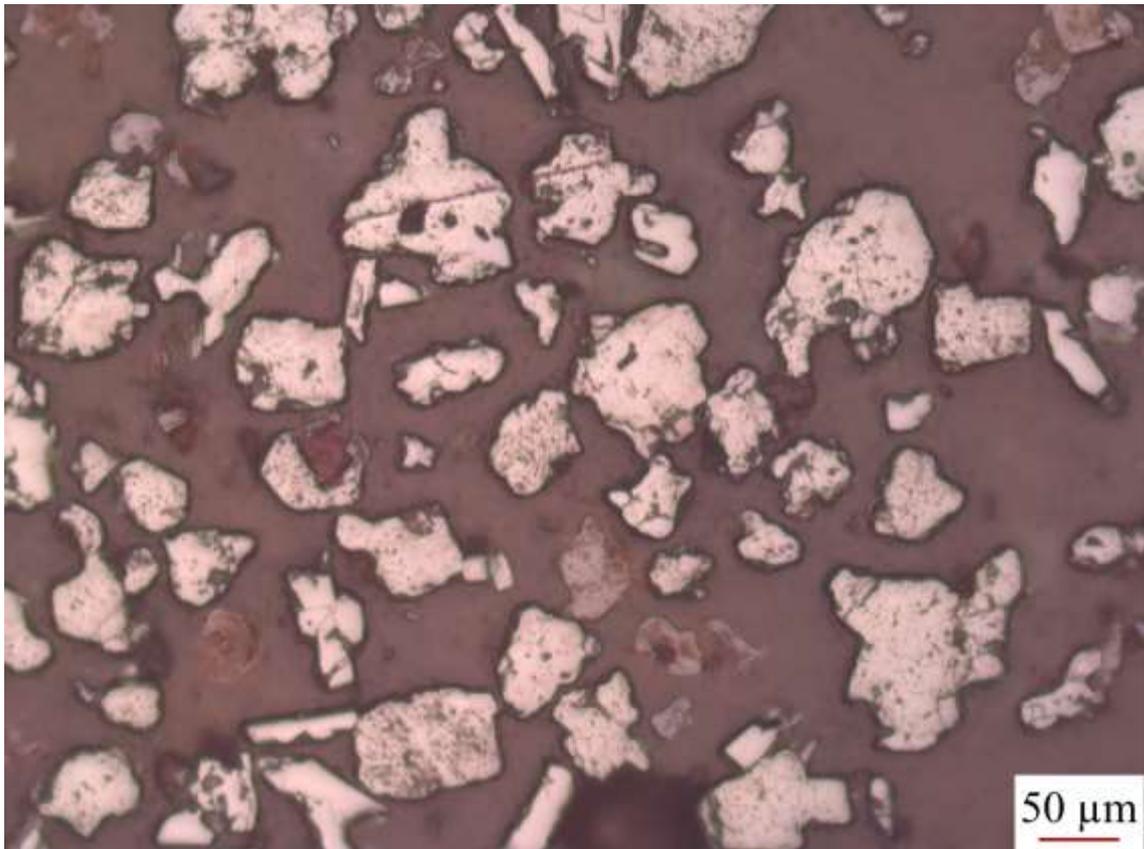


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	92	14
Área dos grãos (μm ²)	1026642	3283

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	86,792%	13,208%
Determinação de áreas	99,679%	0,321%

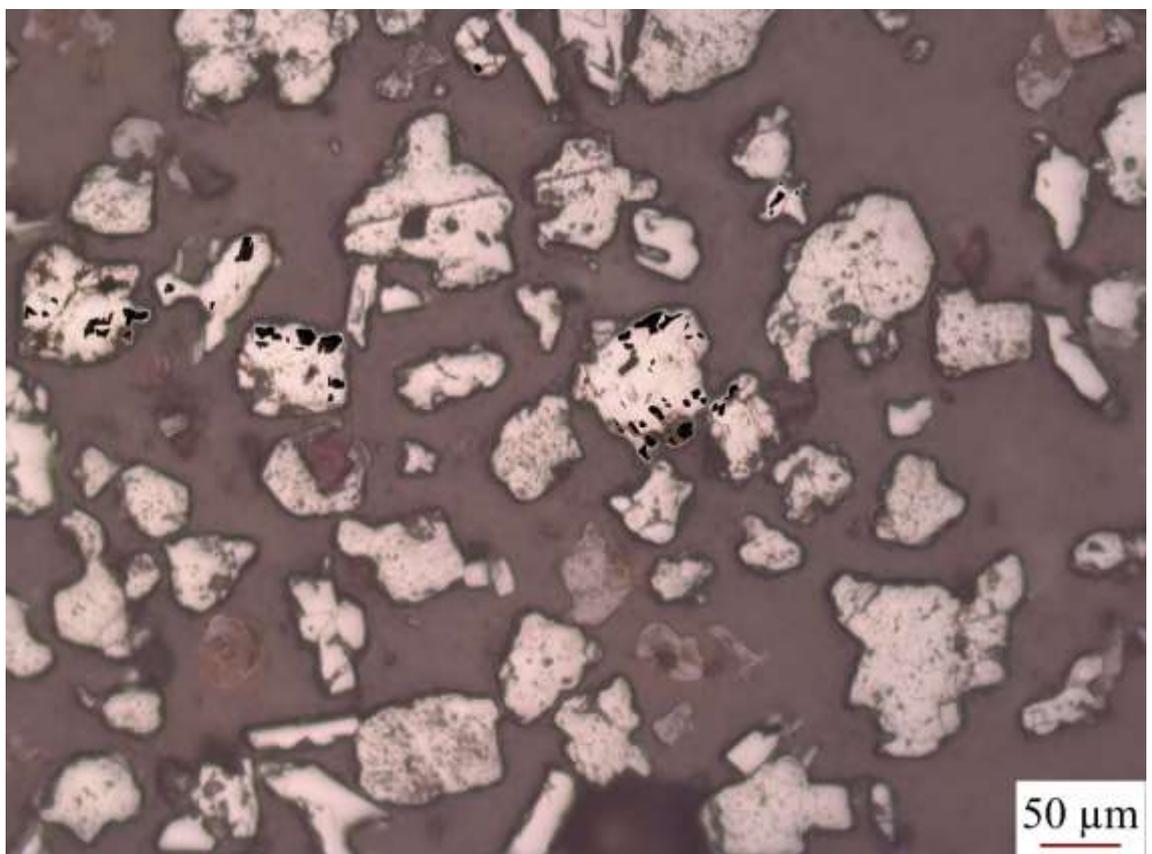
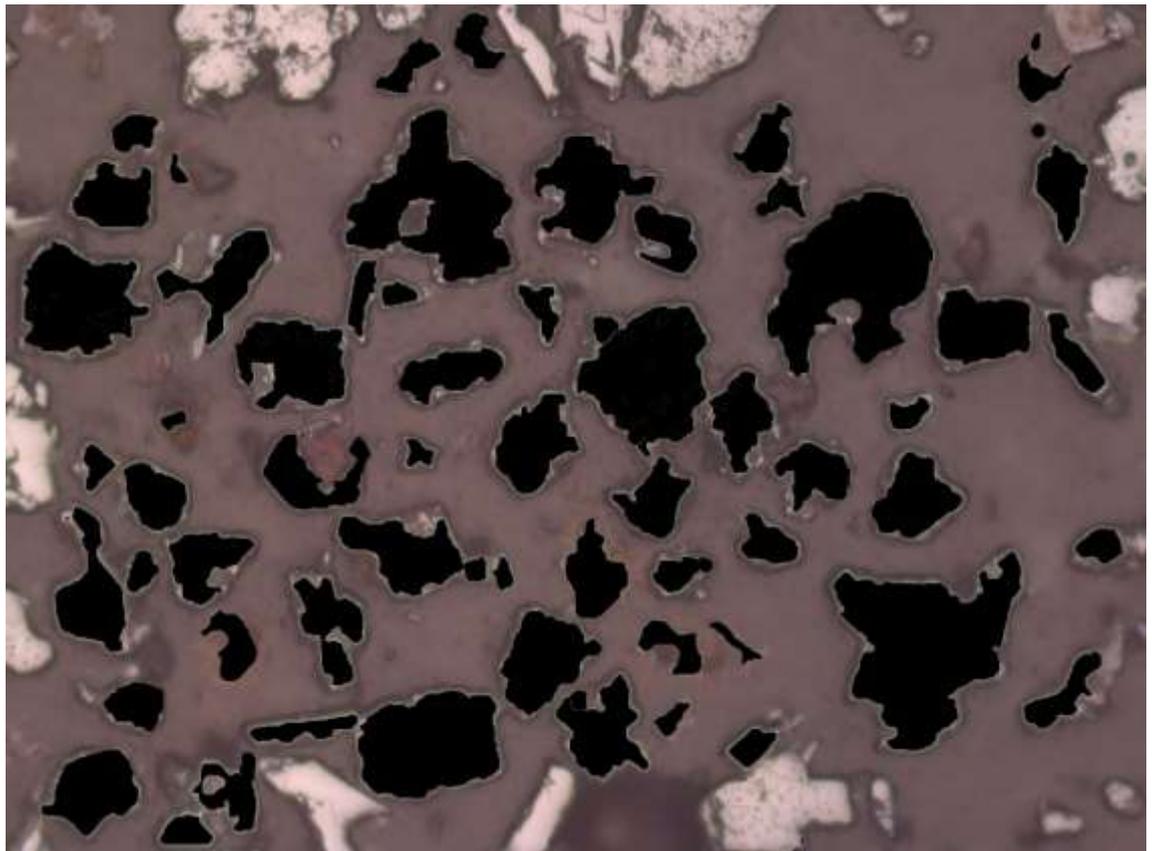


P1-7

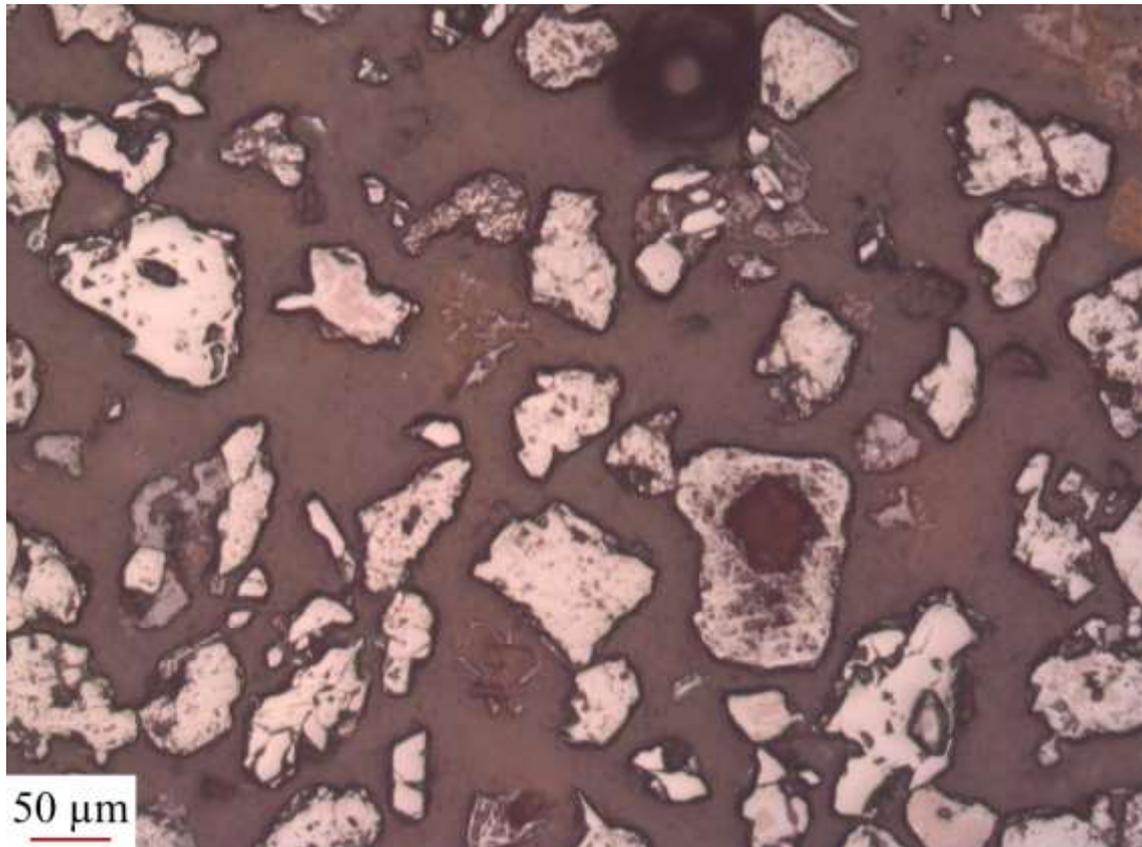


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	72	48
Área dos grãos (μm ²)	1174683	23595

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	60,000%	40,000%
Determinação de áreas	98,029%	1,971%

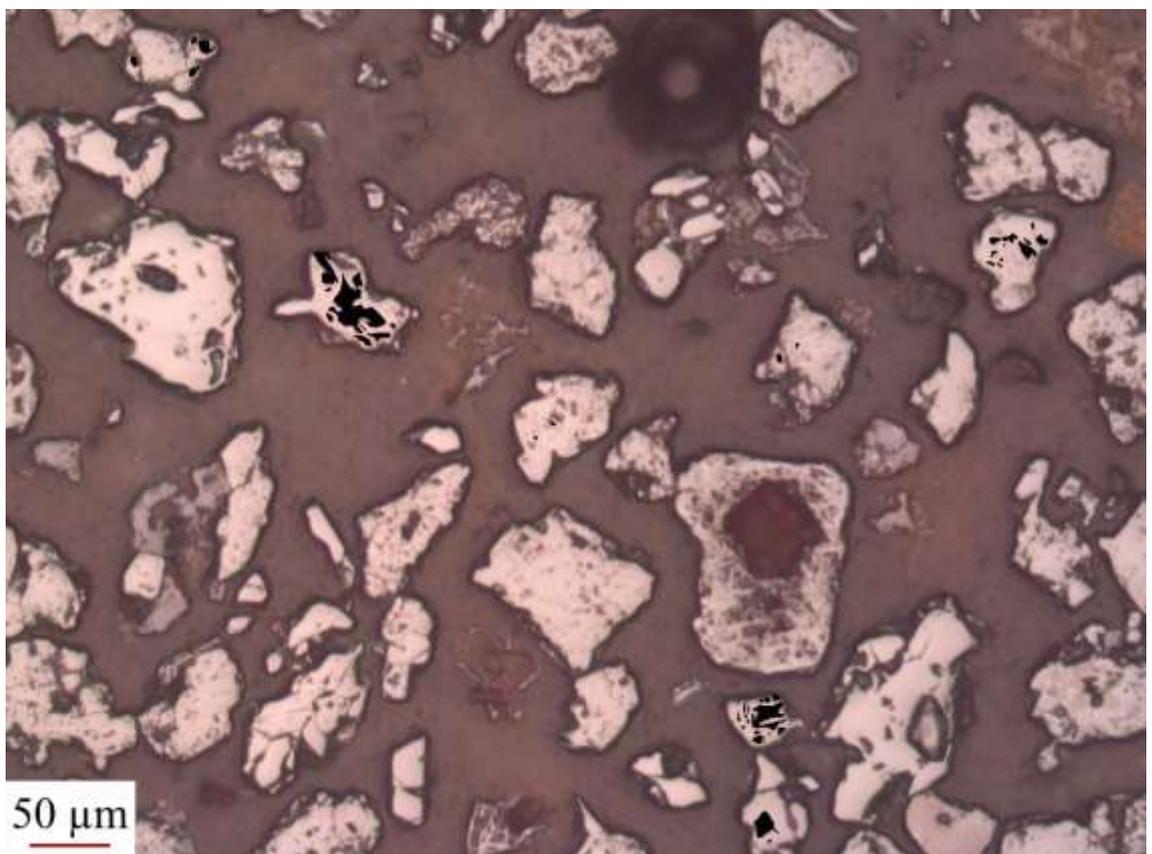
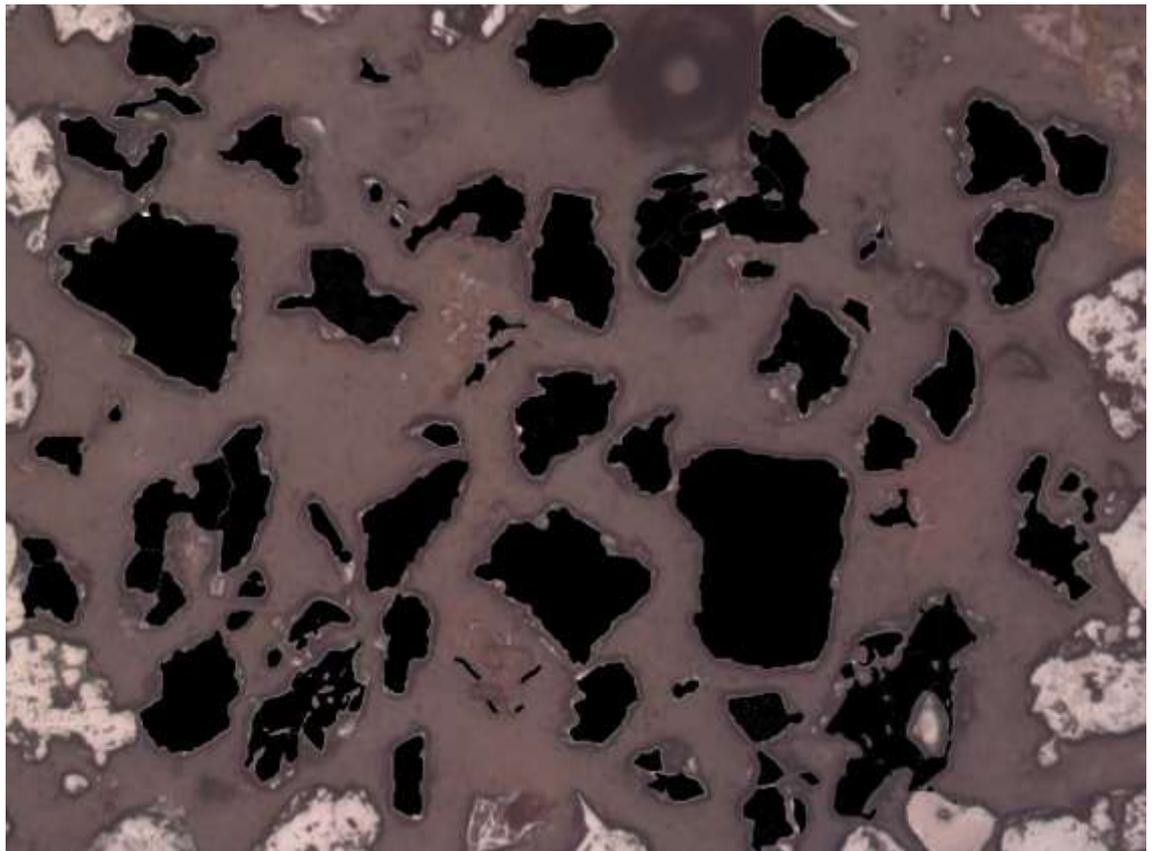


P1-8

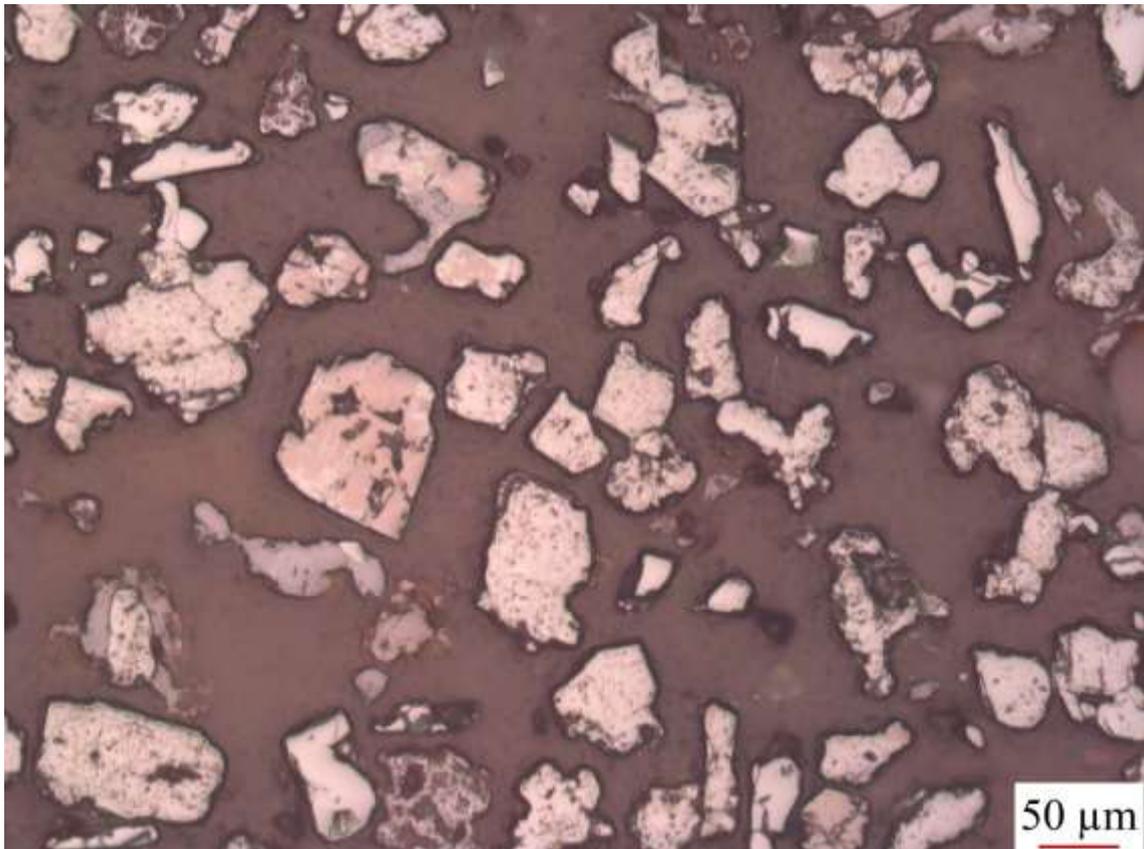


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	78	49
Área dos grãos (μm ²)	1220162	21255

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	61,417%	38,583%
Determinação de áreas	98,287%	1,713%

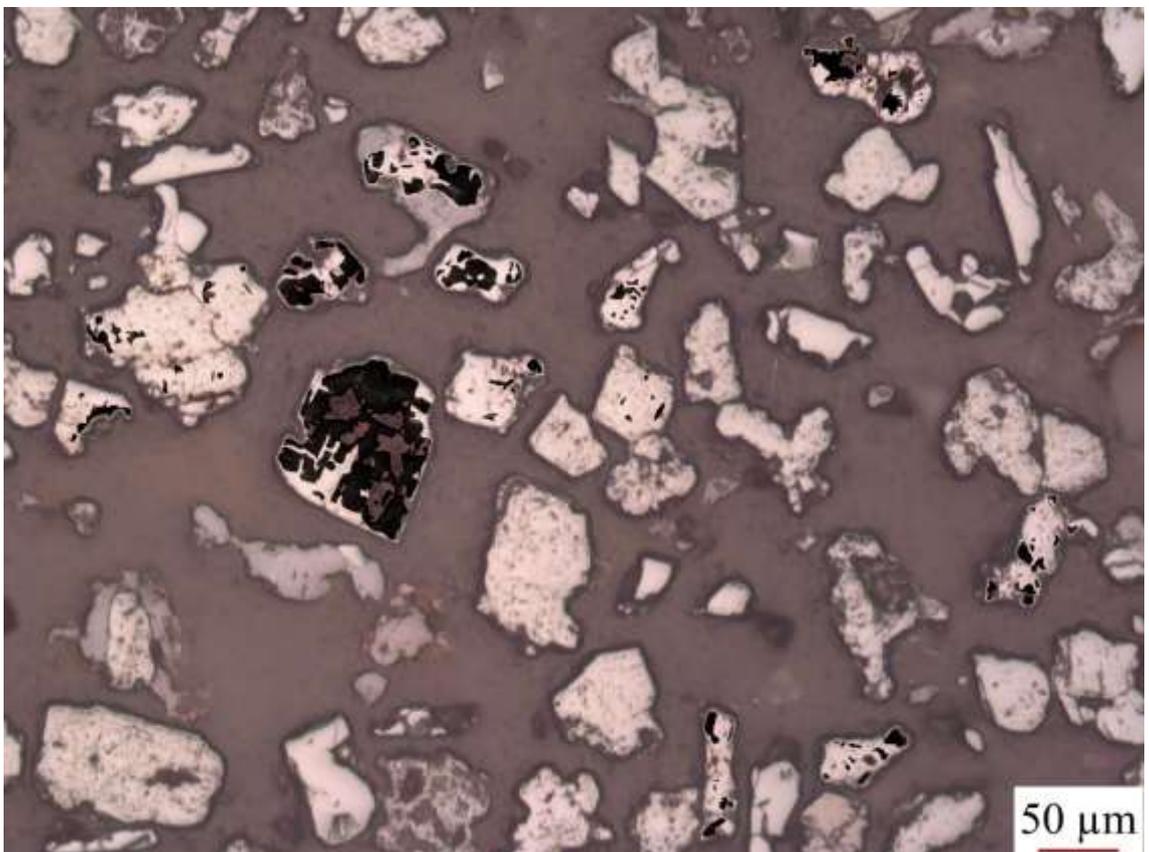
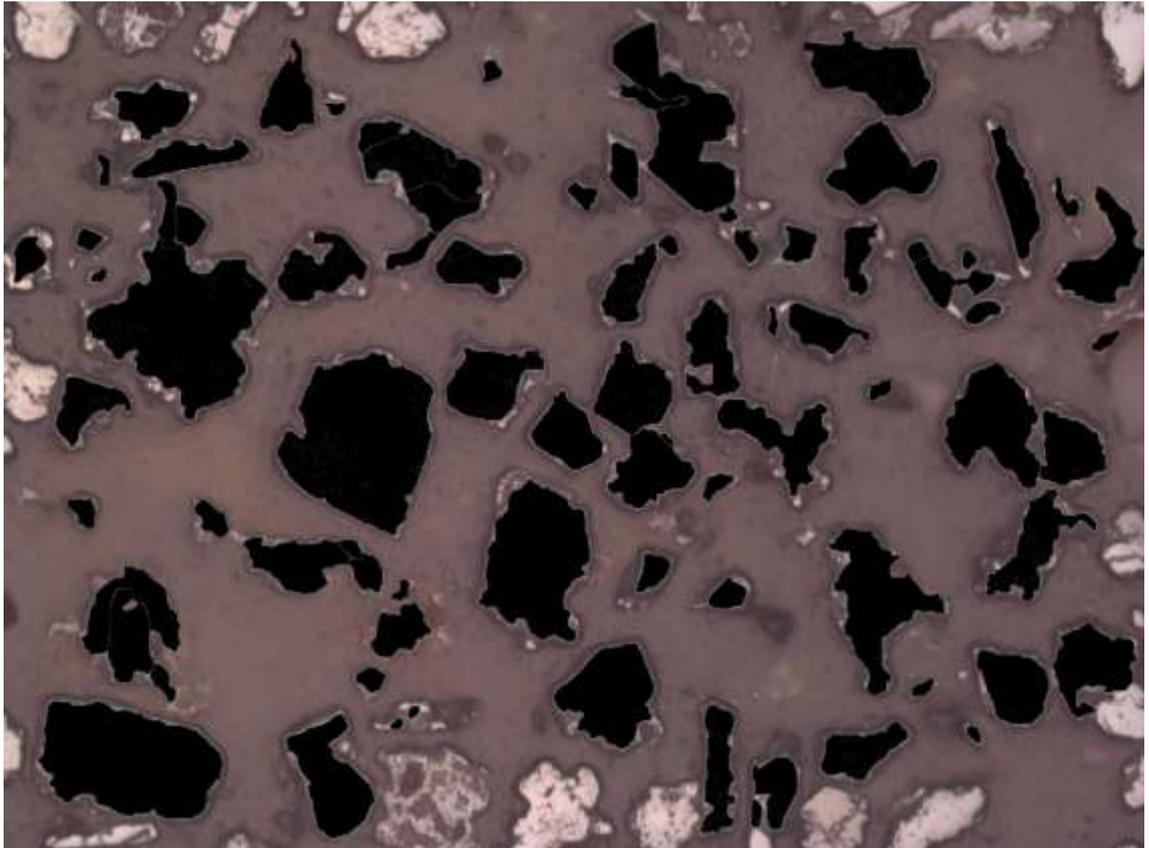


P1-9

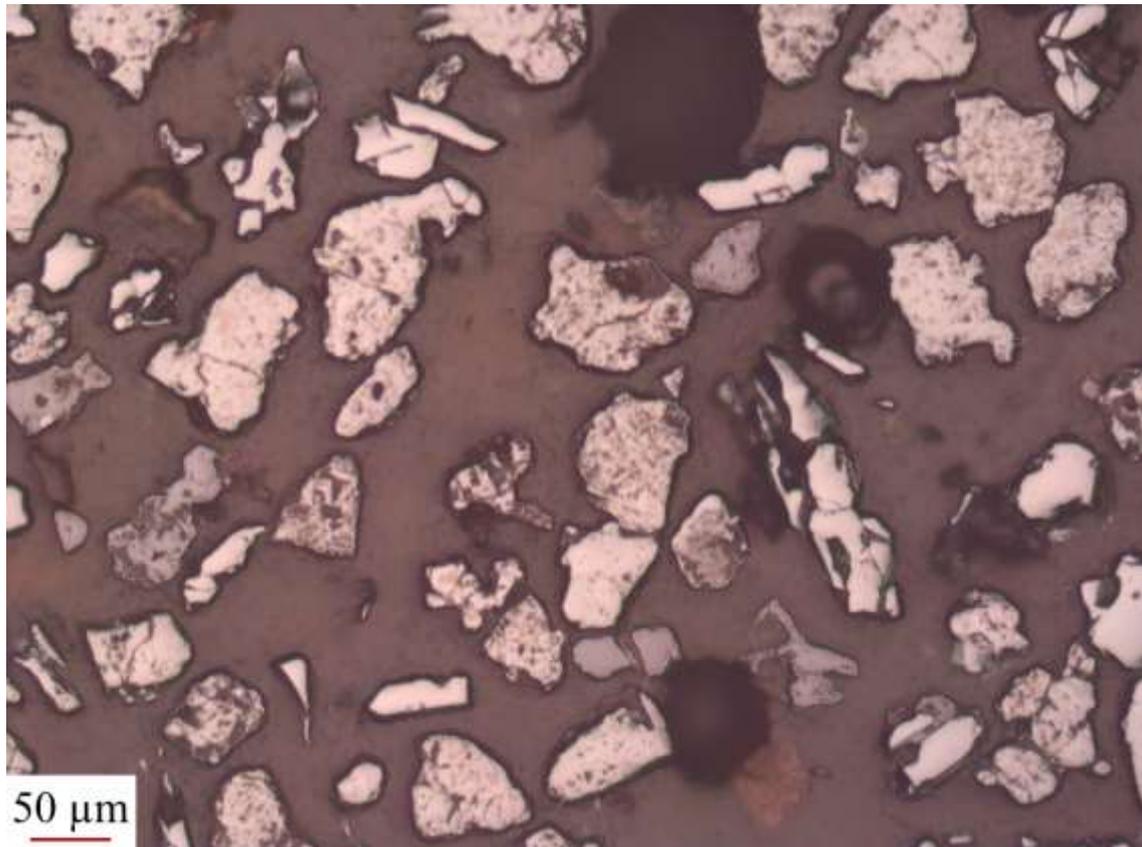


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	74	96
Área dos grãos (μm ²)	1203849	144059

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	43,529%	56,471%
Determinação de áreas	89,311%	10,689%

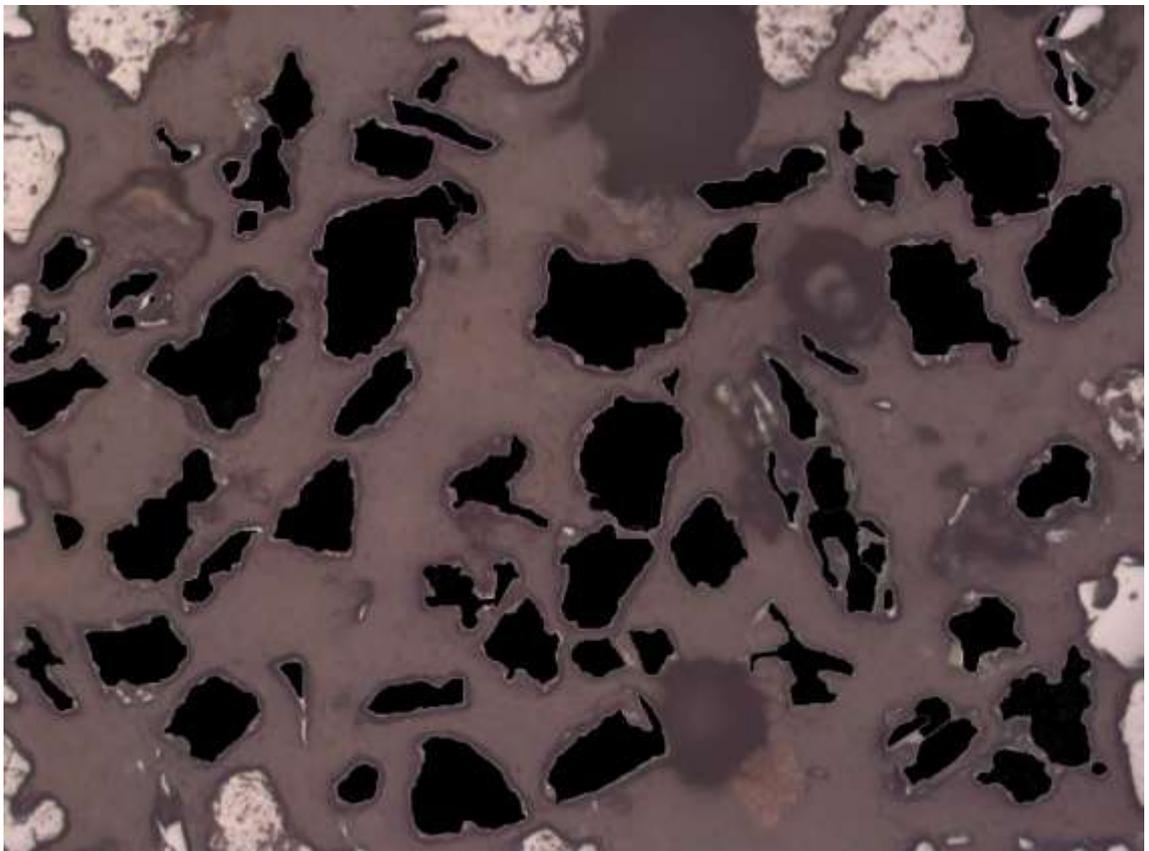
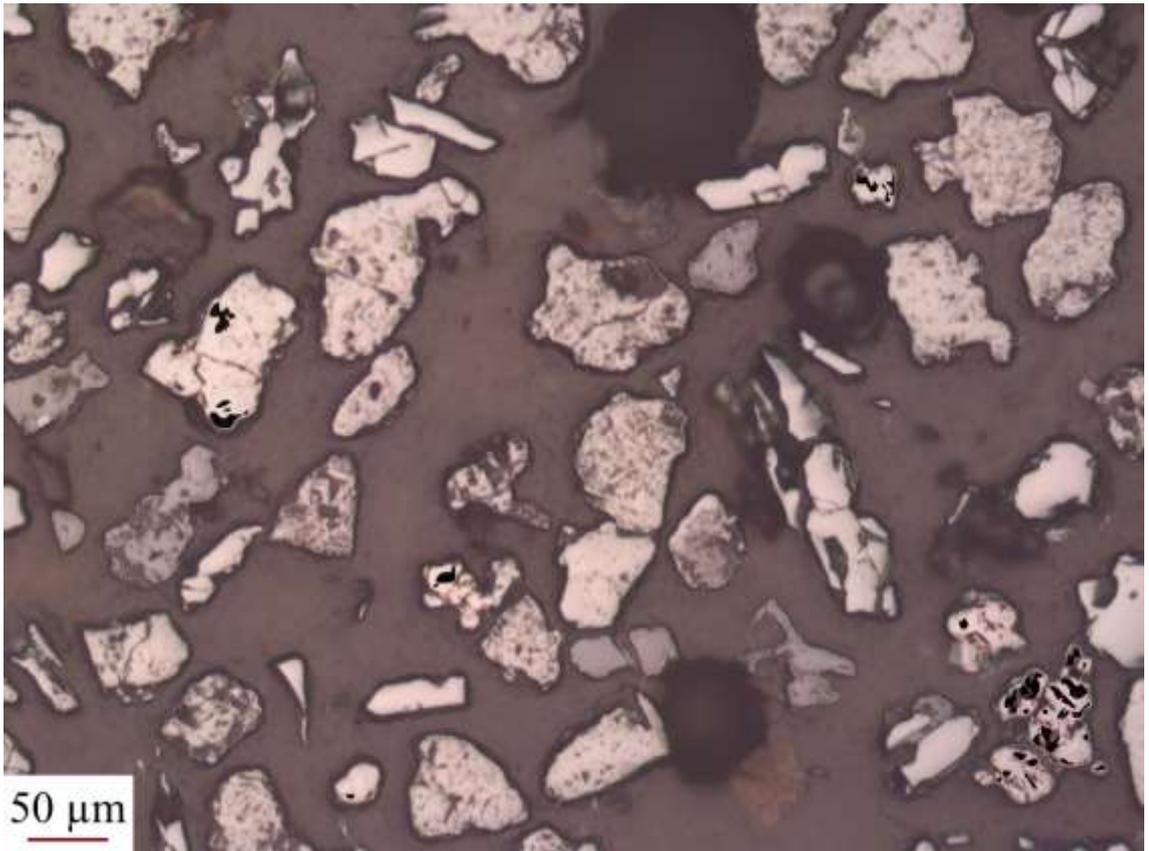


P1-10

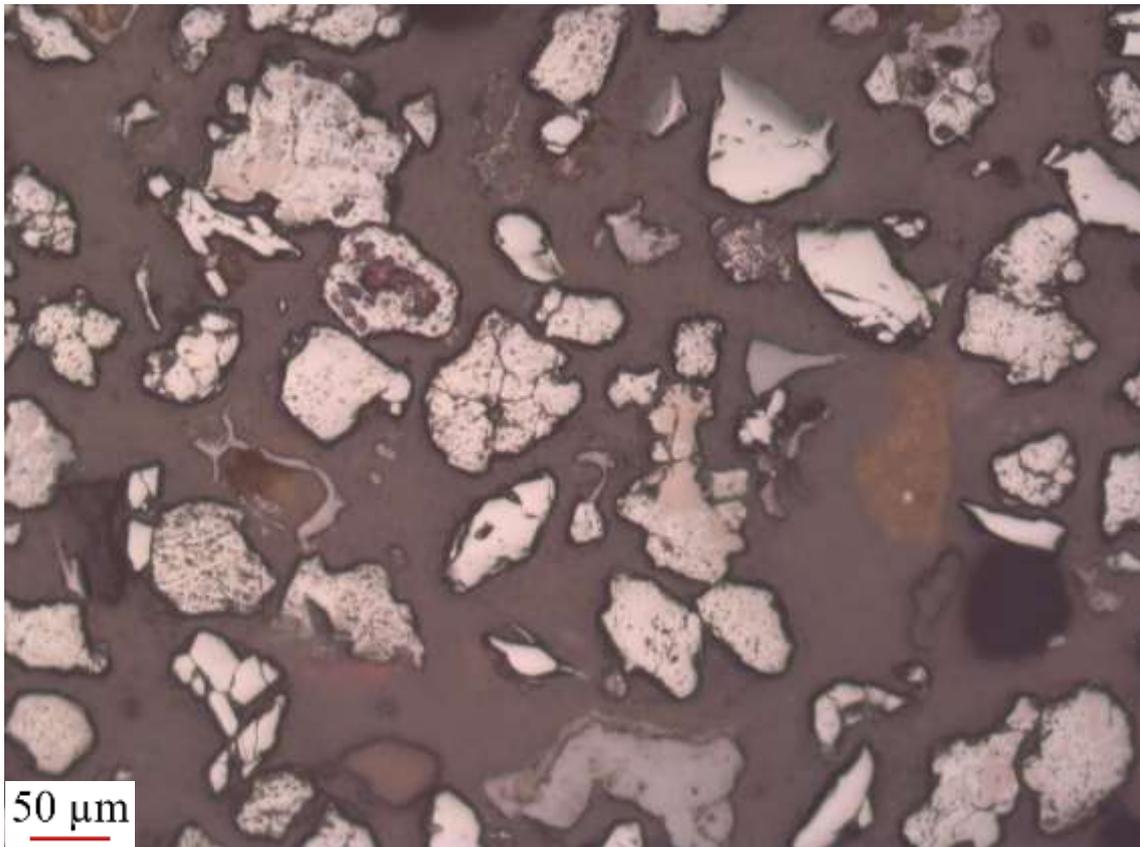


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	67	32
Área dos grãos (µm ²)	1109006	18562

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	67,677%	32,323%
Determinação de áreas	98,354%	1,646%

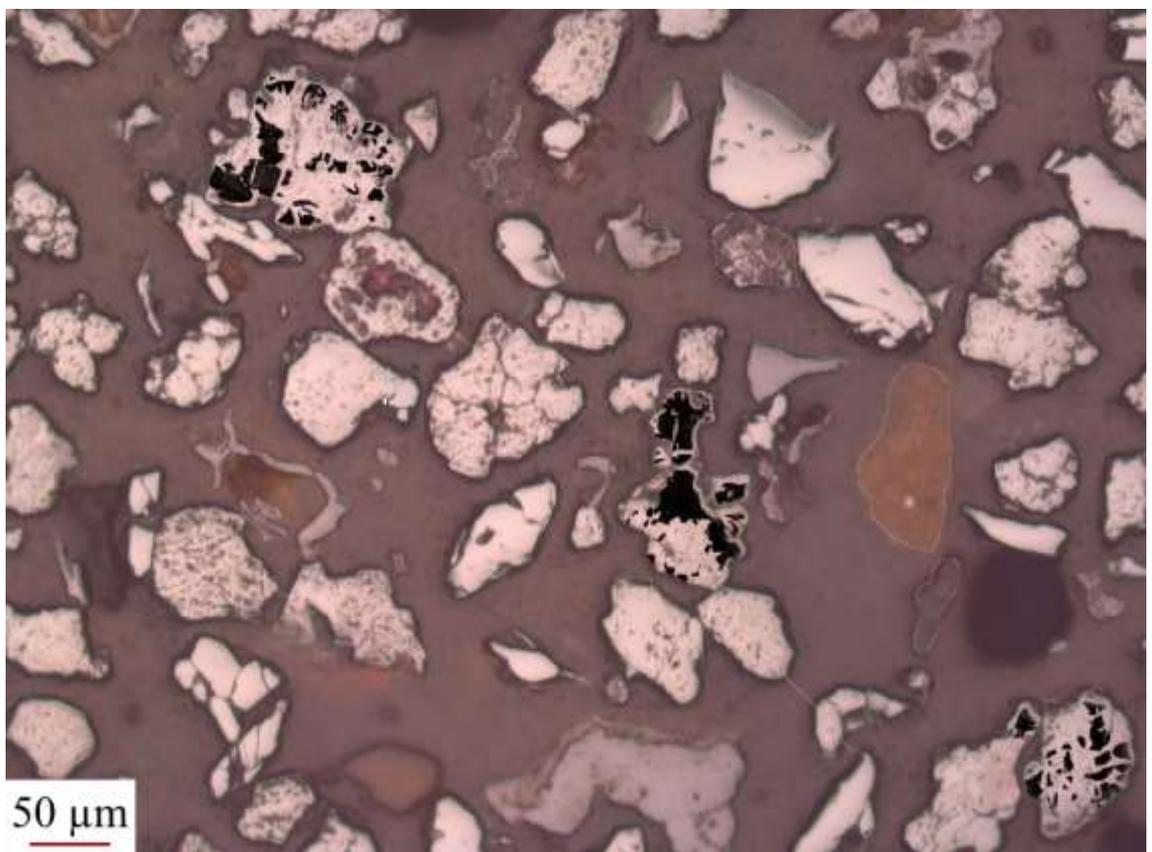
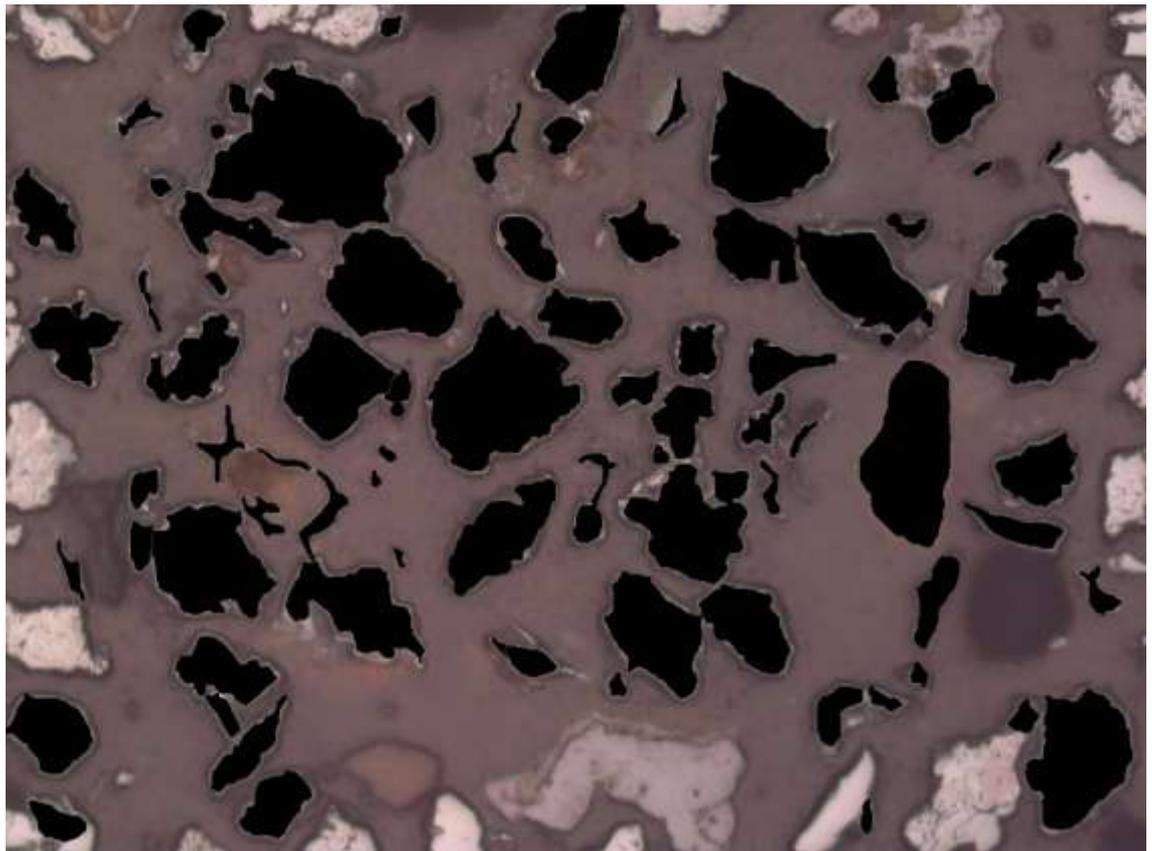


P1-11

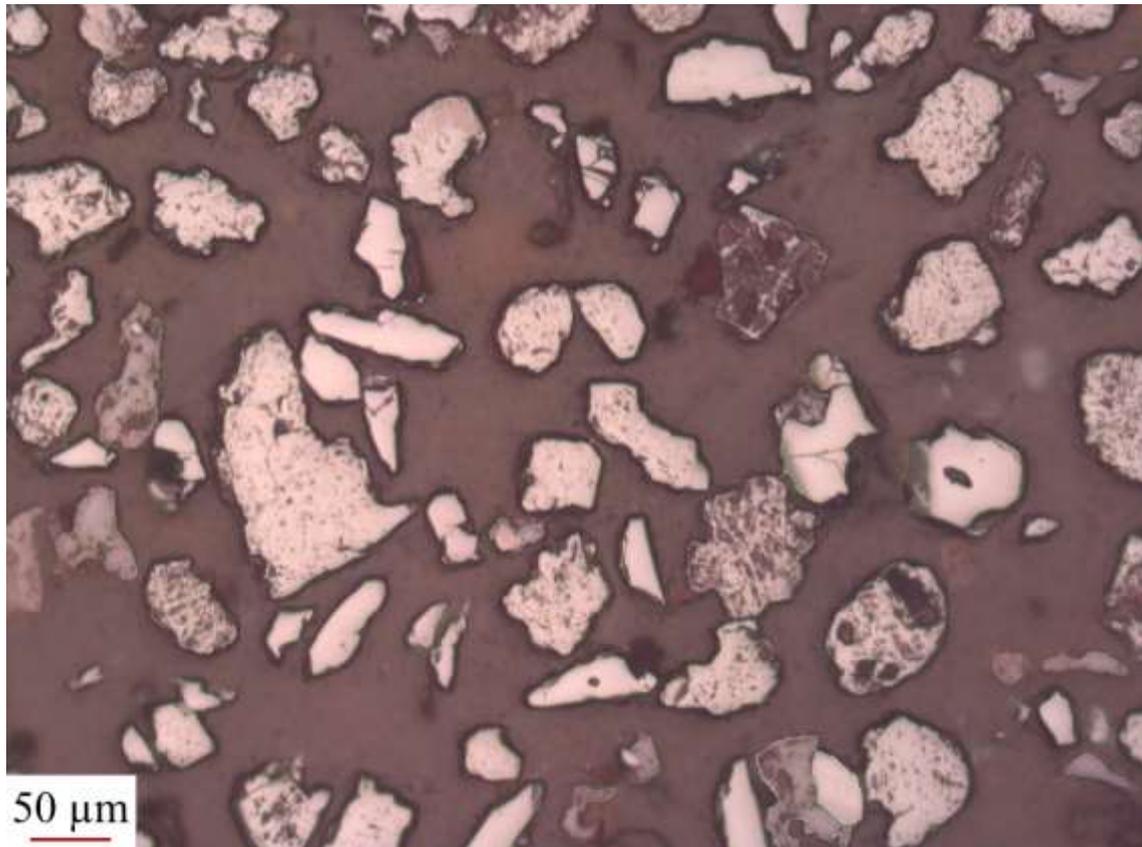


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	161	69
Área dos grãos (µm ²)	1278212	80829

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	70,000%	30,000%
Determinação de áreas	94,052%	5,948%

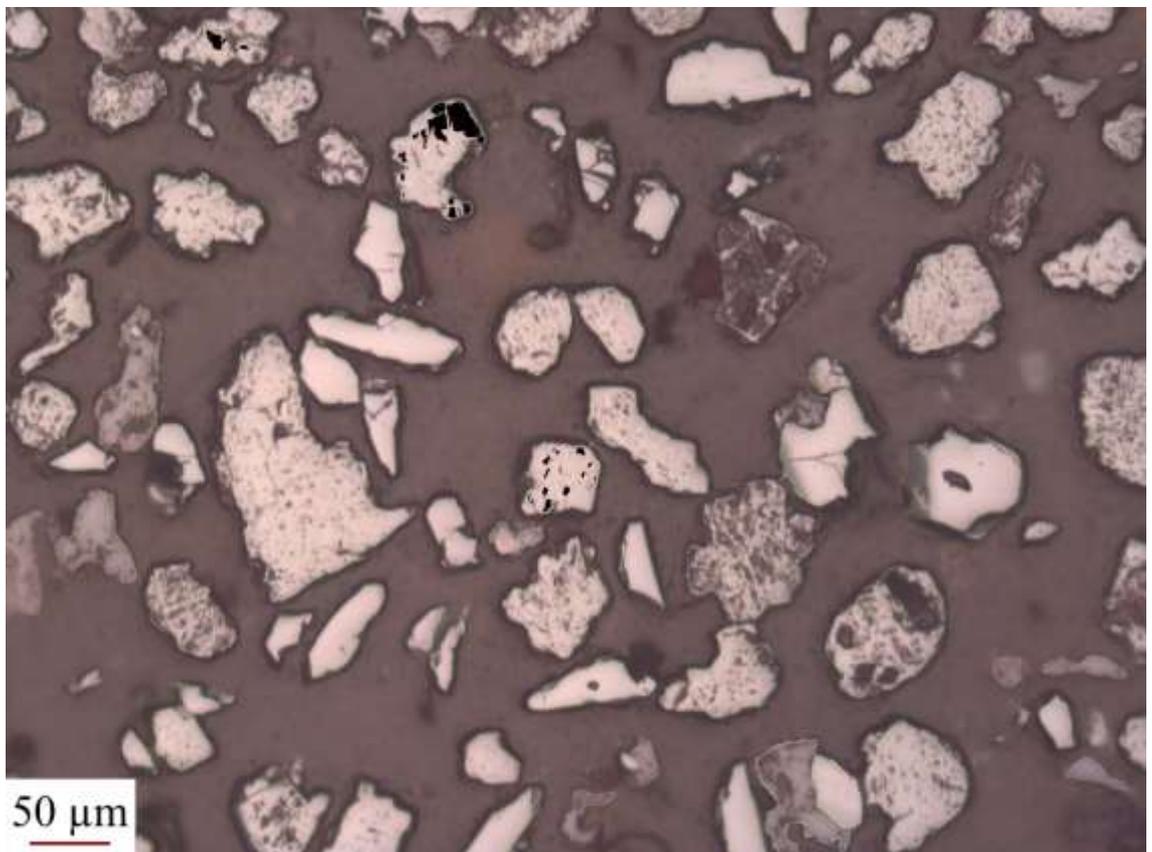
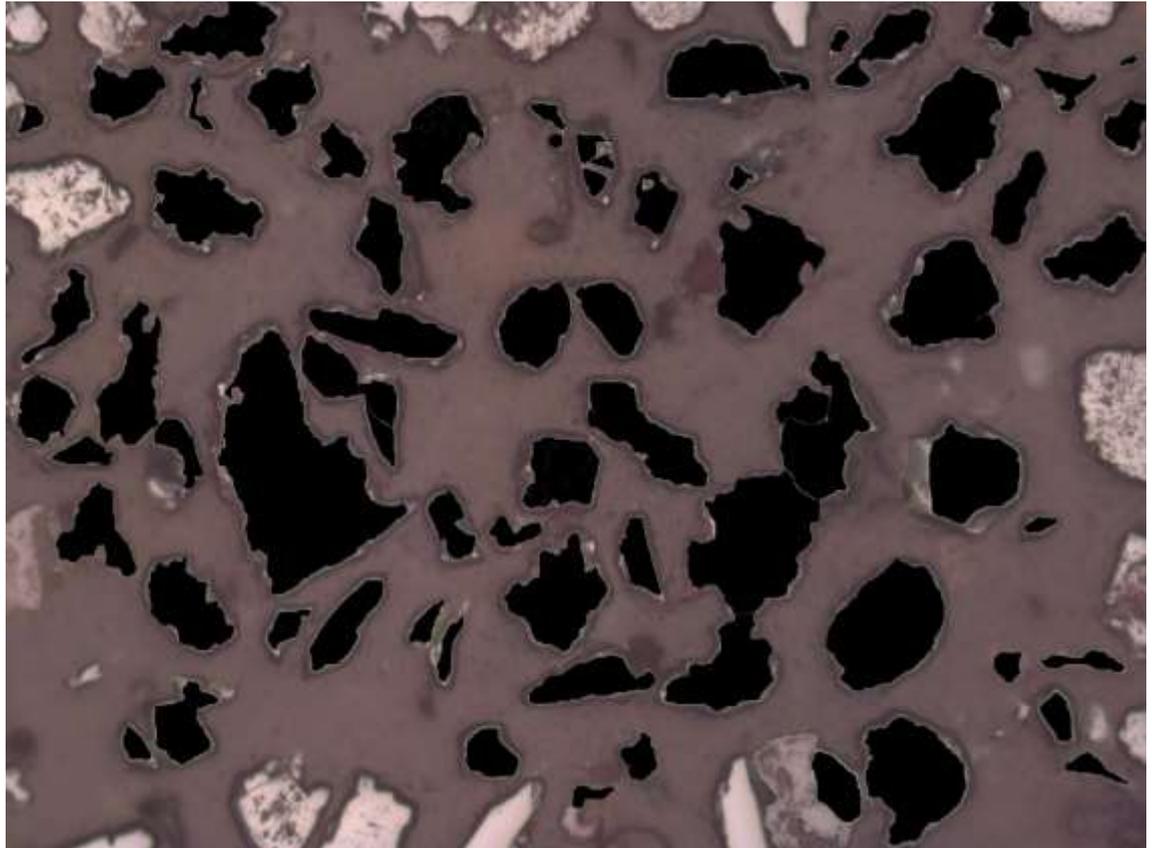


P1-12

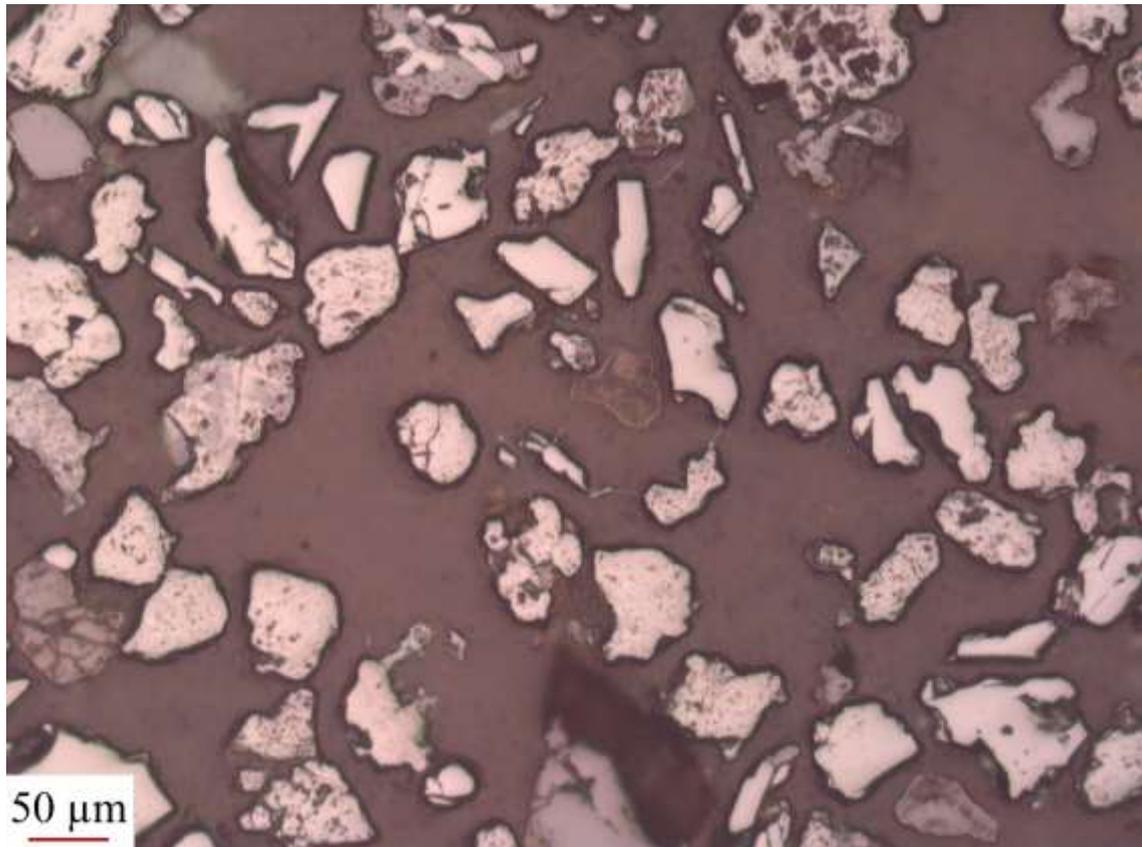


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	67	30
Área dos grãos (μm ²)	1201590	80829

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	69,072%	30,928%
Determinação de áreas	99,052%	0,948%

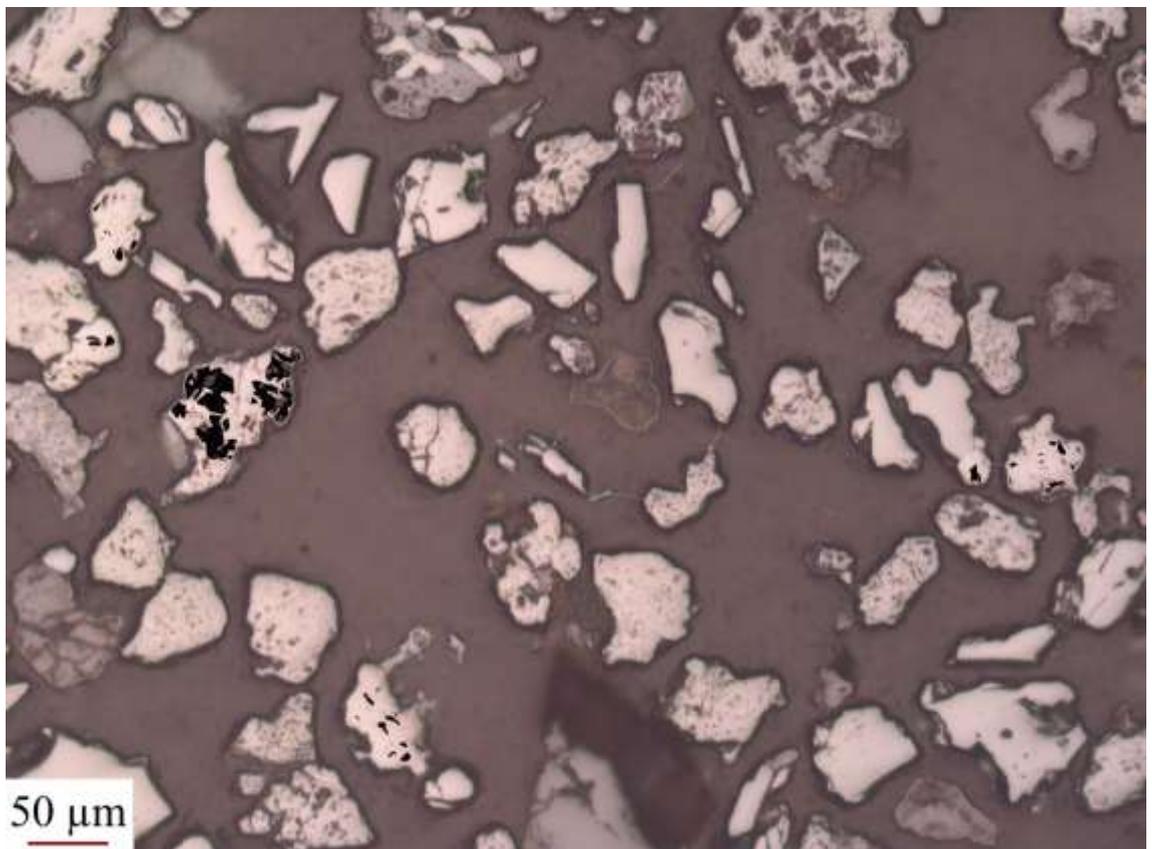
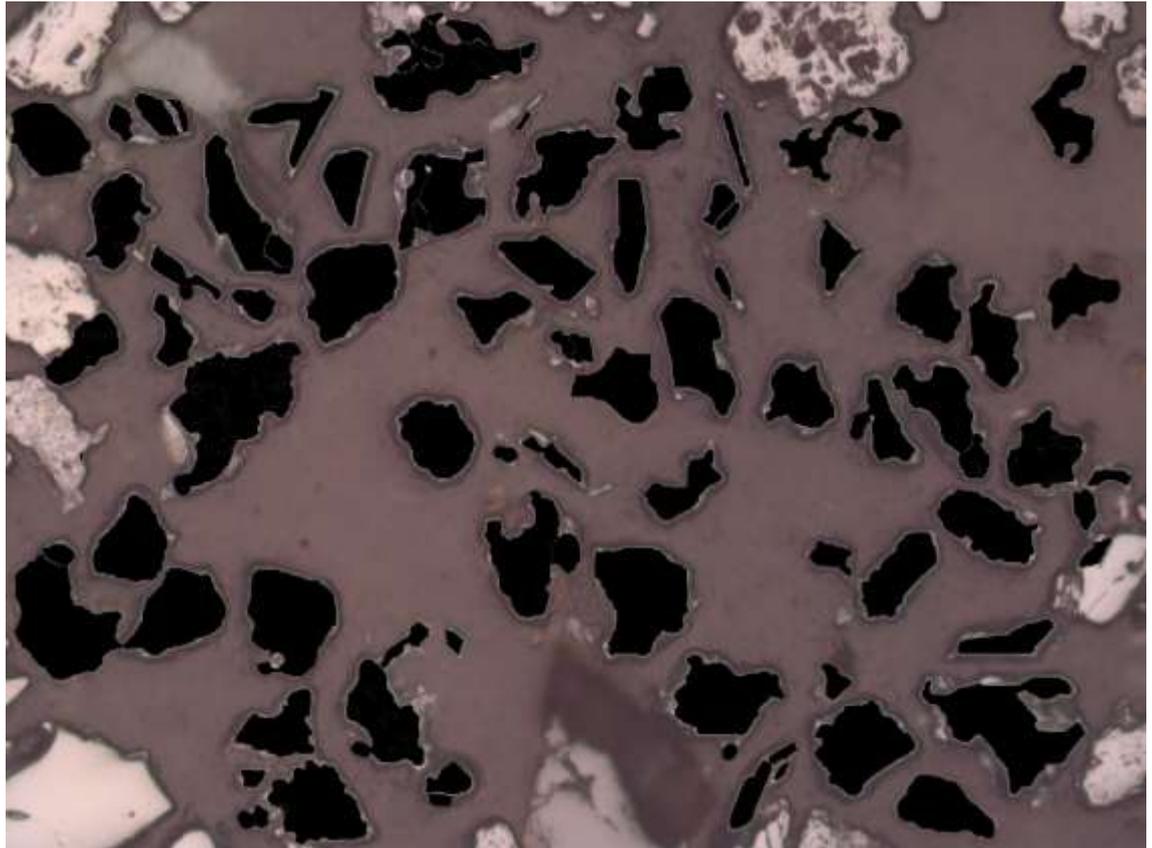


P1-13

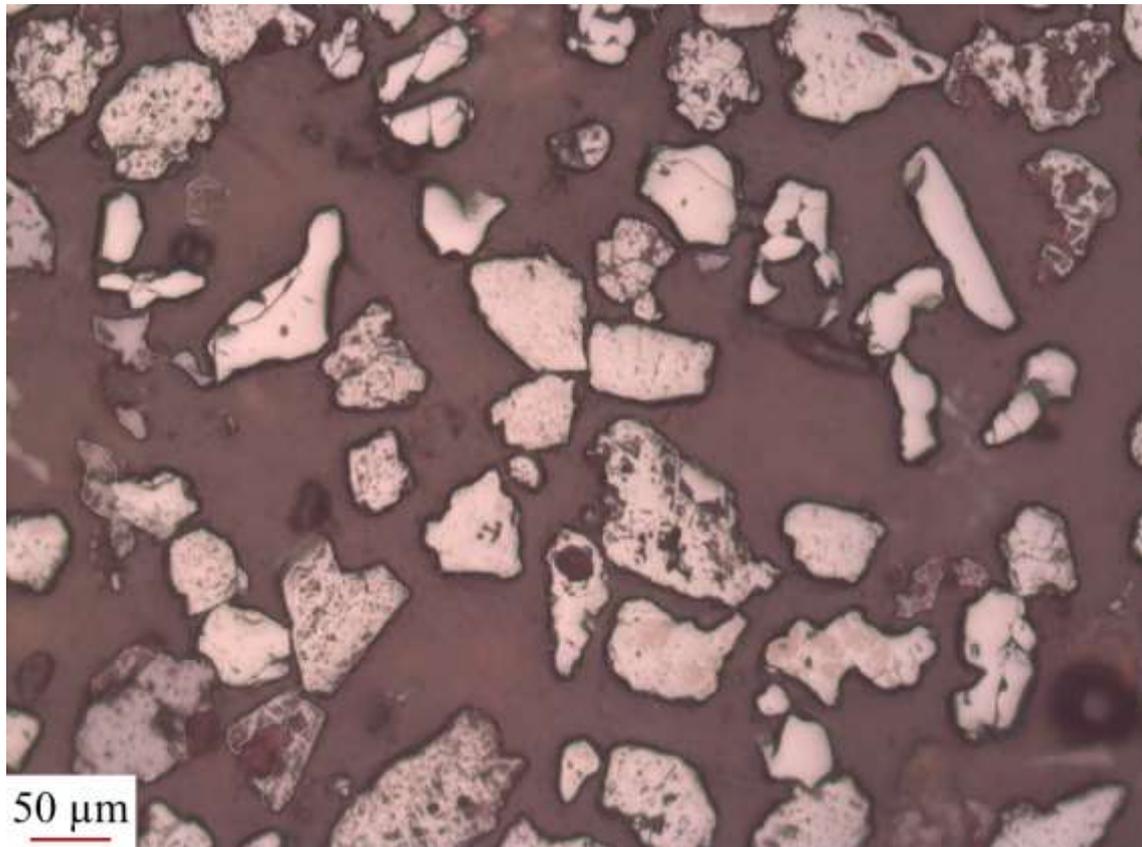


	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	76	39
Área dos grãos (μm ²)	1143442	27358

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	66,087%	33,913%
Determinação de áreas	97,663%	2,337%

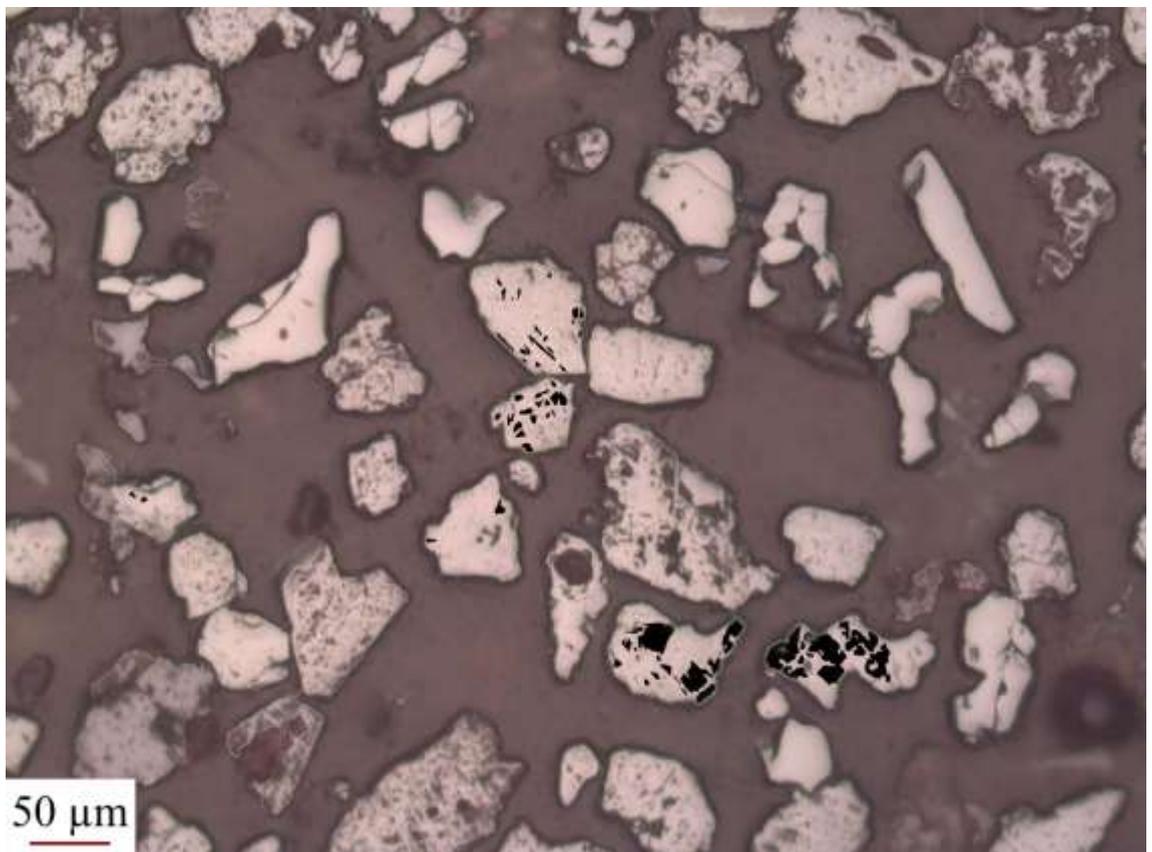
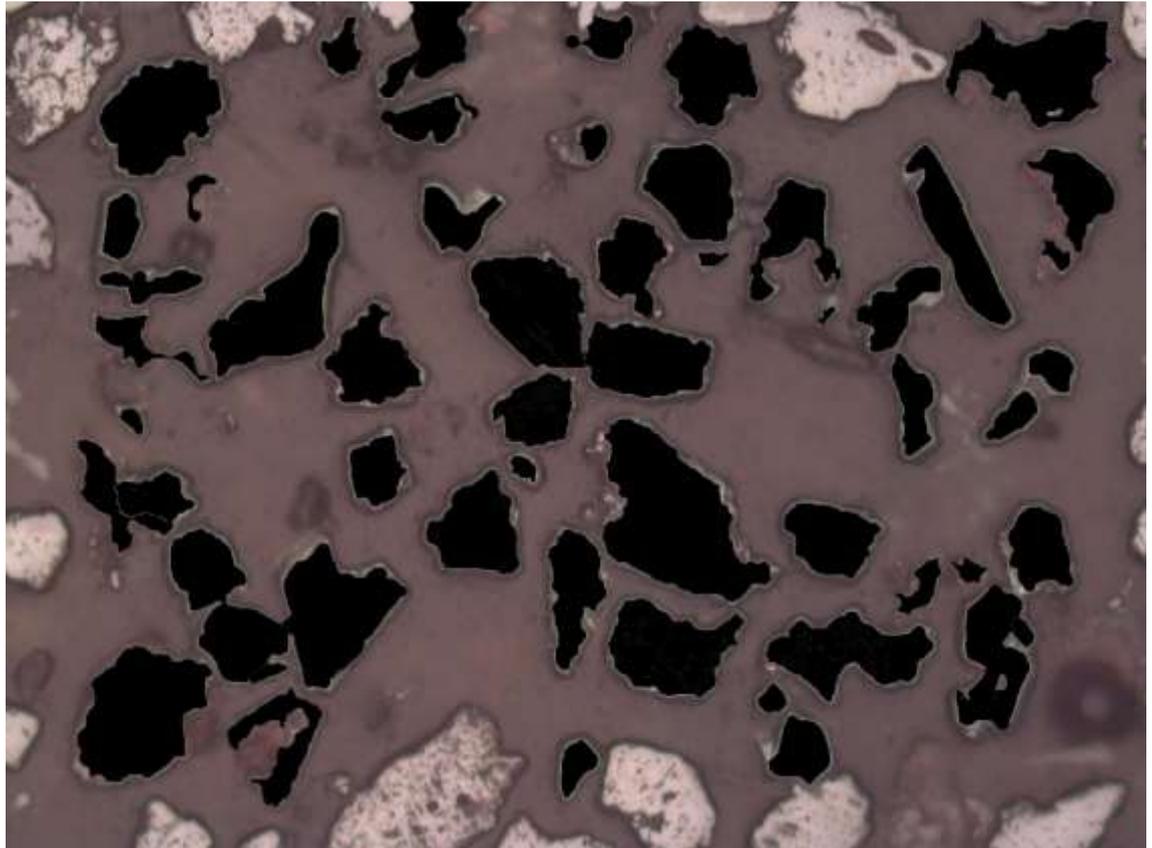


P1-14

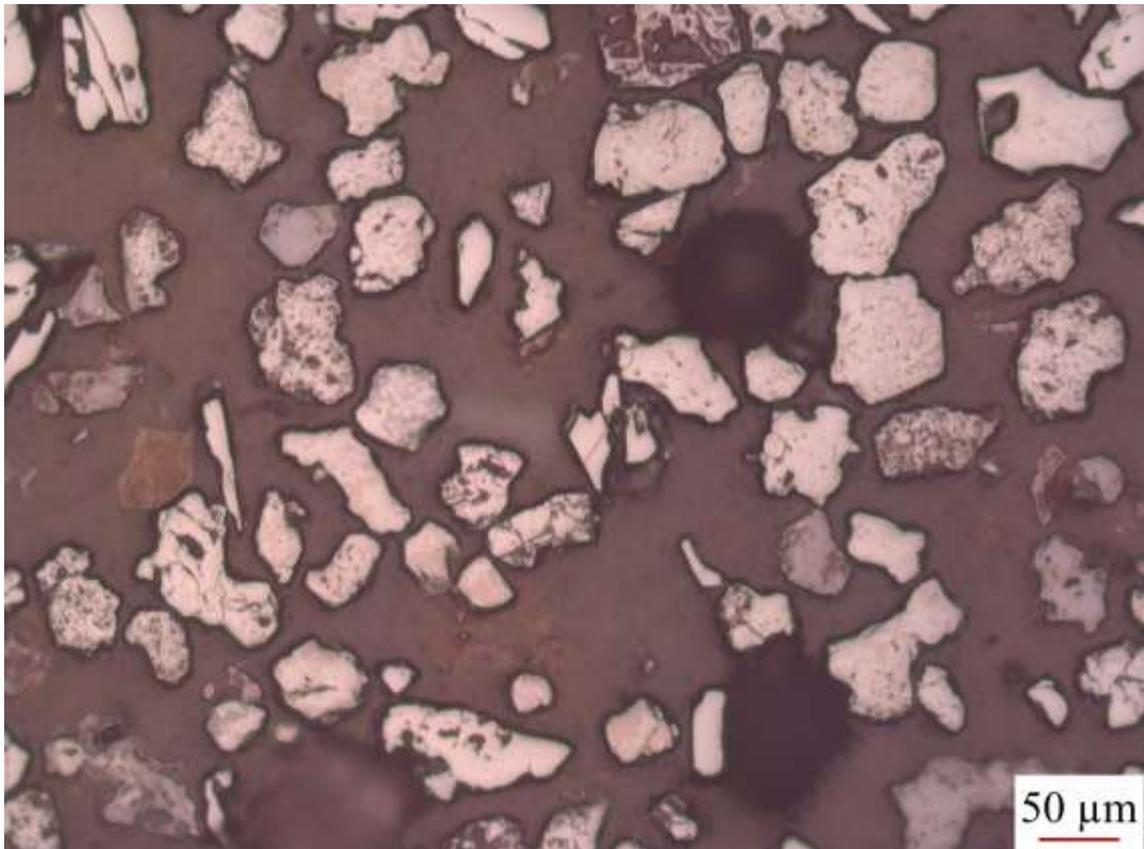


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	58	65
Área dos grãos (μm ²)	1192043	36378

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de Pontos	47,154%	52,846%
Determinação de áreas	97,039%	2,961%

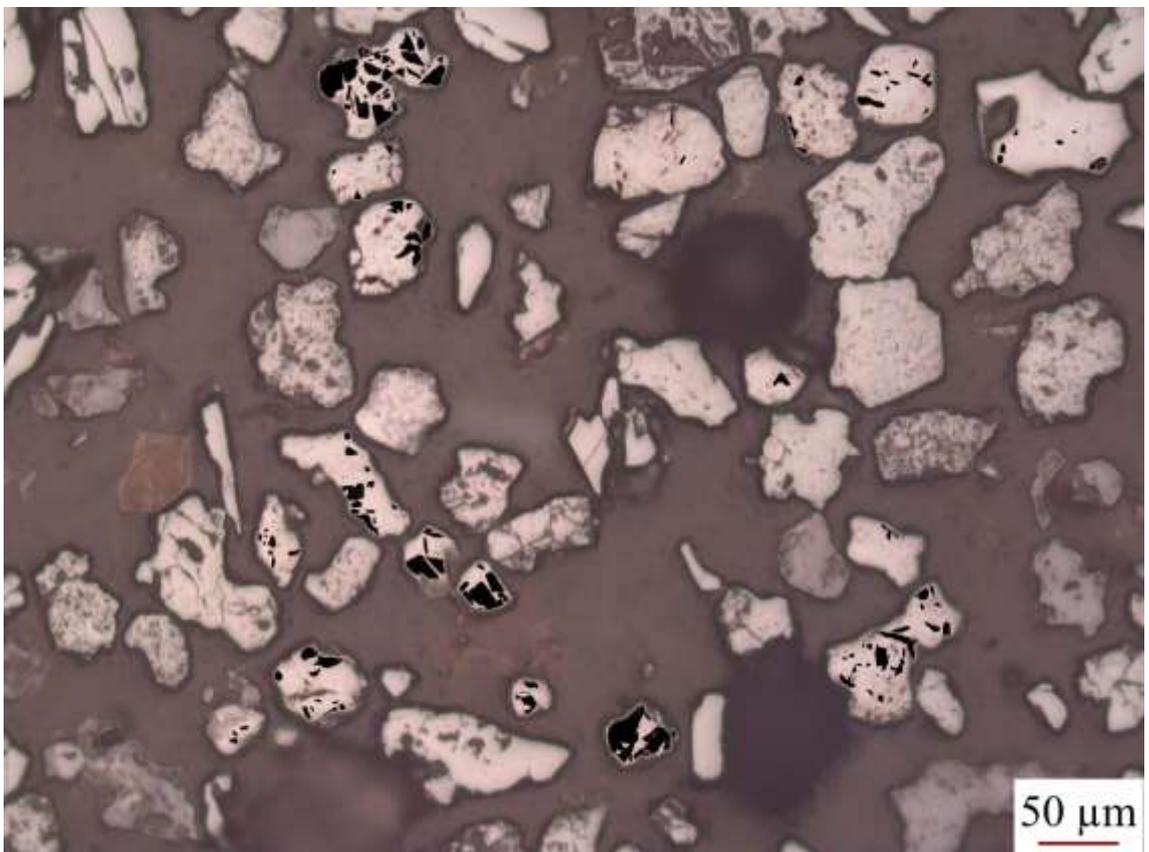
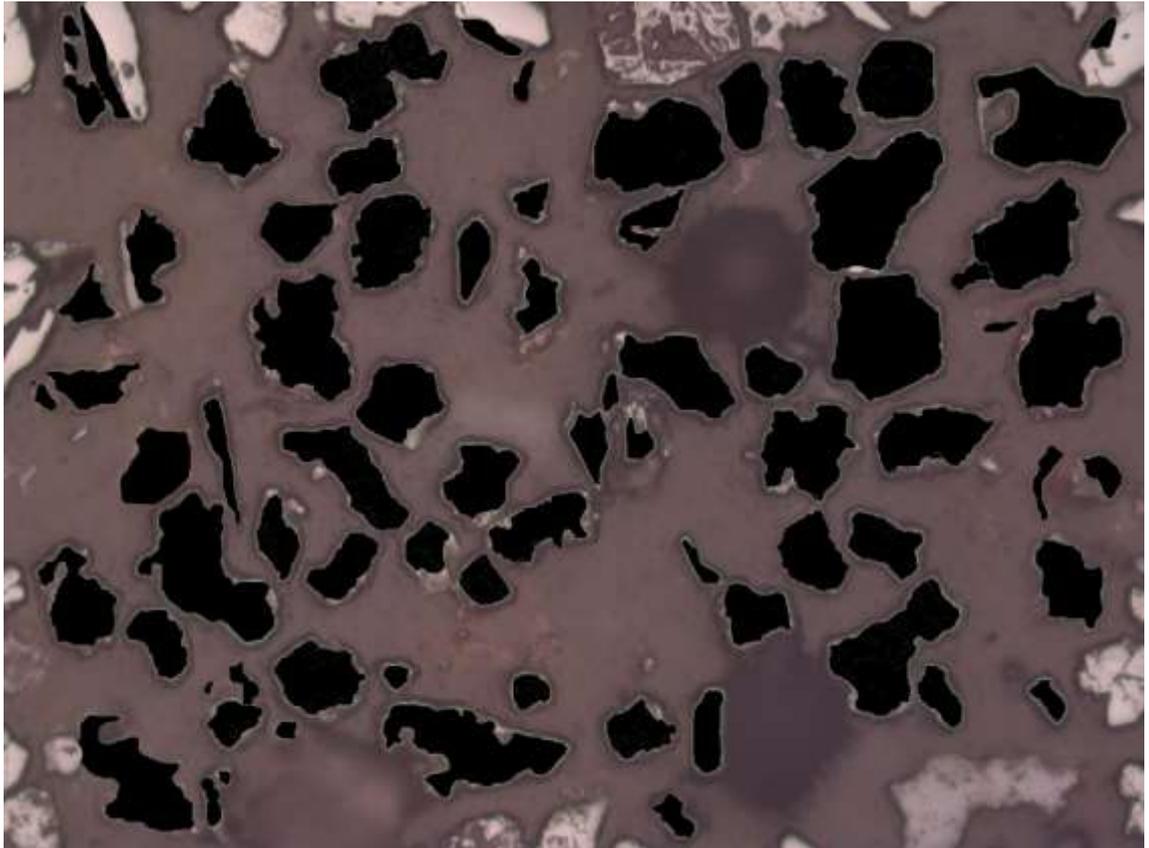


P1-15

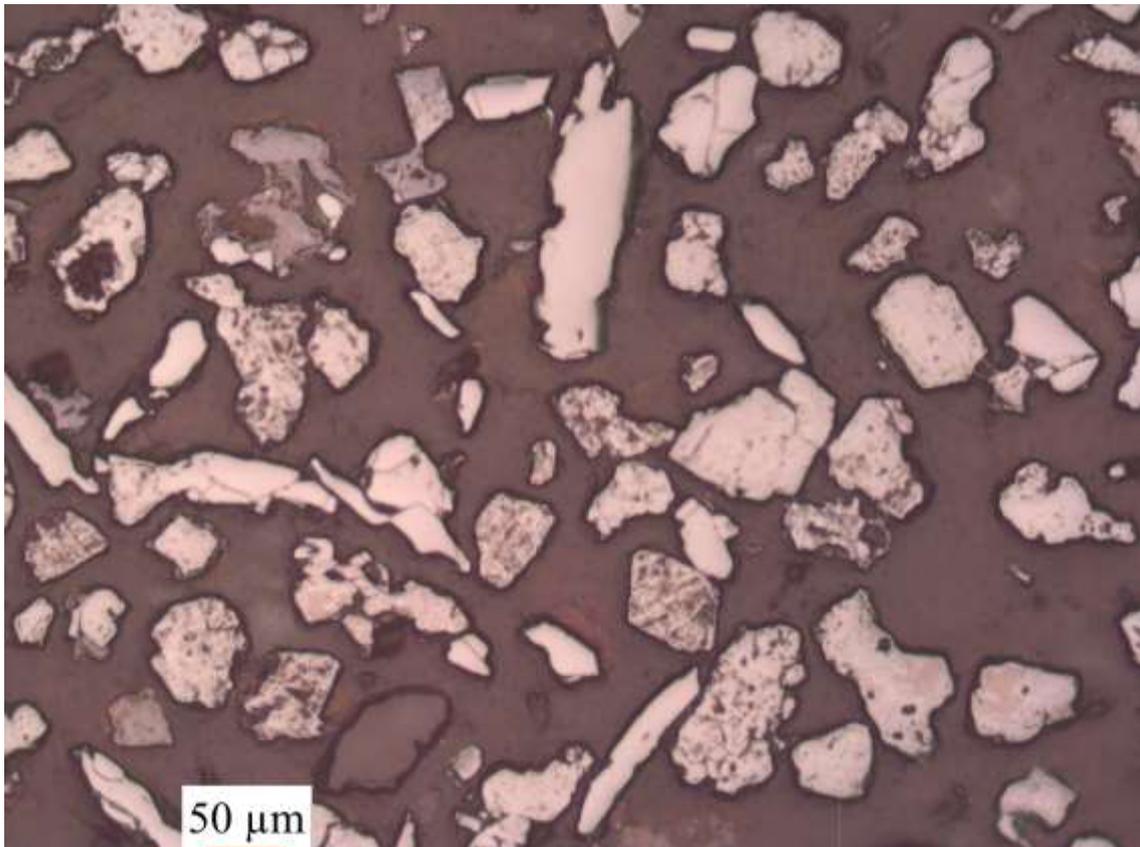


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	79	65
Área dos grãos (μm^2)	1287016	36378

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	54,861%	45,139%
Determinação de áreas	97,252%	2,748%

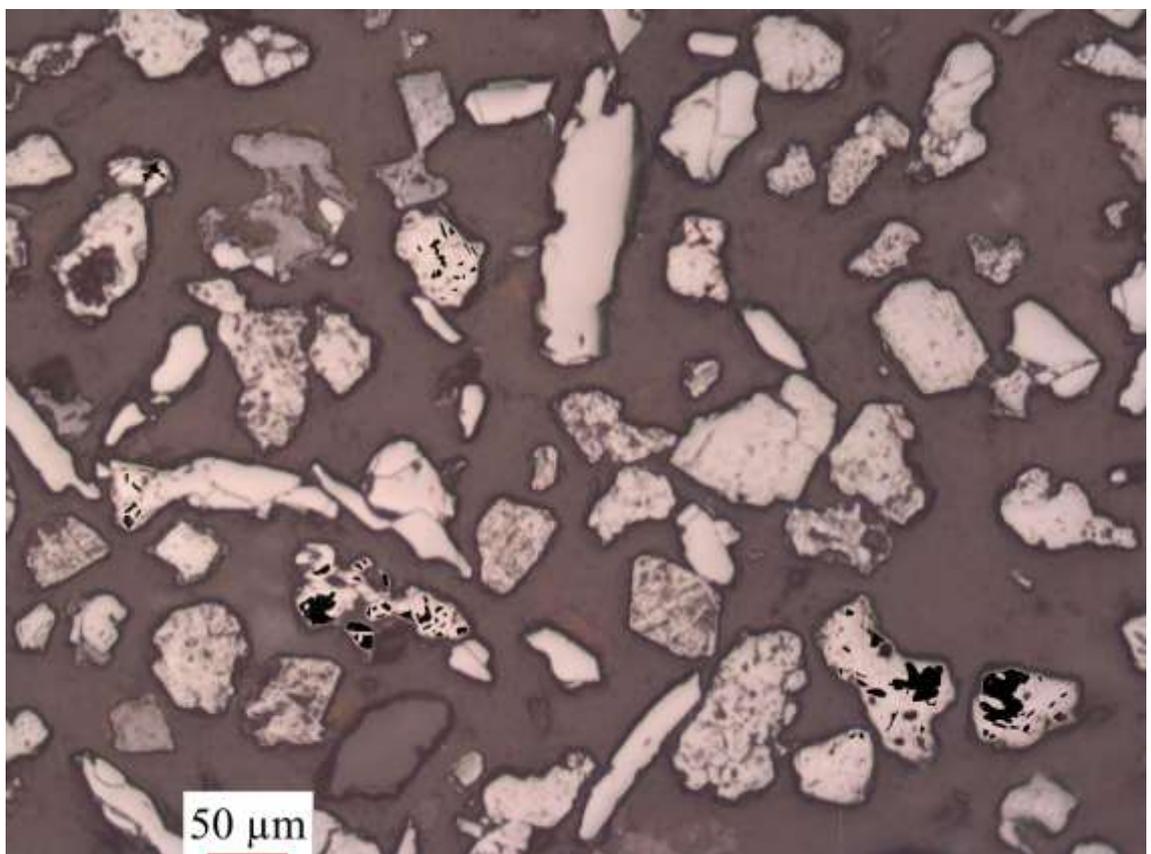
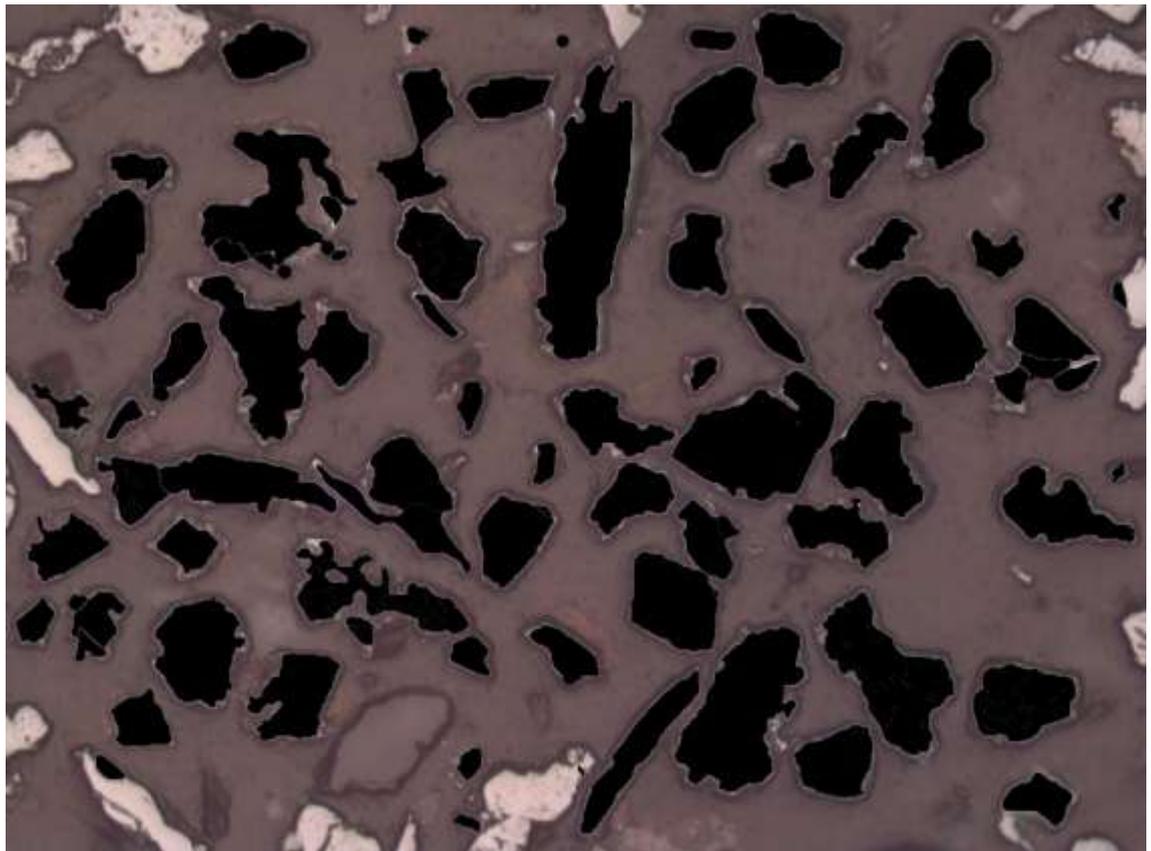


P1-16

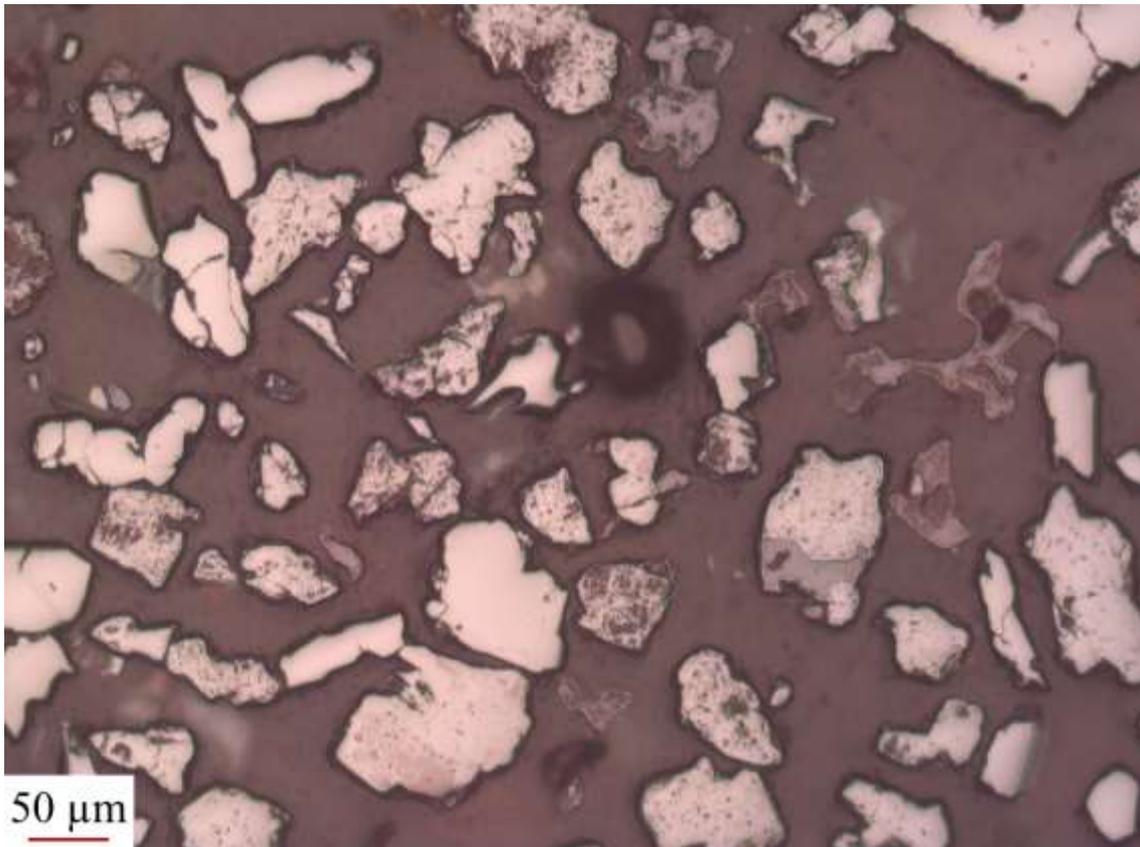


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	74	70
Área dos grãos (μm ²)	1333221	33887

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	51,389%	48,611%
Determinação de áreas	97,523%	2,477%

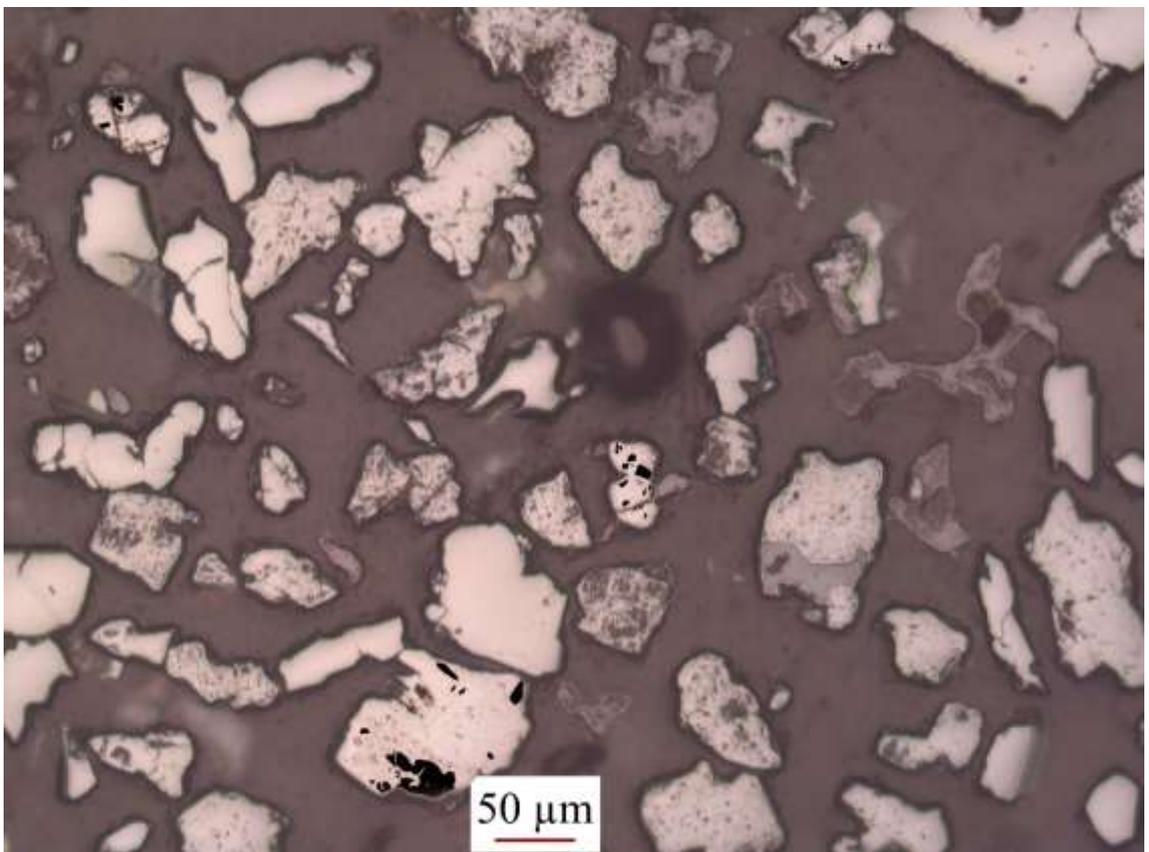
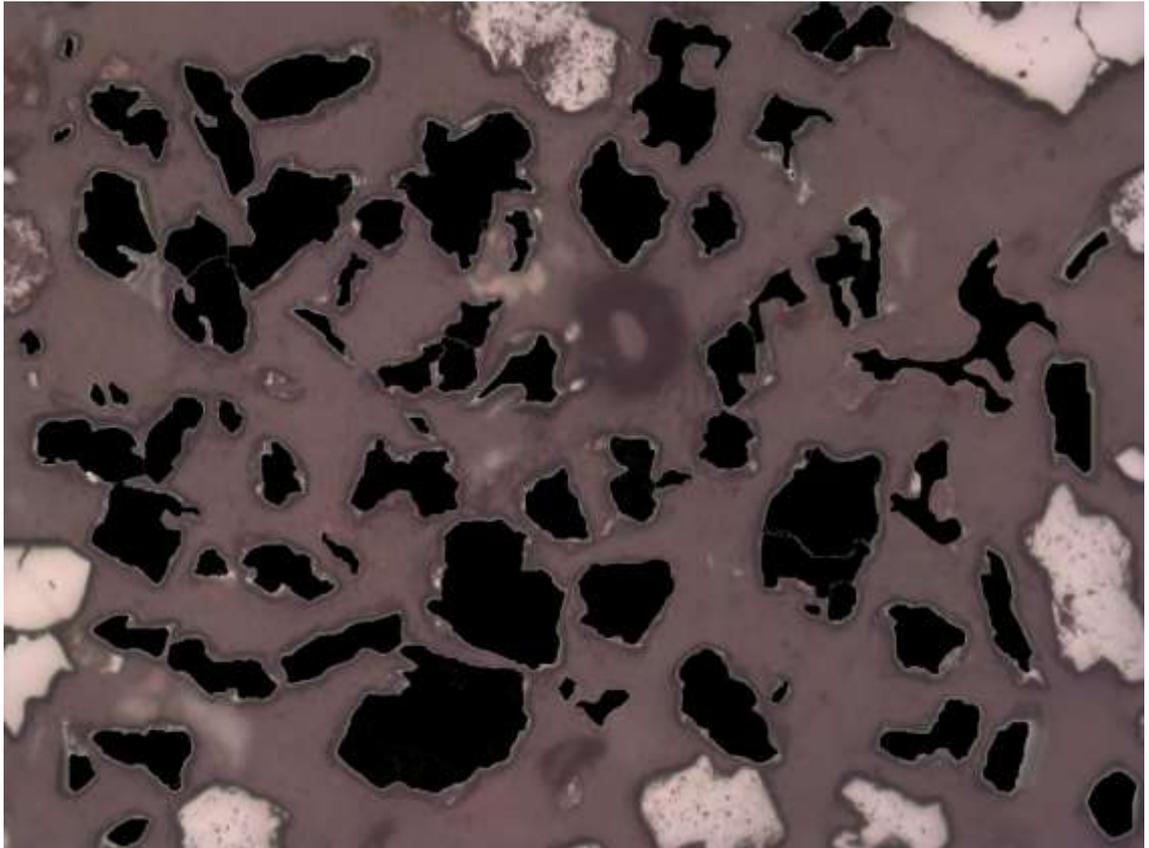


P1-17

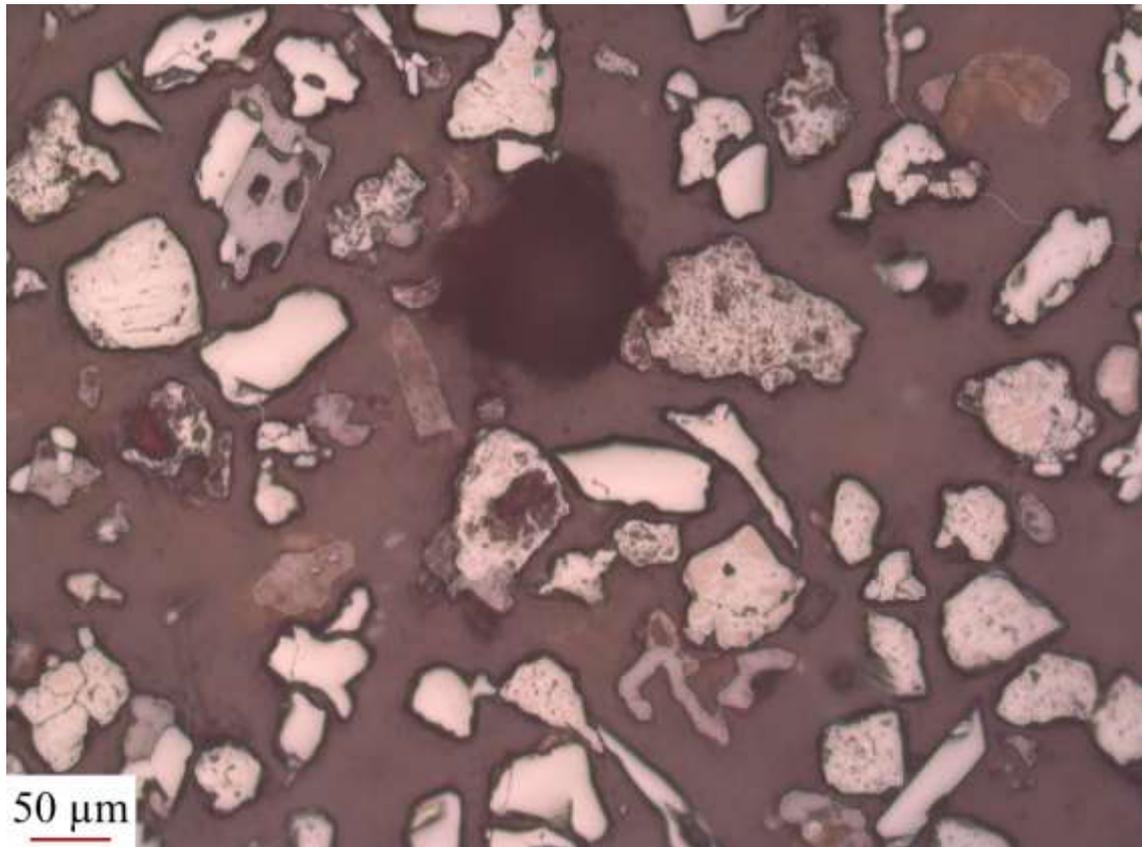


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	70	26
Área dos grãos (μm ²)	1172895	15588

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	72,917%	27,083%
Determinação de áreas	98,687%	1,313%

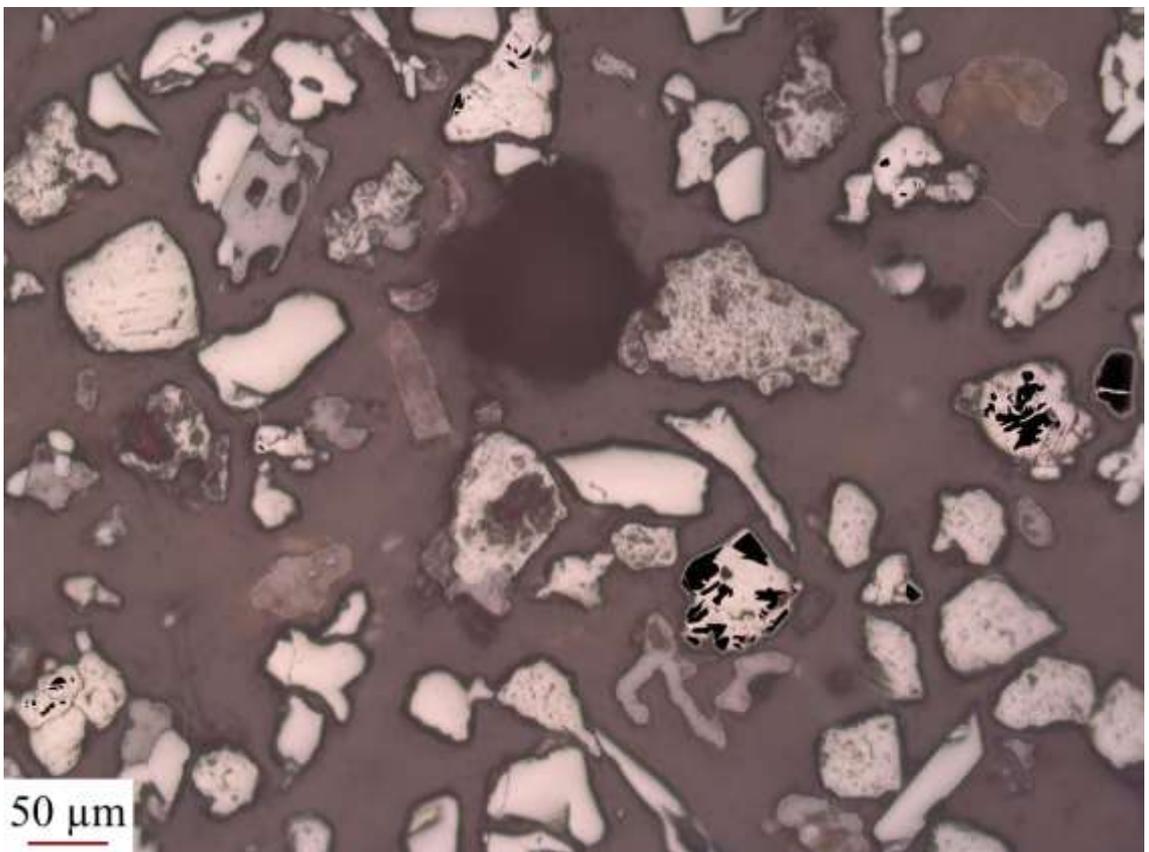
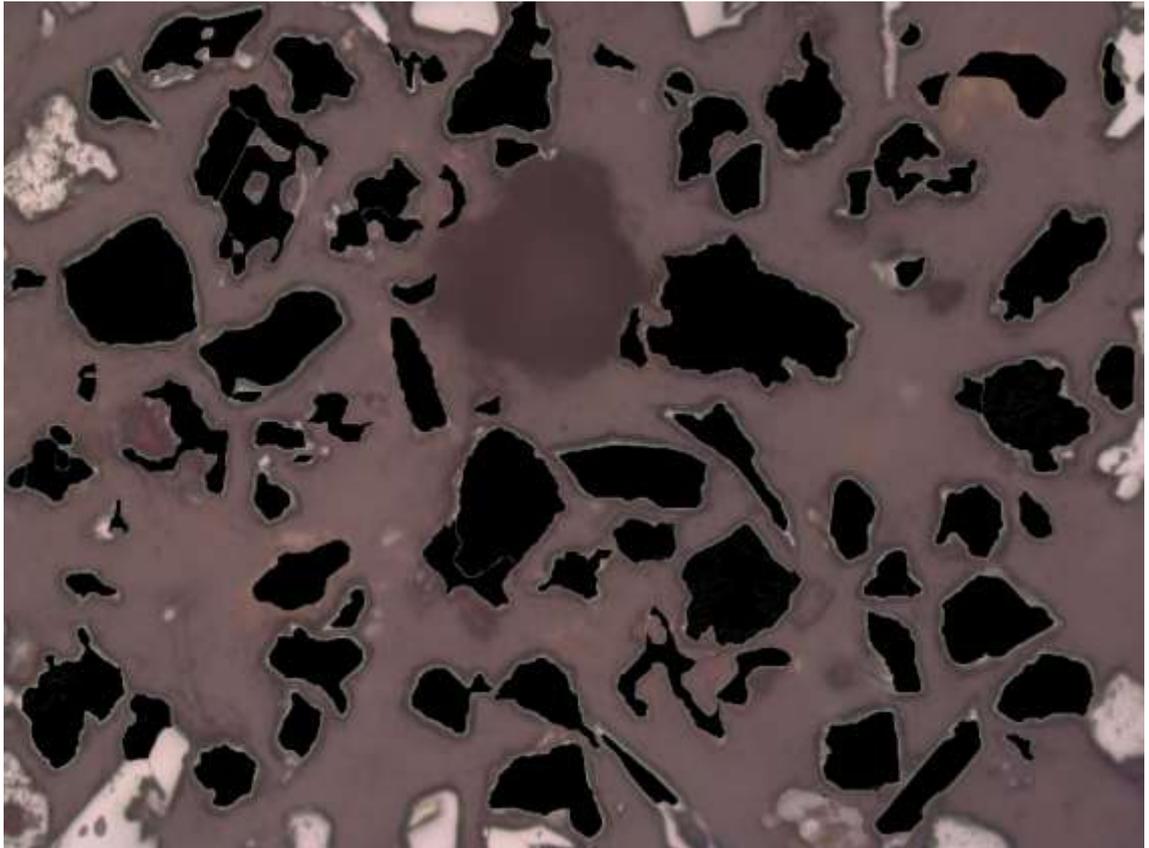


P1-18

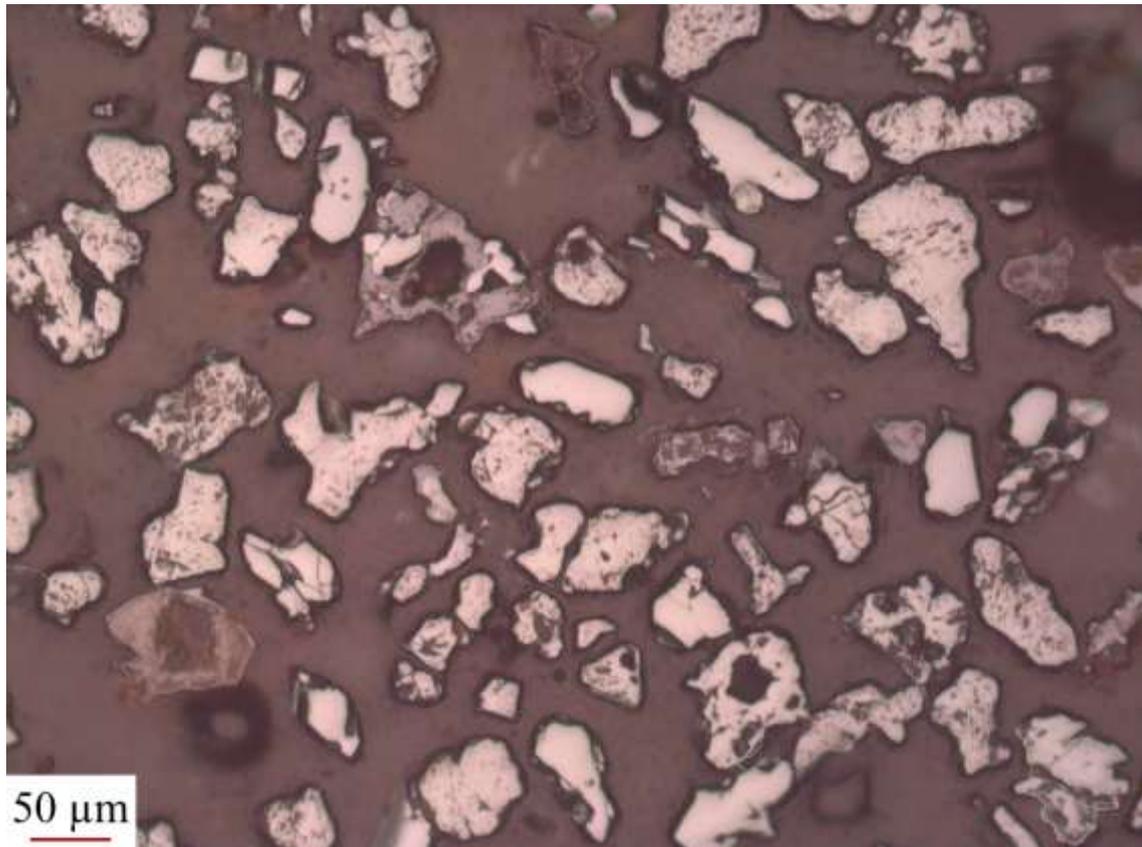


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	82	44
Área dos grãos (µm ²)	1278755	42516

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	65,079%	34,921%
Determinação de áreas	96,782%	3,218%

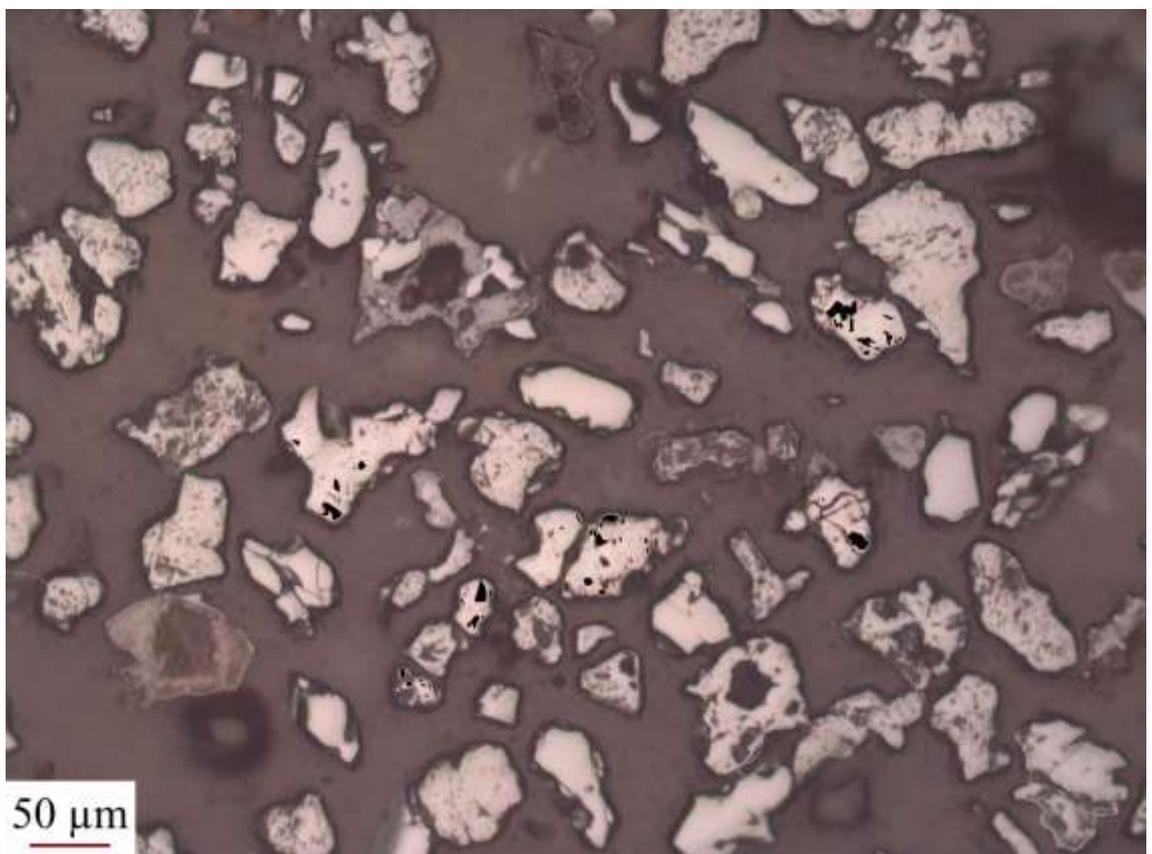
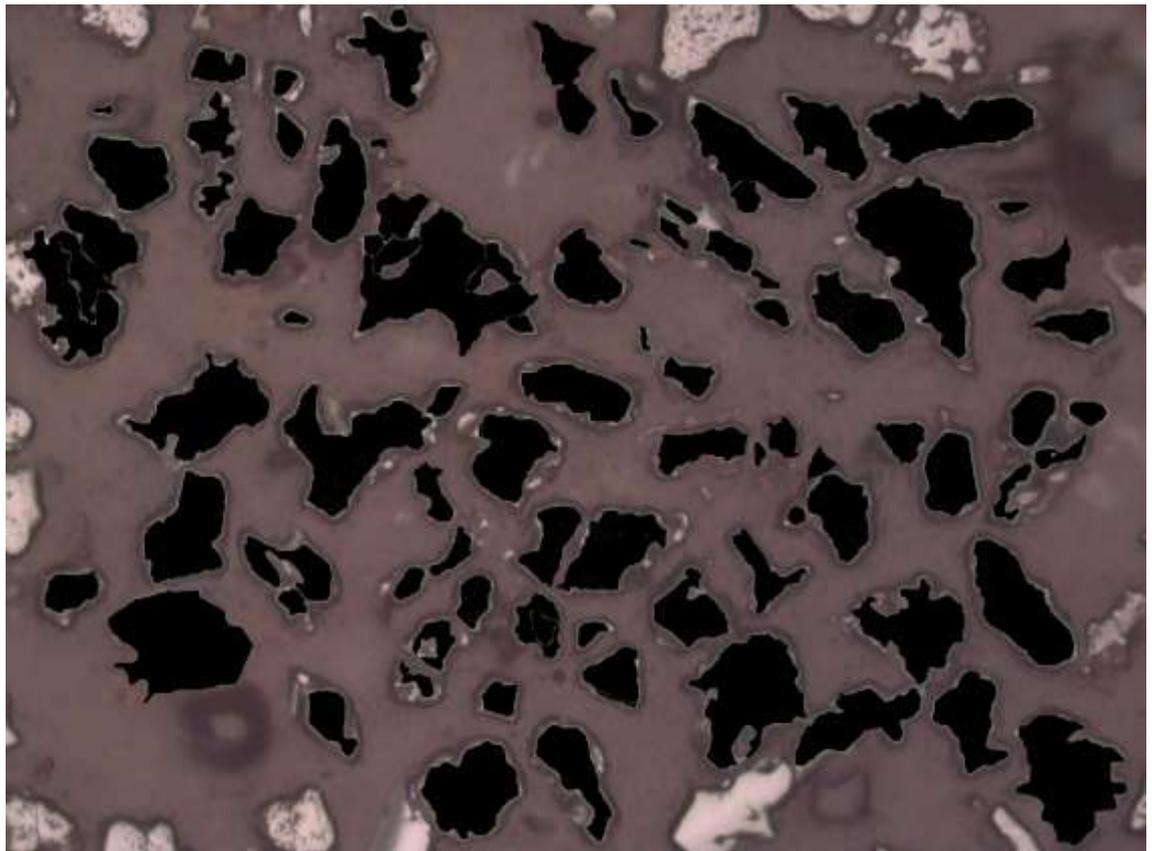


P1-19

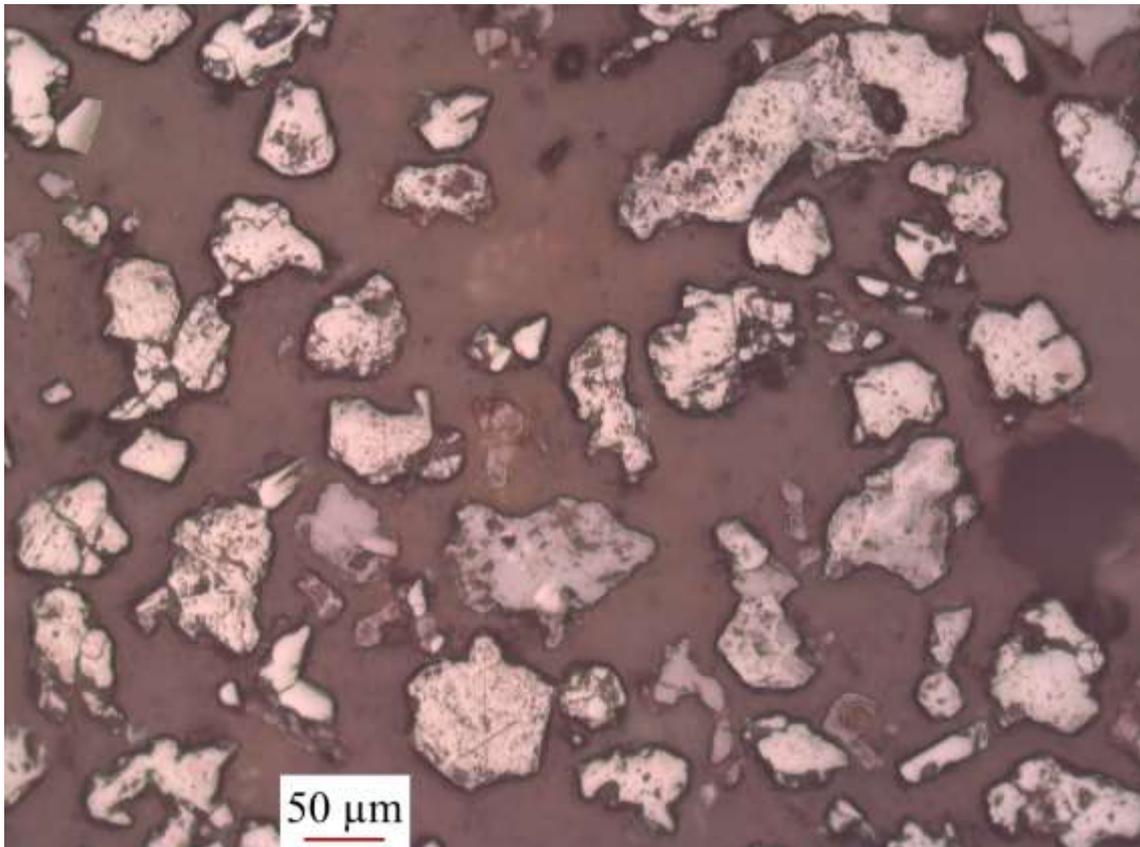


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	93	39
Área dos grãos (µm ²)	1223339	9867

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	70,455%	29,545%
Determinação de áreas	99,201%	0,799%

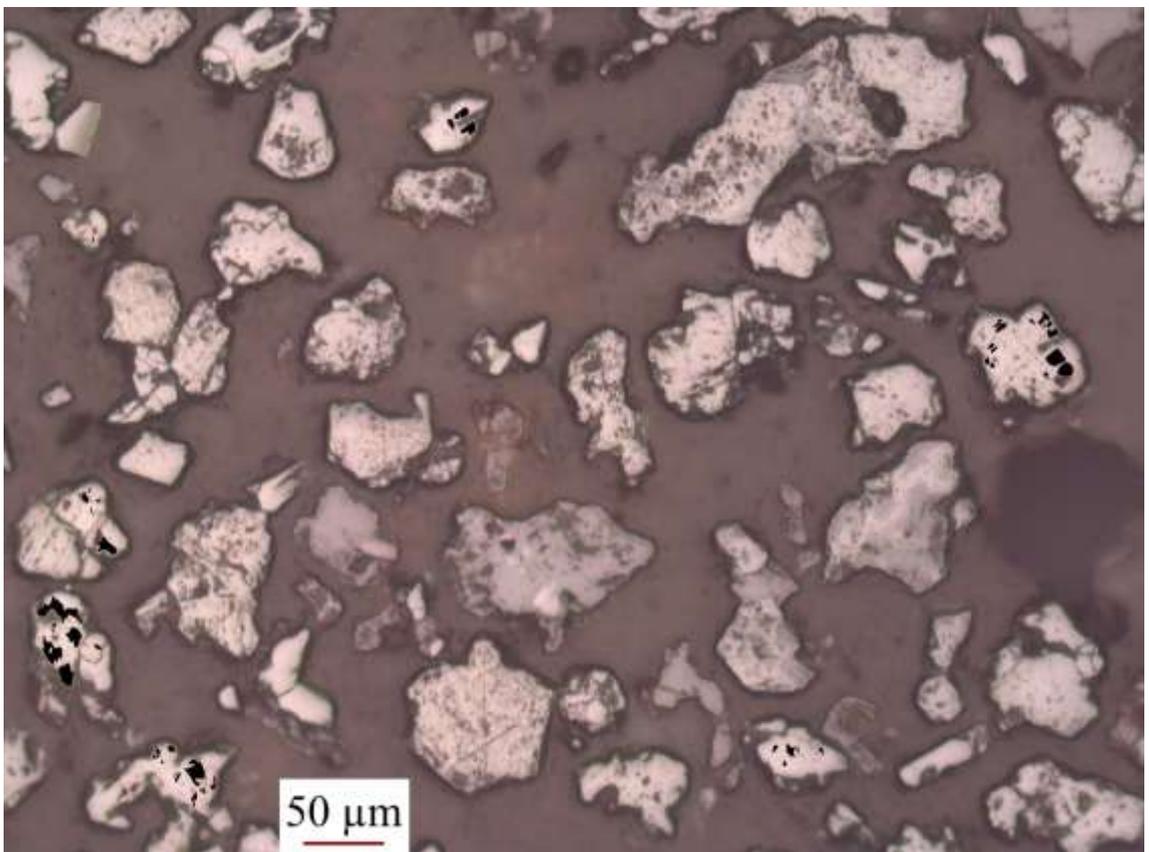
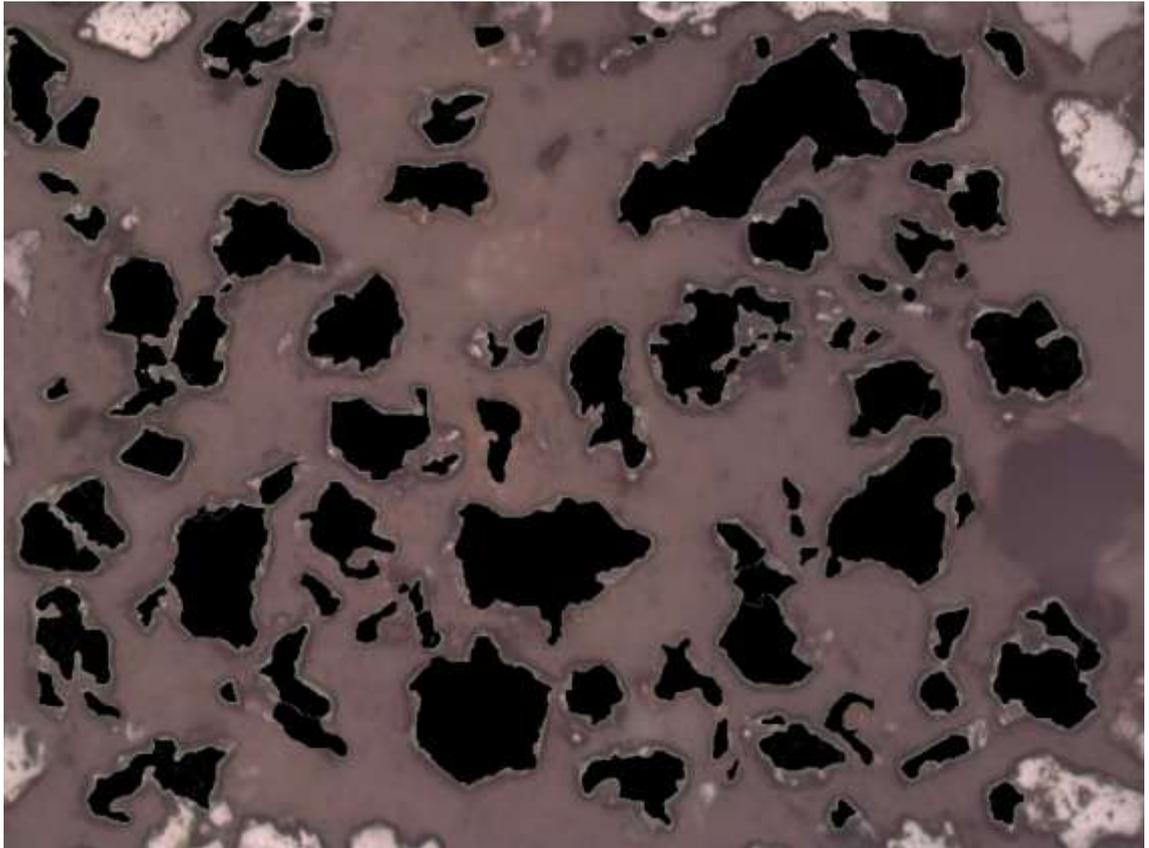


P1-20

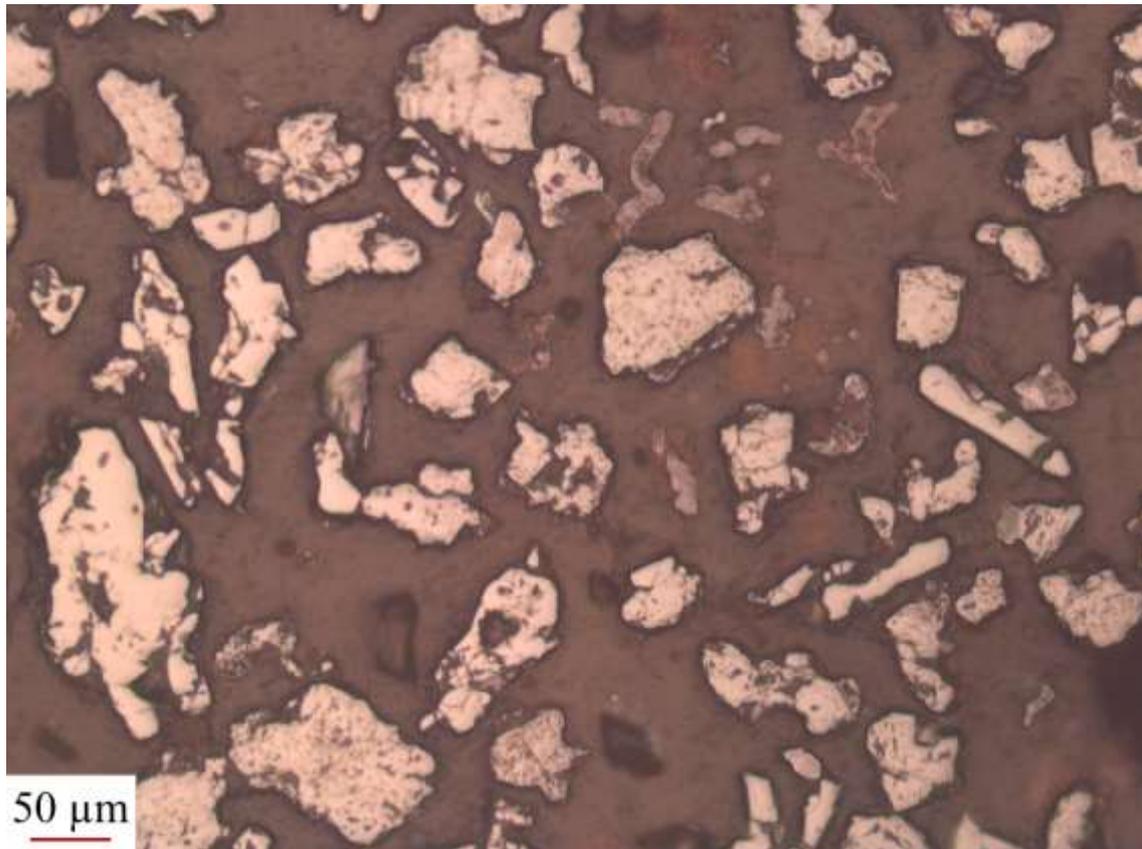


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	87	47
Área dos grãos (µm ²)	1234993	16121

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	64,925%	35,075%
Determinação de áreas	98,712%	1,288%

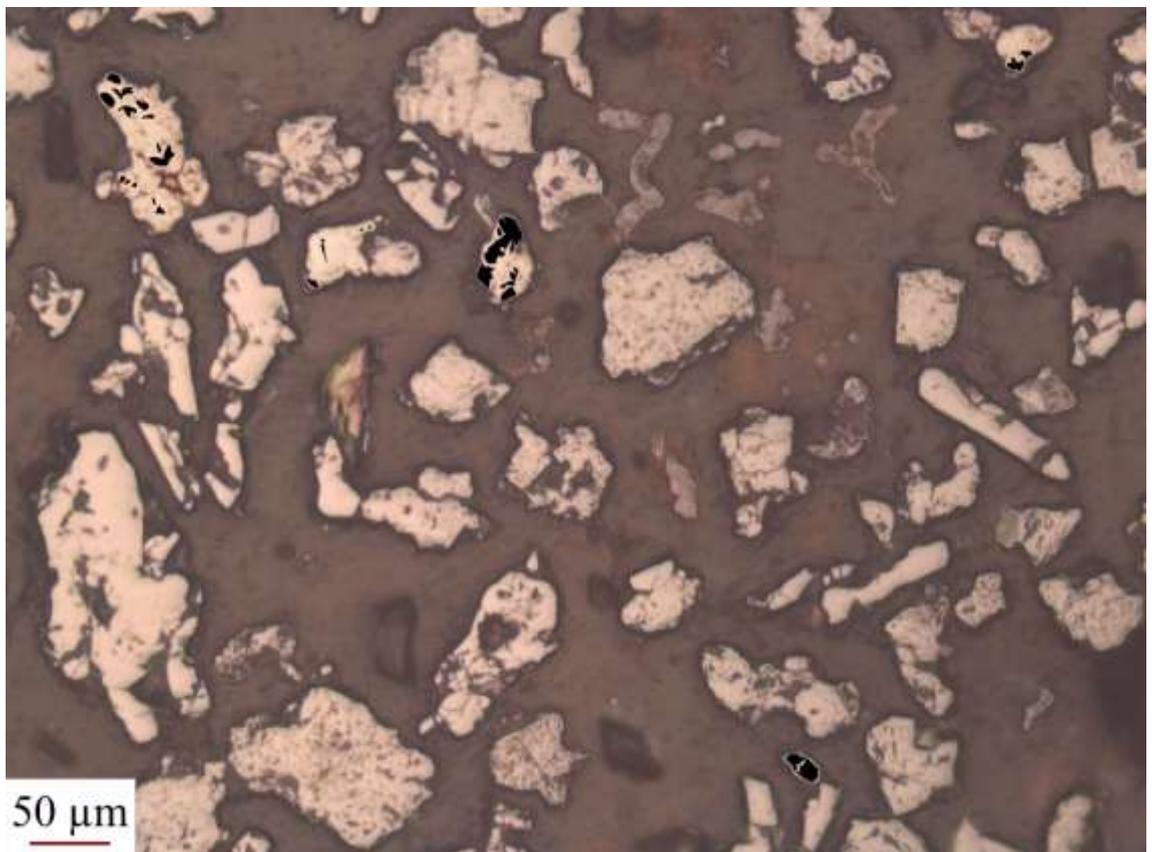


P1-21

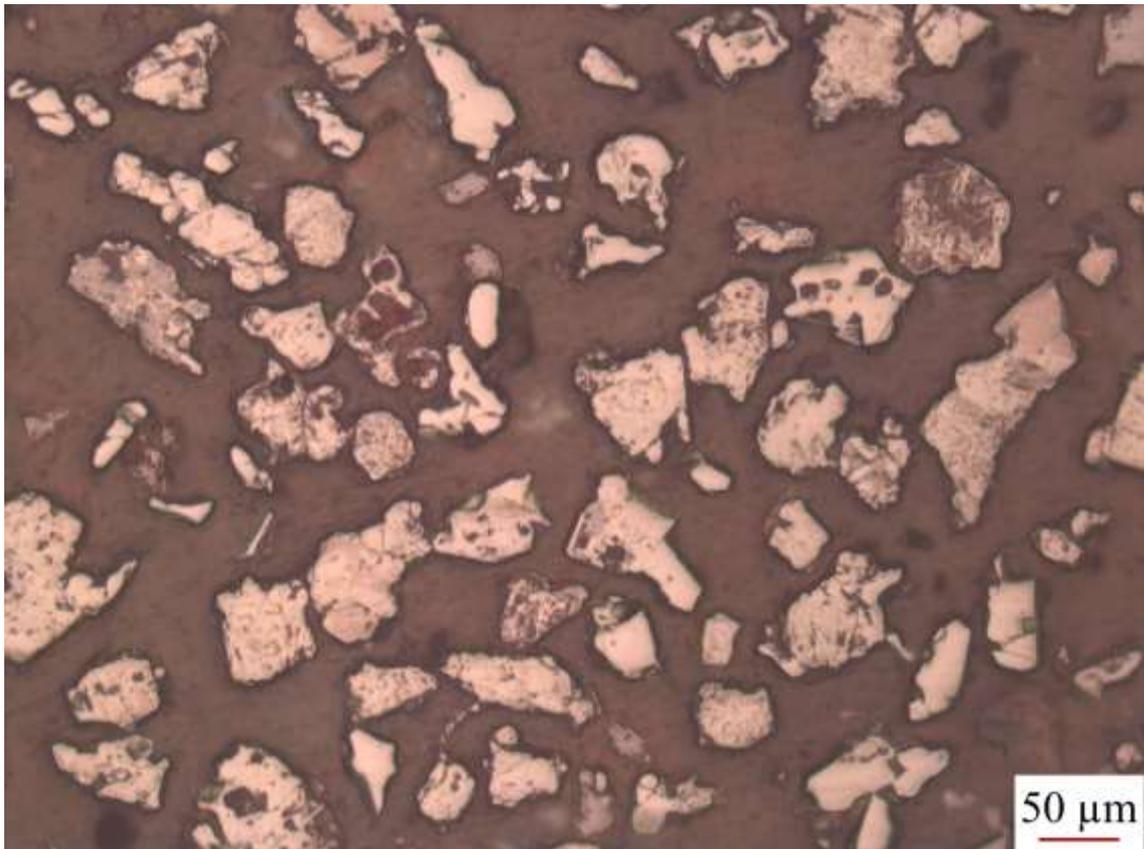


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	84	26
Área dos grãos (μm ²)	1143272	15729

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	76,364%	23,636%
Determinação de áreas	98,645%	1,355%

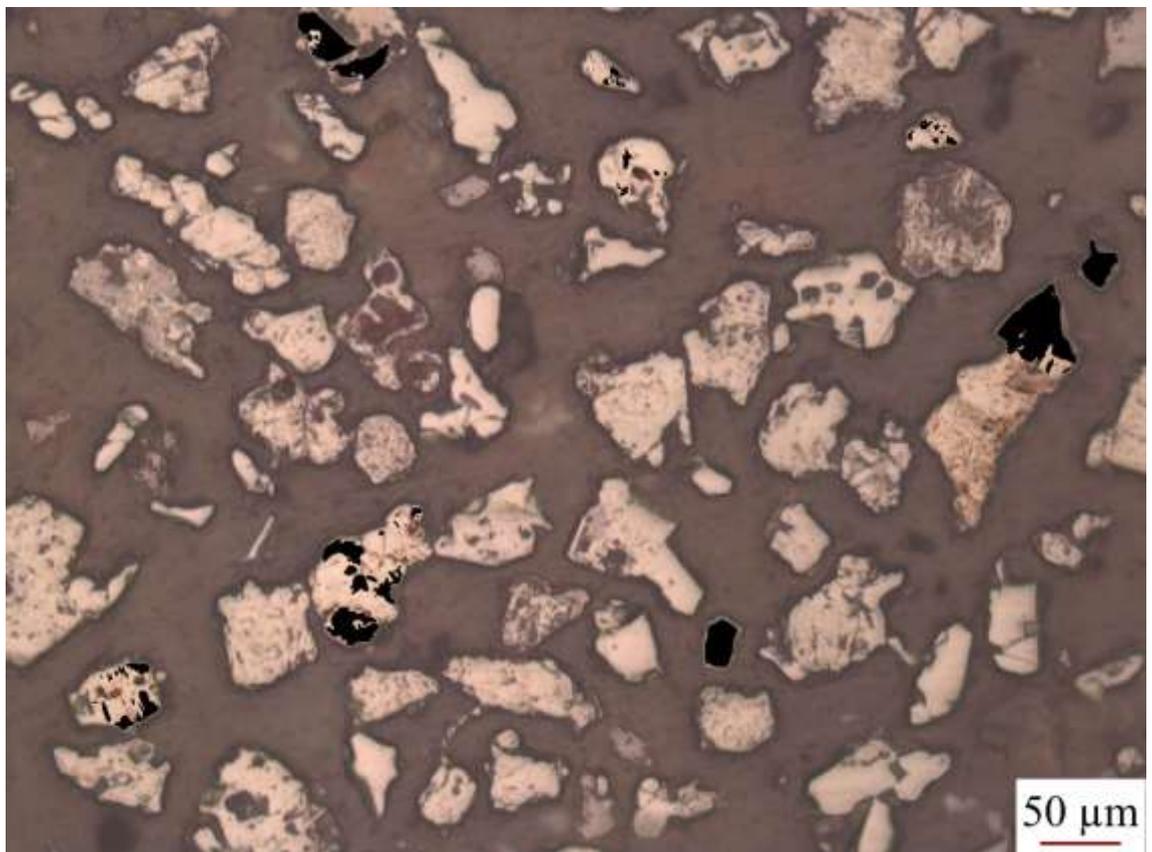
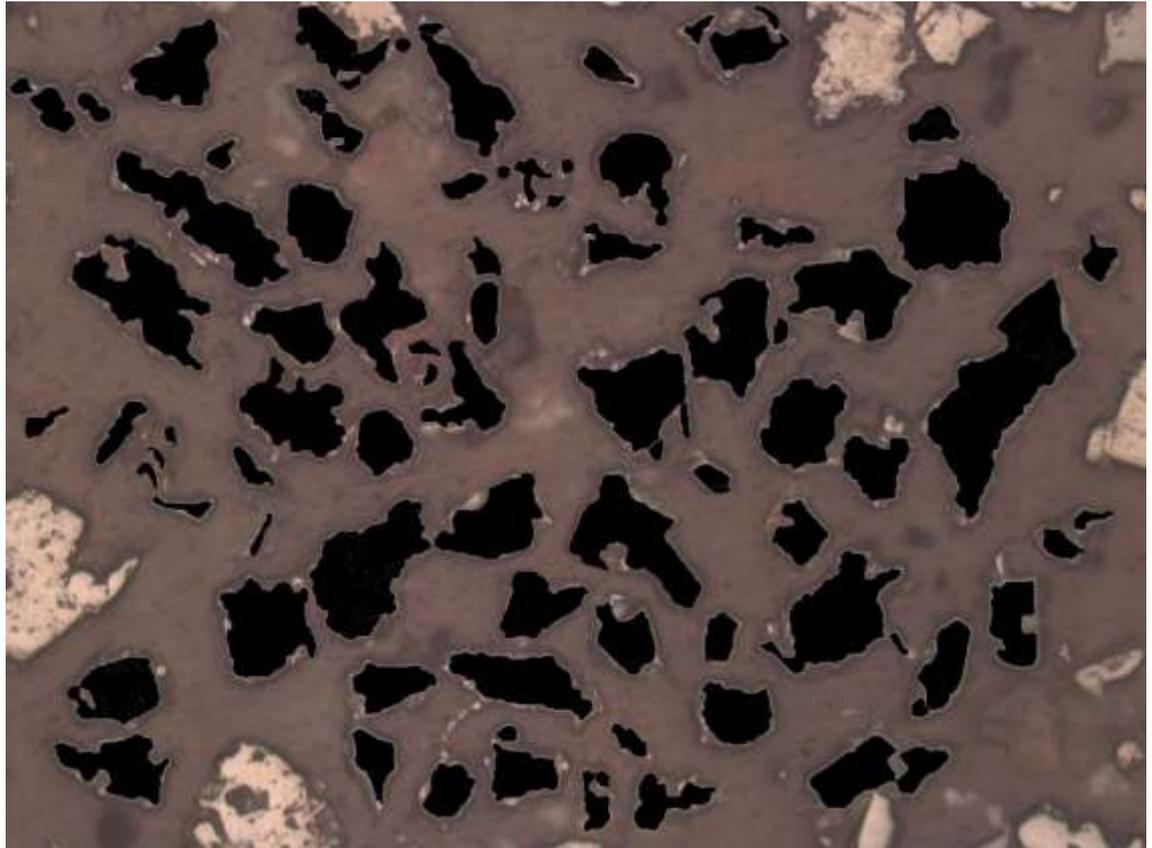


P1-22

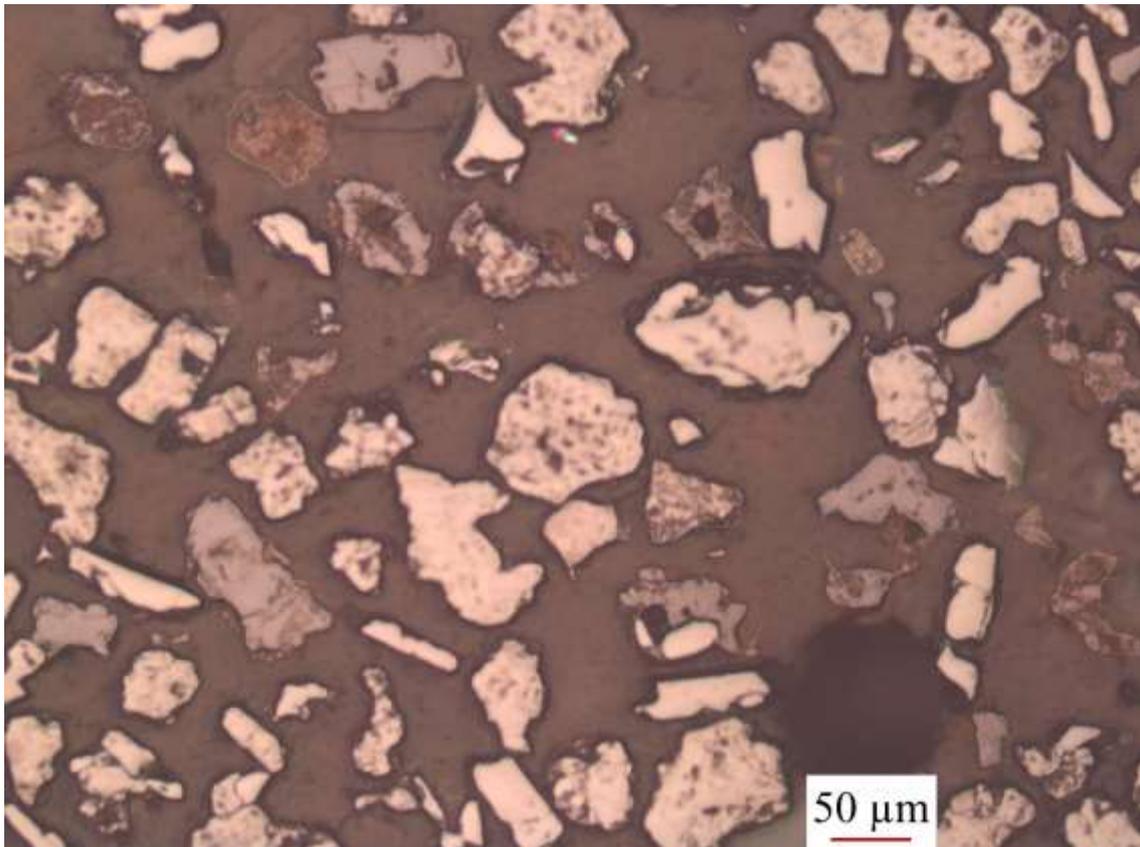


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	83	46
Área dos grãos (μm^2)	1145128	63889

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	64,341%	35,659%
Determinação de áreas	94,716%	5,284%

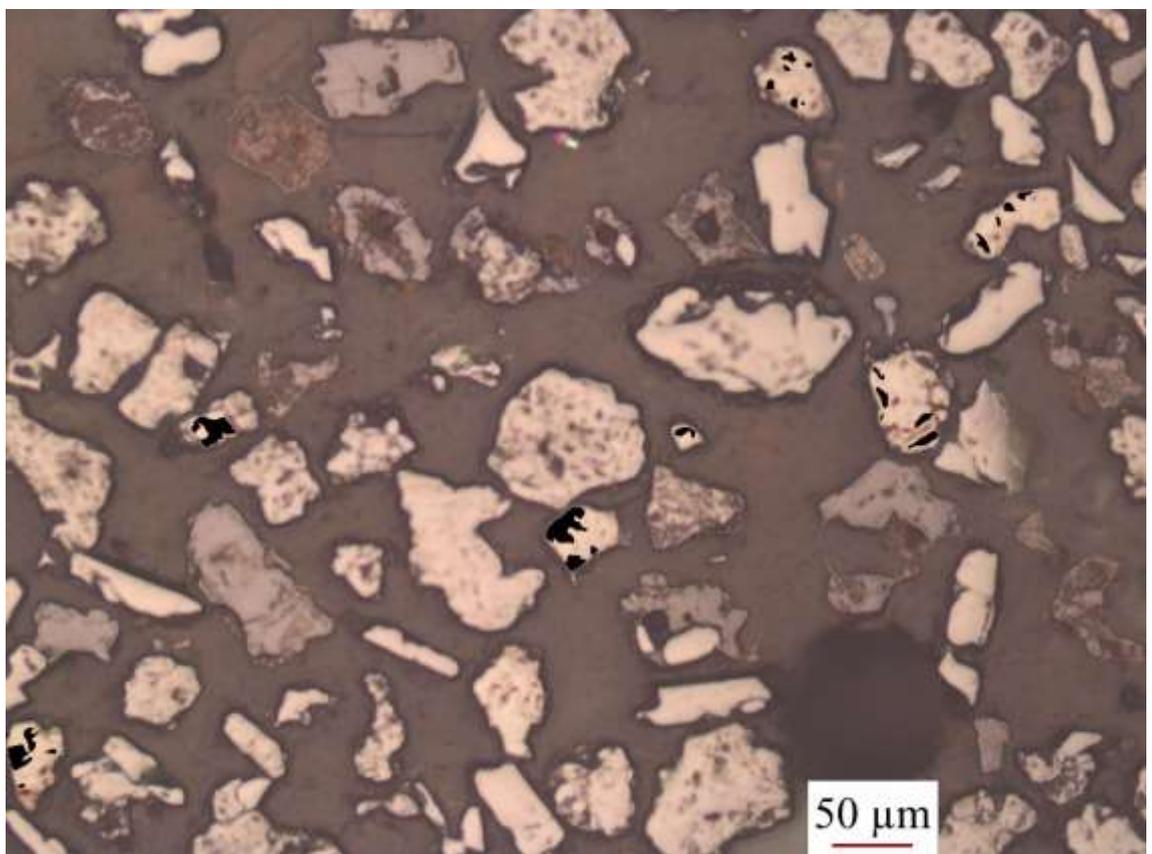
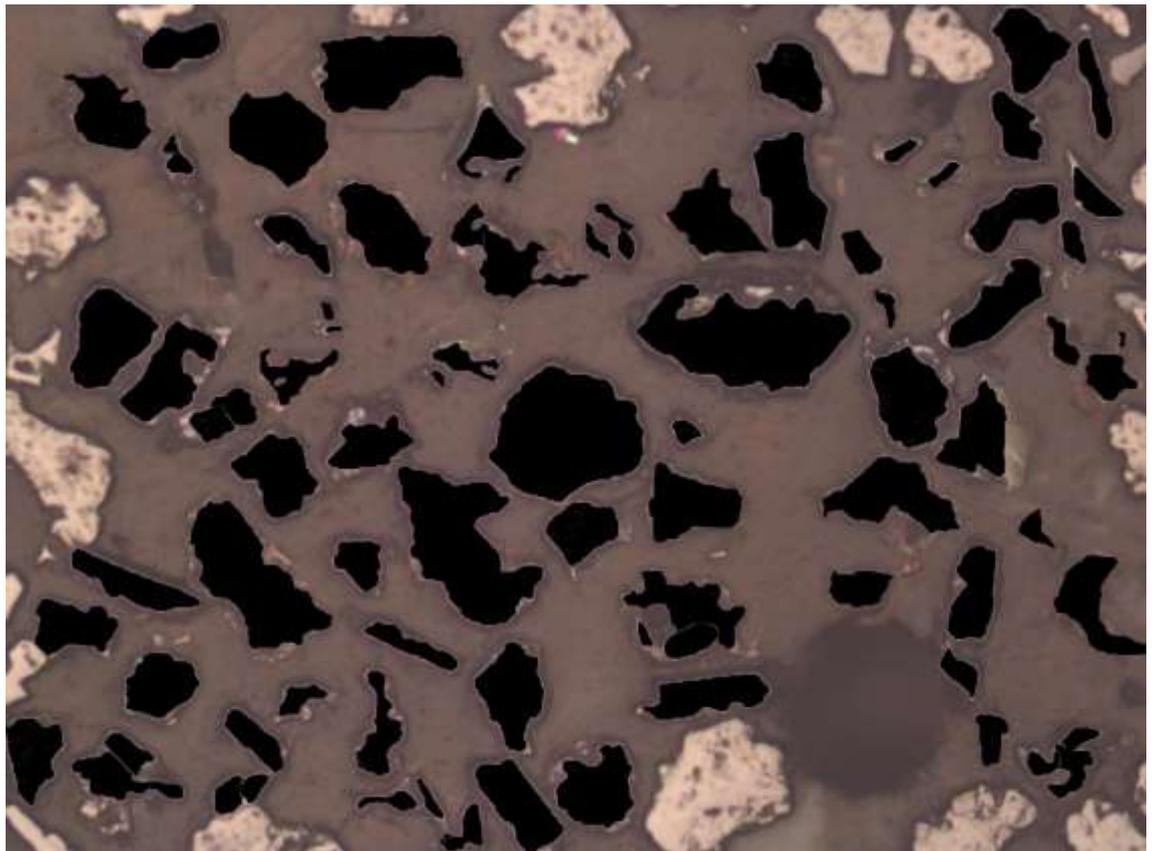


P1-23

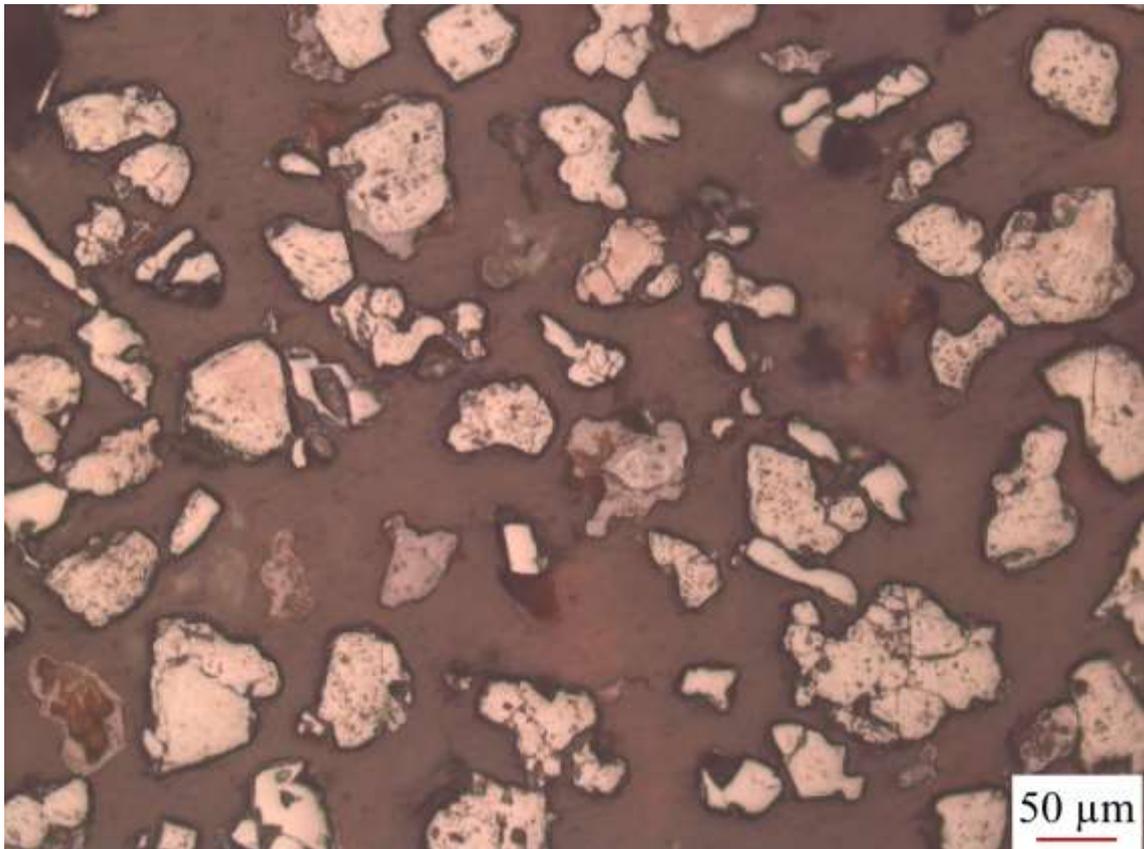


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	79	28
Área dos grãos (μm ²)	1207480	19015

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	73,832%	26,168%
Determinação de áreas	98,450%	1,550%

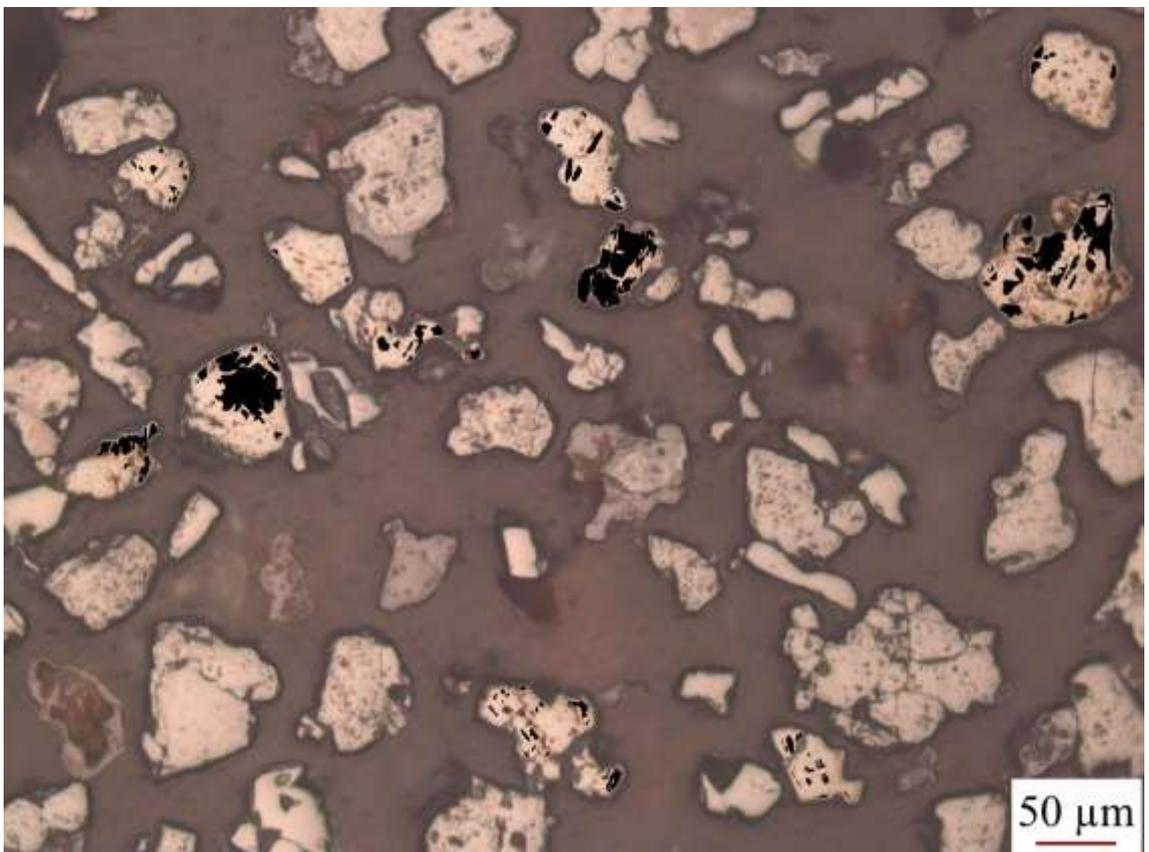
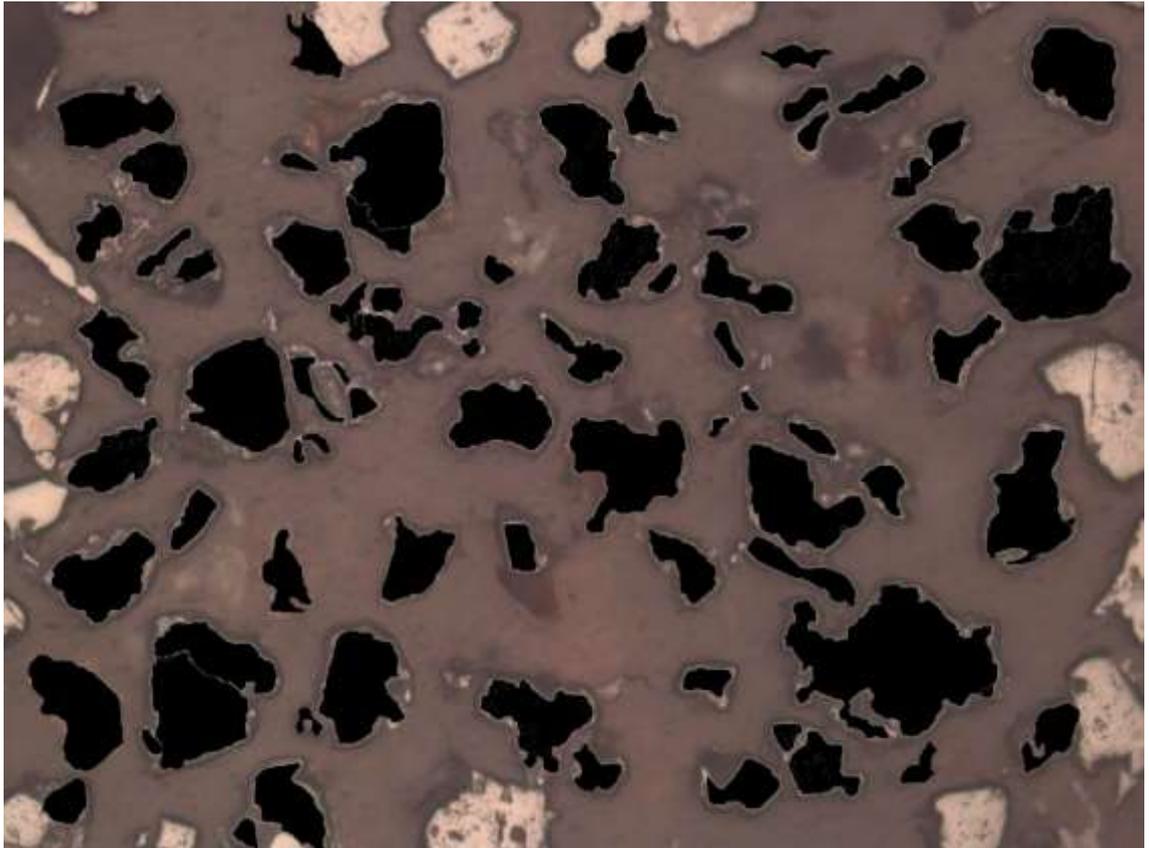


P1-24

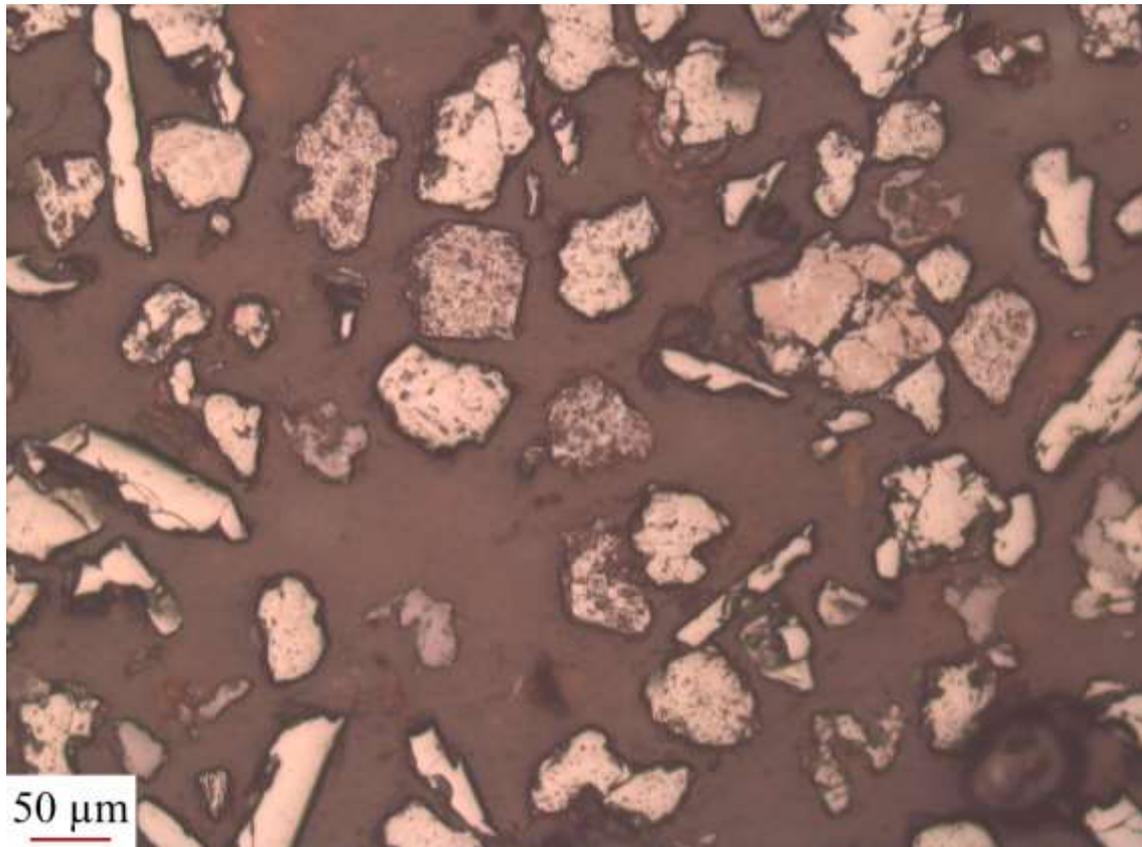


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	74	111
Área dos grãos (μm ²)	1123595	70239

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	40,000%	60,000%
Determinação de áreas	94,117%	5,883%

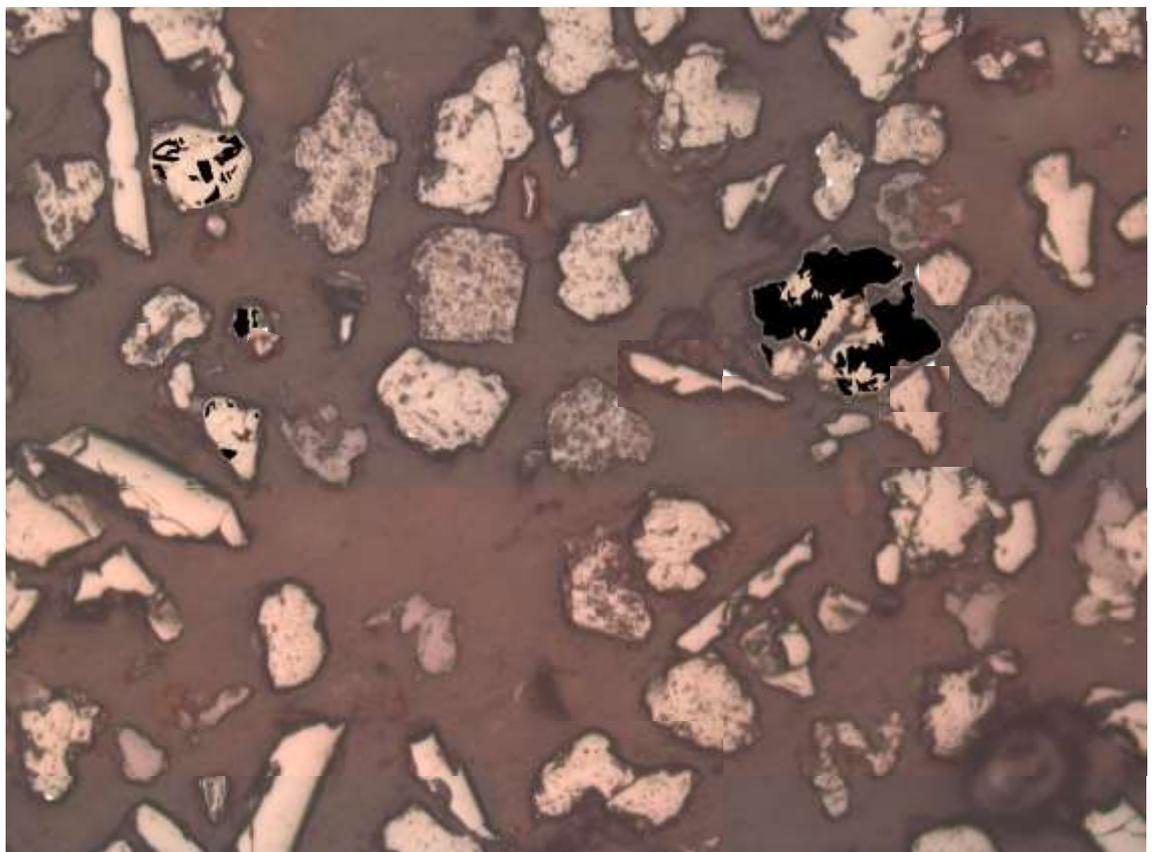
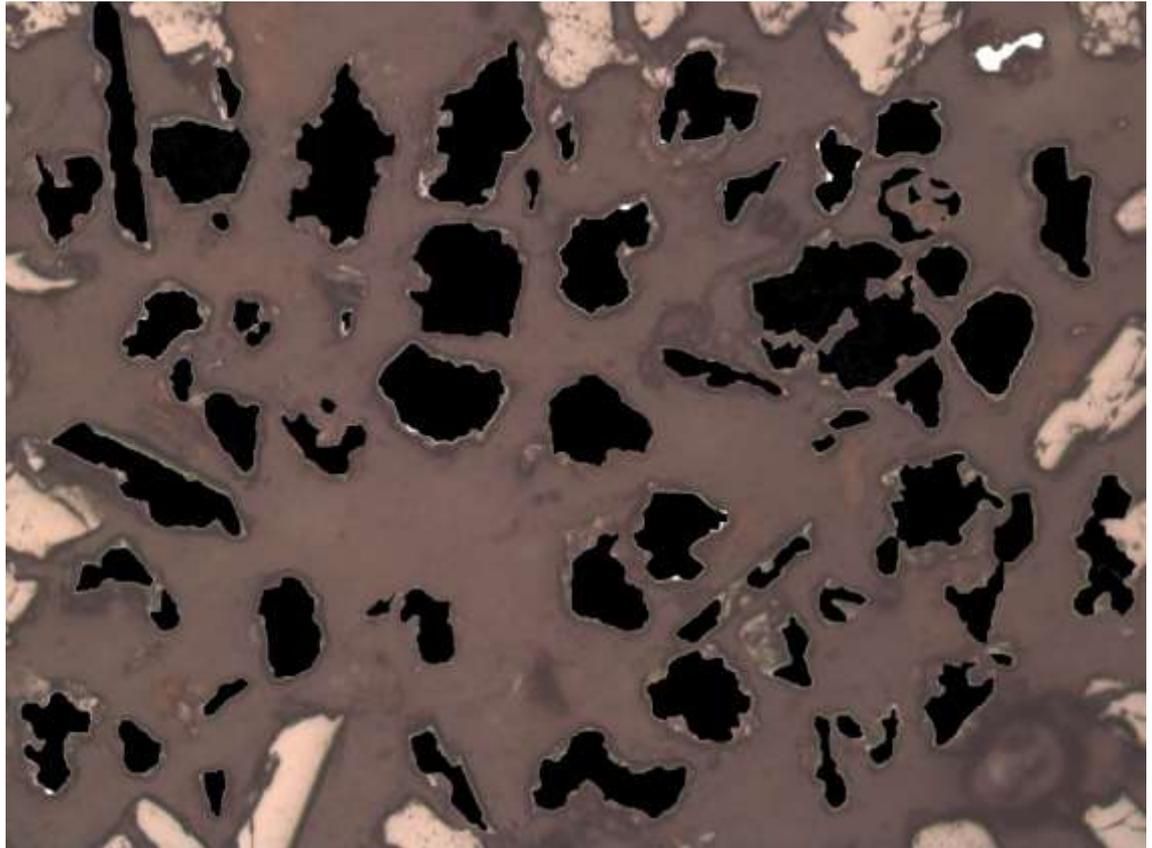


P1-25

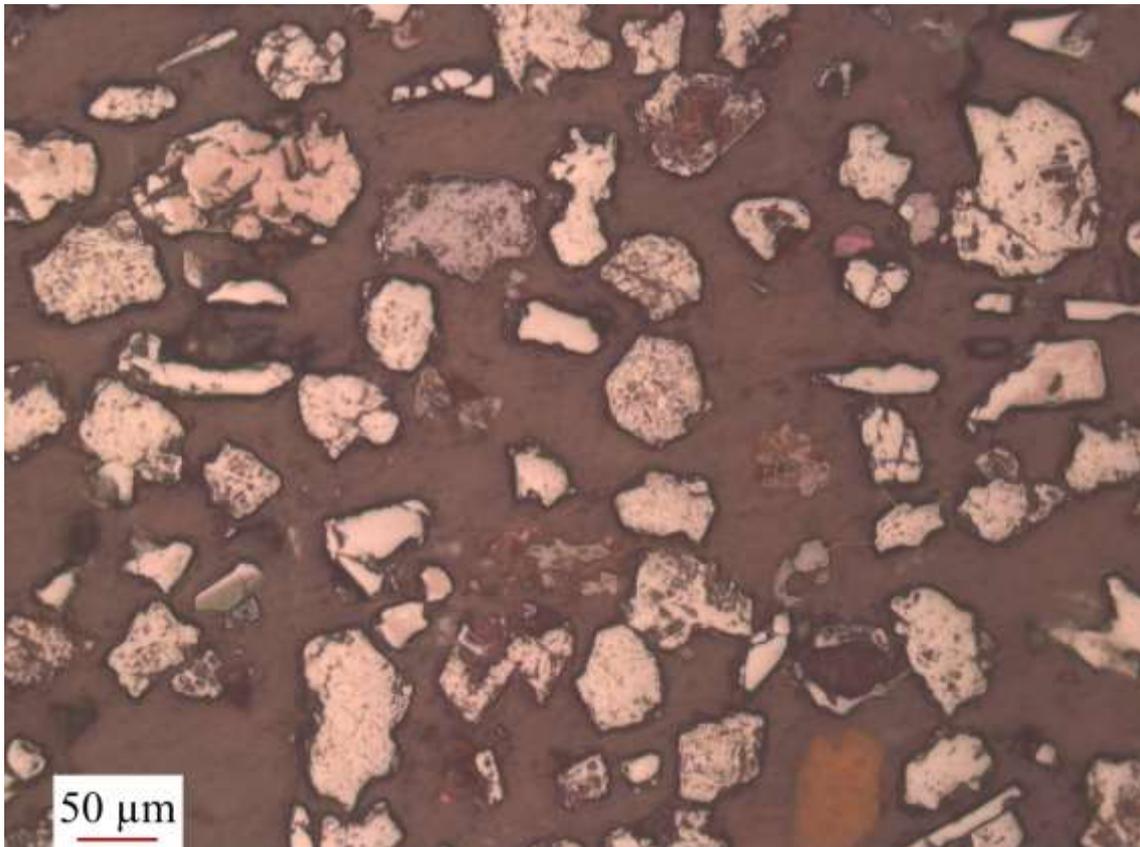


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	66	28
Área dos grãos (µm ²)	1038626	71926

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	70,213%	29,787%
Determinação de áreas	93,523%	6,477%

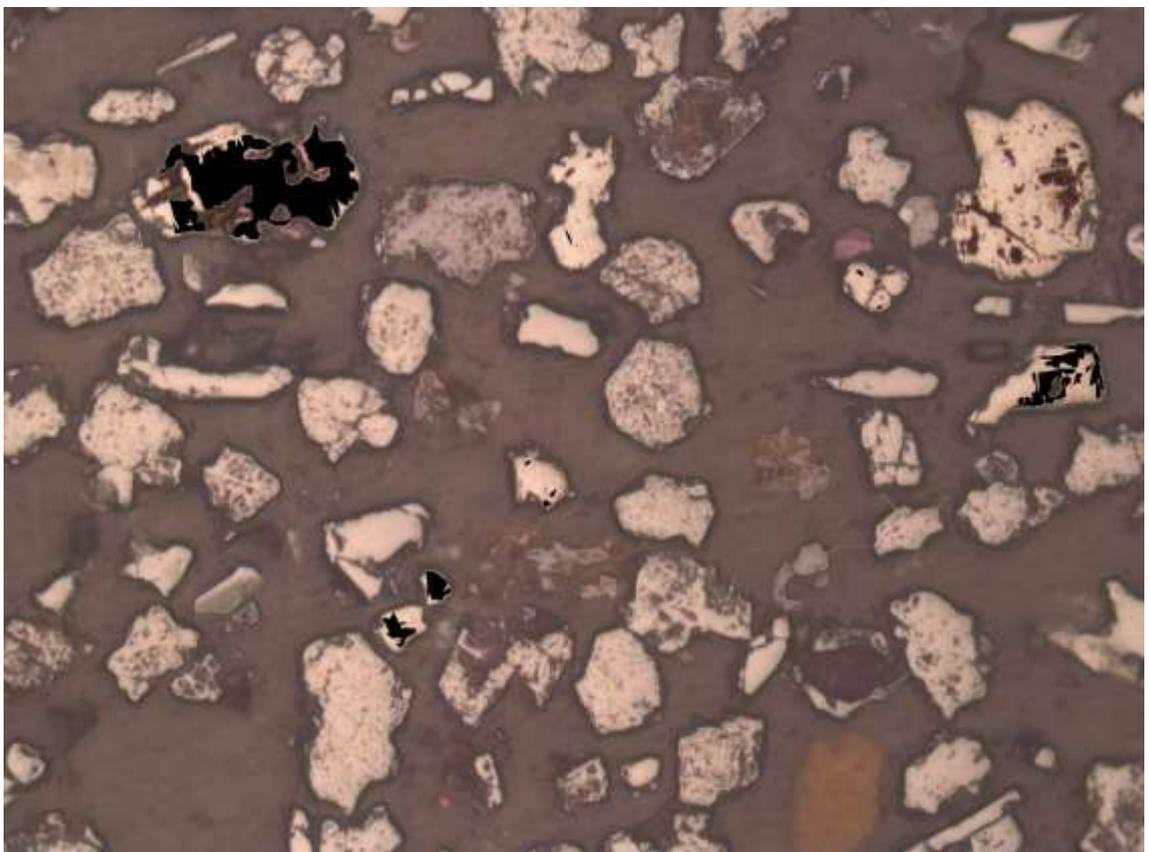
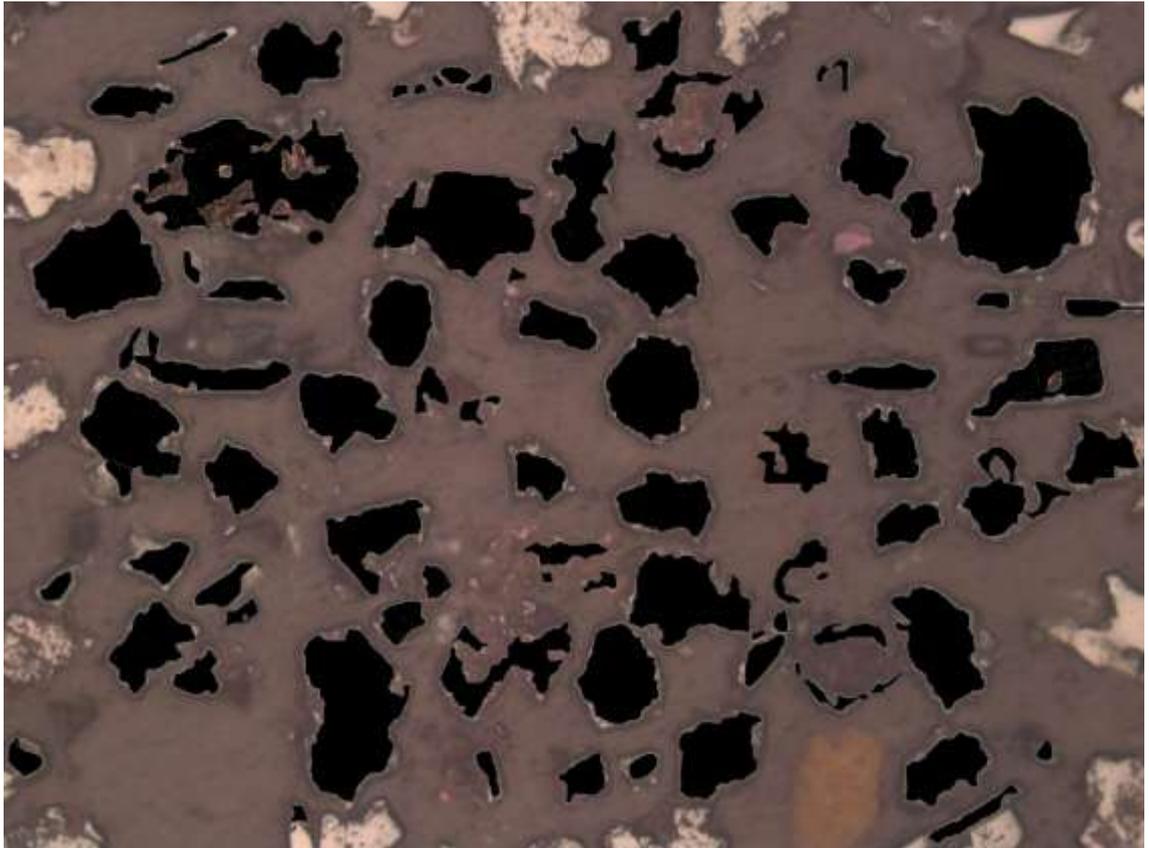


P1-26

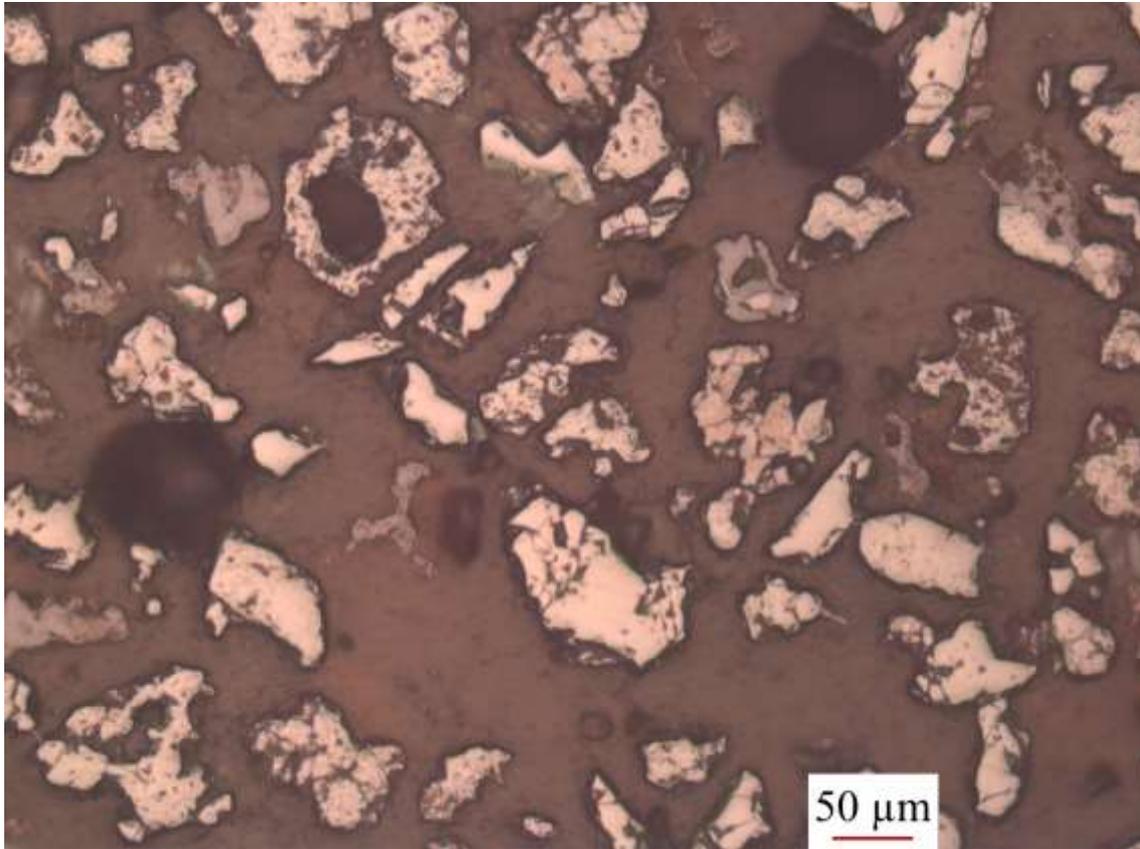


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	111	38
Área dos grãos (μm ²)	1138574	74584

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	60,326%	25,503
Determinação de áreas	93,852%	6,148%

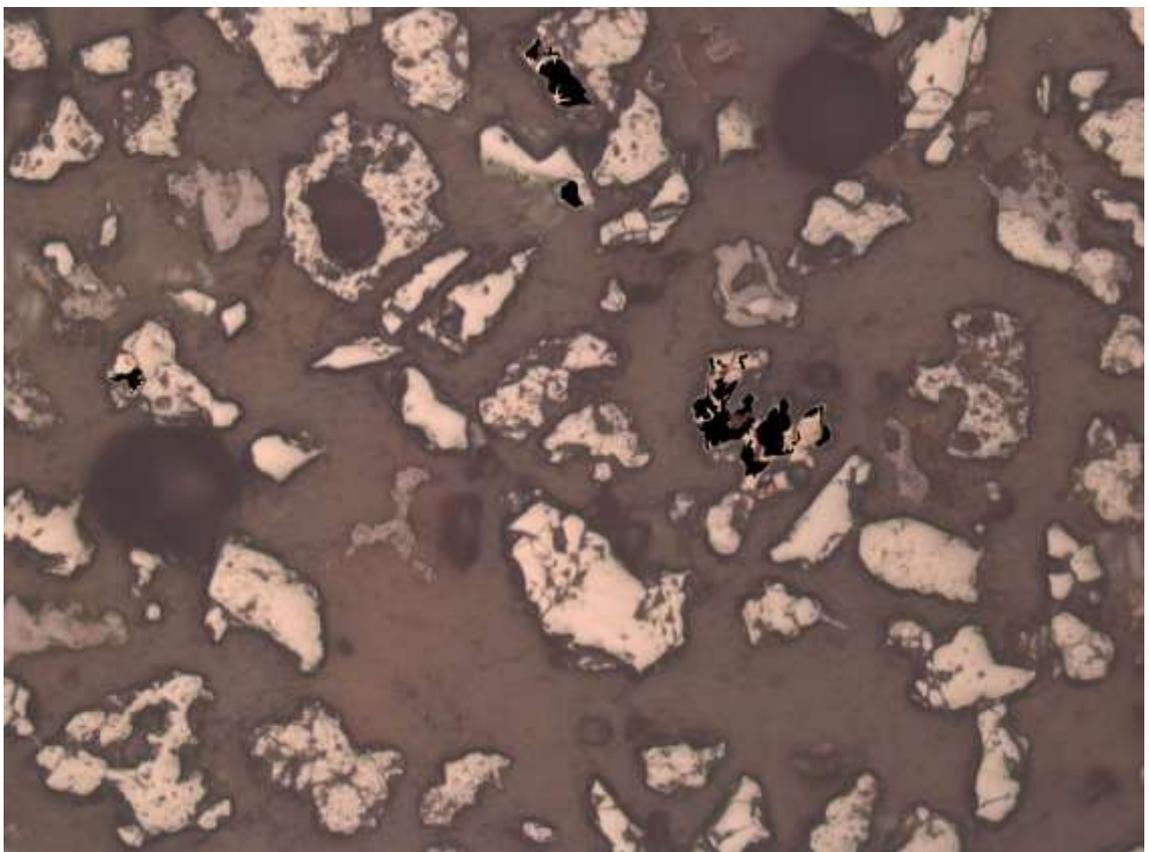
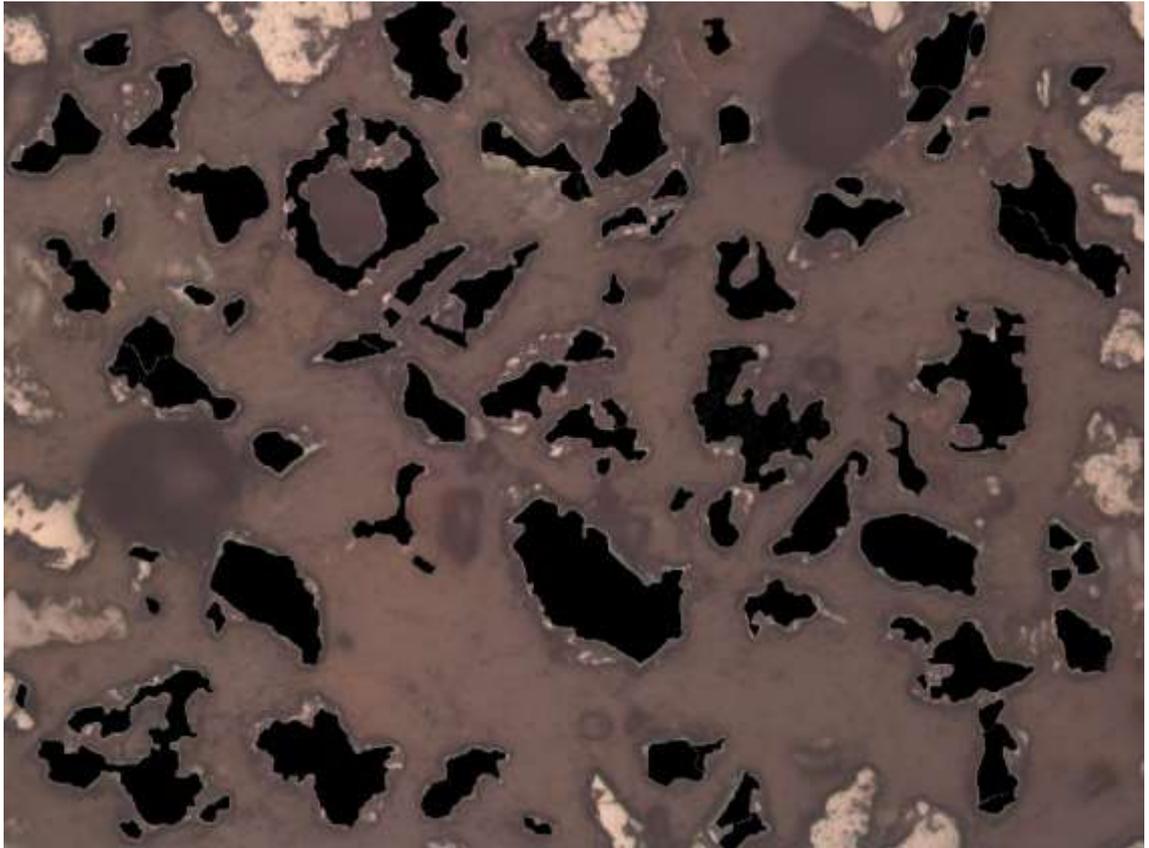


P1-27

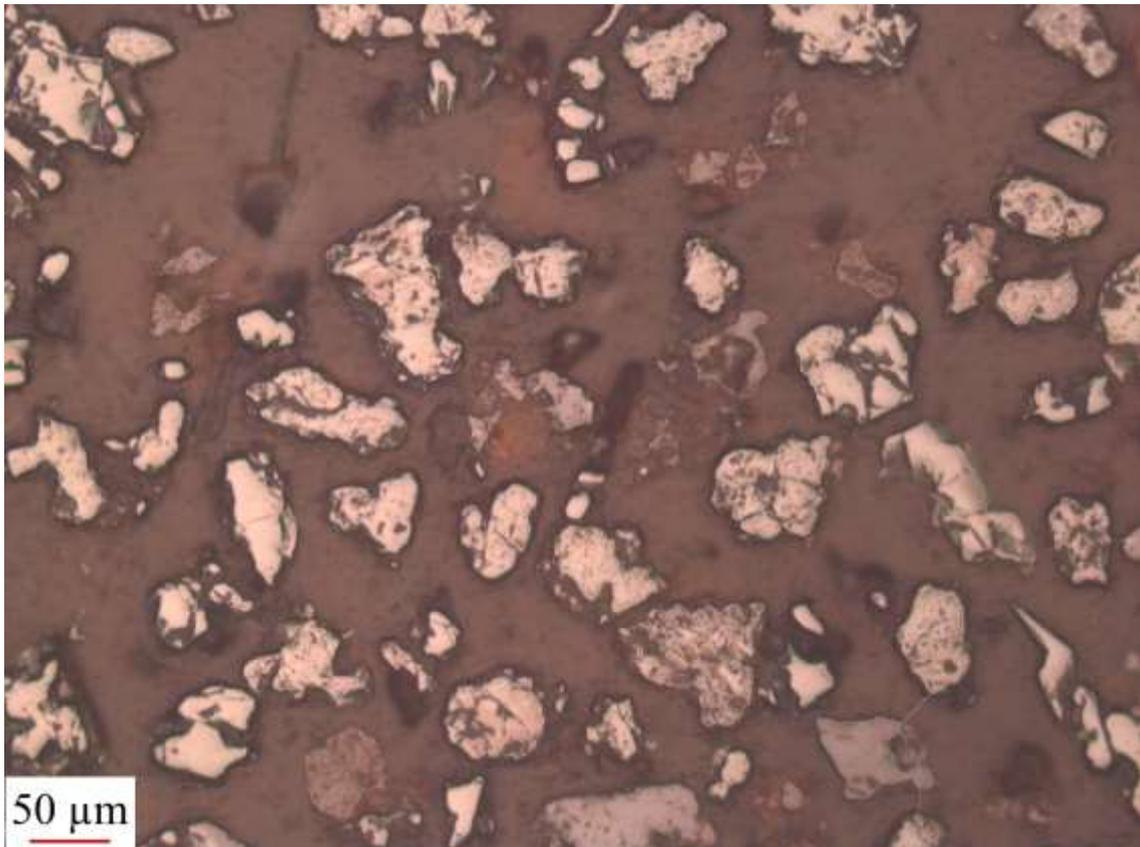


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	75	17
Área dos grãos (μm ²)	952114	35065

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	81,522%	18,478%
Determinação de áreas	96,448%	3,552%

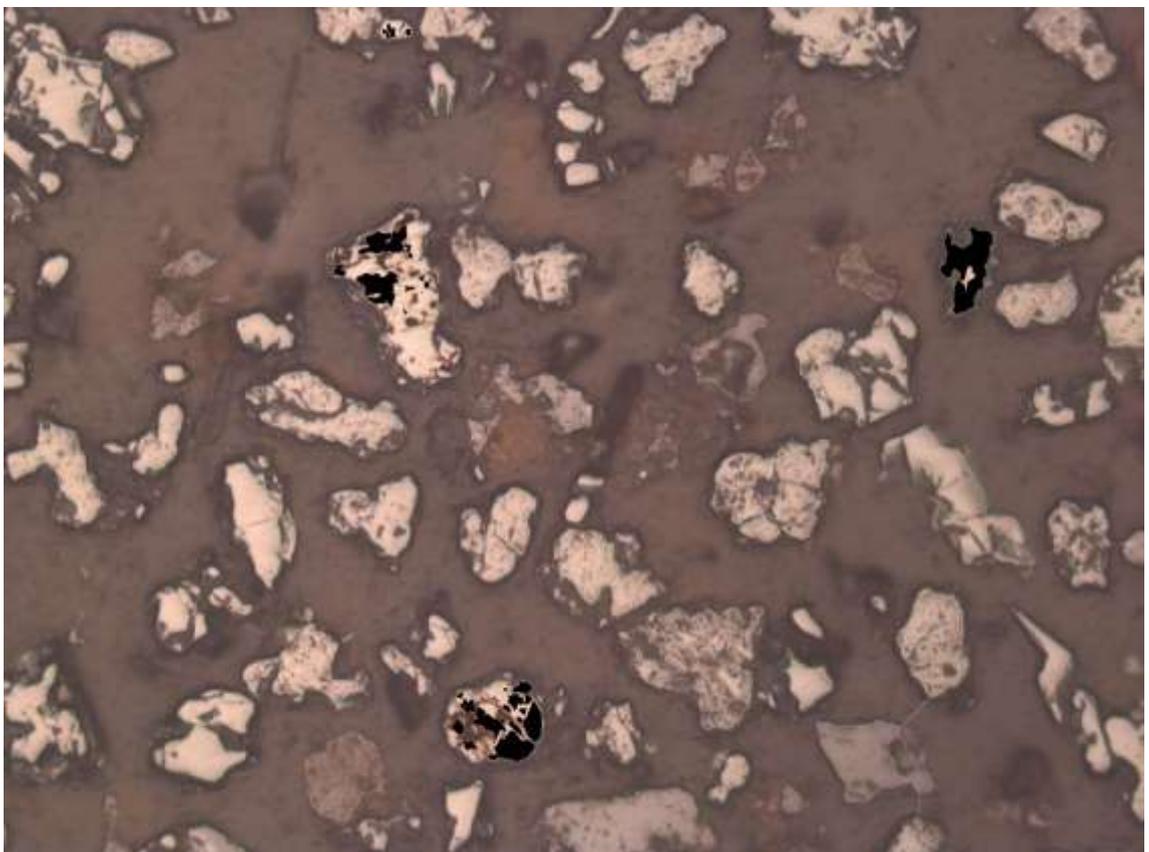
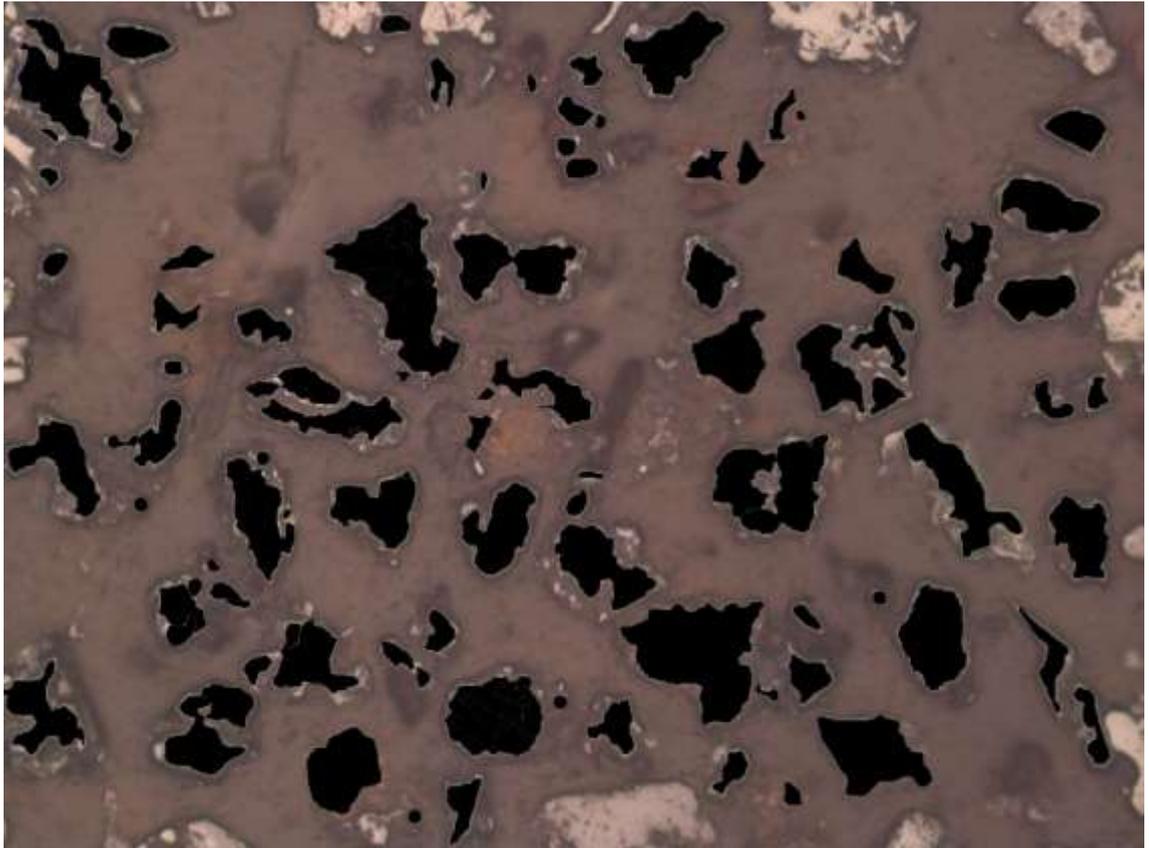


P1-28

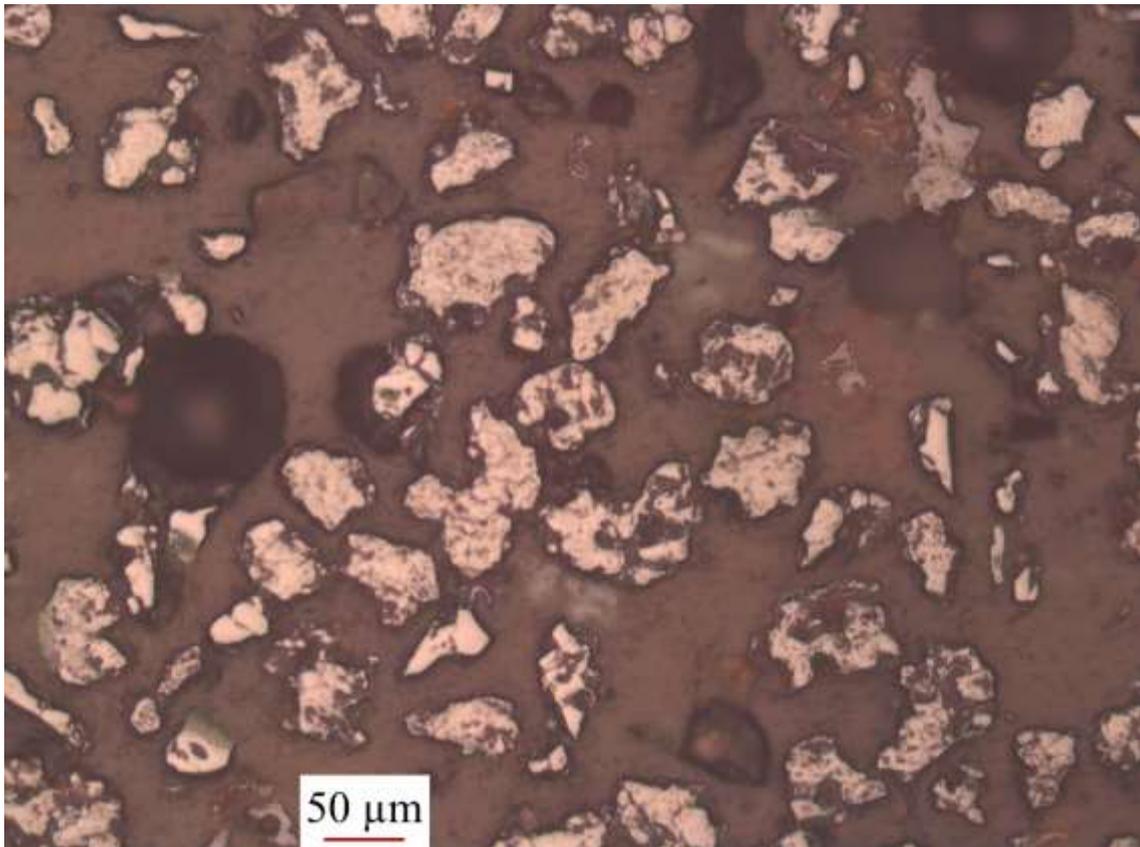


Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	85	29
Área dos grãos (μm ²)	847910	36959

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	74,561%	25.439%
Determinação de áreas	95,822%	4,178%

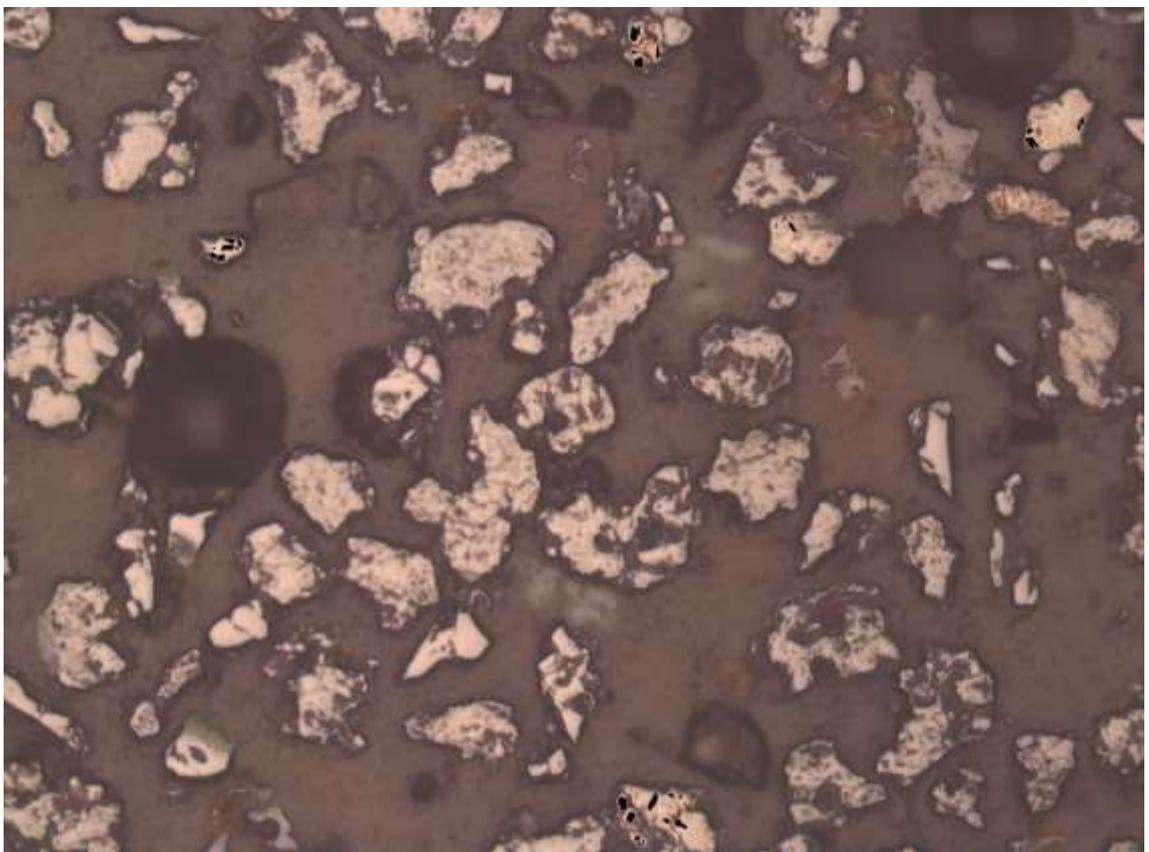
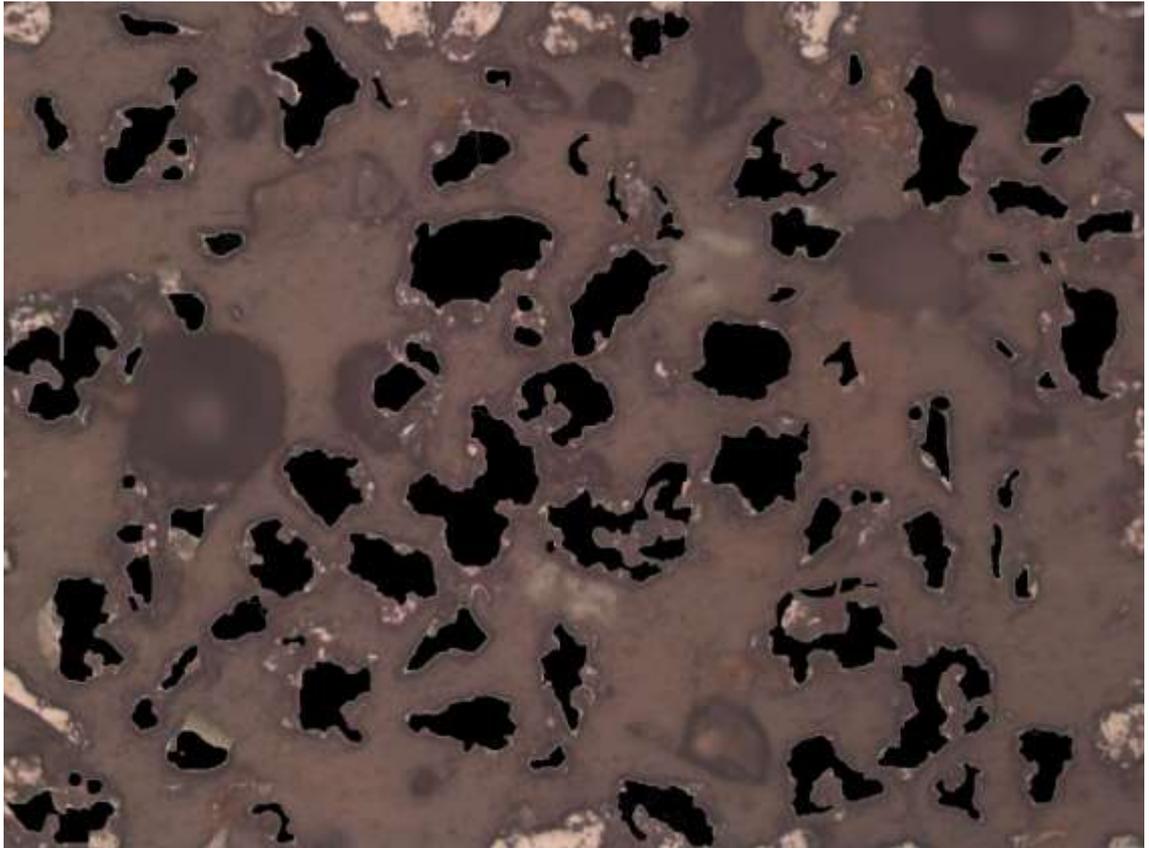


P1-29

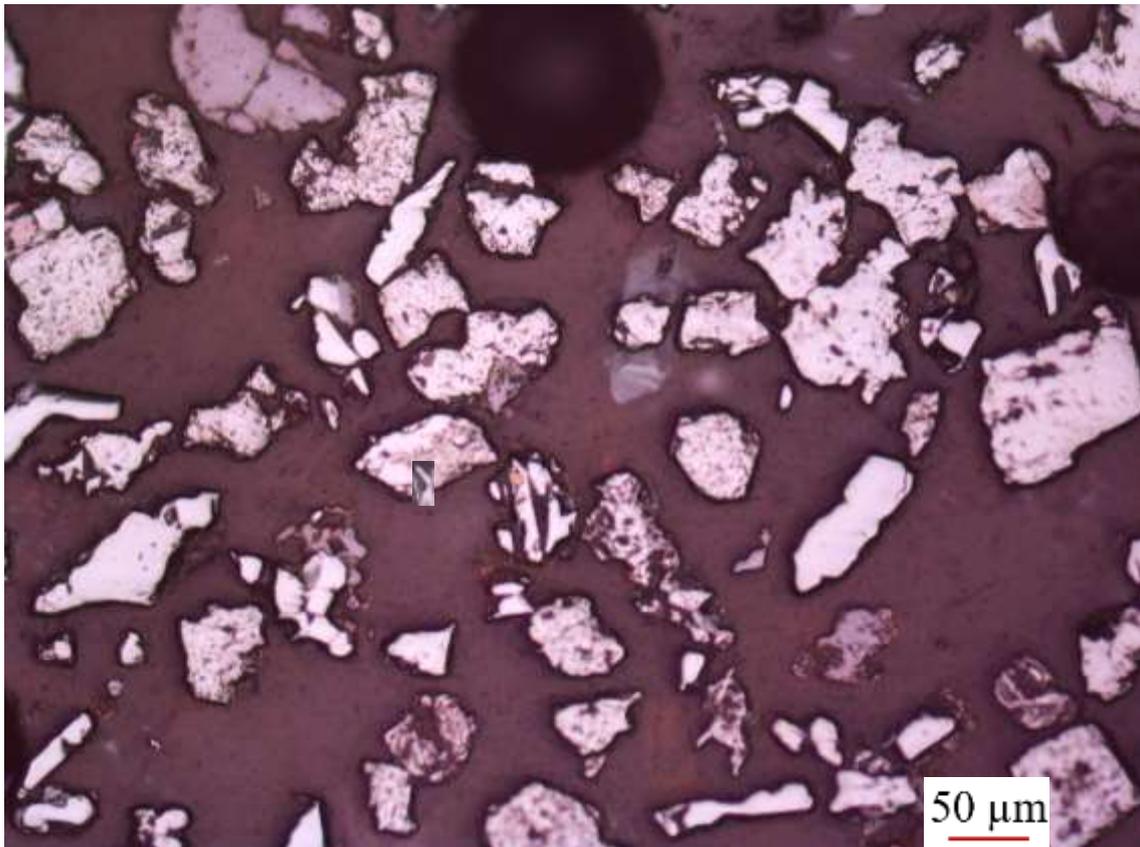


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	100	26
Área dos grãos (μm ²)	856011	5510

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	79,365%	20,635%
Determinação de áreas	99,361%	0,639%

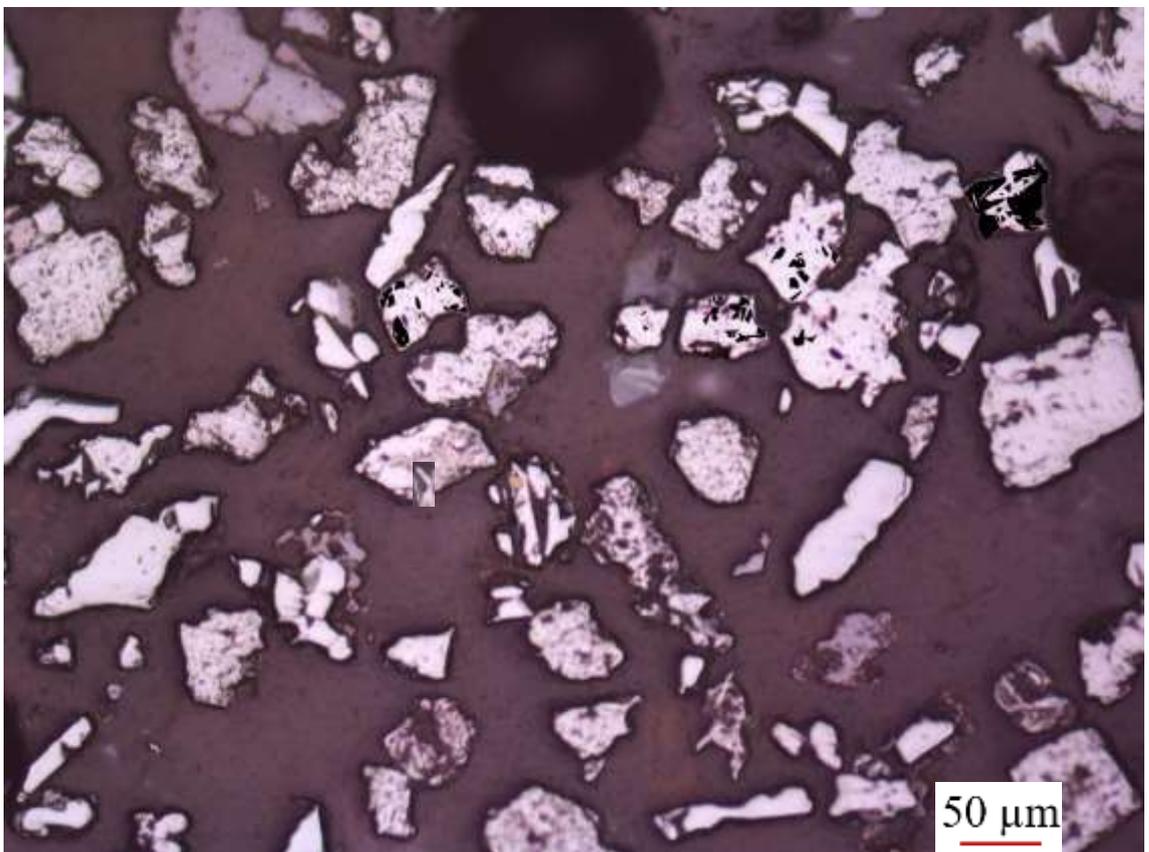
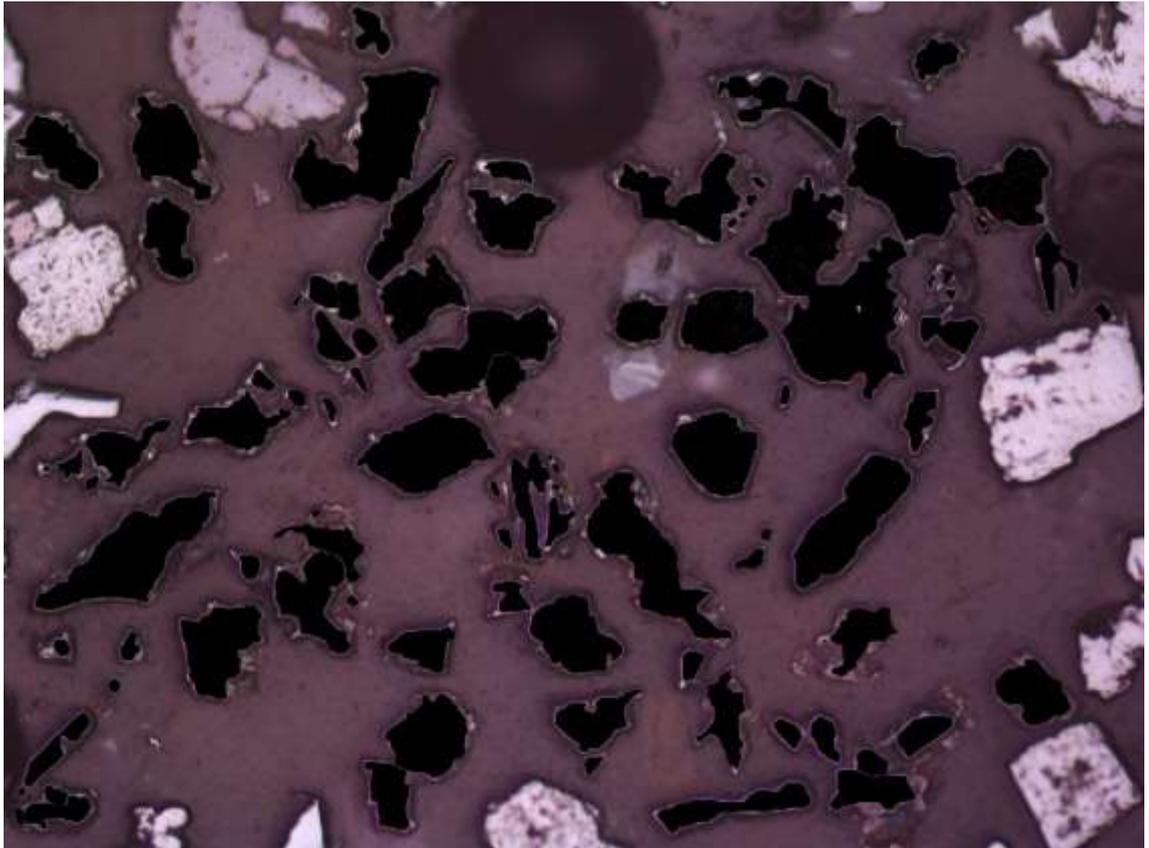


P2-1

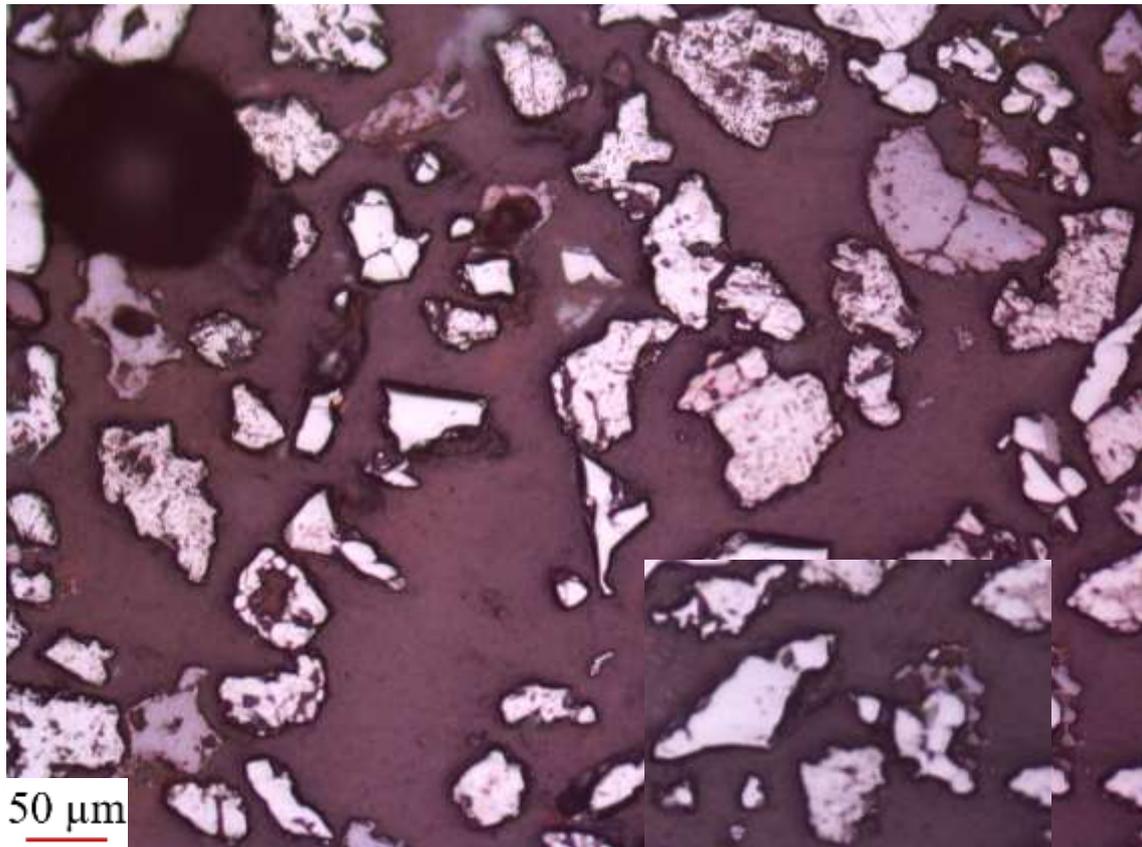


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	87	43
Área dos grãos (μm ²)	994172	26695

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	66,923%	33,077%
Determinação de áreas	97,383%	2,617%

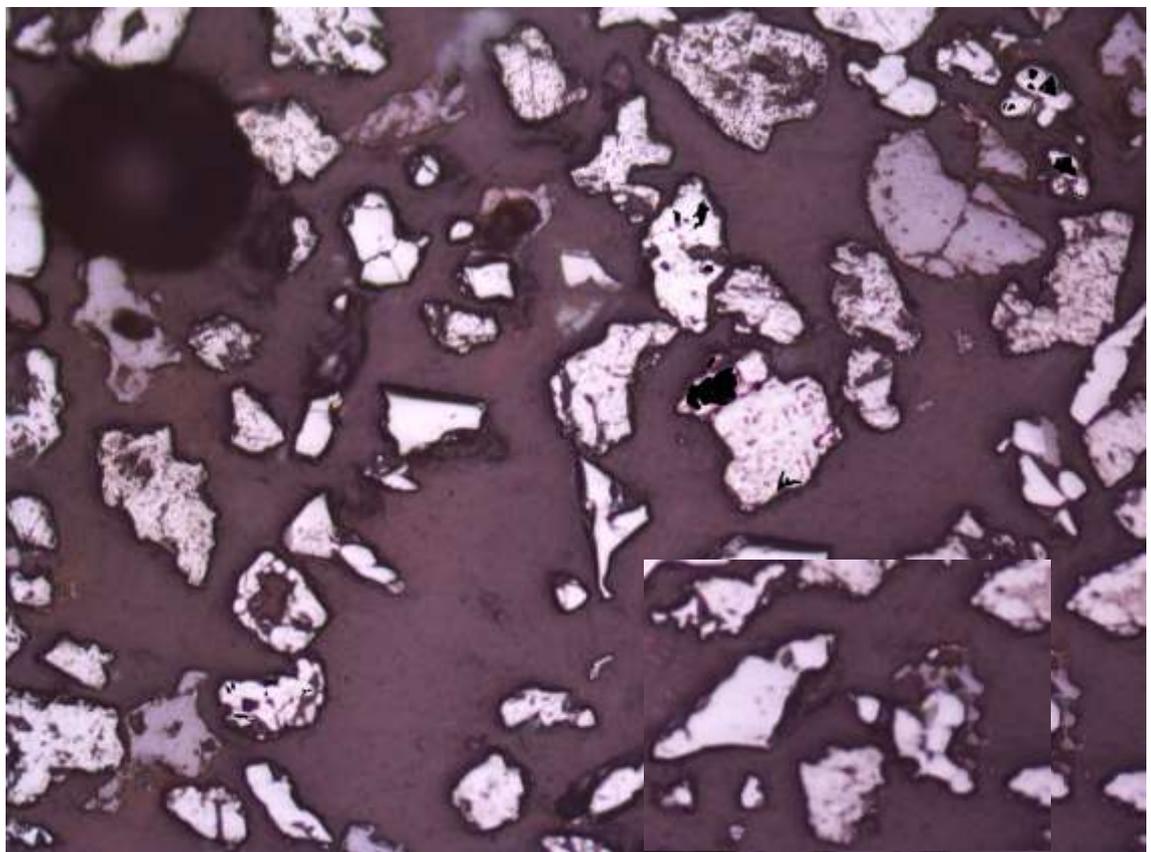
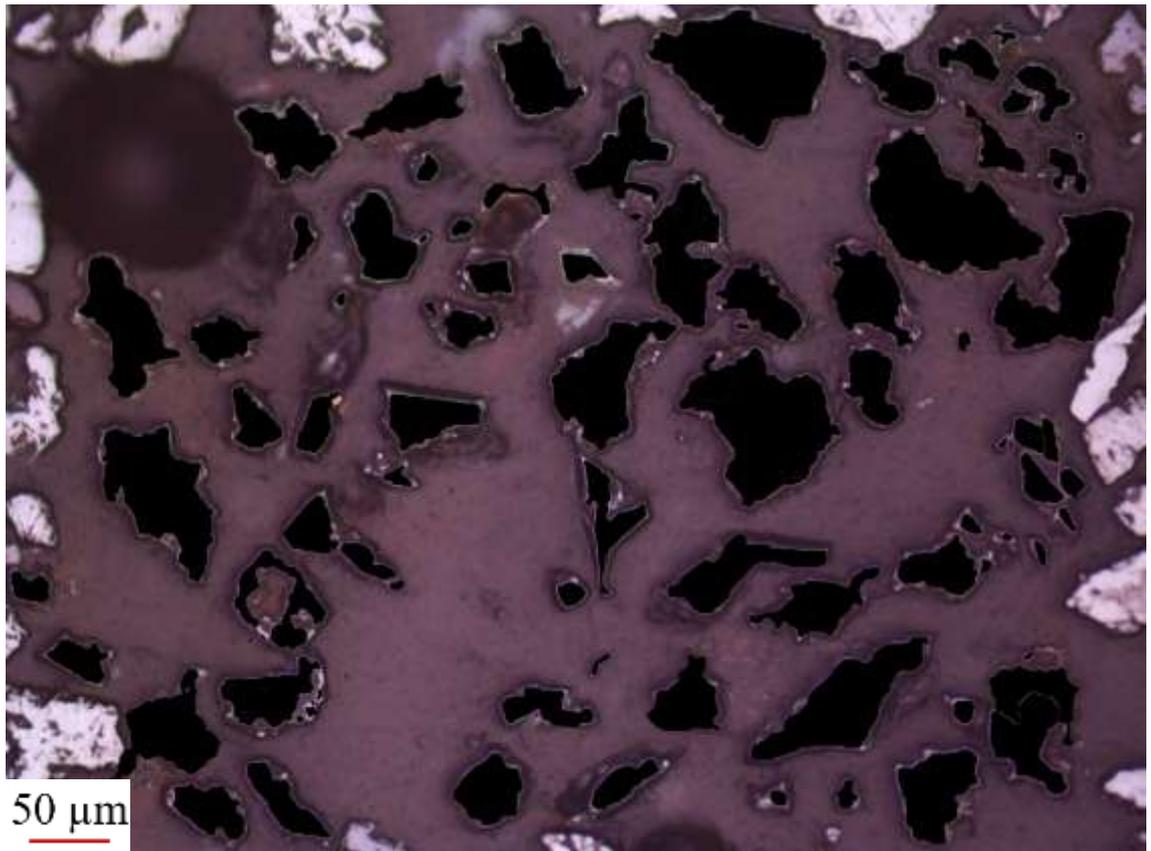


P2-2

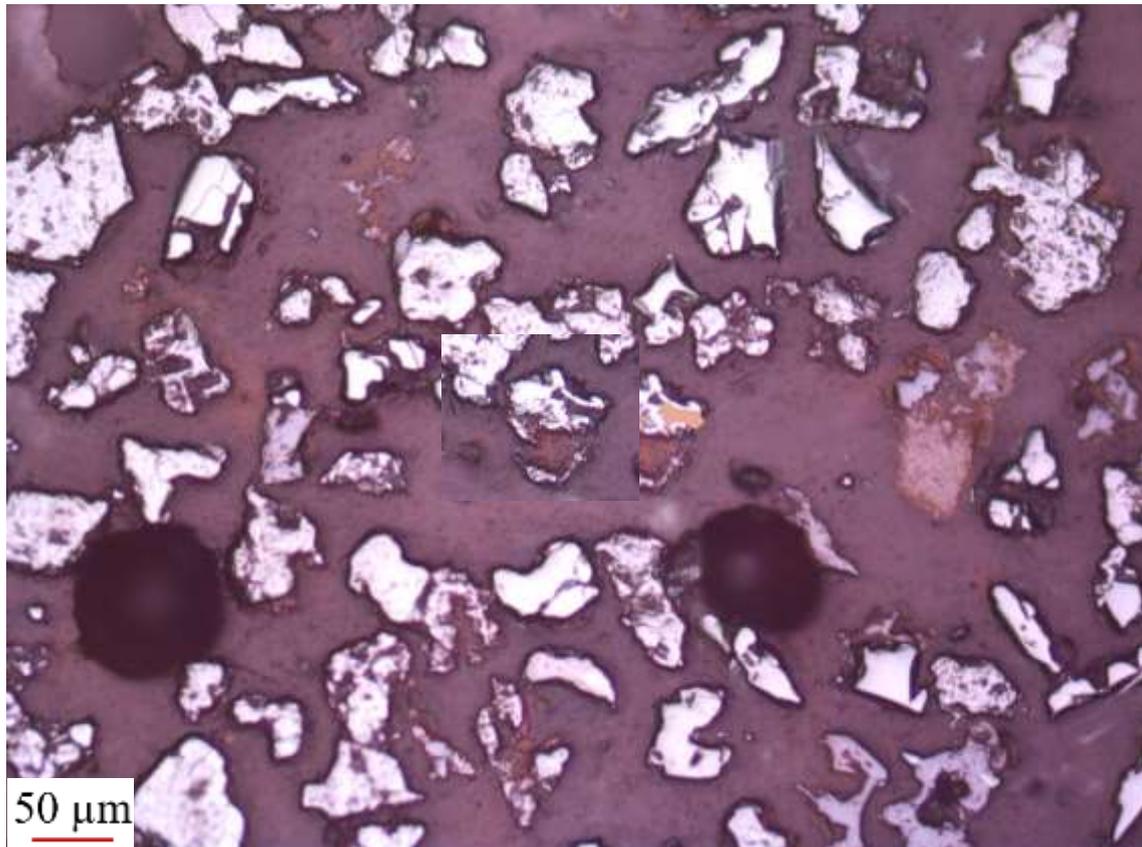


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	88	21
Área dos grãos (μm ²)	1100480	14450

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	80,734%	19,266%
Determinação de áreas	98,703%	1,297%

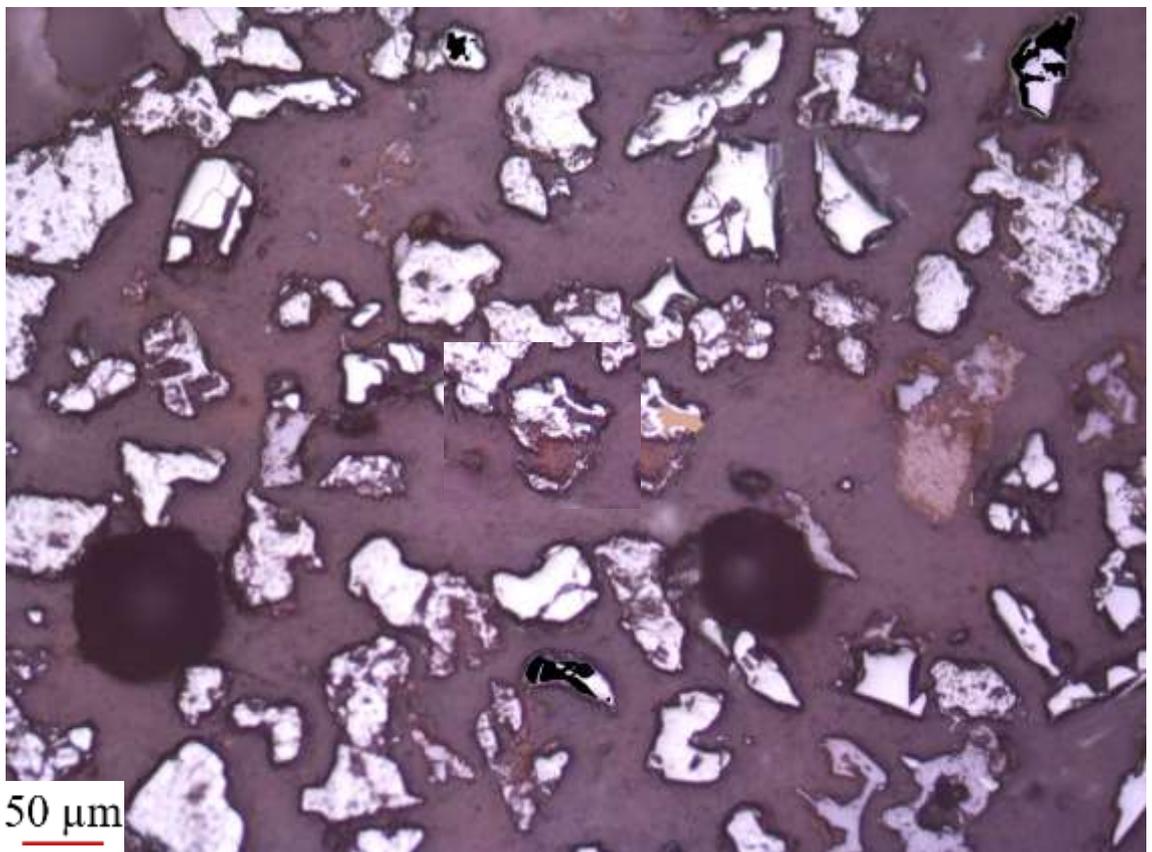
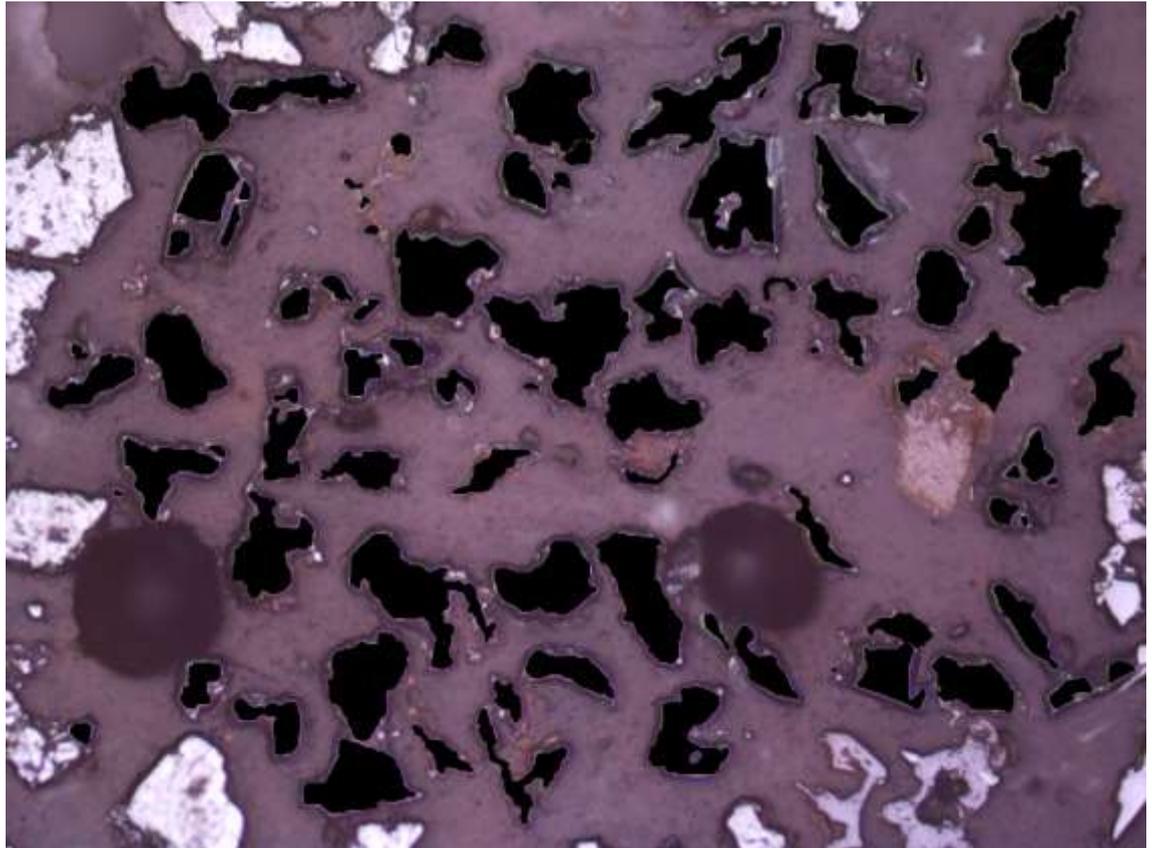


P2-3



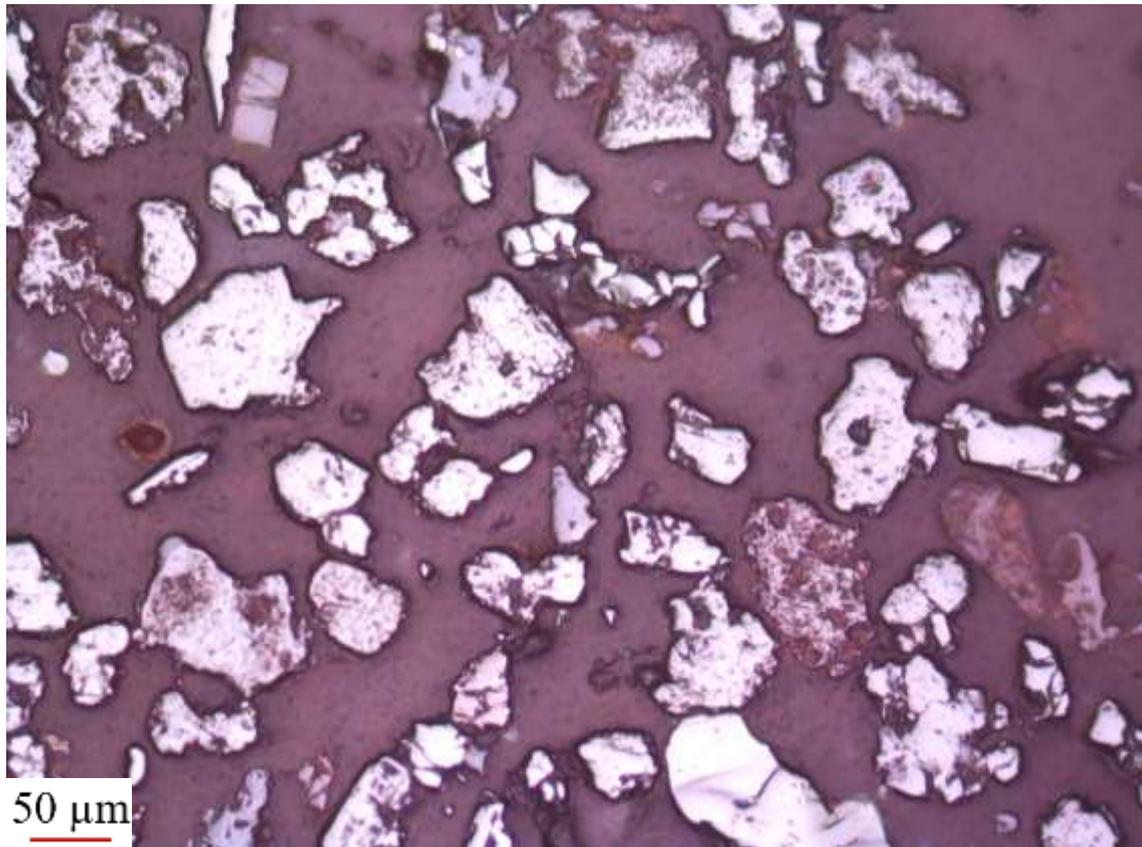
Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	82	12
Área dos grãos (μm ²)	920058	20757

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	87,234%	12,766%
Determinação de áreas	97,793%	2,207%



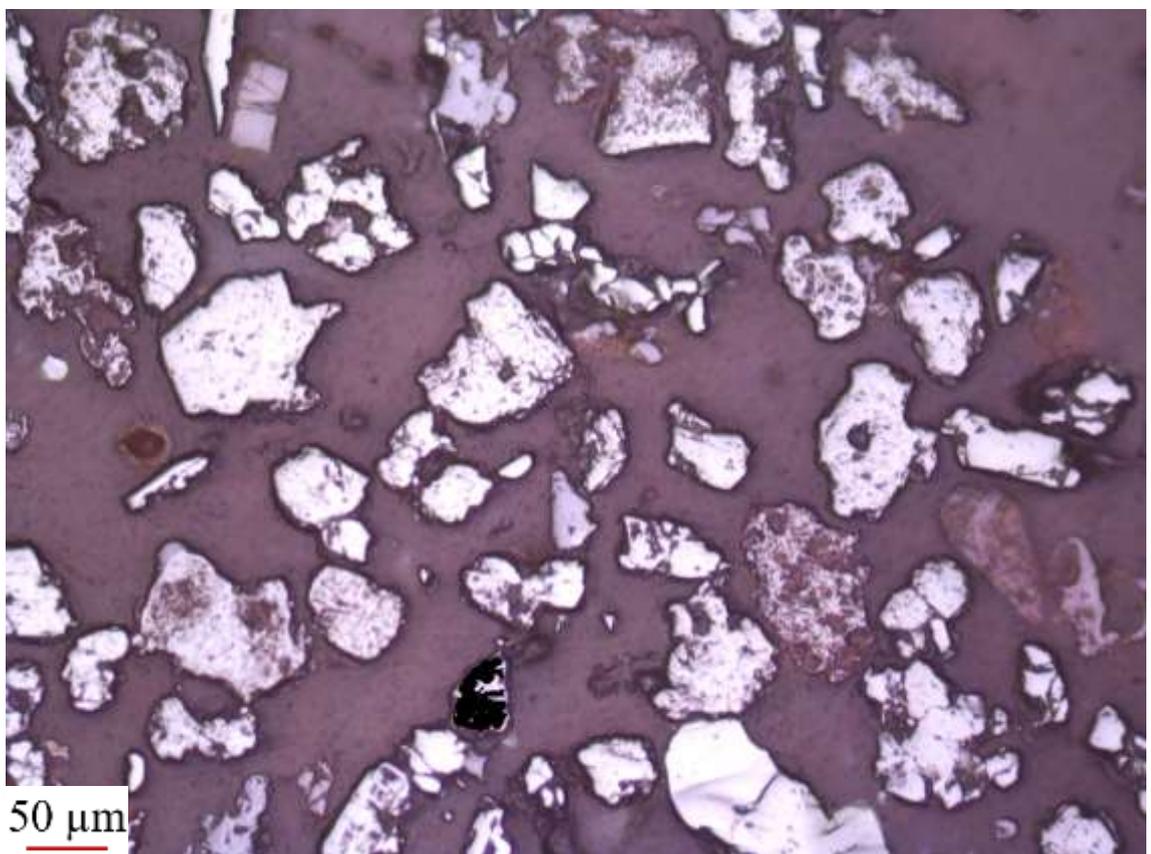
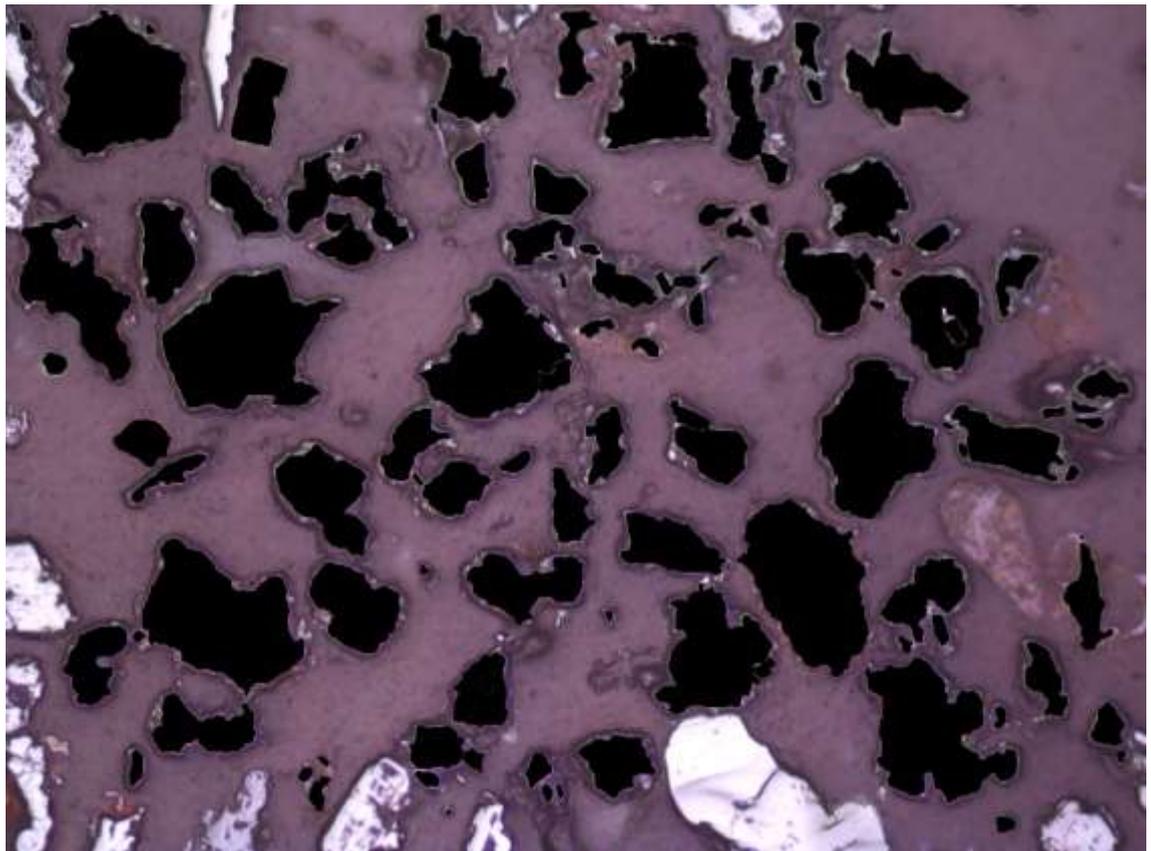
50 μm

P2-4

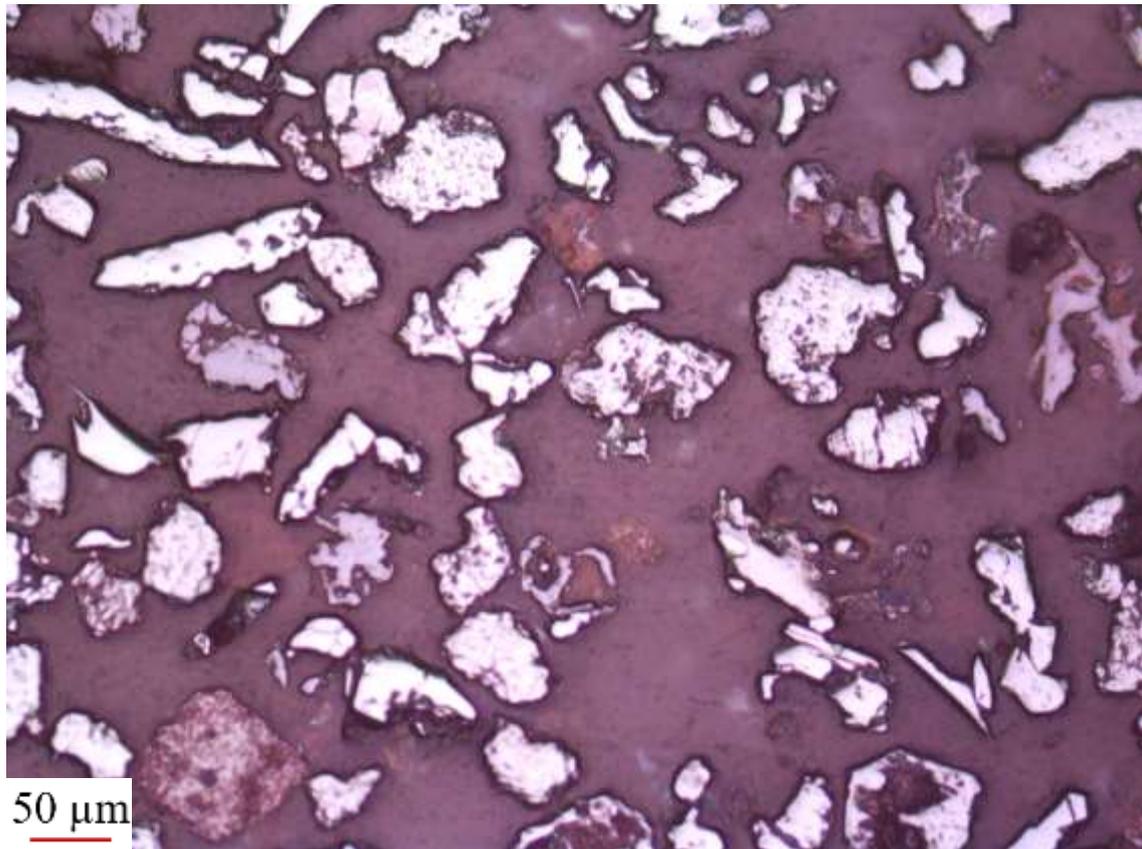


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	100	1
Área dos grãos (μm^2)	1307745	13240

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	99,010%	0,990%
Determinação de áreas	98,996%	1,004%

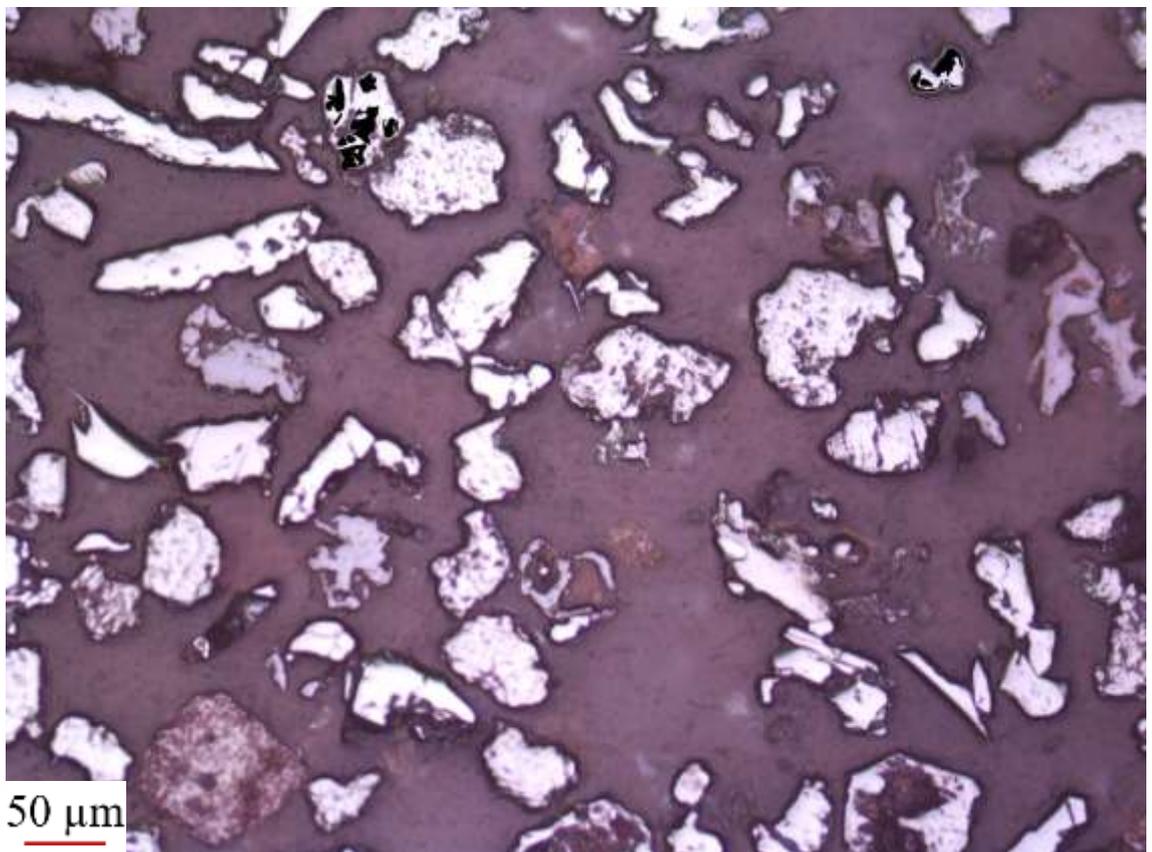
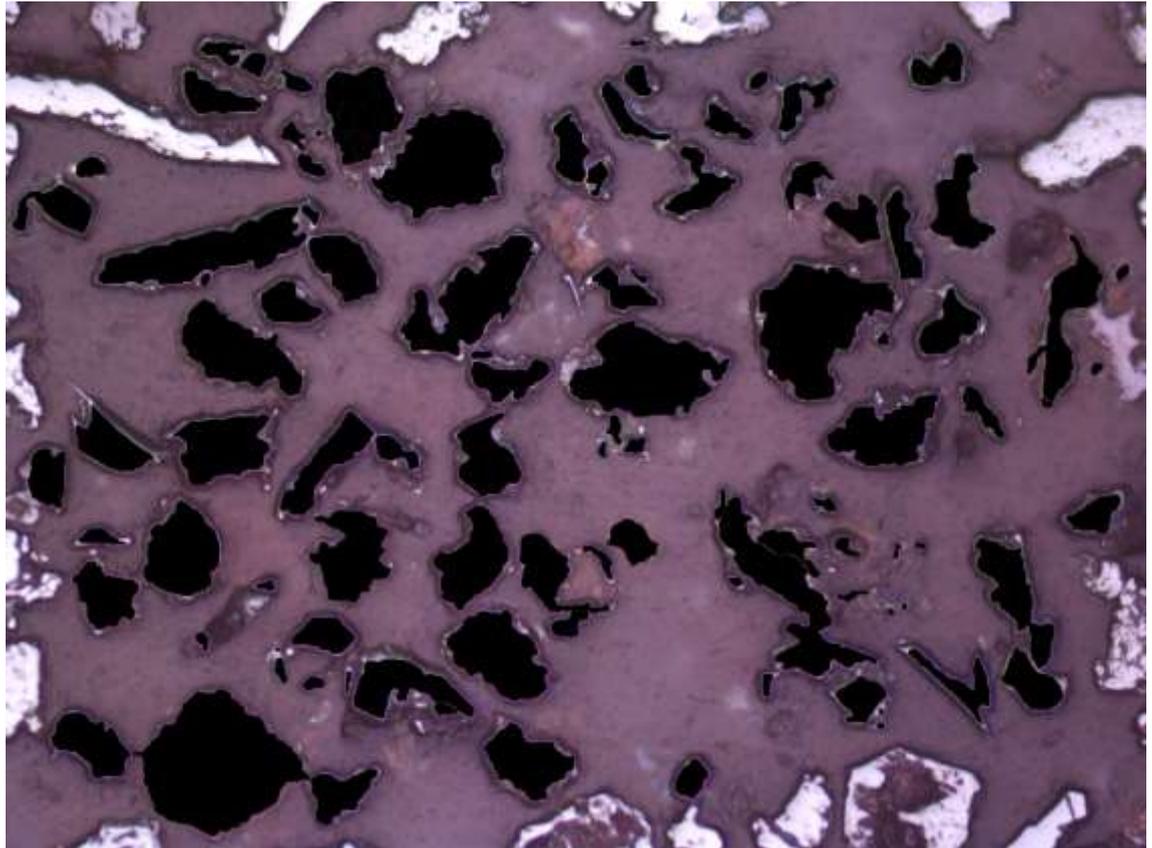


P2-5

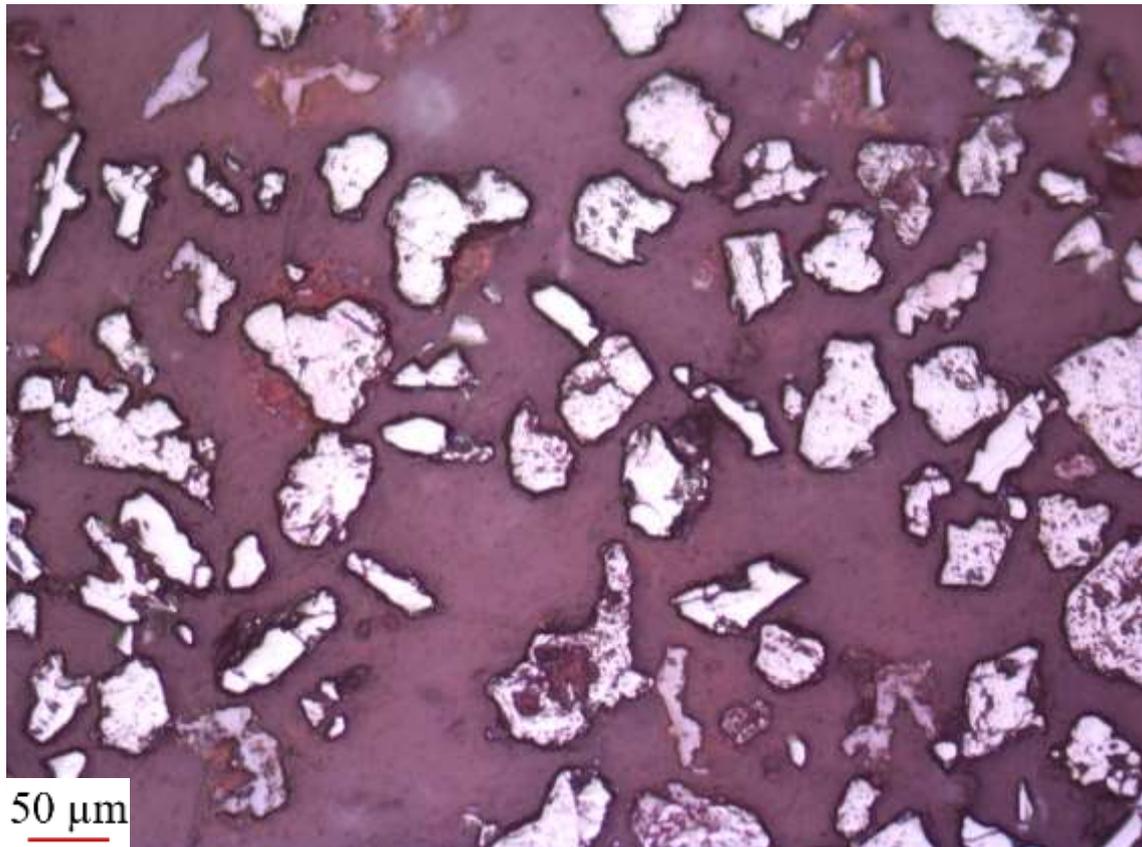


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	92	13
Área dos grãos (μm ²)	1031761	14692

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	87,619%	12,381%
Determinação de áreas	98,595%	1,405%

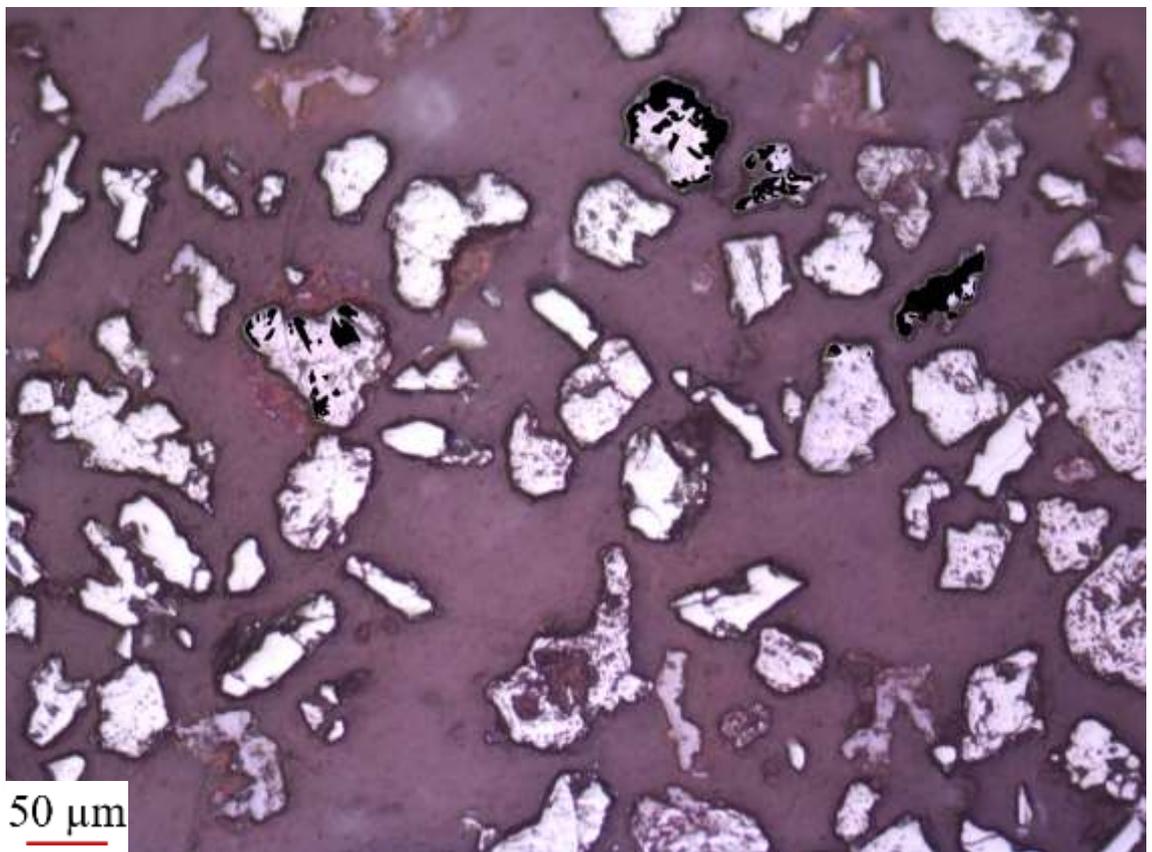
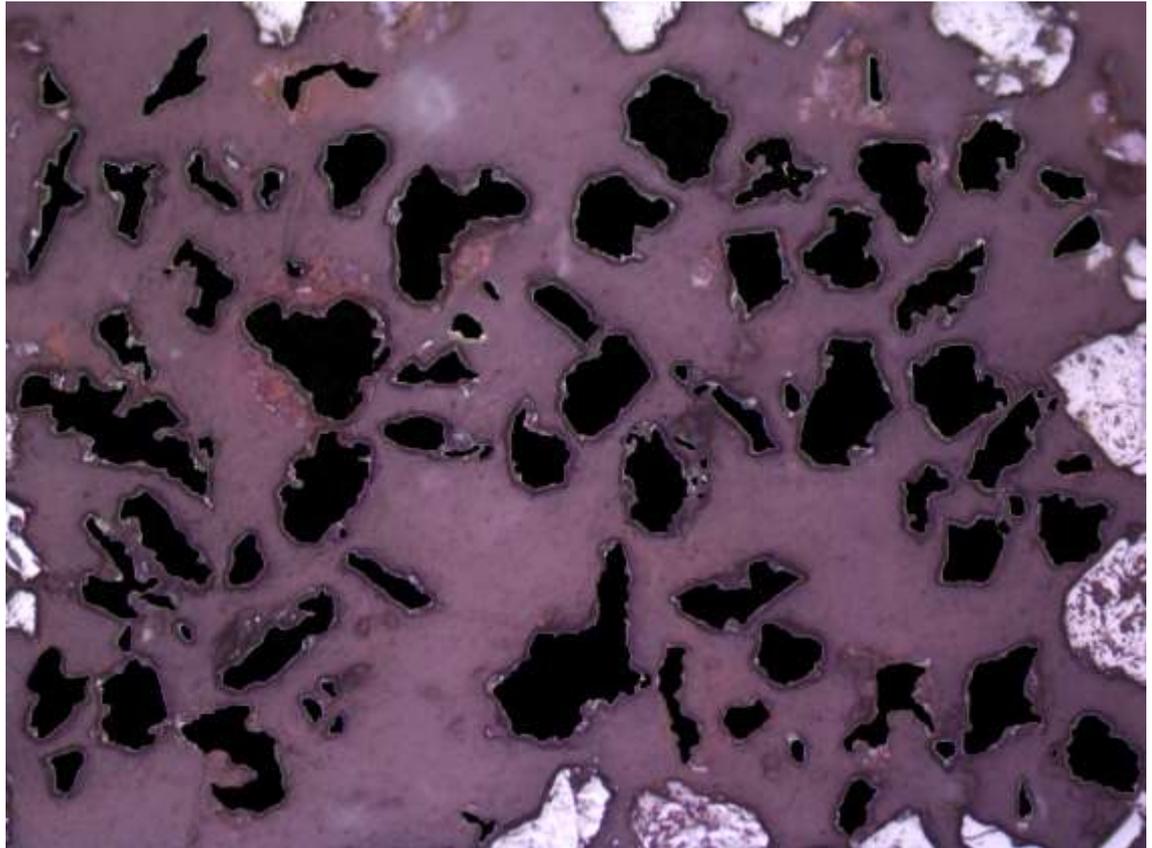


P2-6

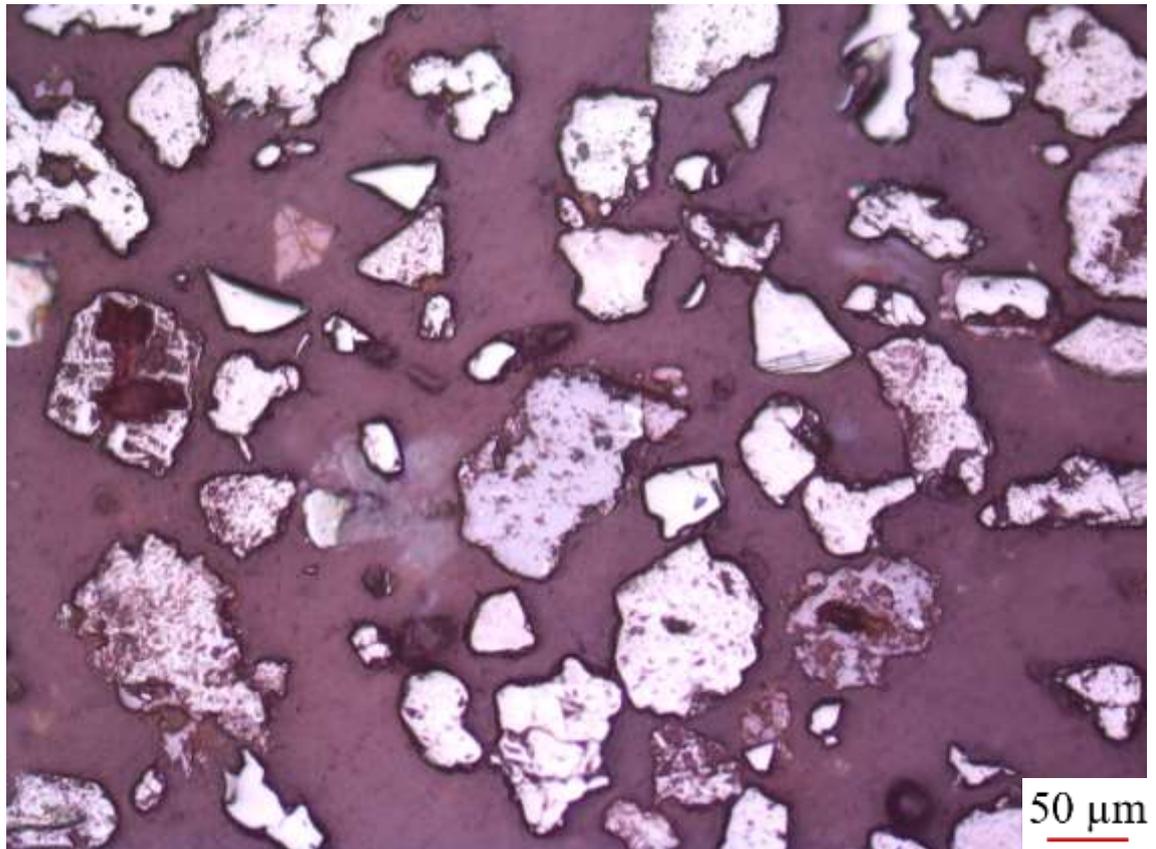


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	88	39
Área dos grãos (μm ²)	1019622	50627

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	69,291%	30,709%
Determinação de áreas	95,270%	4,730%

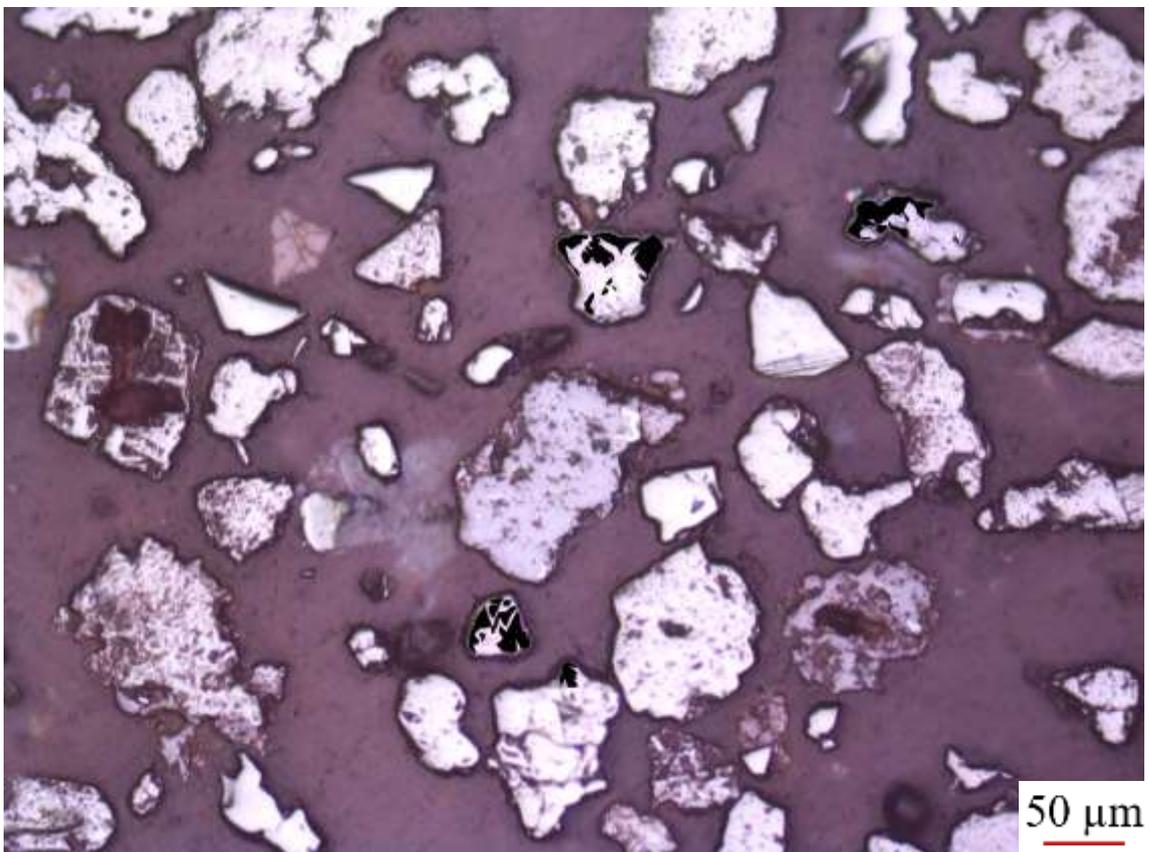
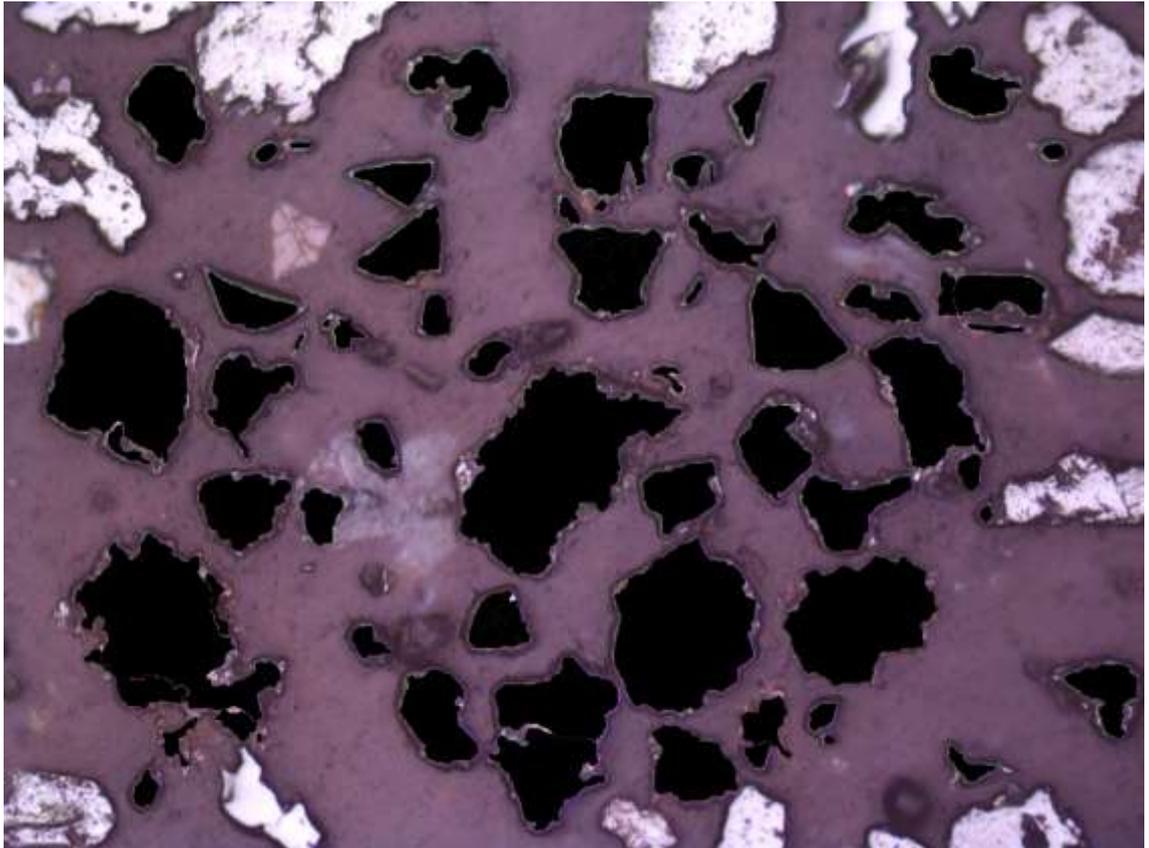


P2-7

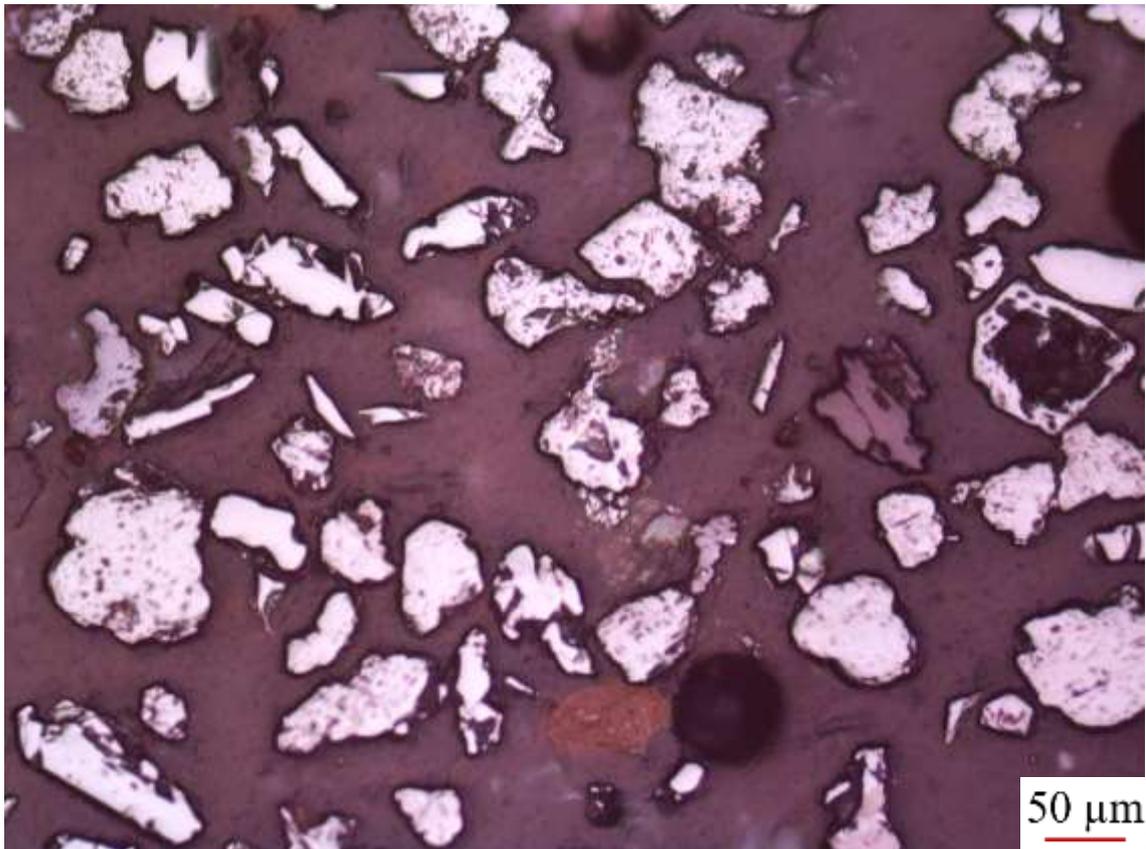


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	58	18
Área dos grãos (μm ²)	1126579	30444

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	76,316%	23,684%
Determinação de áreas	97,367%	2,633%

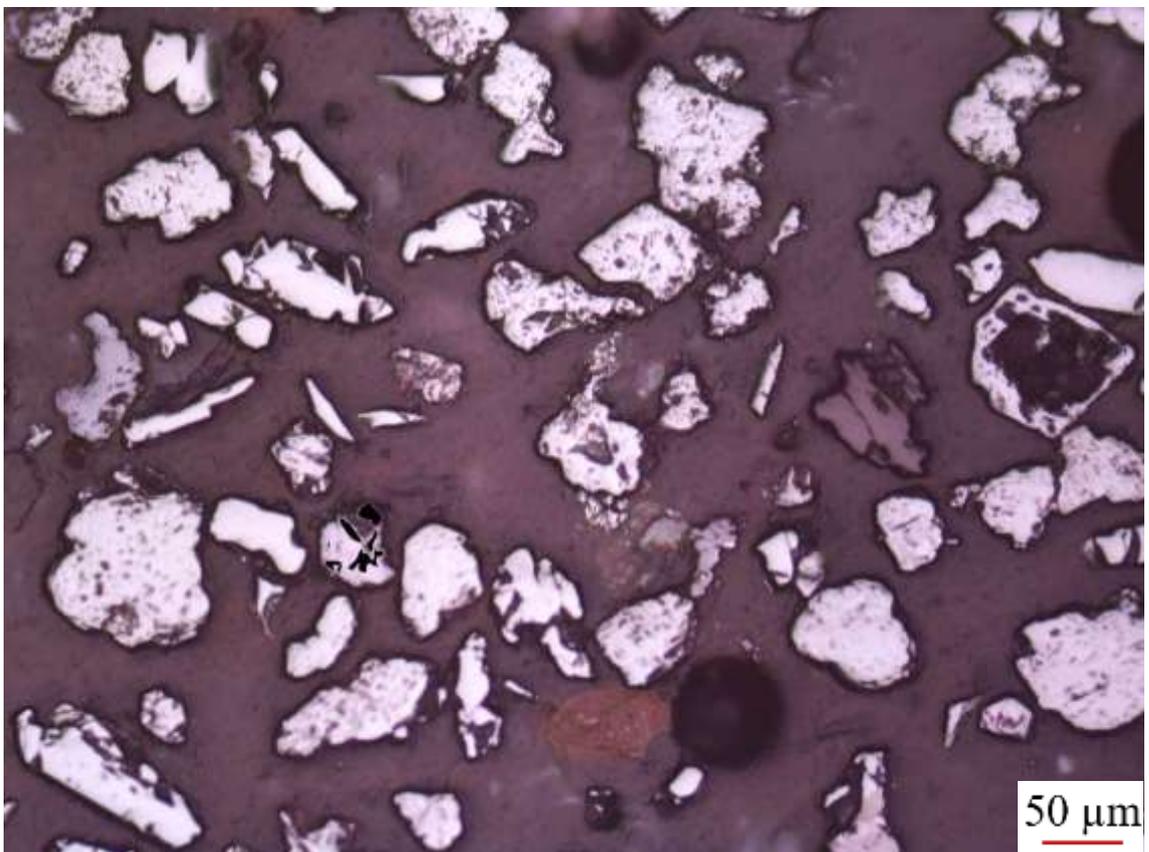
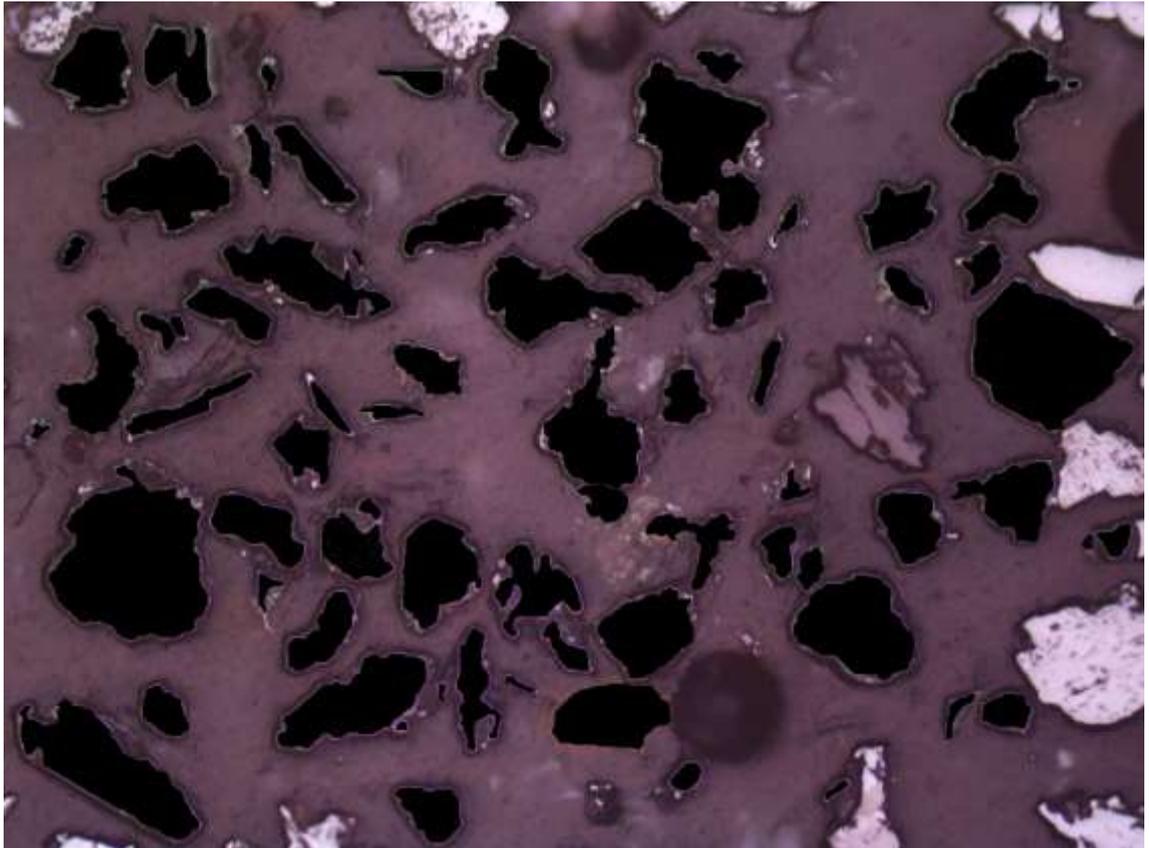


P2-8

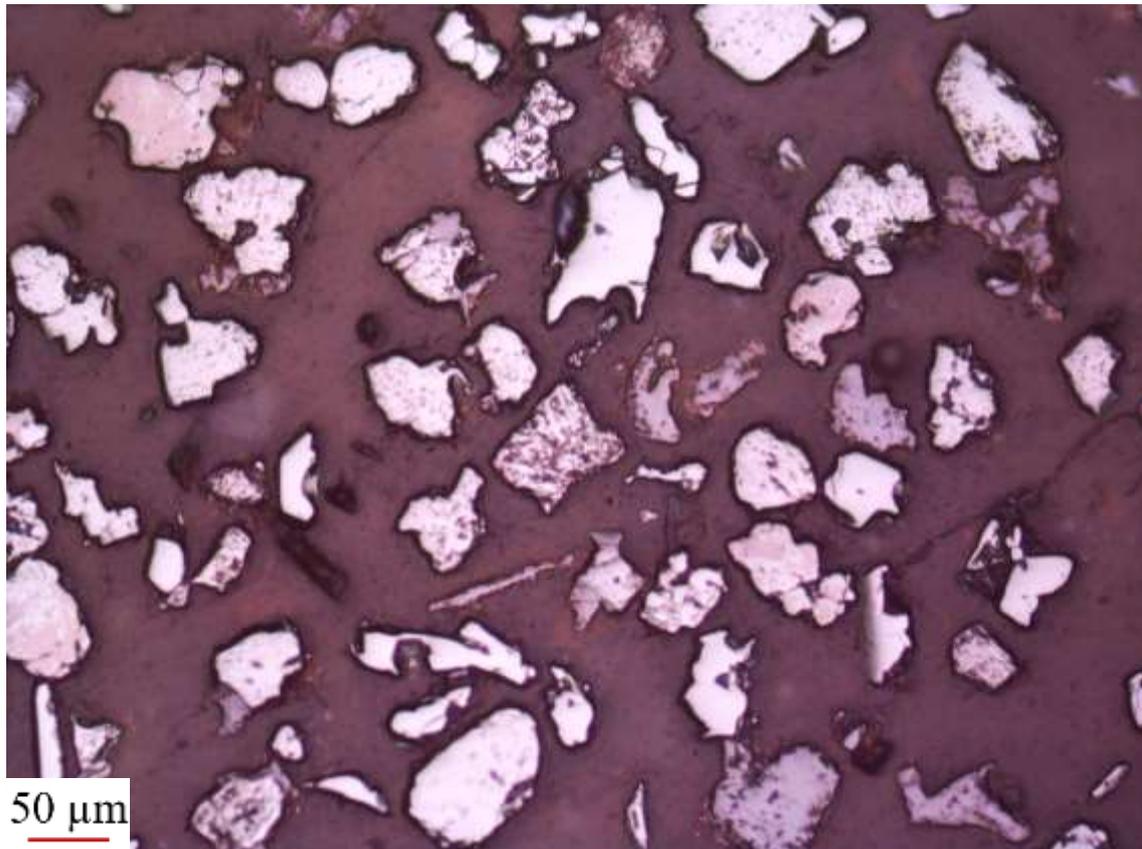


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	69	7
Área dos grãos (µm ²)	1161730	5175

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	90,789%	9,211%
Determinação de áreas	99,558%	0,442%

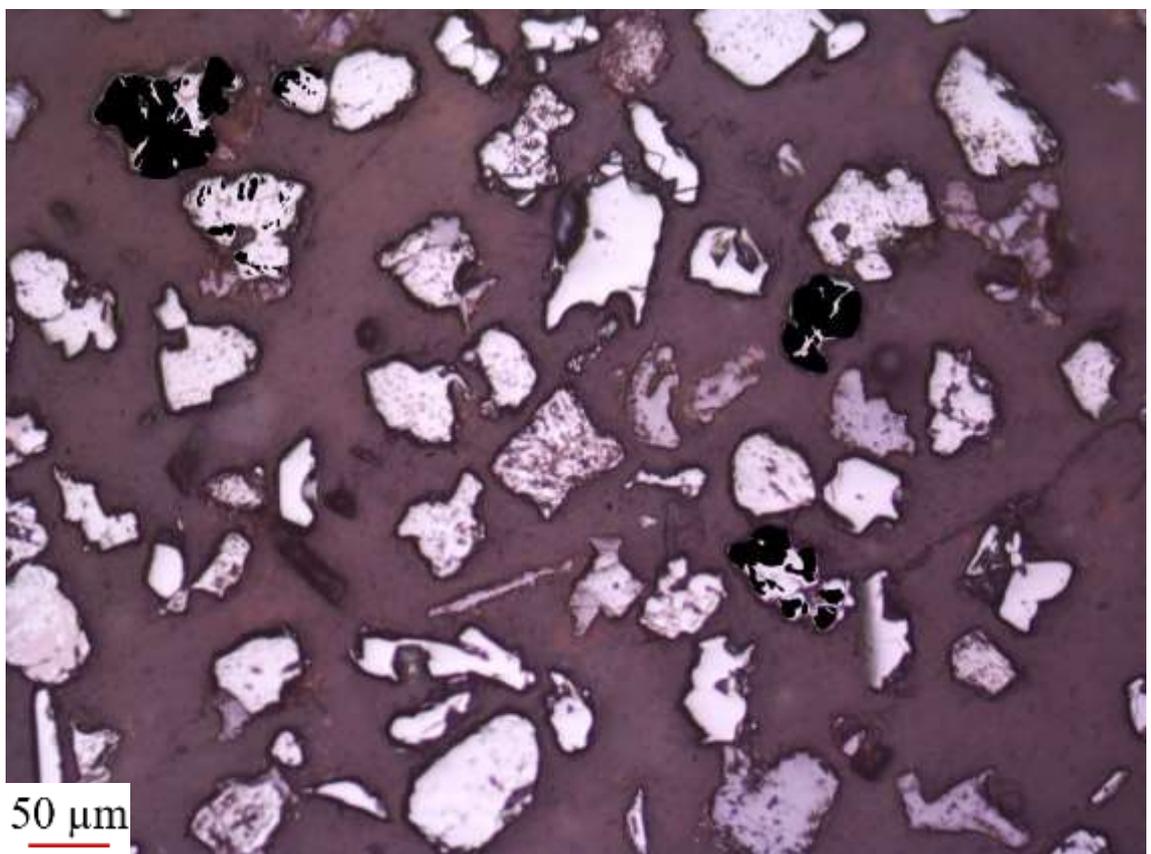
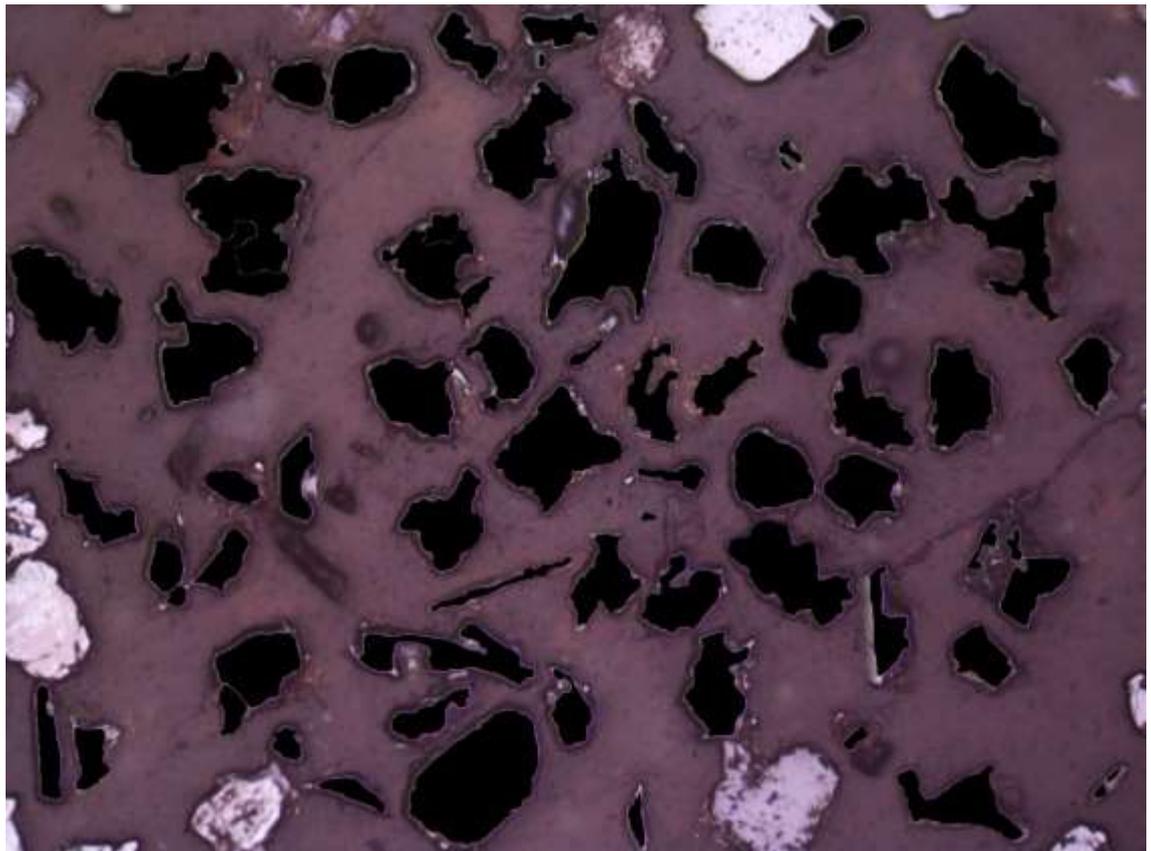


P2-9

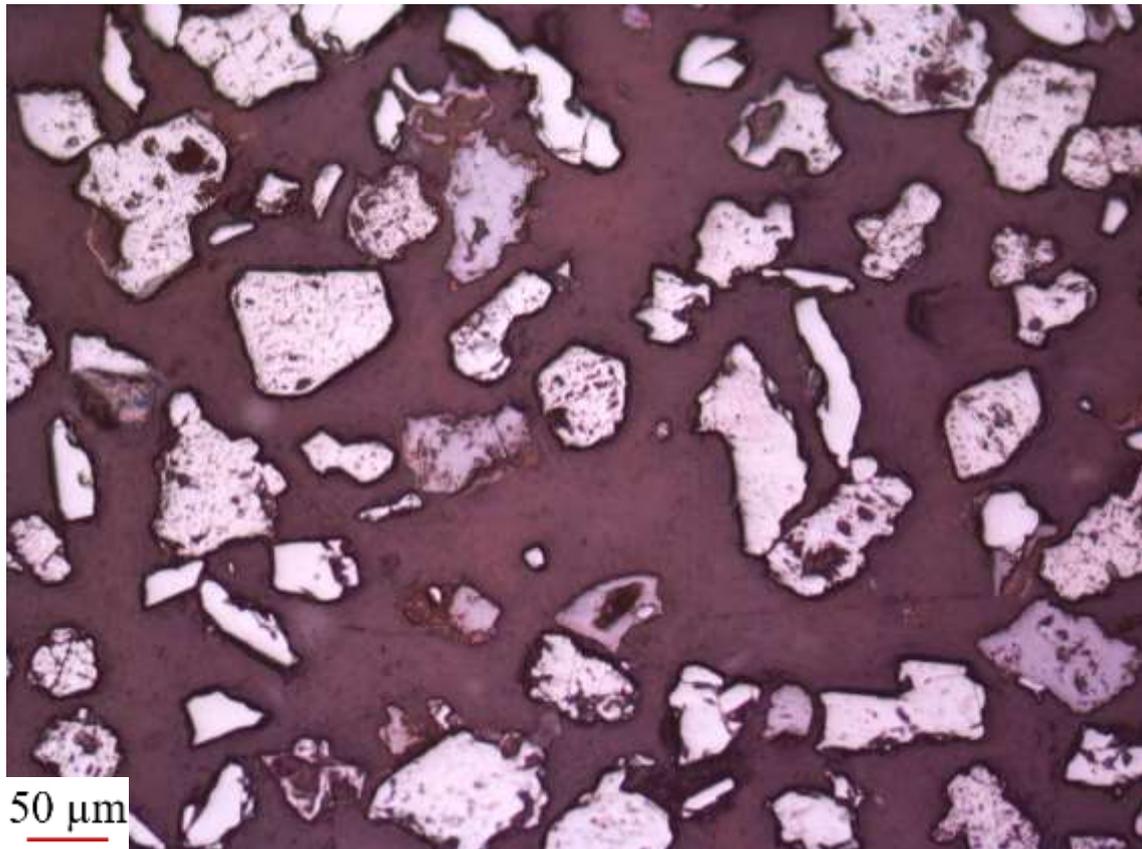


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	68	45
Área dos grãos (μm^2)	1107996	89293

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	60,177%	39,823%
Determinação de áreas	92,542%	7,458%

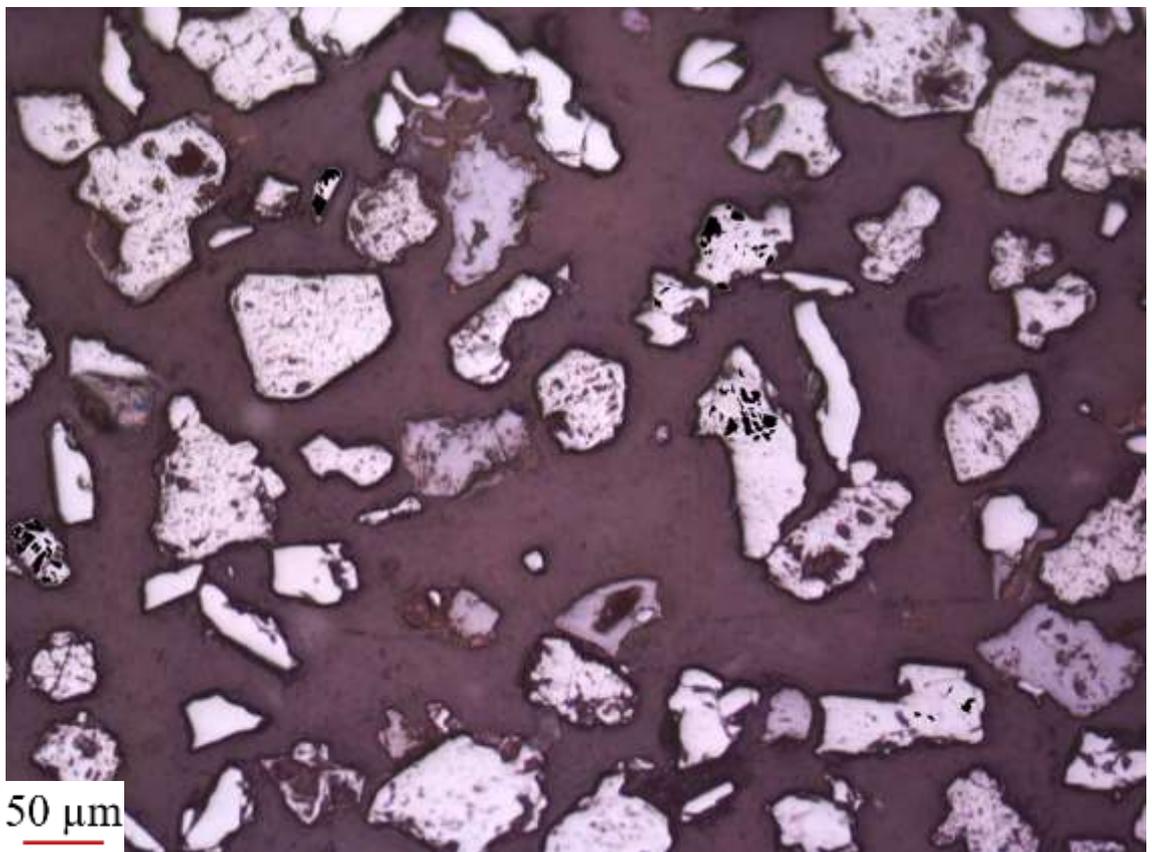
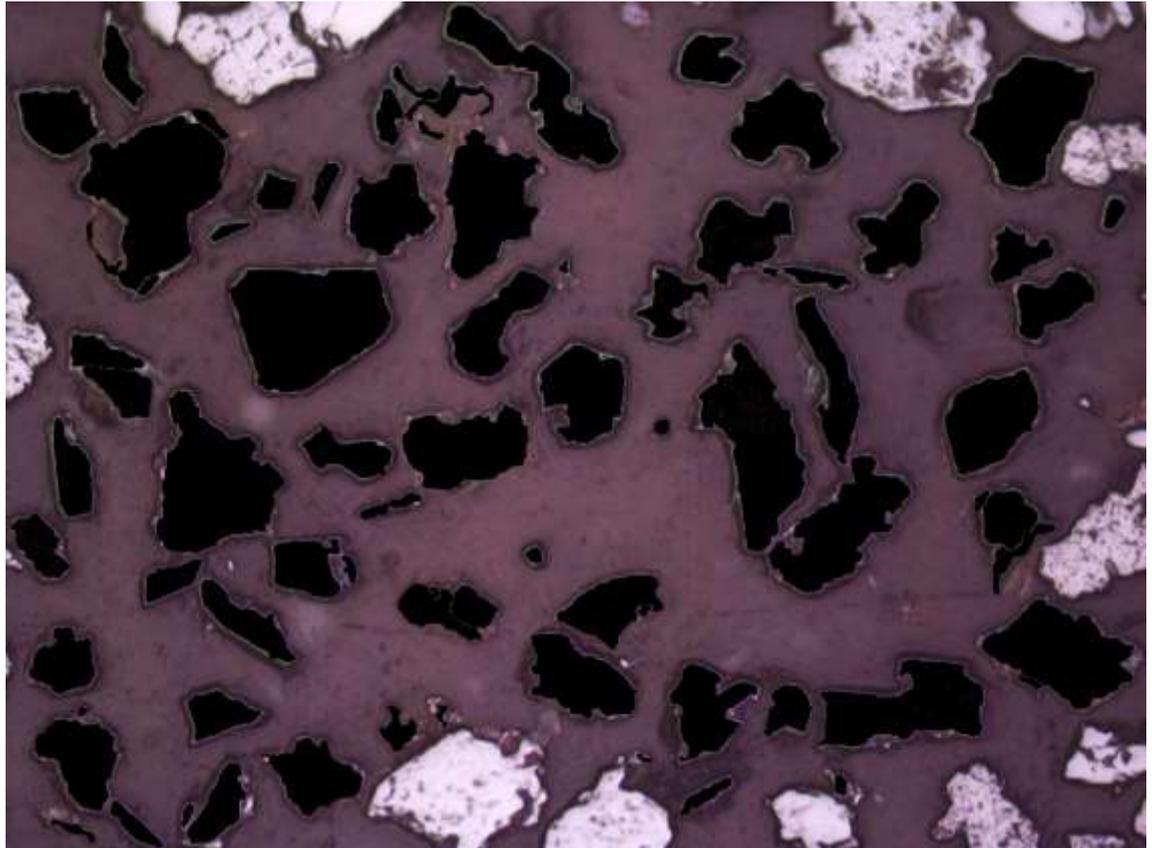


P2-10

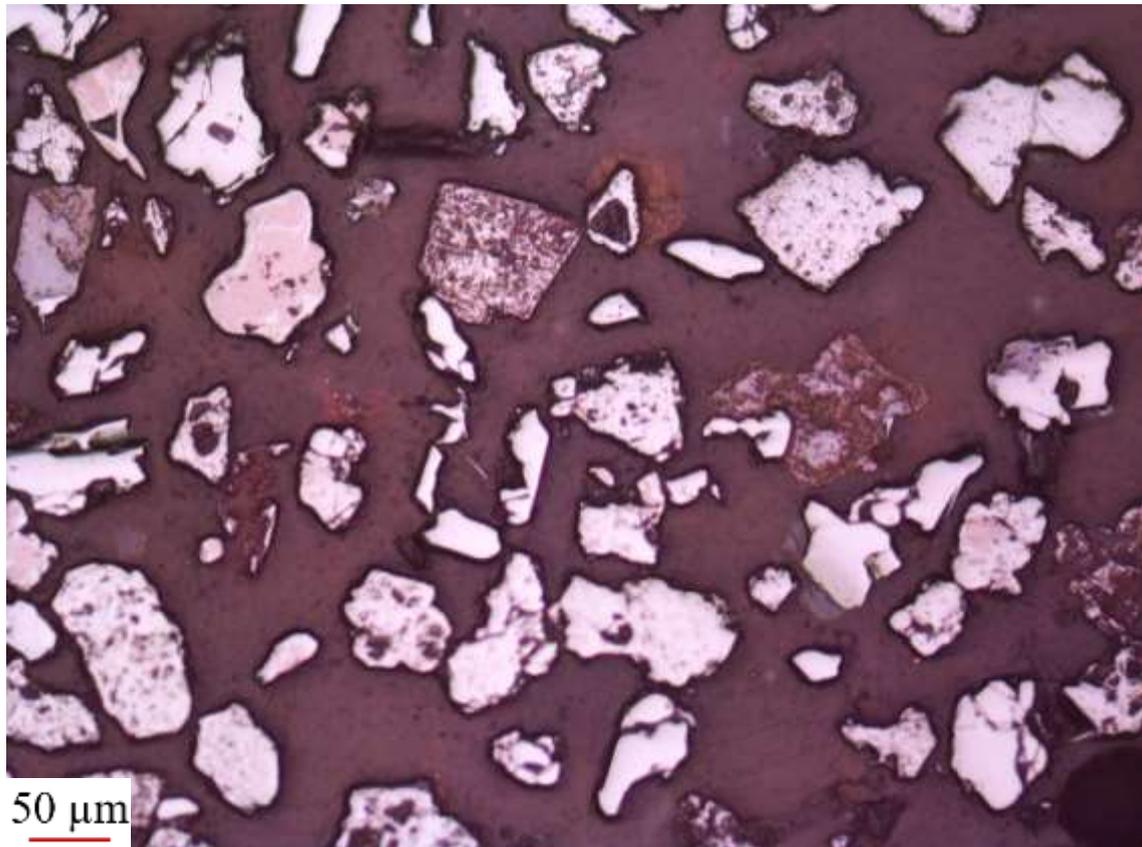


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	70	62
Área dos grãos (µm ²)	1260070	18154

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	53,030%	46,970%
Determinação de áreas	98,579%	1,421%

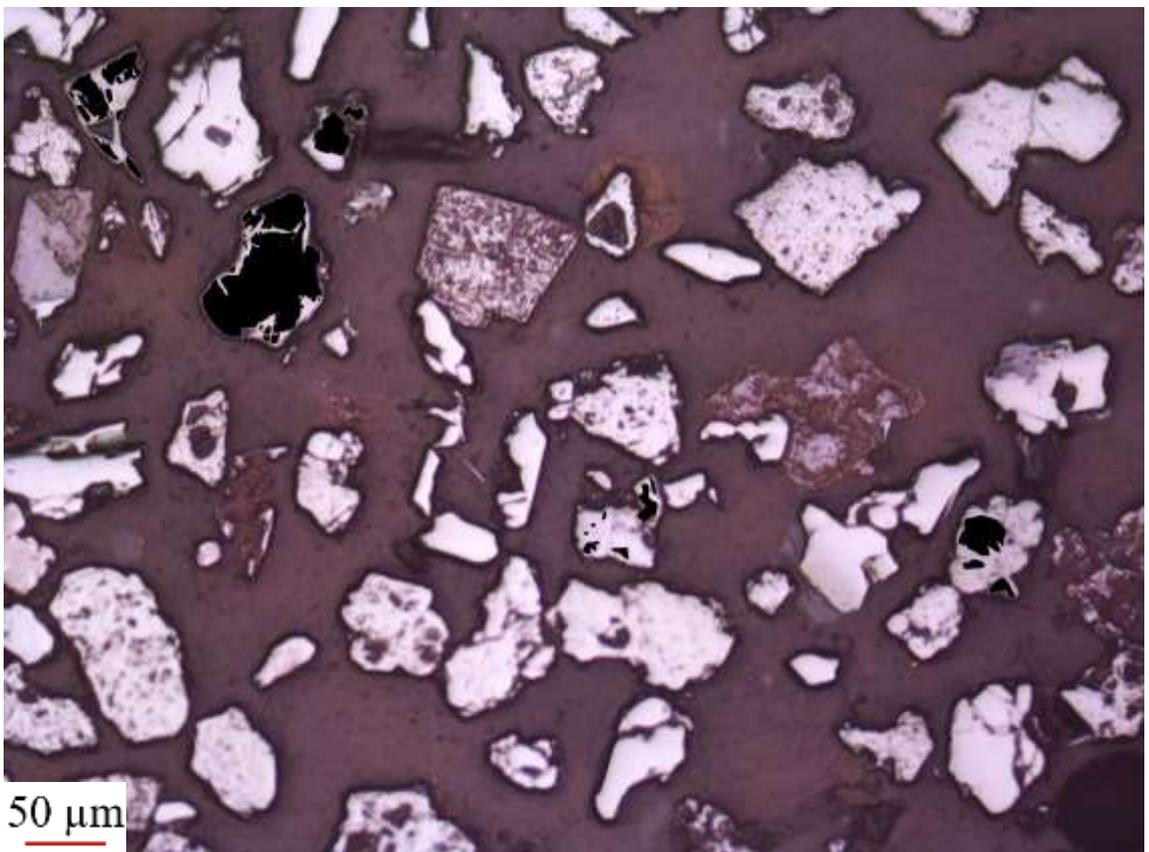
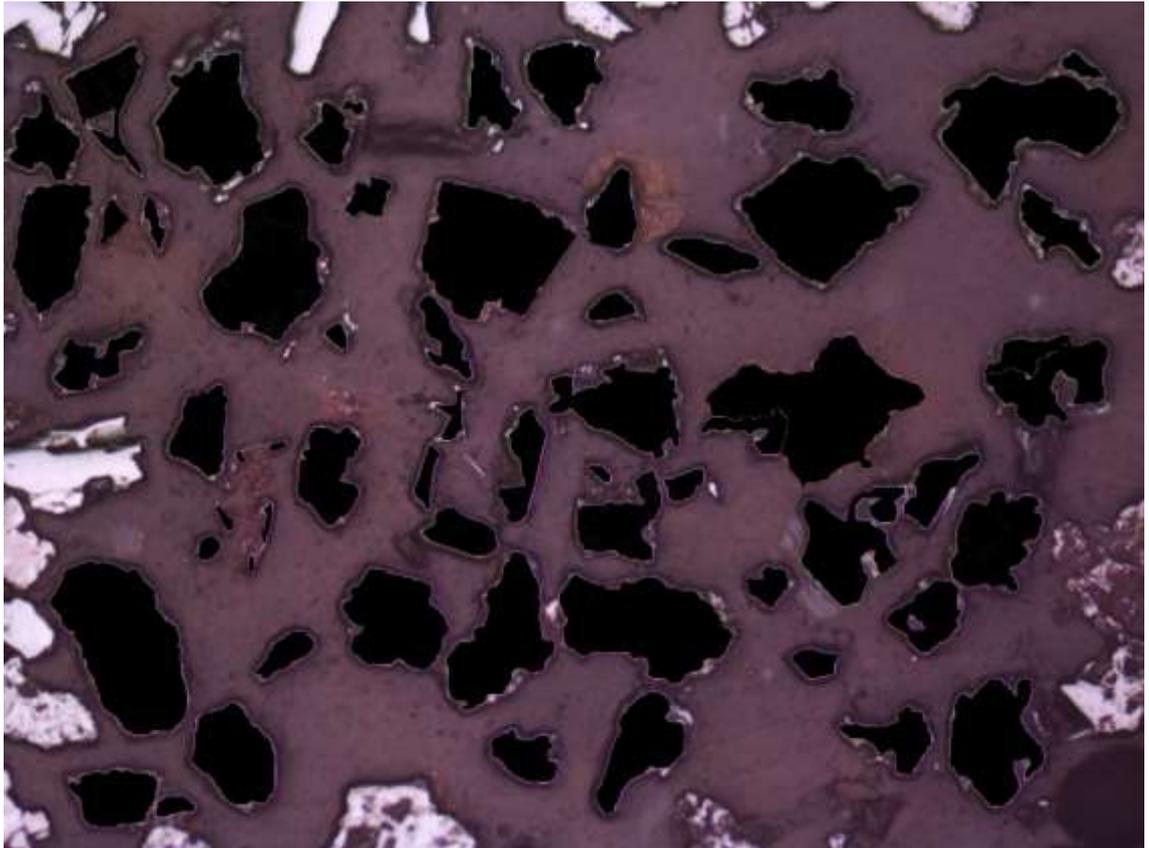


P2-11

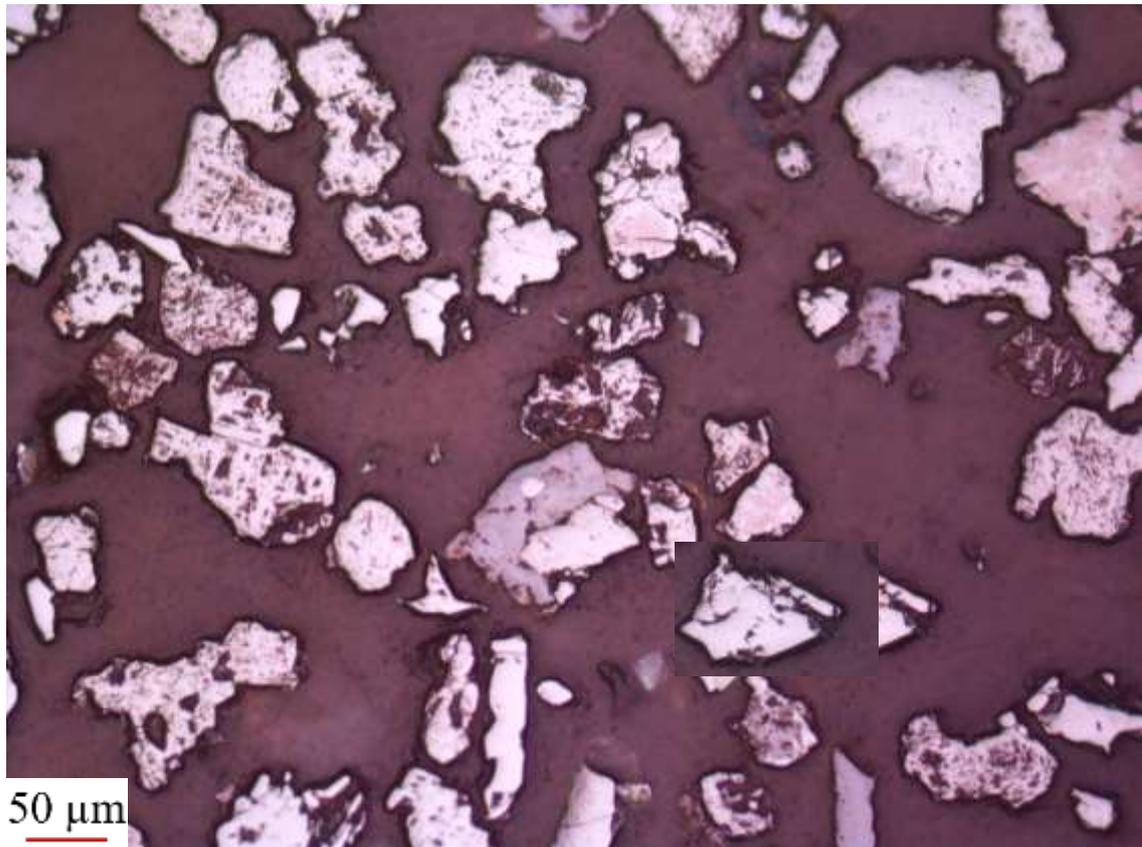


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	61	32
Área dos grãos (µm ²)	1299505	82583

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	65,591%	34,409%
Determinação de áreas	94,024%	5,976%

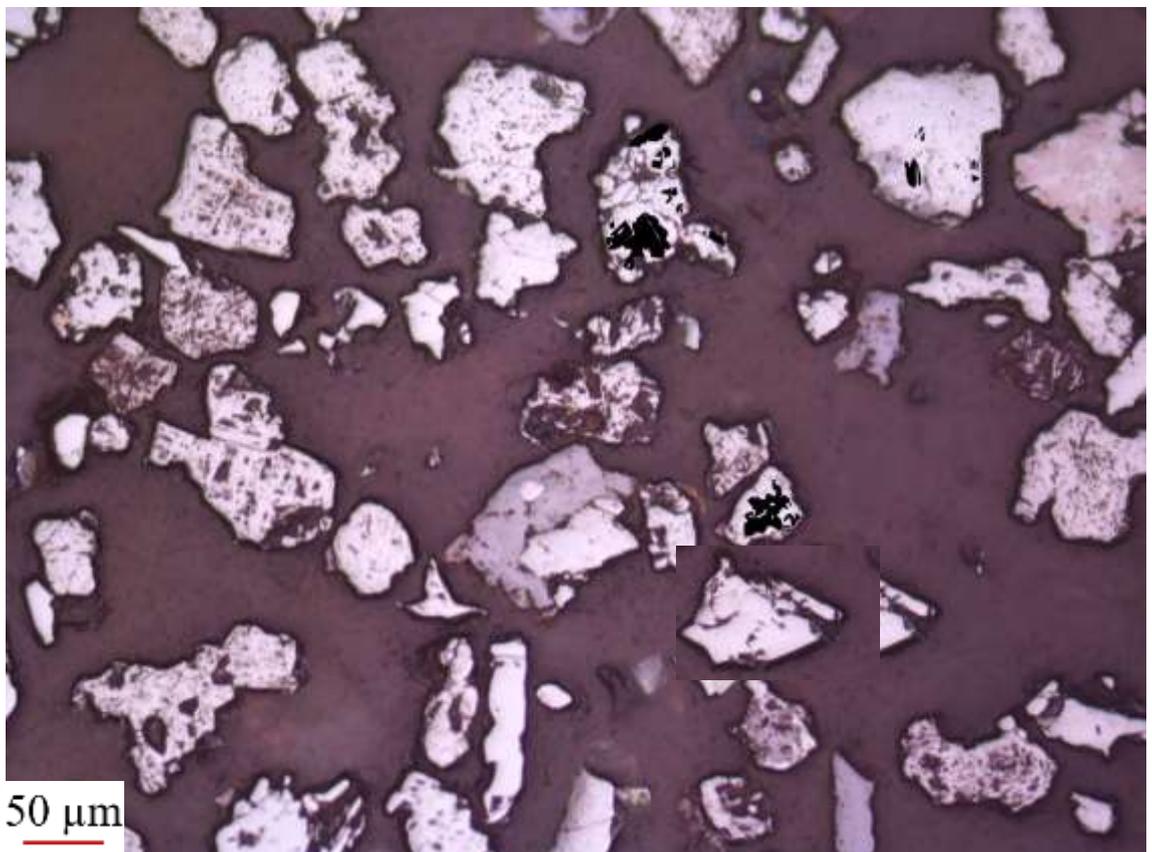
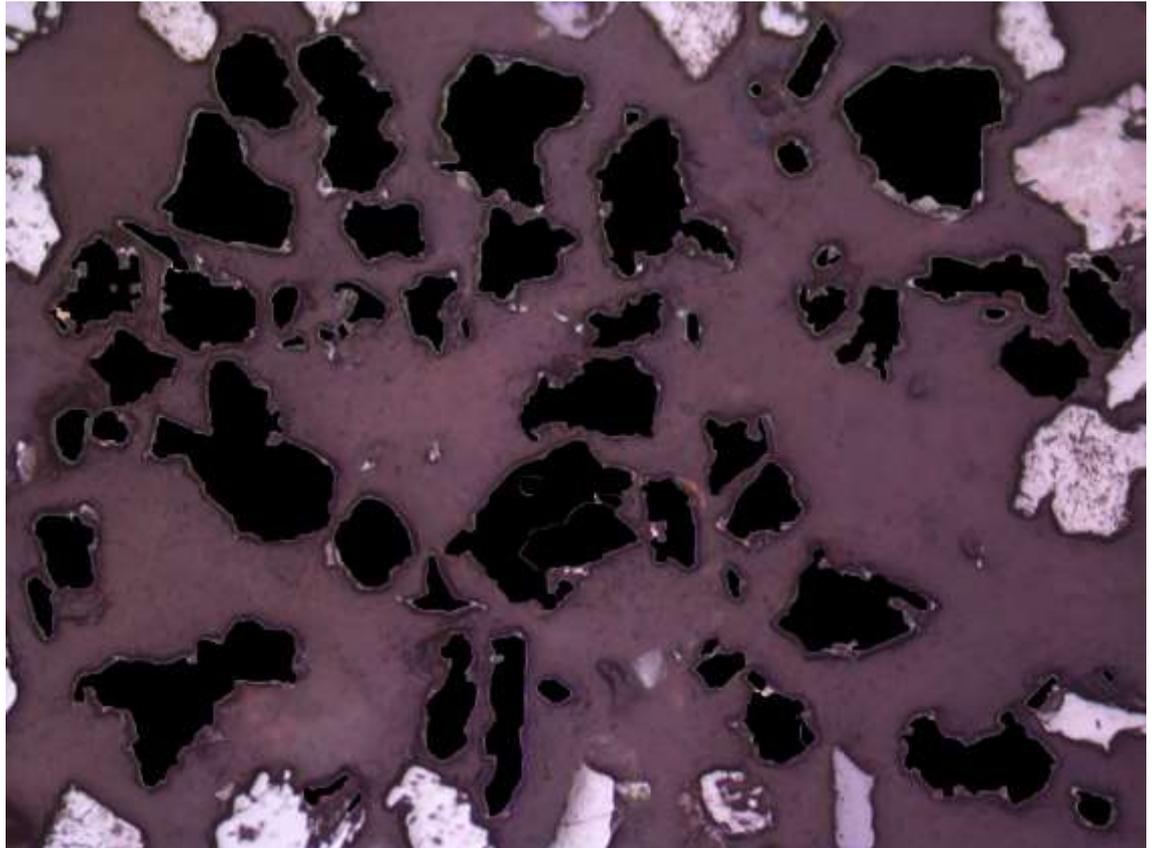


P2-12

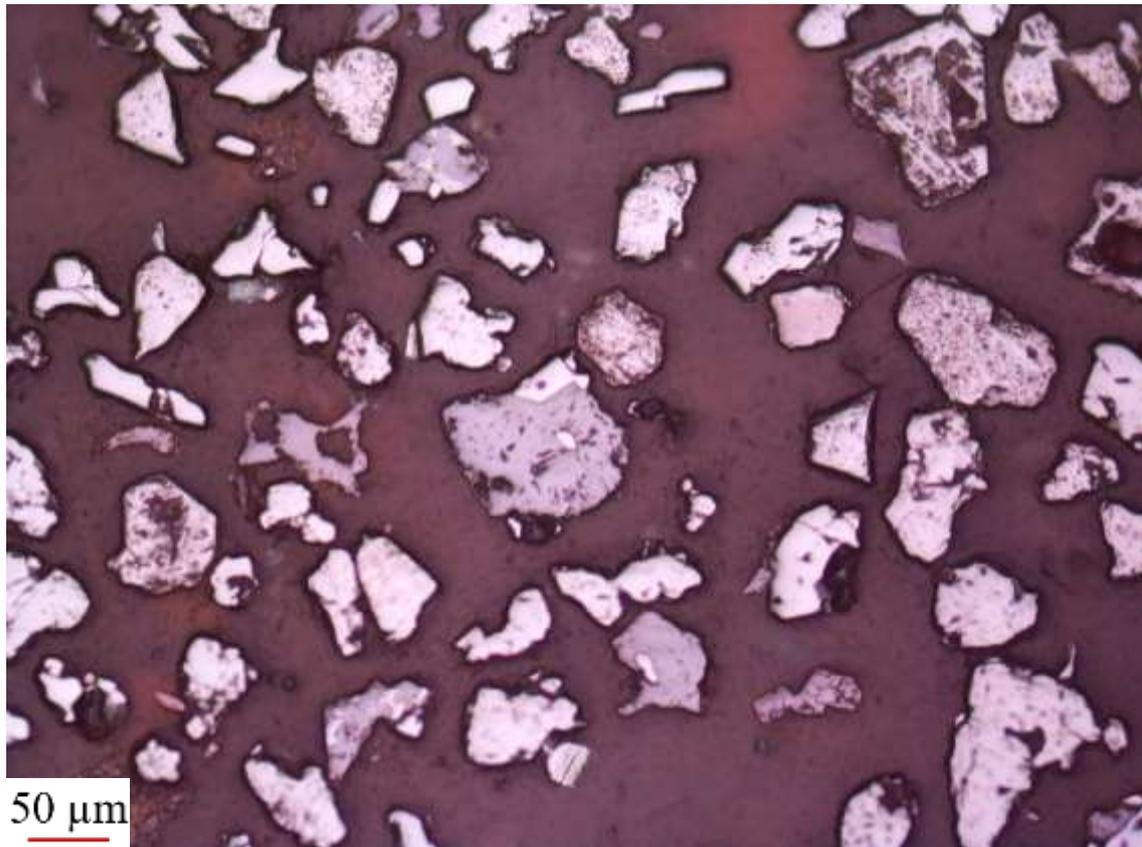


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	67	22
Área dos grãos (µm ²)	1193849	24047

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	75,281%	24,719%
Determinação de áreas	98,024%	1,976%

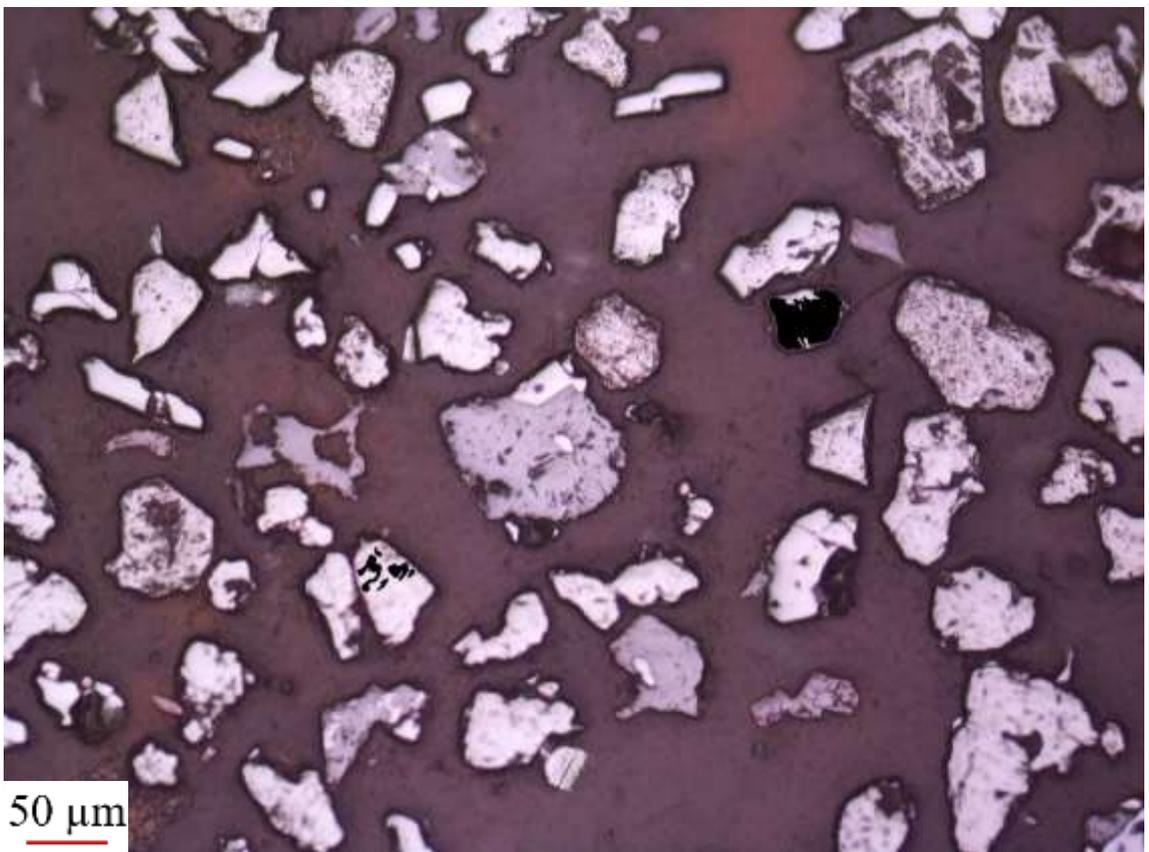
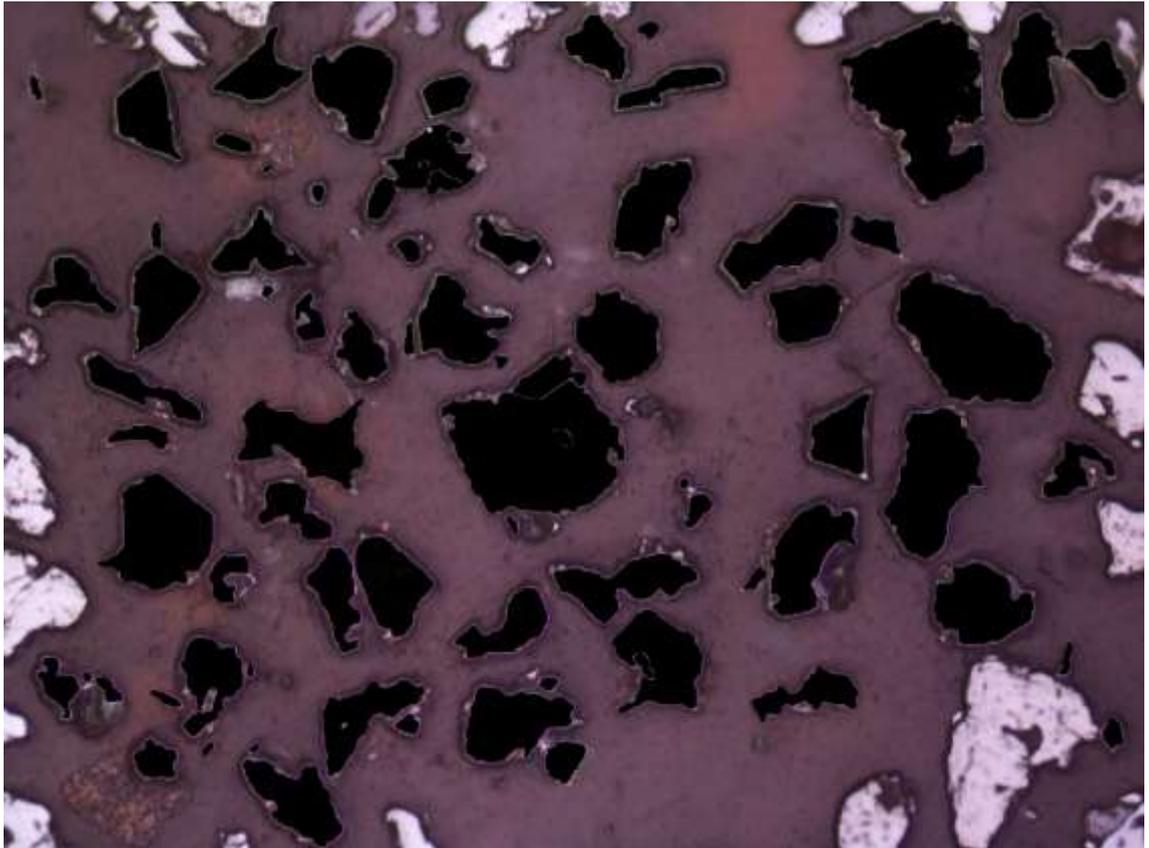


P2-13

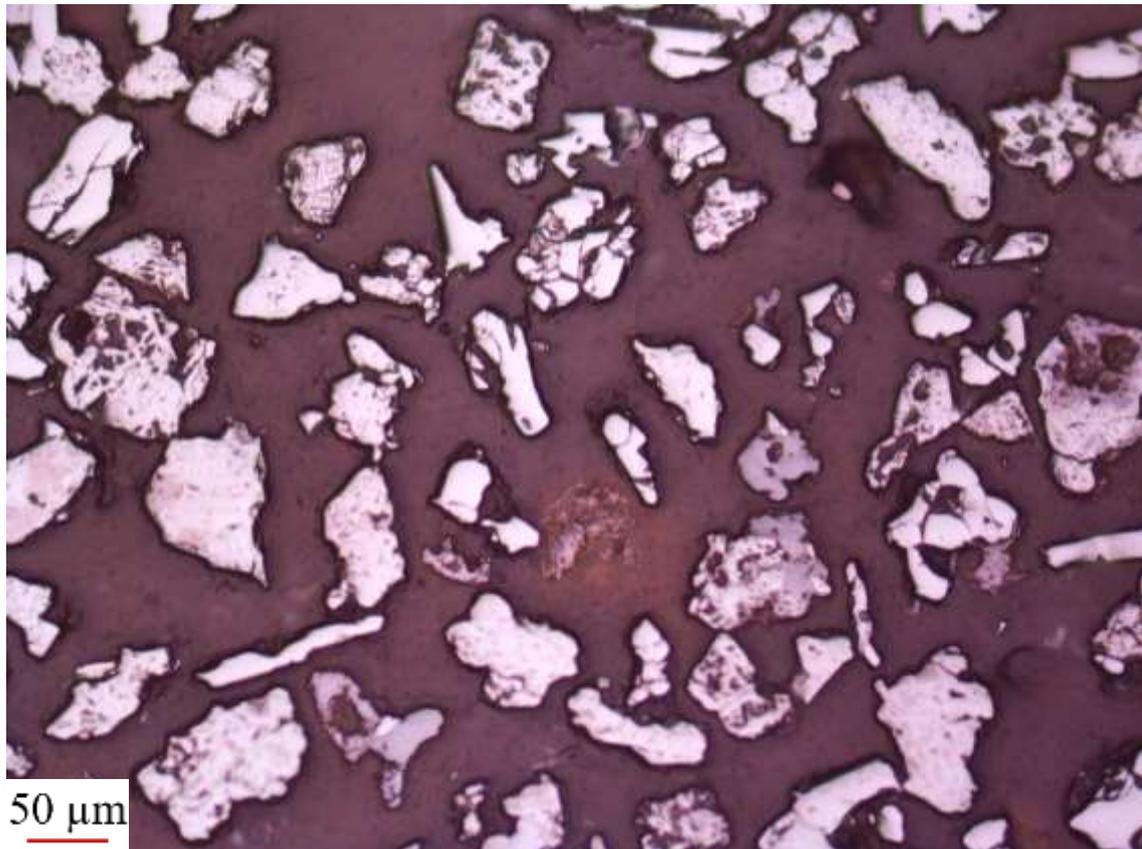


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	73	6
Área dos grãos (μm^2)	1093730	19353

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	92,405%	7,595%
Determinação de áreas	98,261%	1,739%

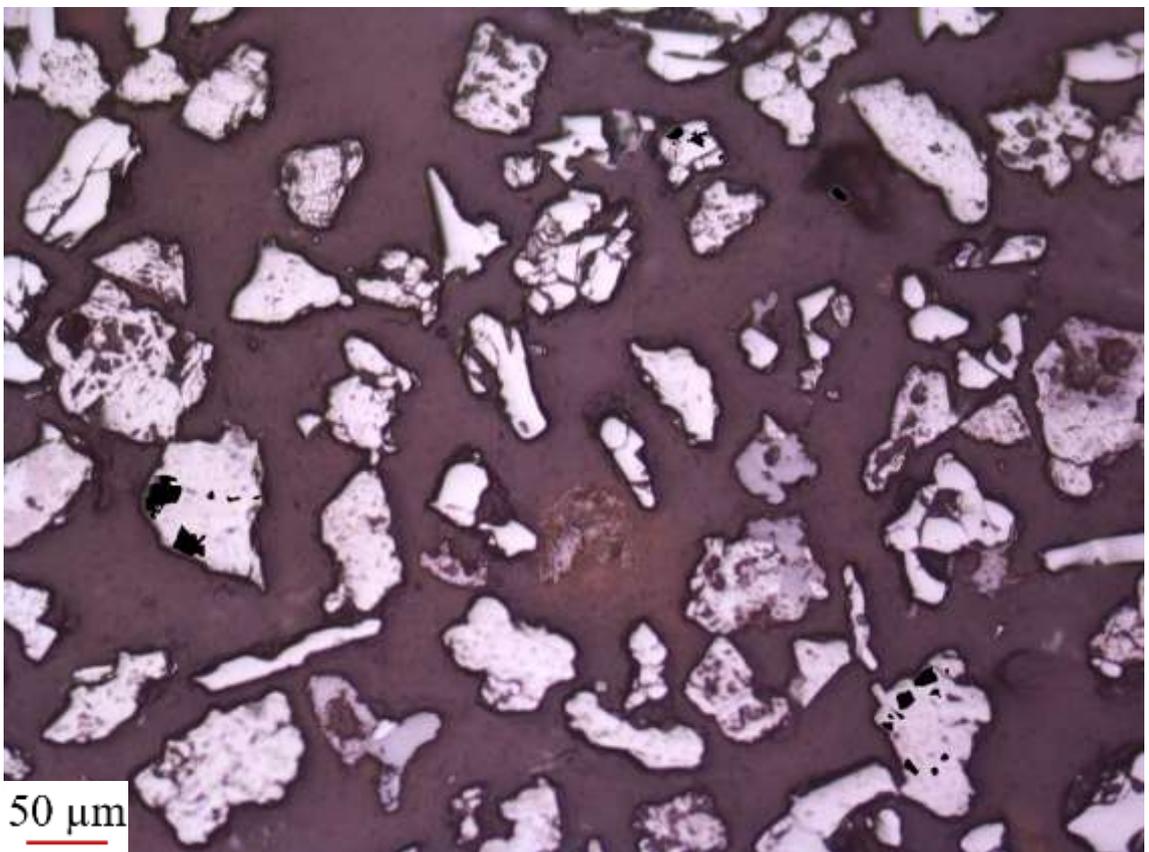
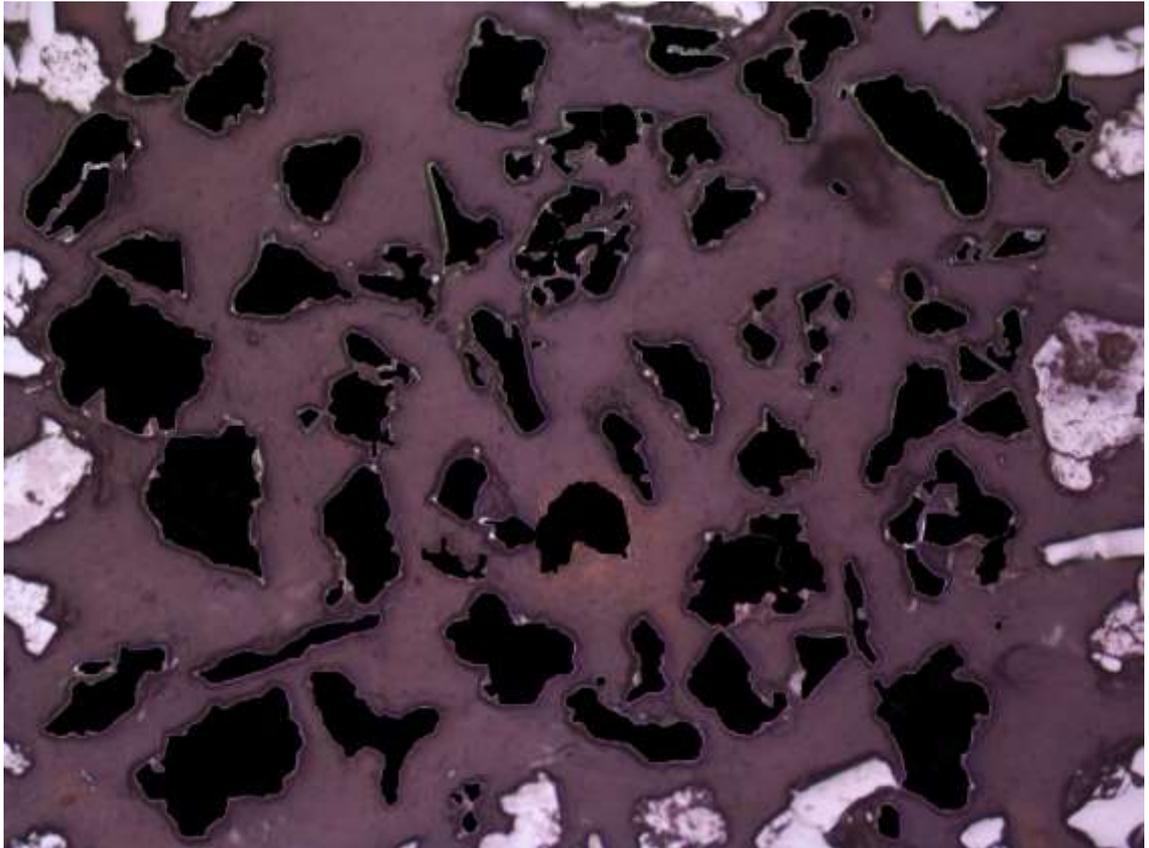


P2-14

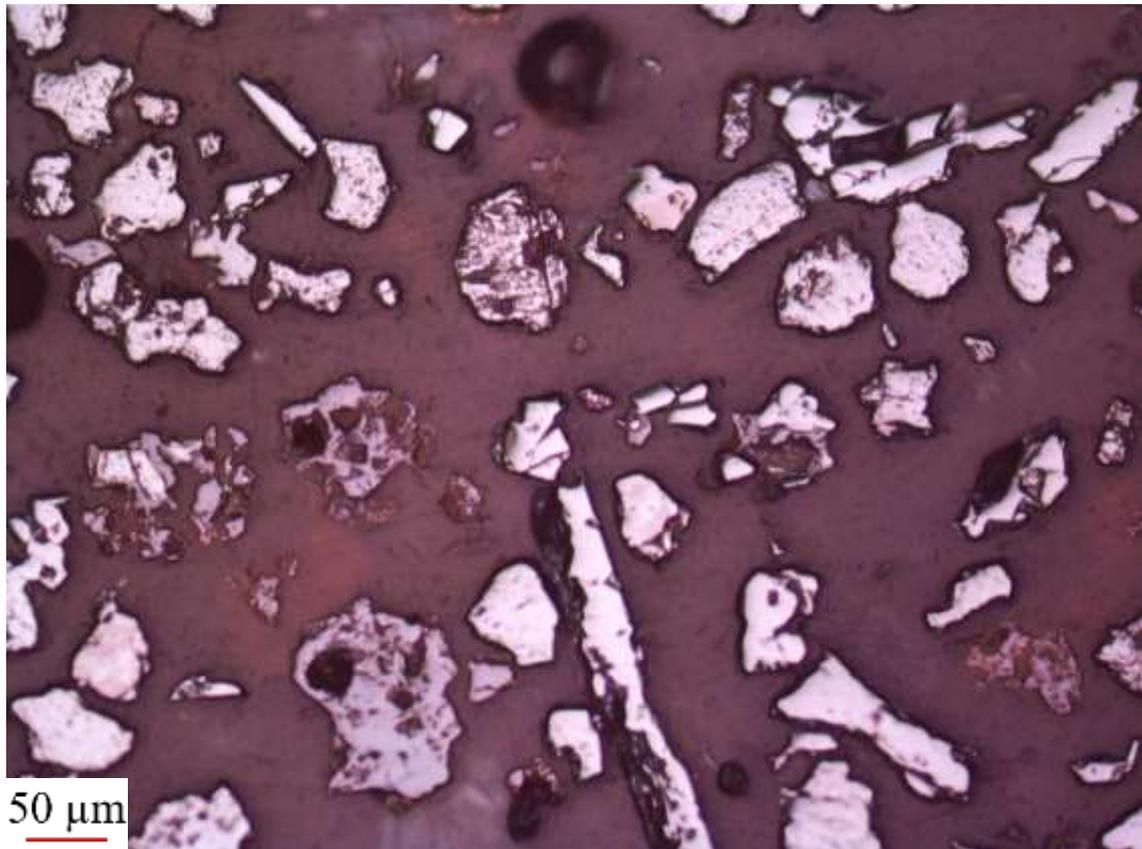


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	82	22
Área dos grãos (μm ²)	1227091	16140

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	78,846%	21,154%
Determinação de áreas	98,700%	1,300%

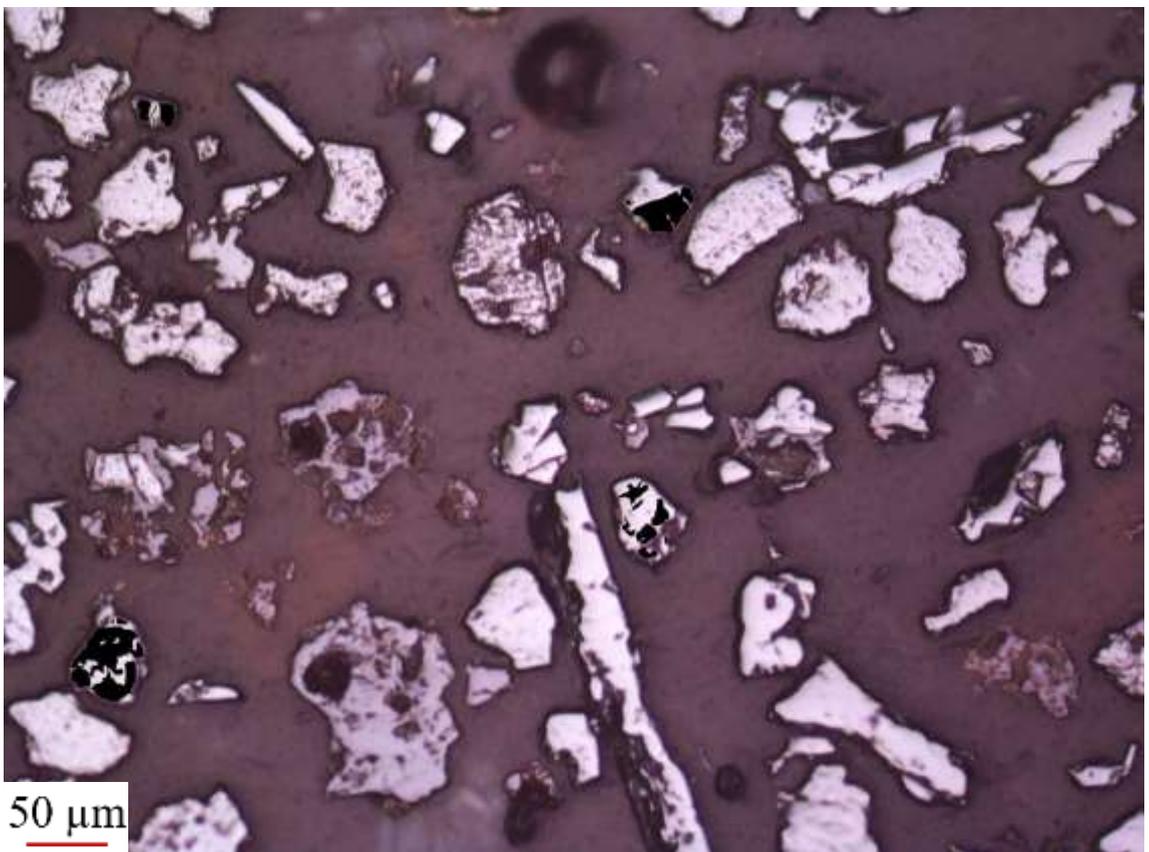
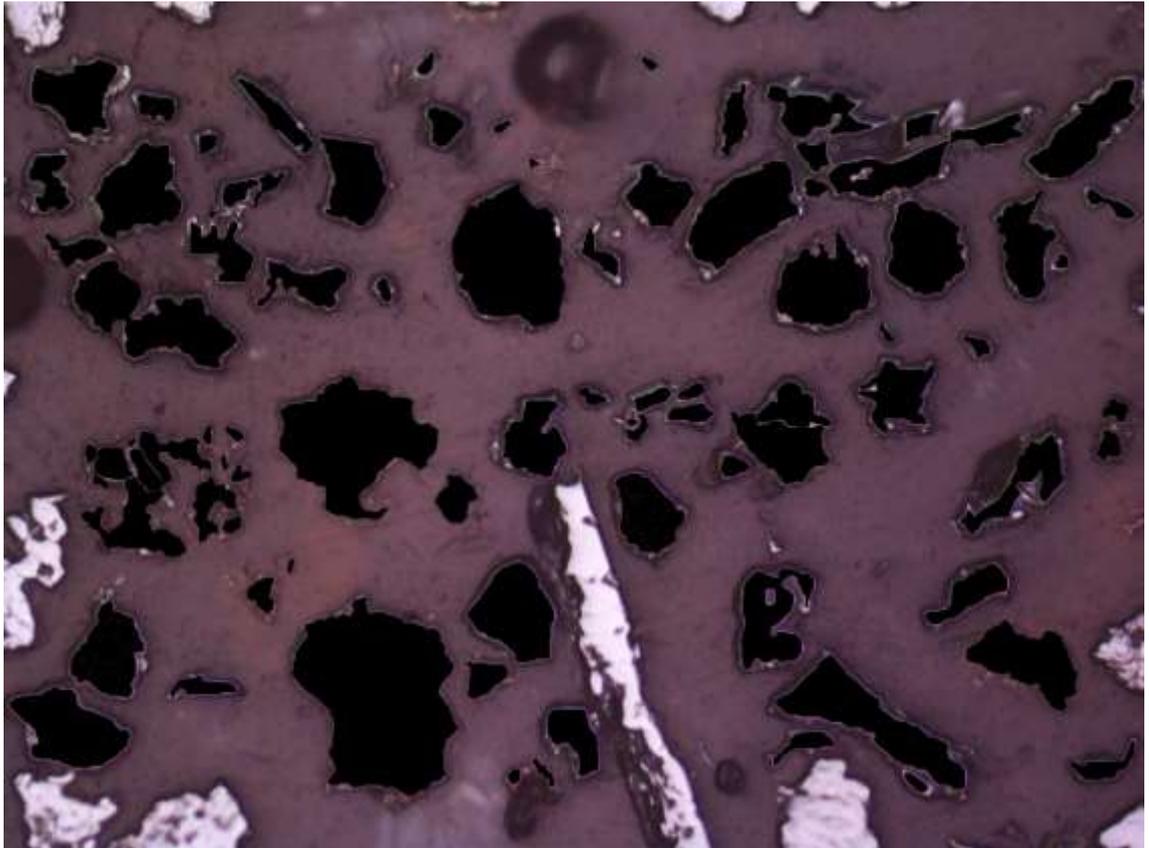


P2-15

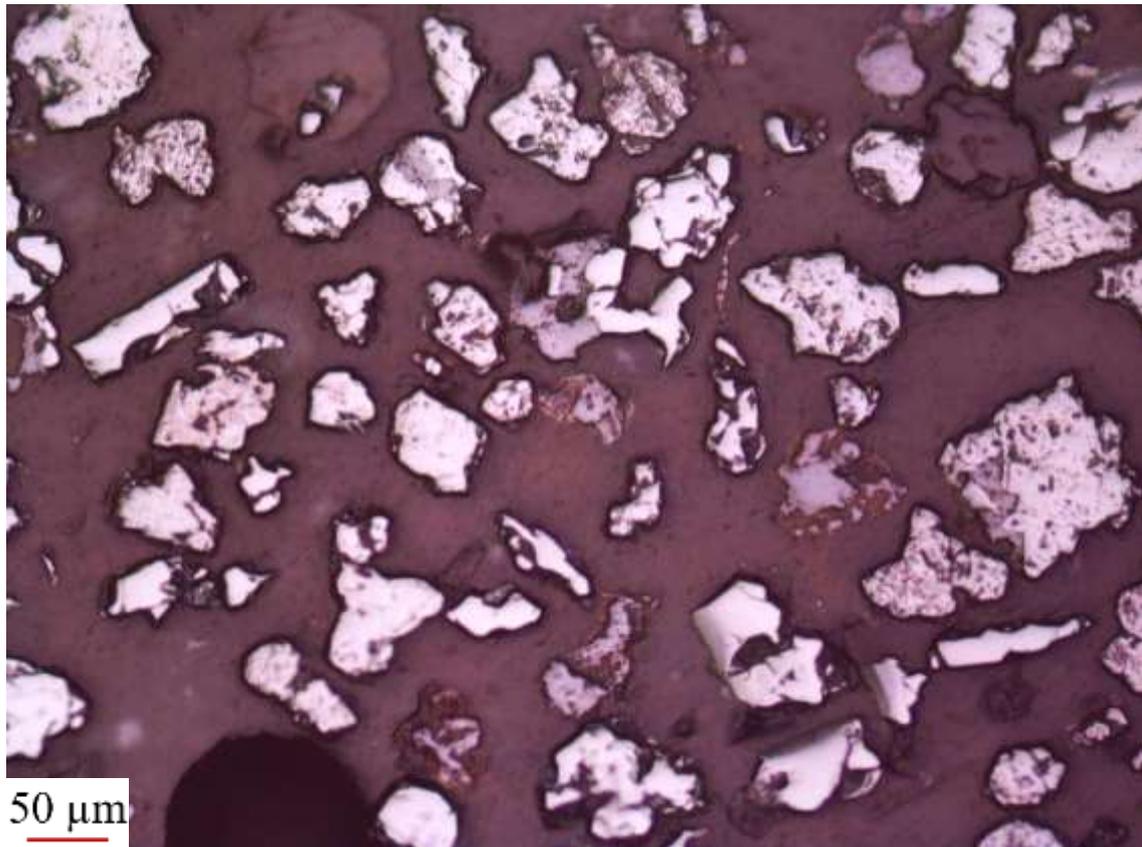


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	80	18
Área dos grãos (μm ²)	1020522	33243

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	81,633%	18,367%
Determinação de áreas	96,843%	3,157%

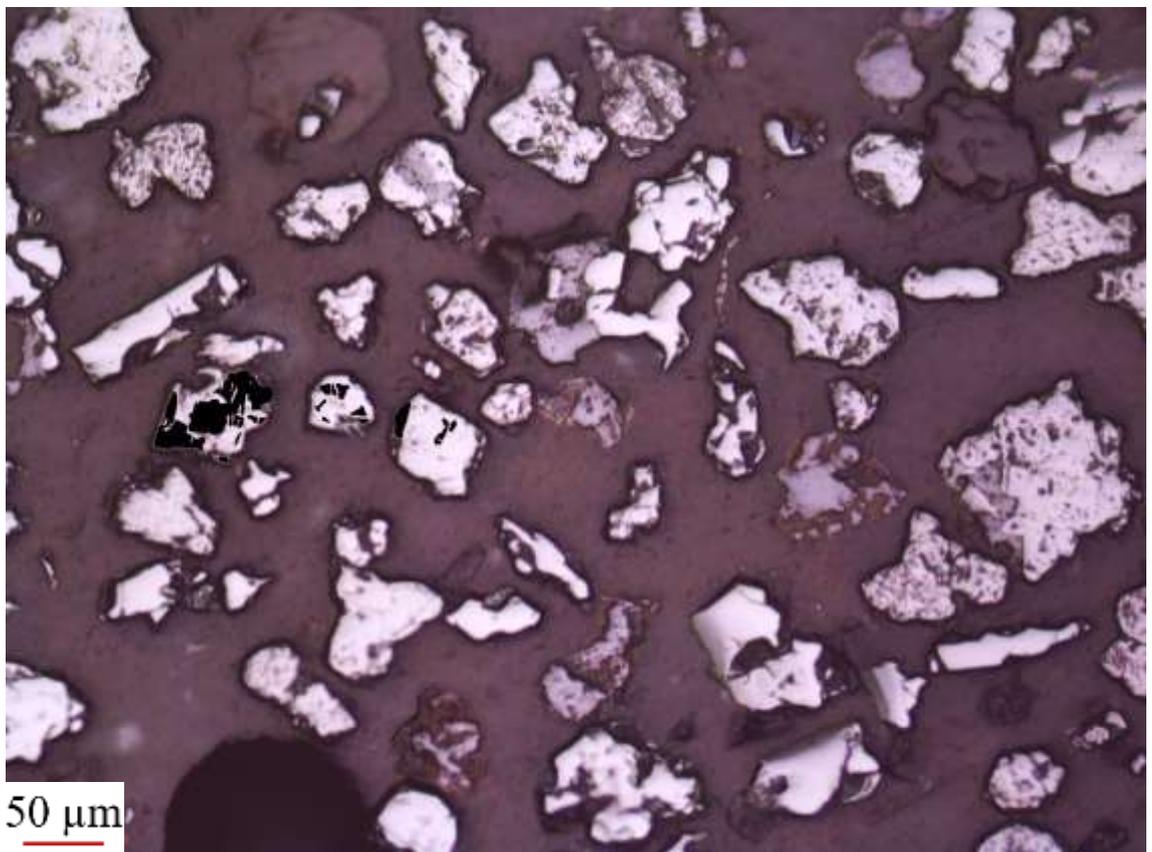
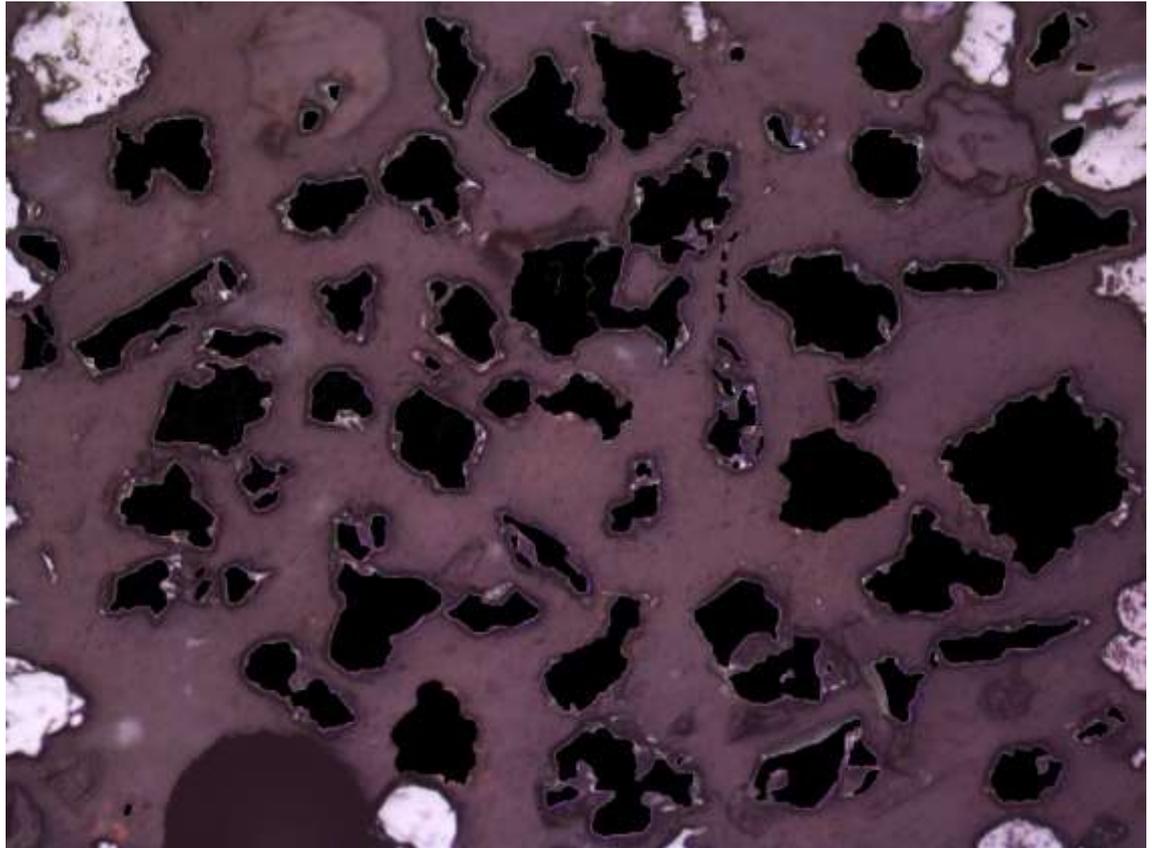


P2-16

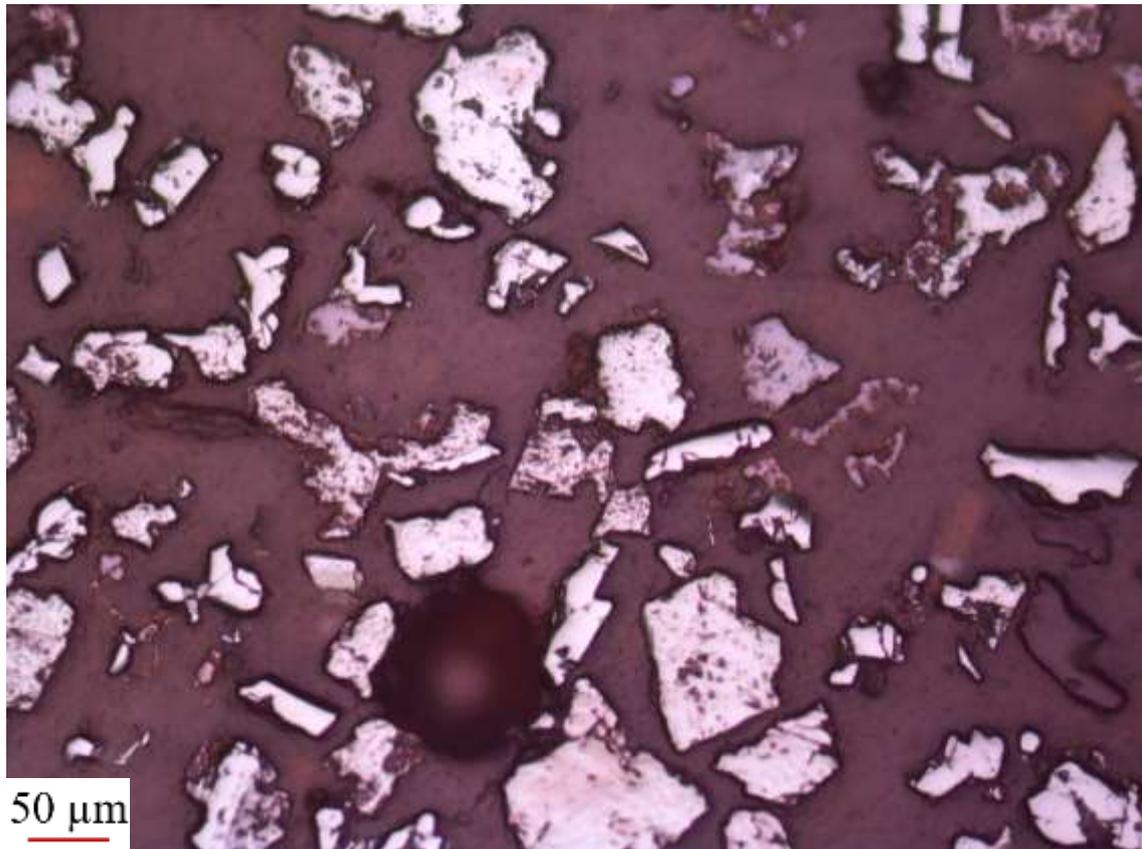


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	86	17
Área dos grãos (µm ²)	1121560	26221

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	83,495%	16,505%
Determinação de áreas	97,716%	2,284%

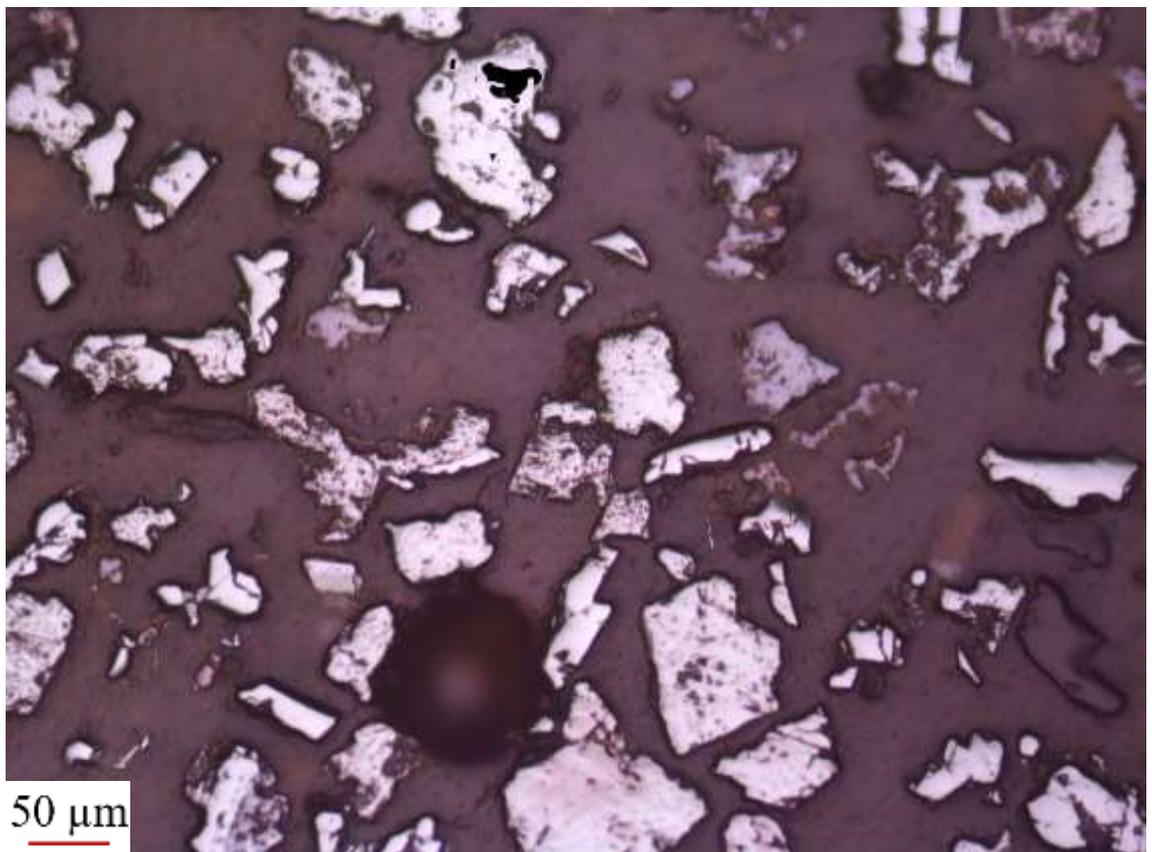
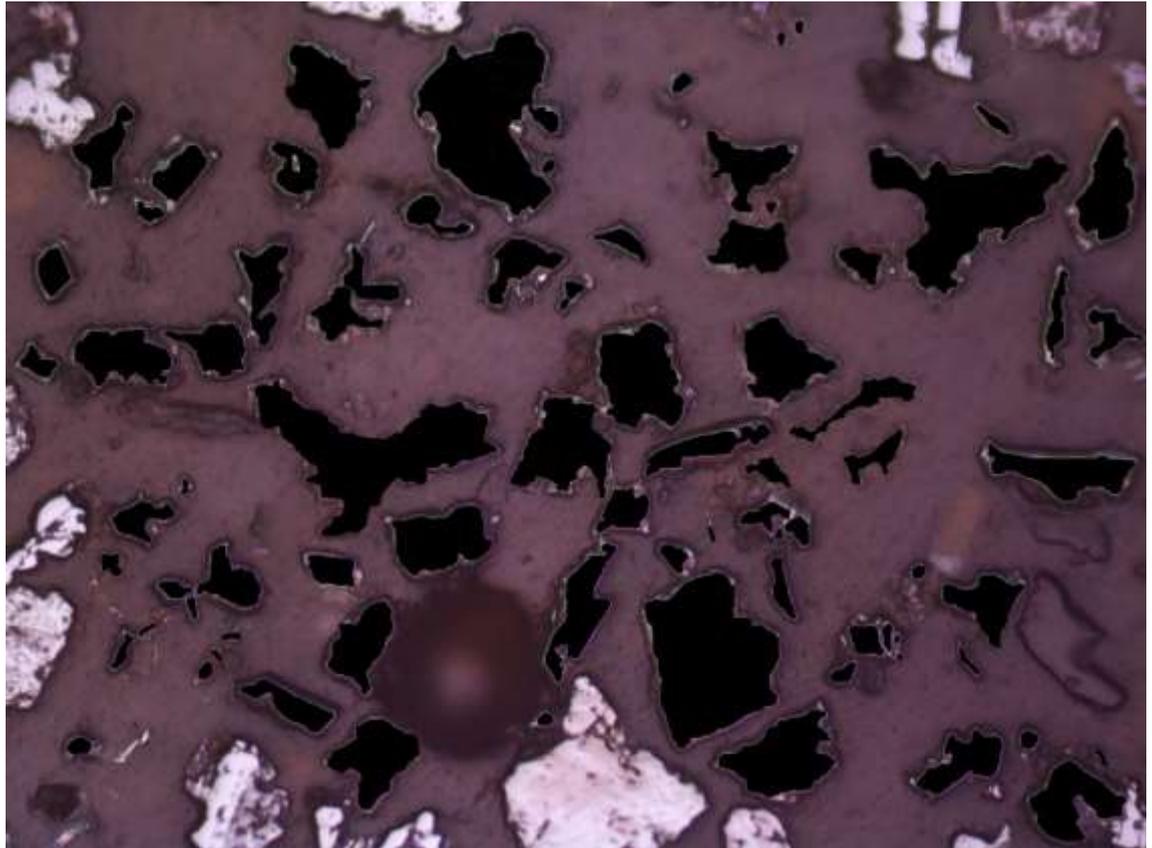


P2-17

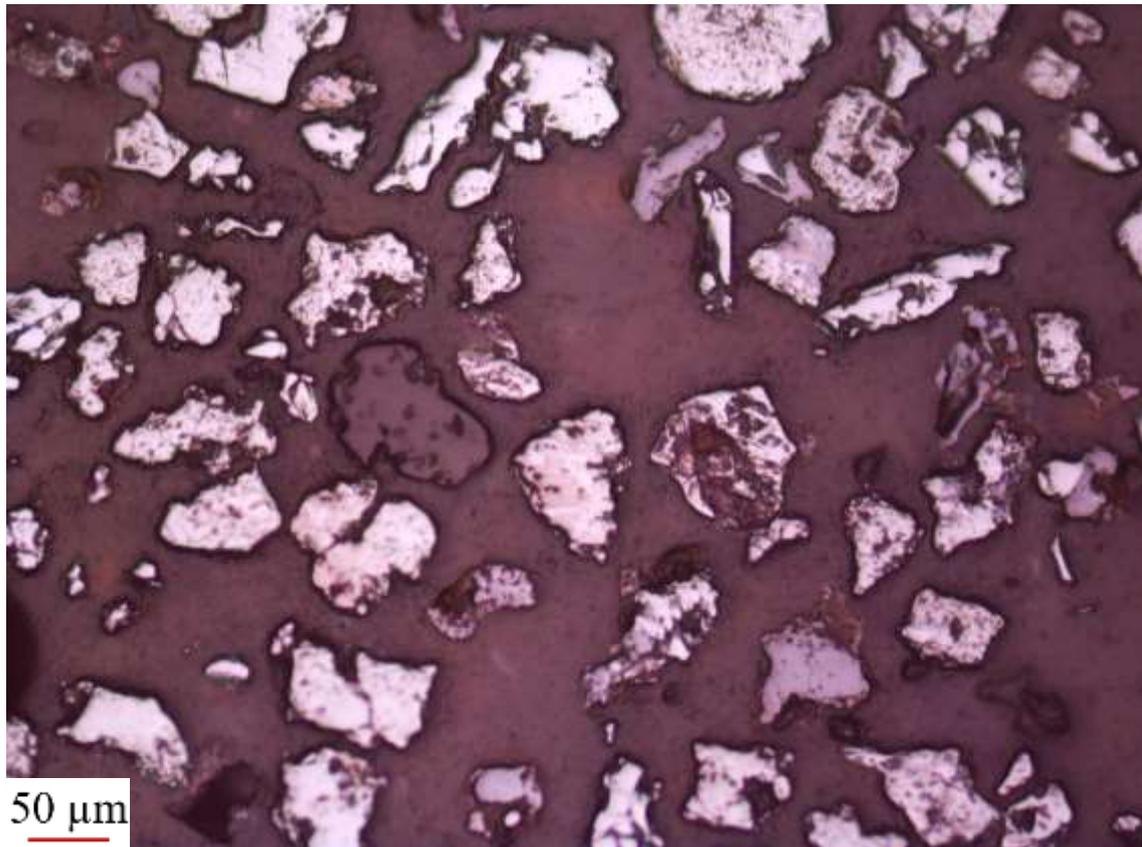


	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	78	4
Área dos grãos (µm ²)	904870	7044

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	95,122%	4,878%
Determinação de áreas	99,227%	0,773%

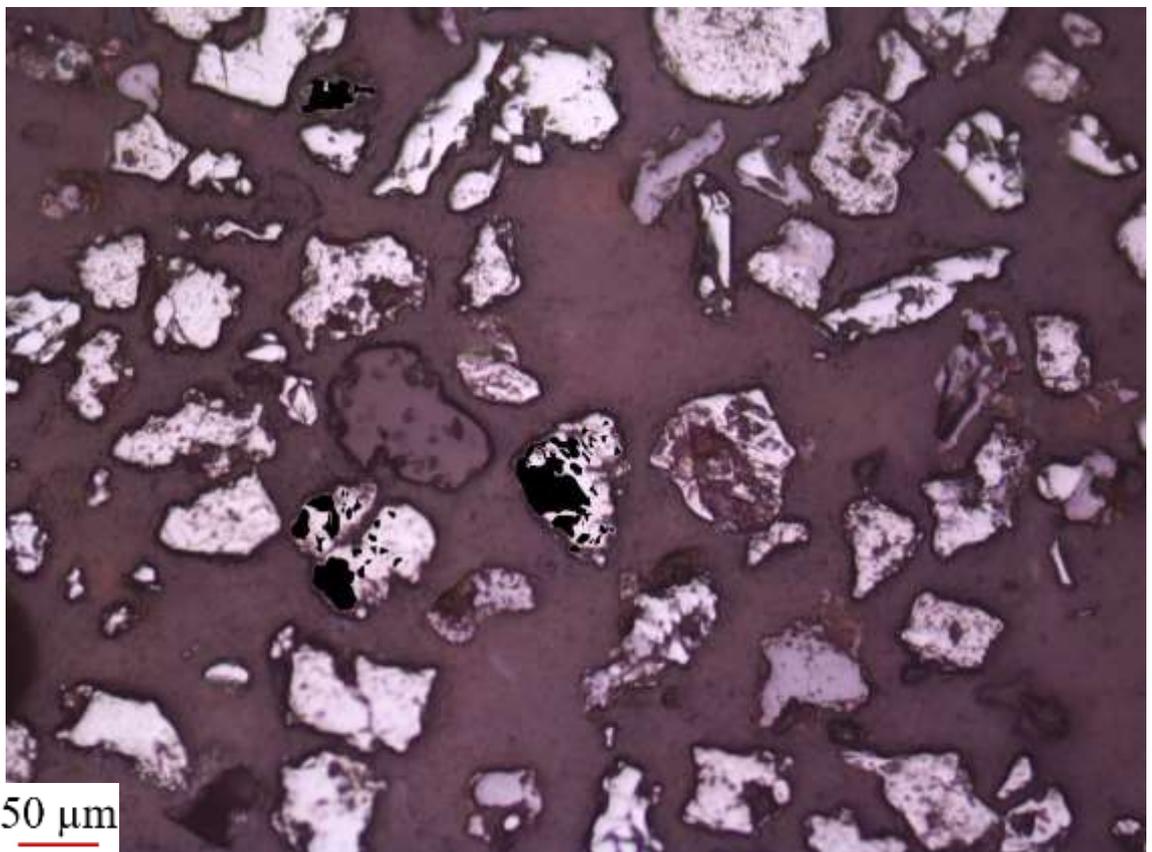
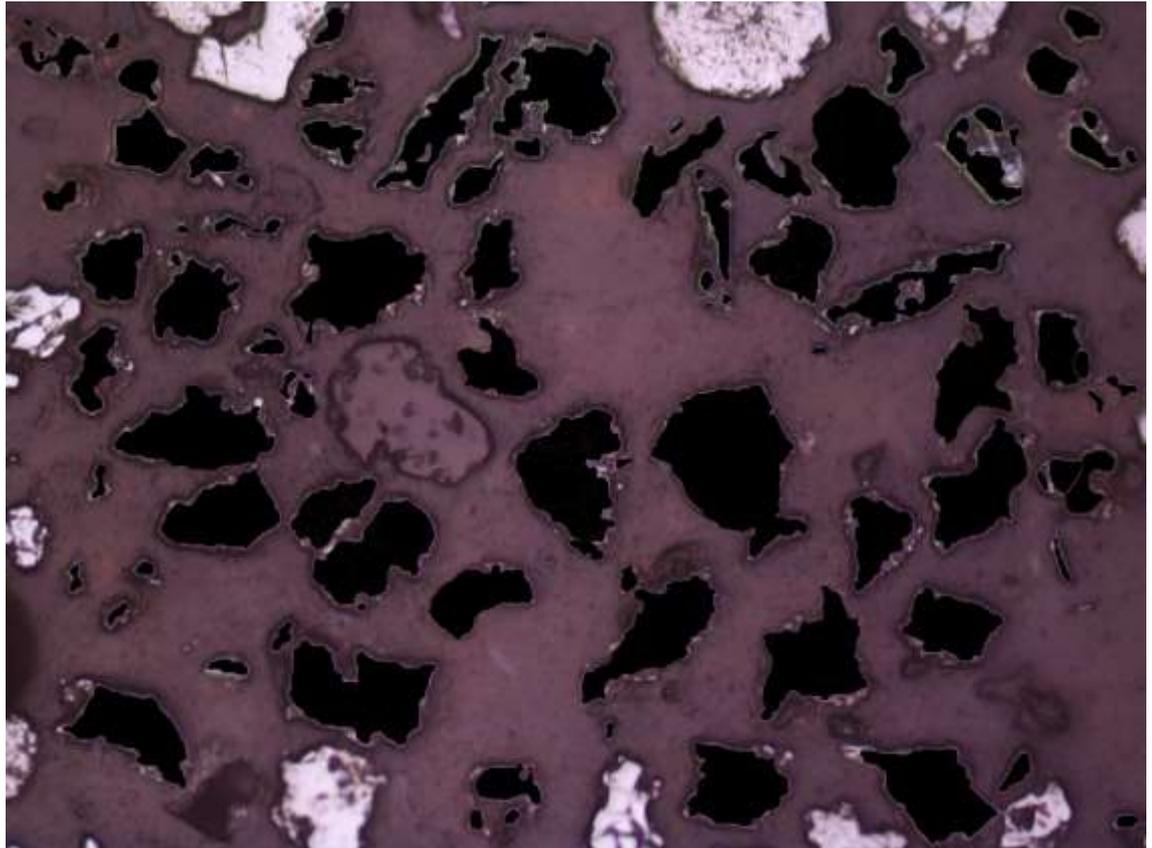


P2-18

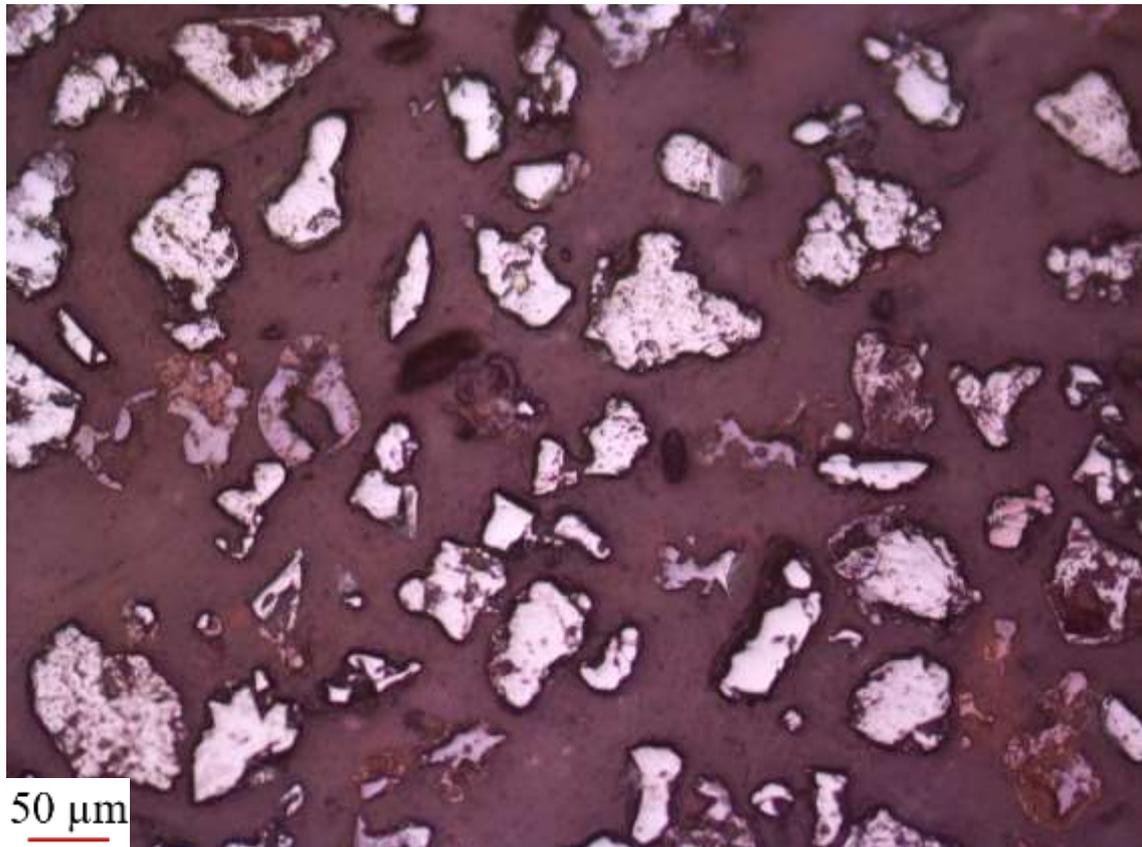


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	98	45
Área dos grãos (µm ²)	1102803	47864

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	68,531%	31,469%
Determinação de áreas	95,839%	4,161%

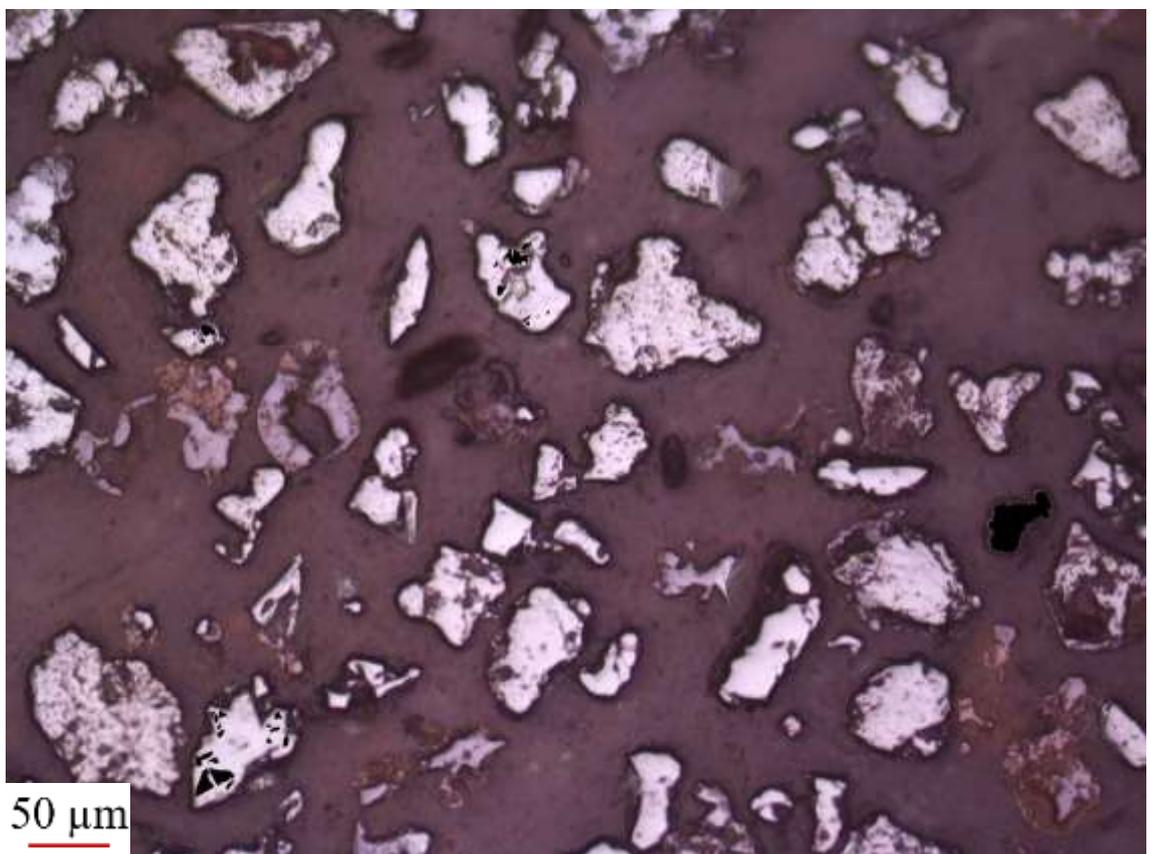
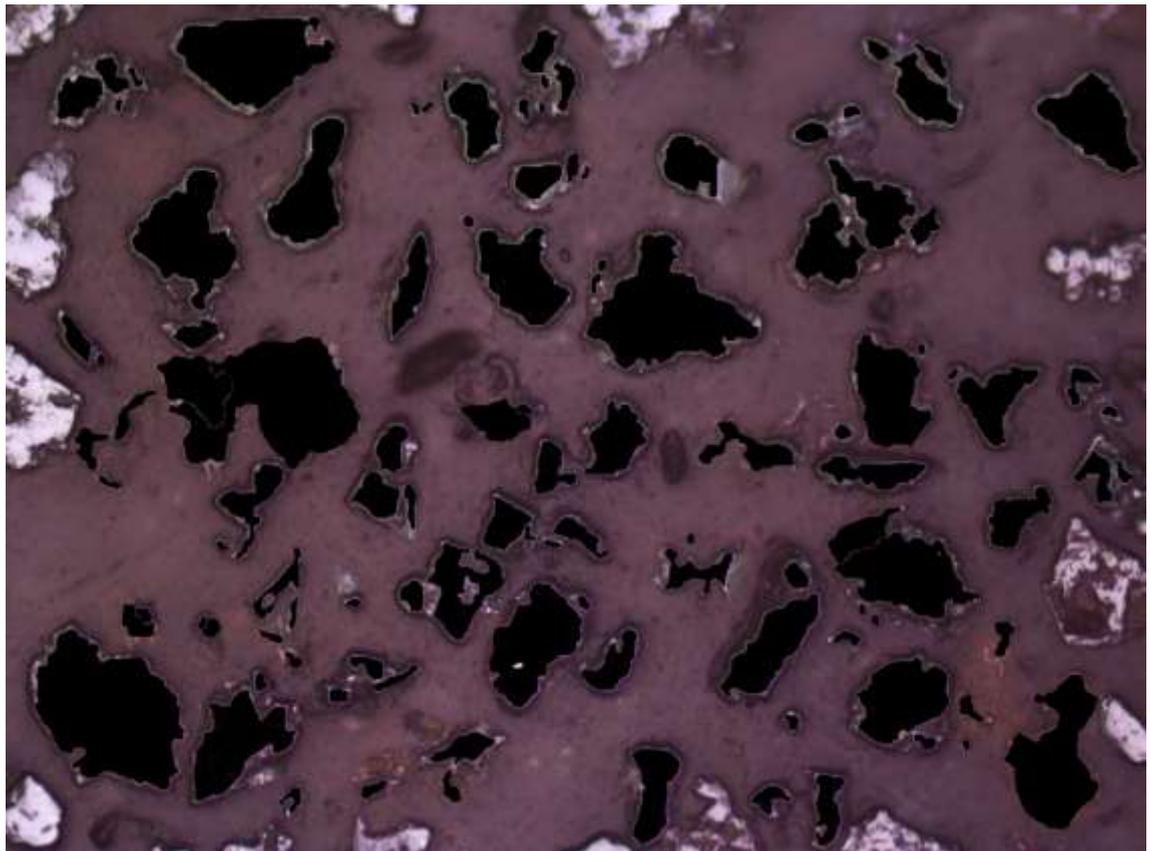


P2-19

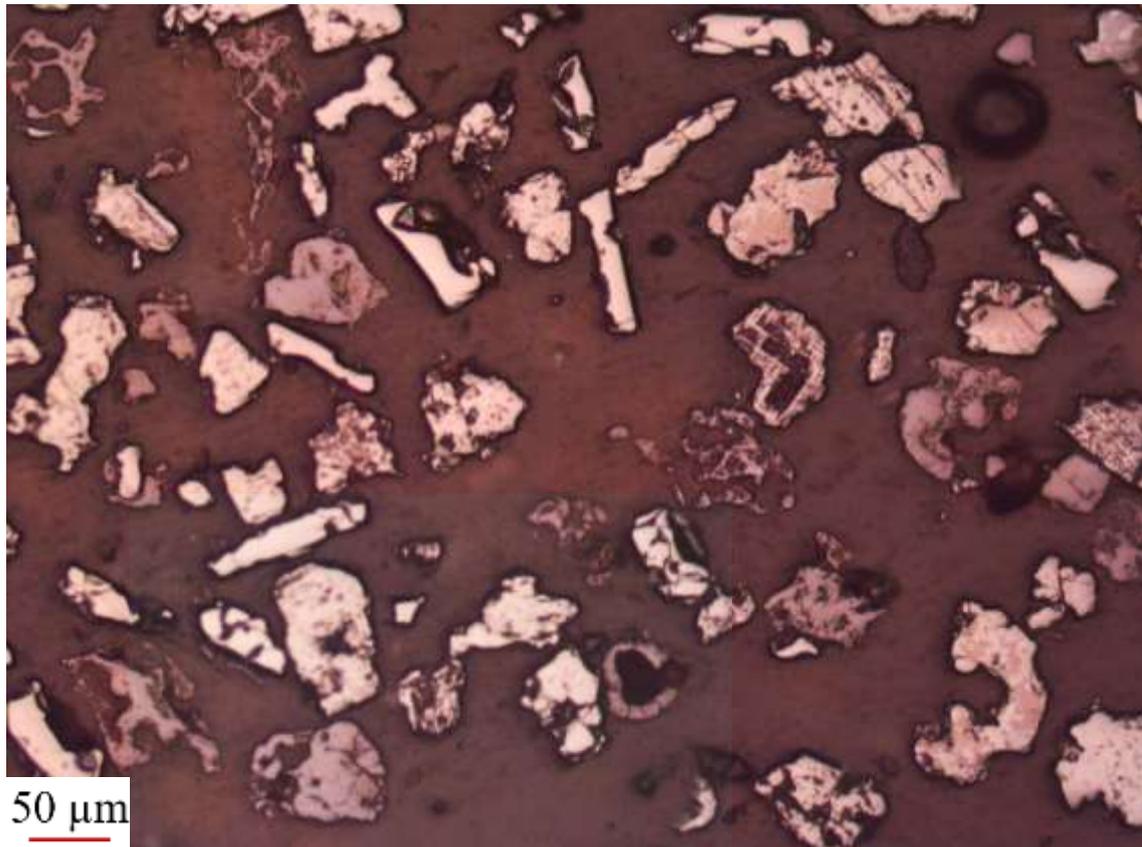


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	111	28
Área dos grãos (μm^2)	1002922	18482

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	79,856%	20,144%
Determinação de áreas	98,193%	1,807%

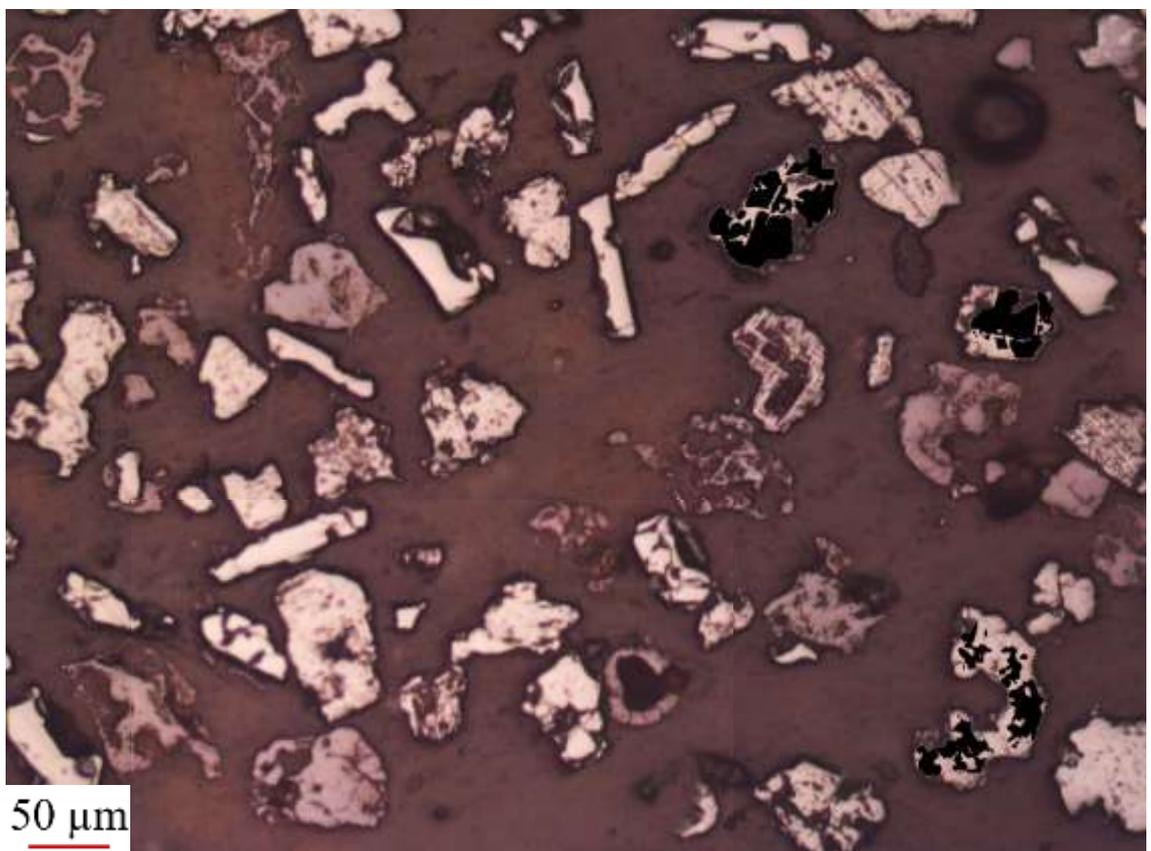
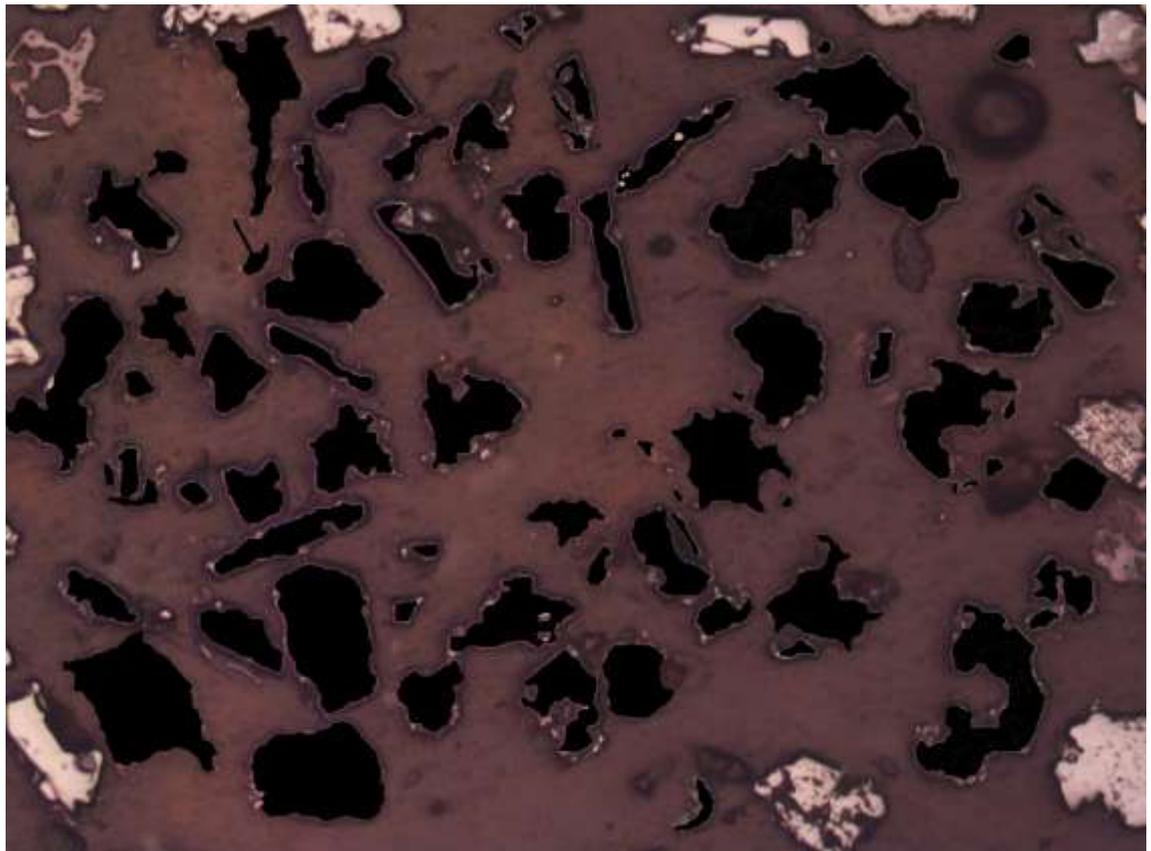


P2-20

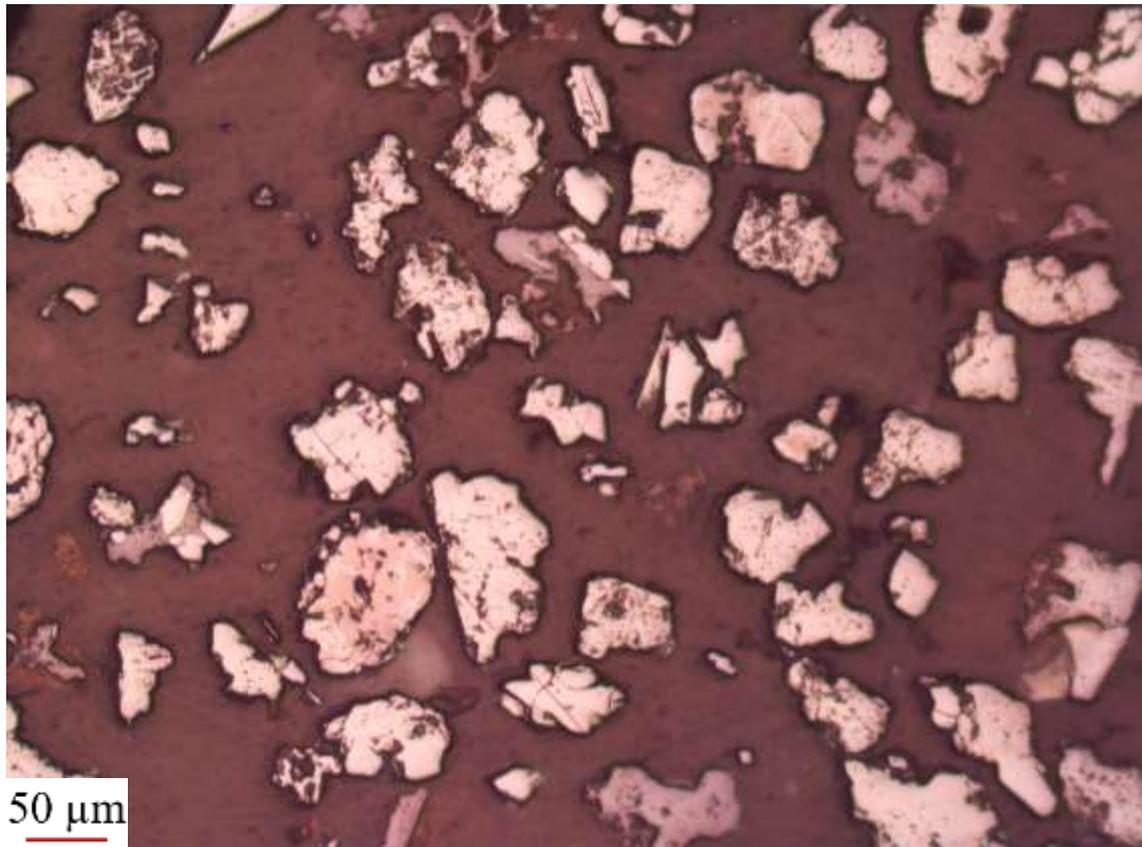


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	78	22
Área dos grãos (μm ²)	1058942	72670

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	78,000%	22,000%
Determinação de áreas	93,577%	6,423%

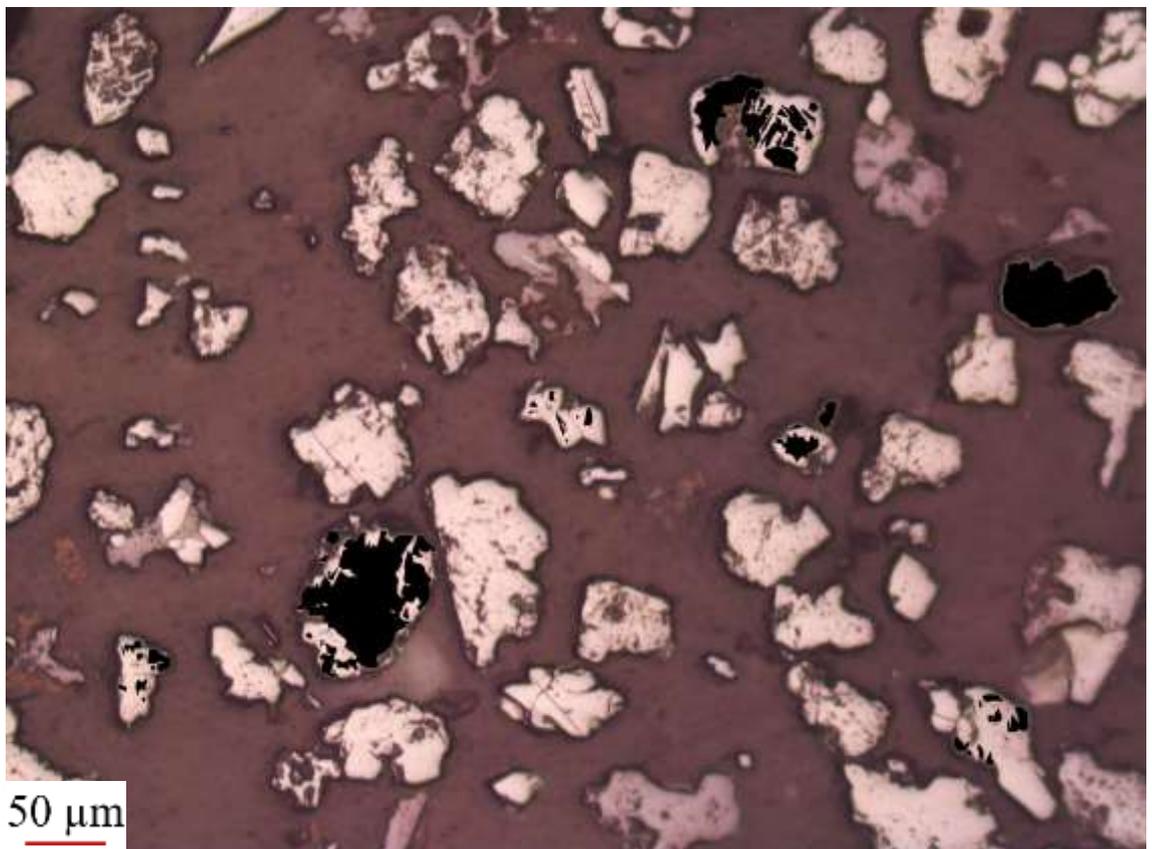
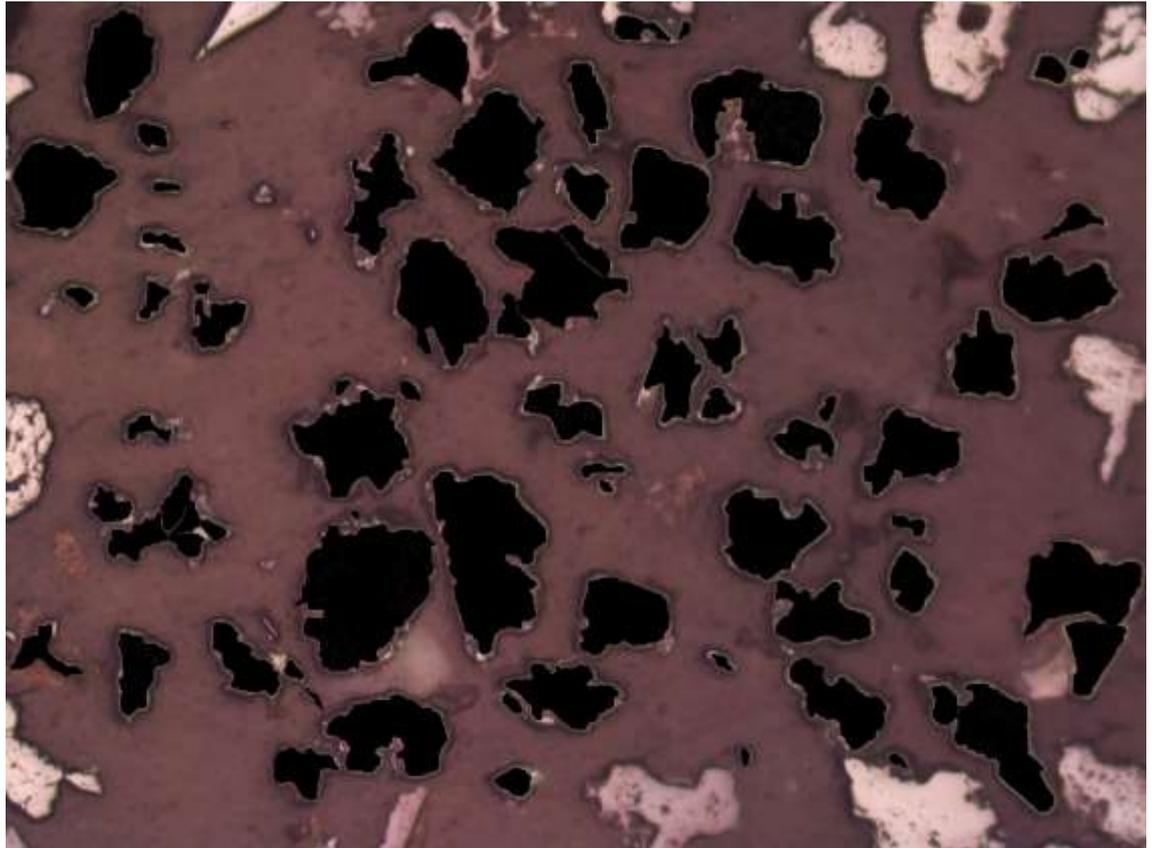


P2-21

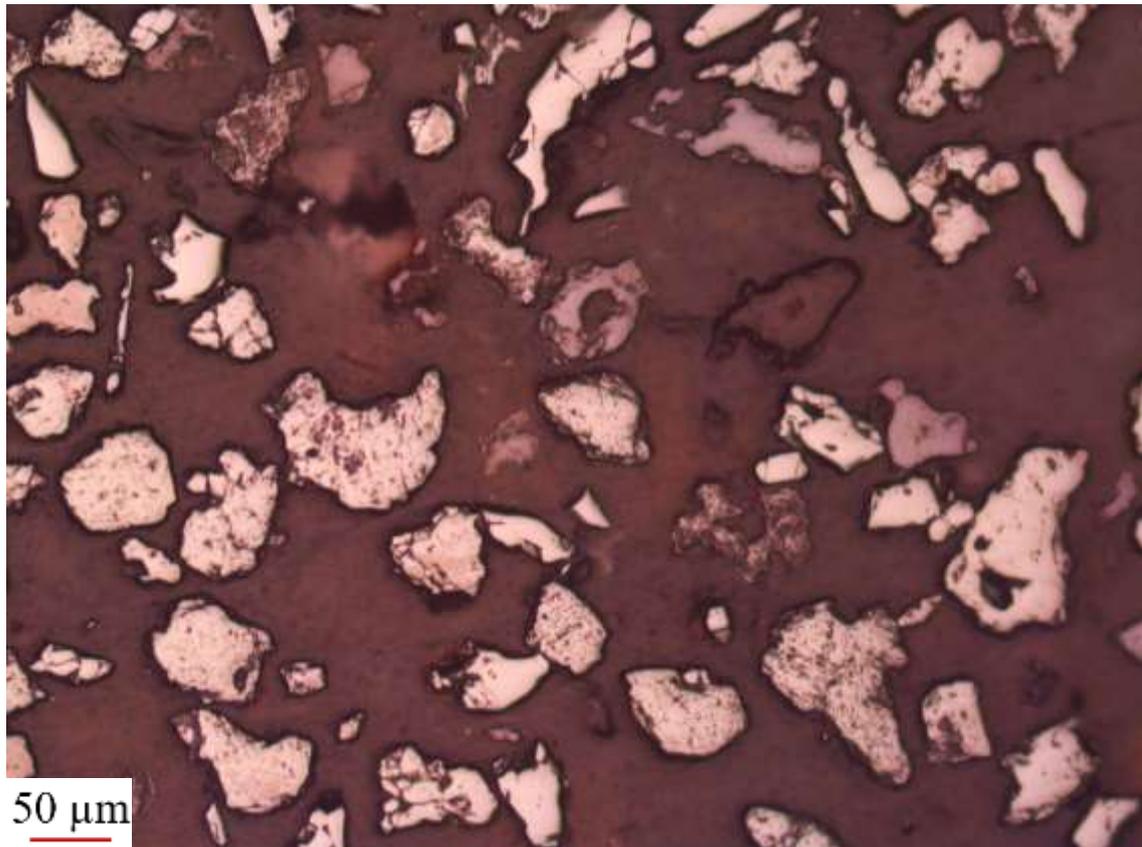


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	67	54
Área dos grãos (µm ²)	1063809	121690

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	55,372%	44,628%
Determinação de áreas	89,733%	10,267%

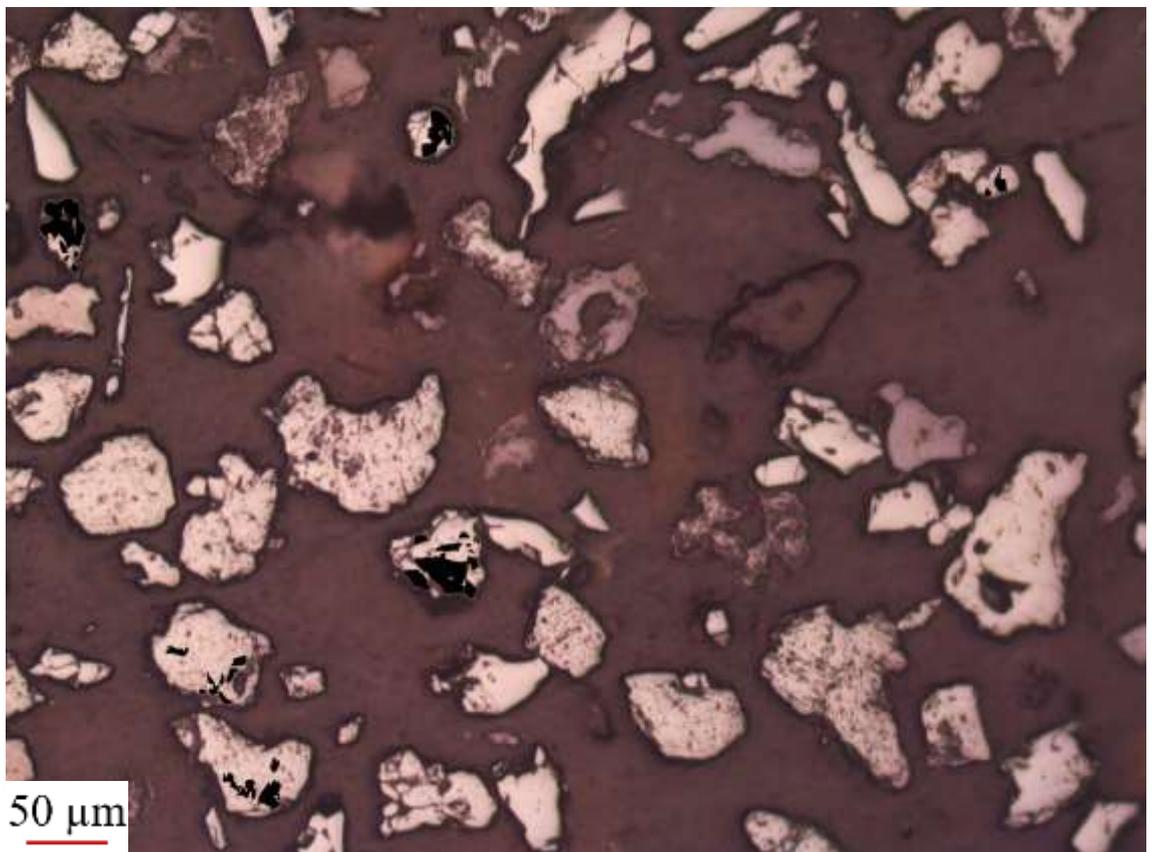
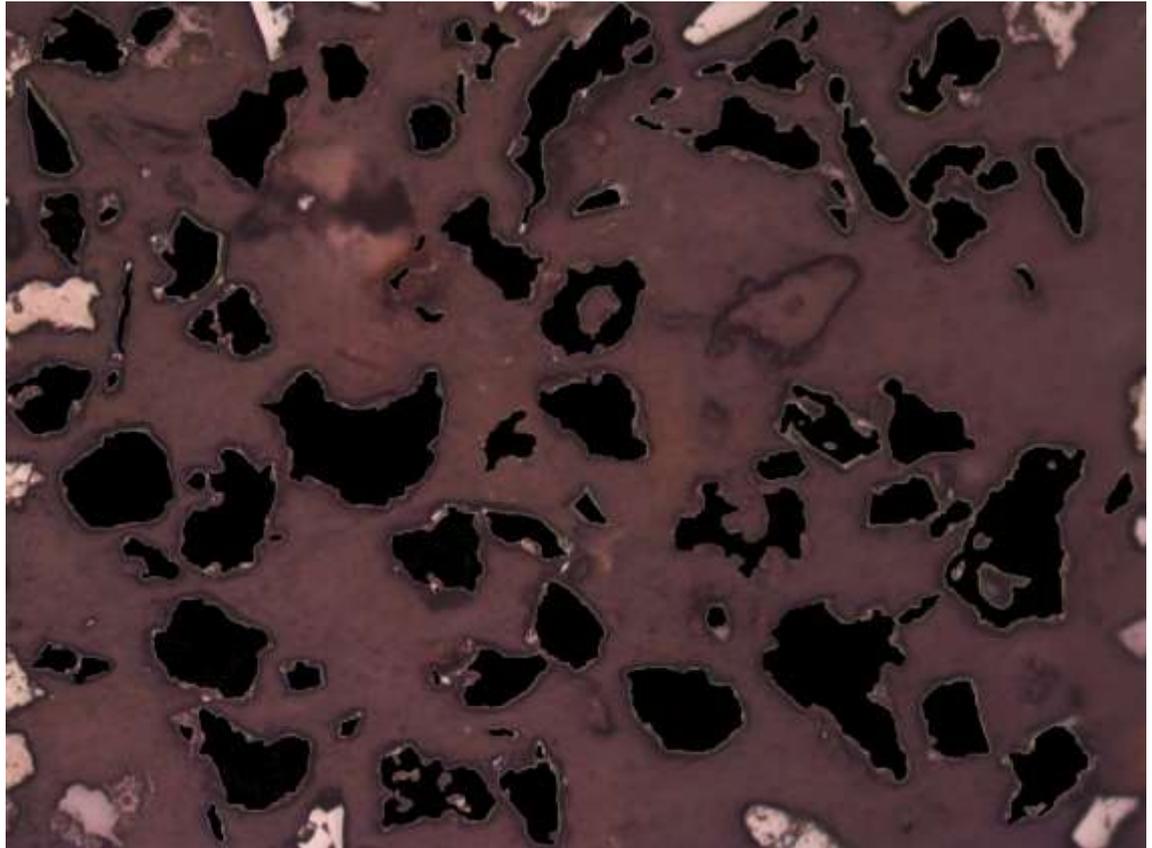


P2-22

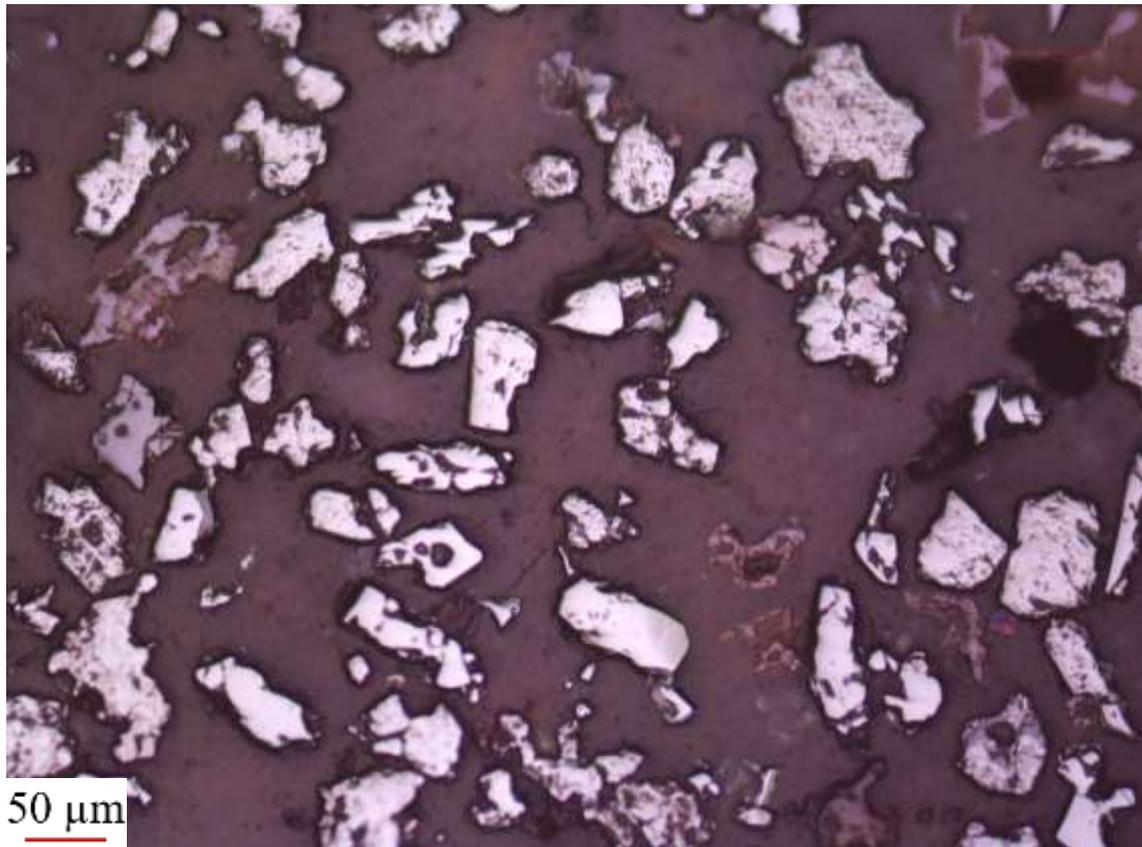


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	85	29
Área dos grãos (μm ²)	1097921	32824

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	74,561%	25,439%
Determinação de áreas	97,098%	2,902%

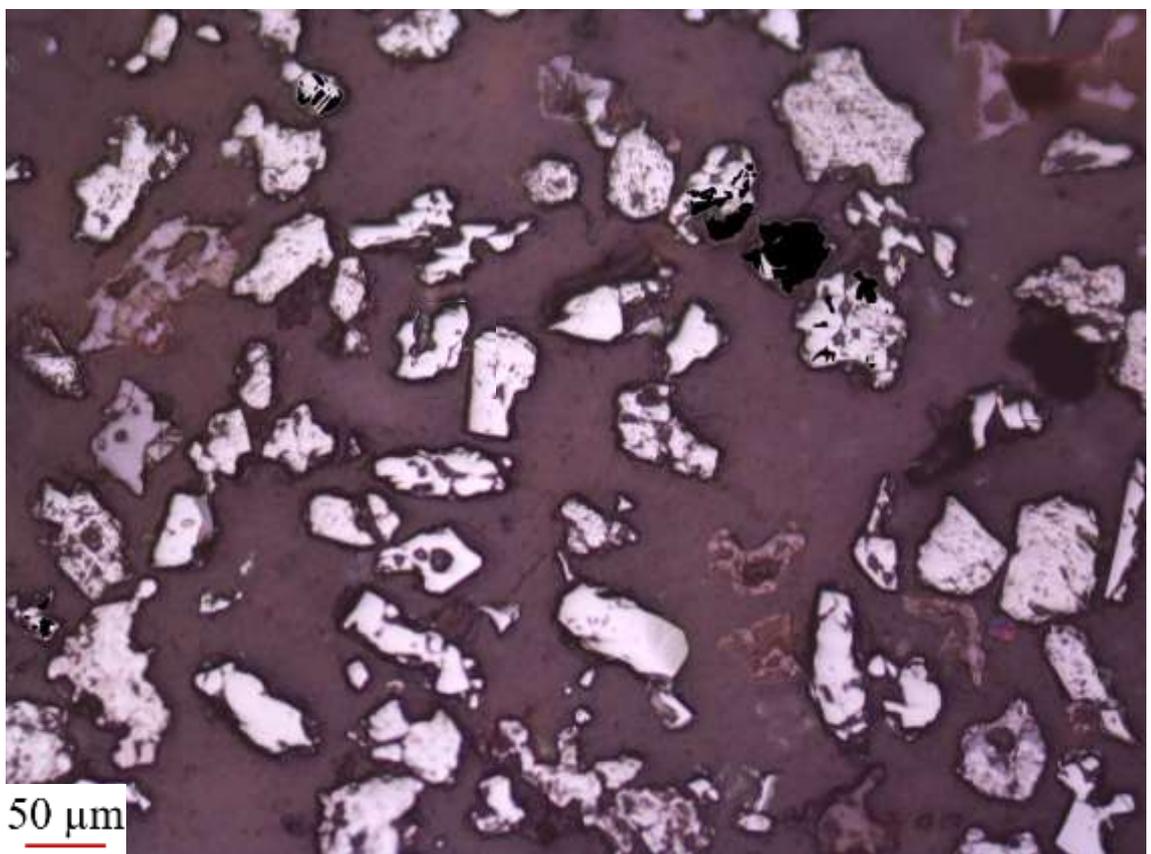
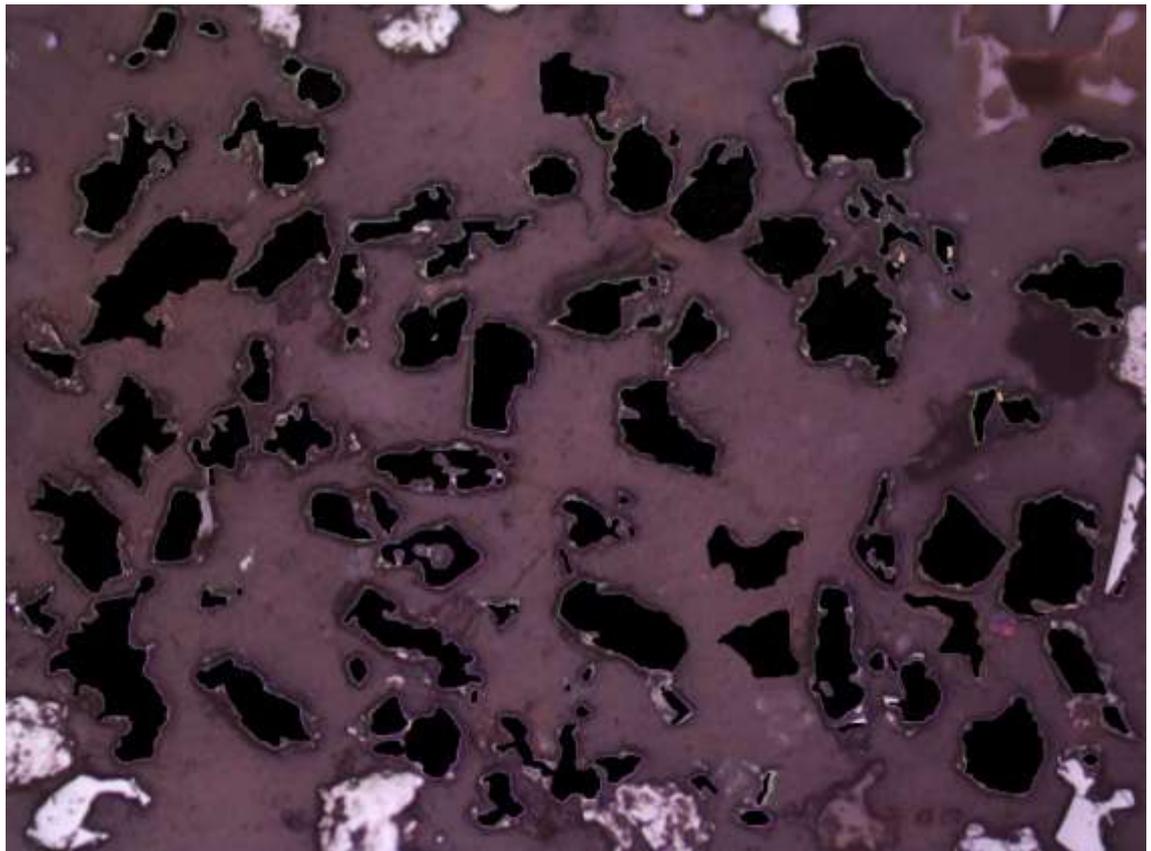


P2-23

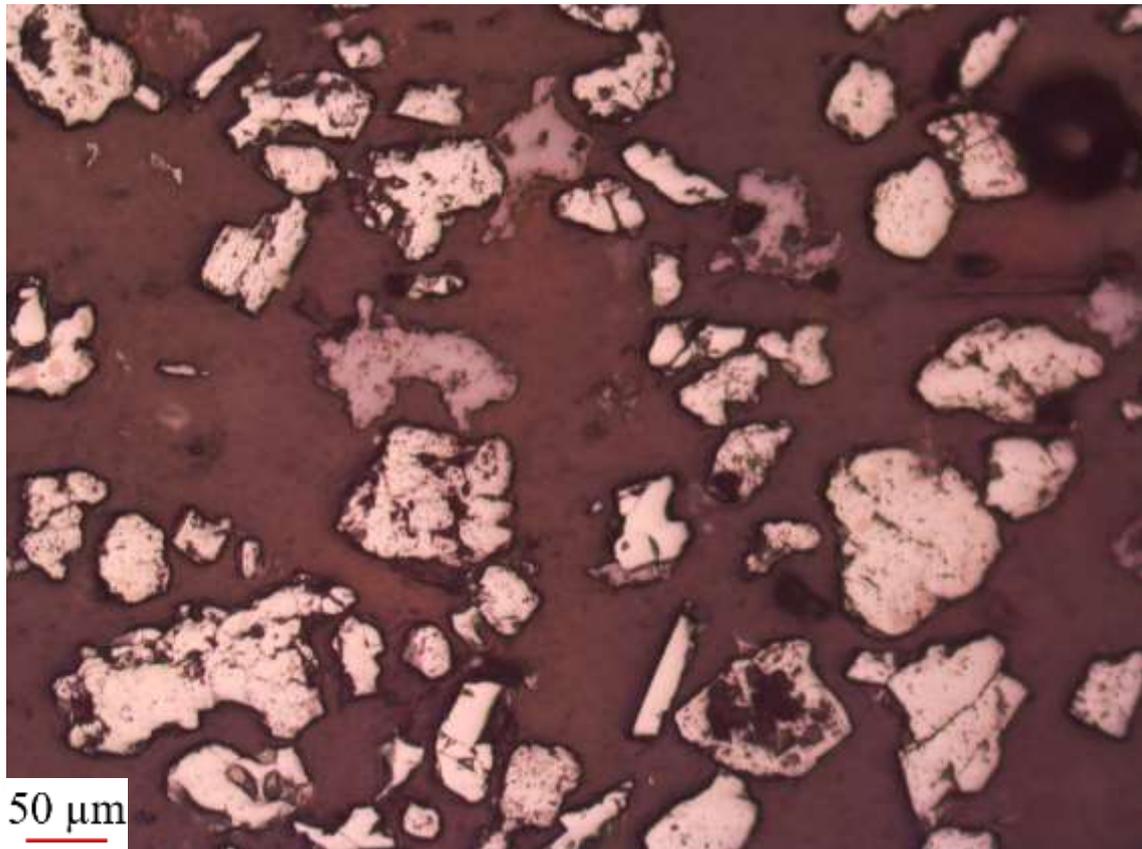


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	106	30
Área dos grãos (µm ²)	1047966	39012

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	77,941%	22,059%
Determinação de áreas	96,410%	3,590%

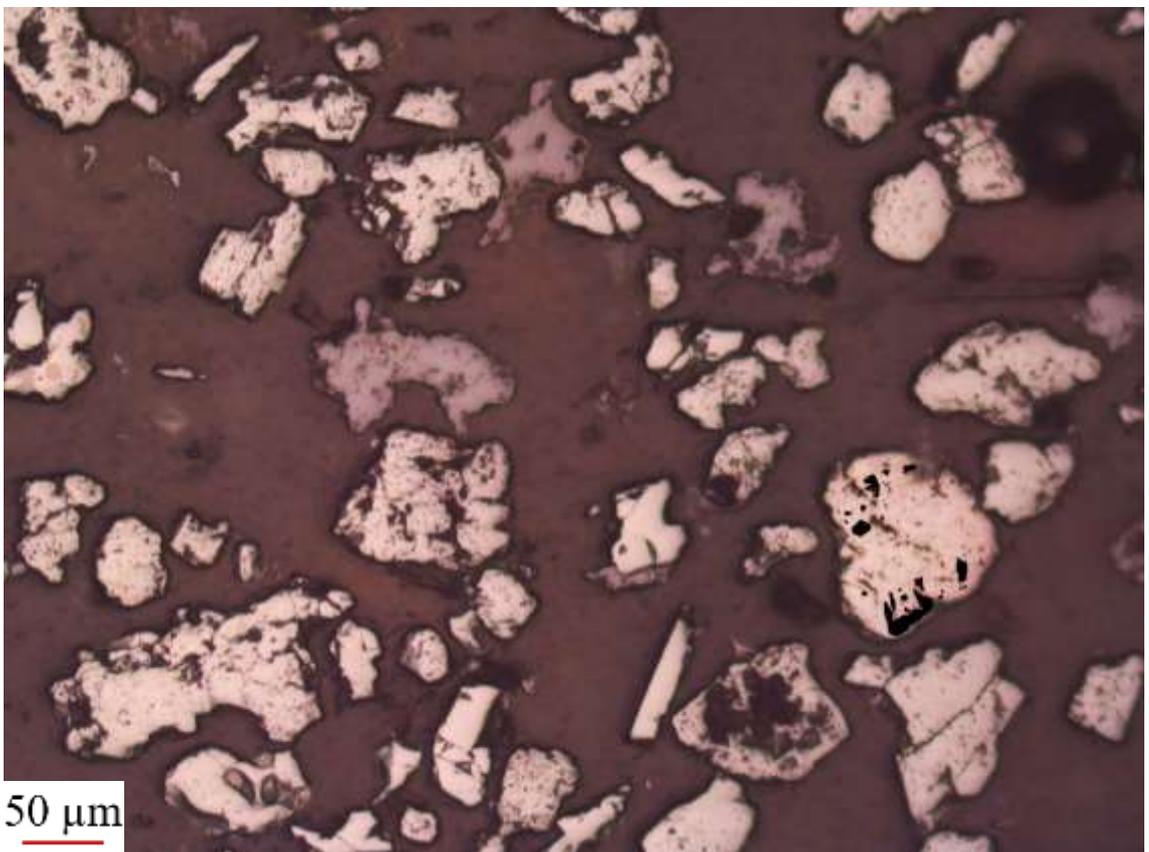
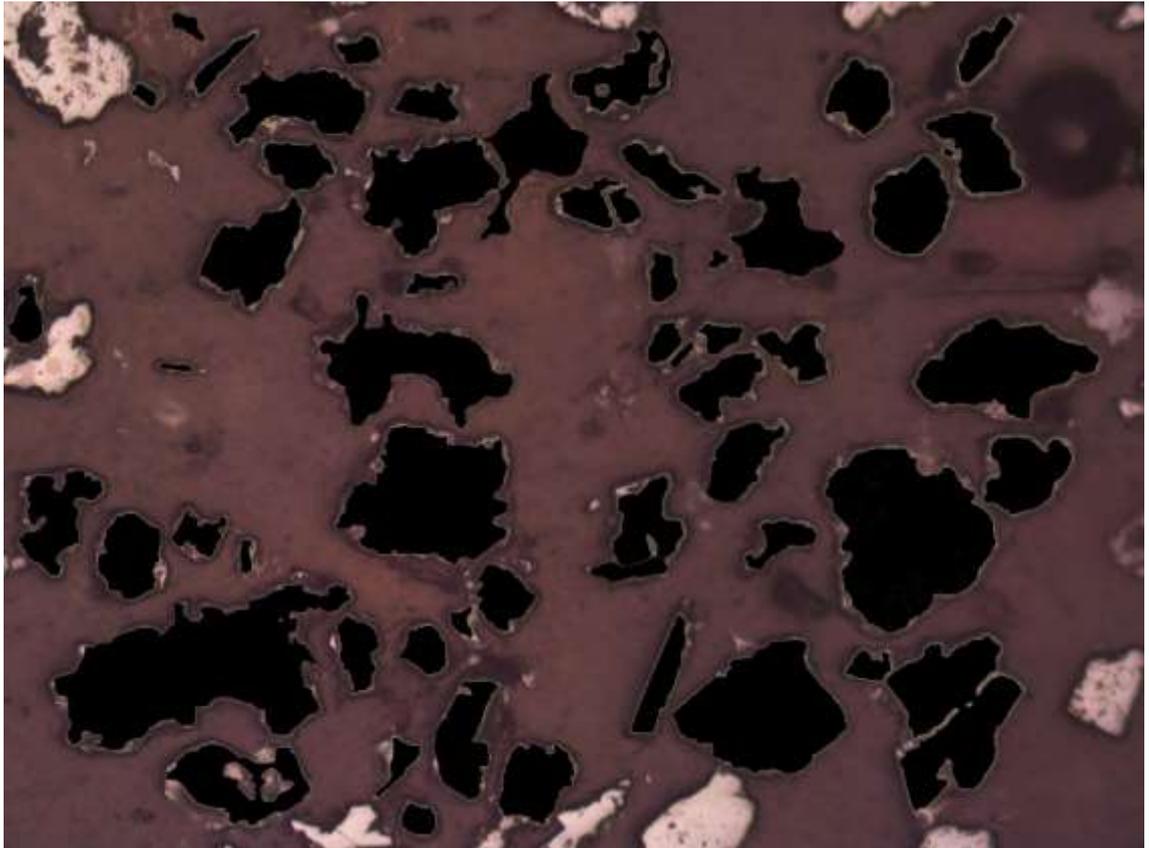


P2-24

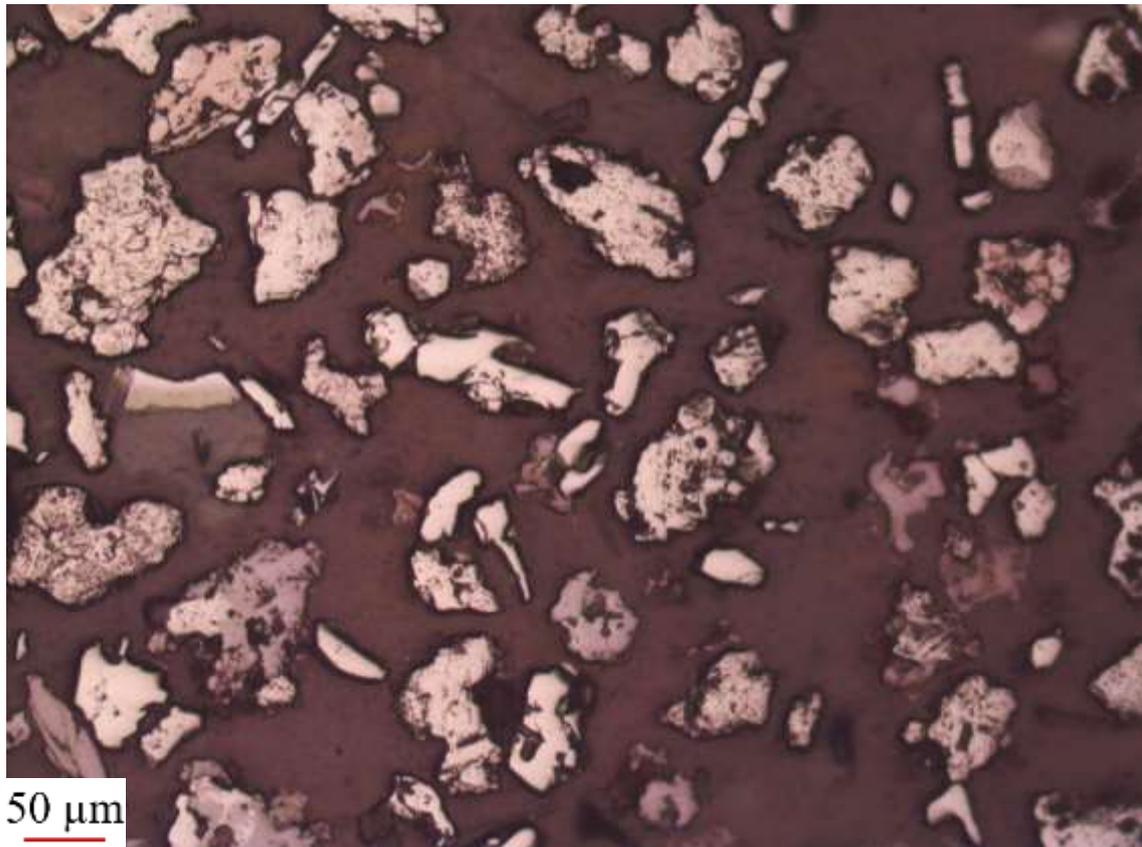


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	56	20
Área dos grãos (μm ²)	1238367	10314

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de Pontos	73,684%	26,316%
Determinação de áreas	99,175%	0,825%

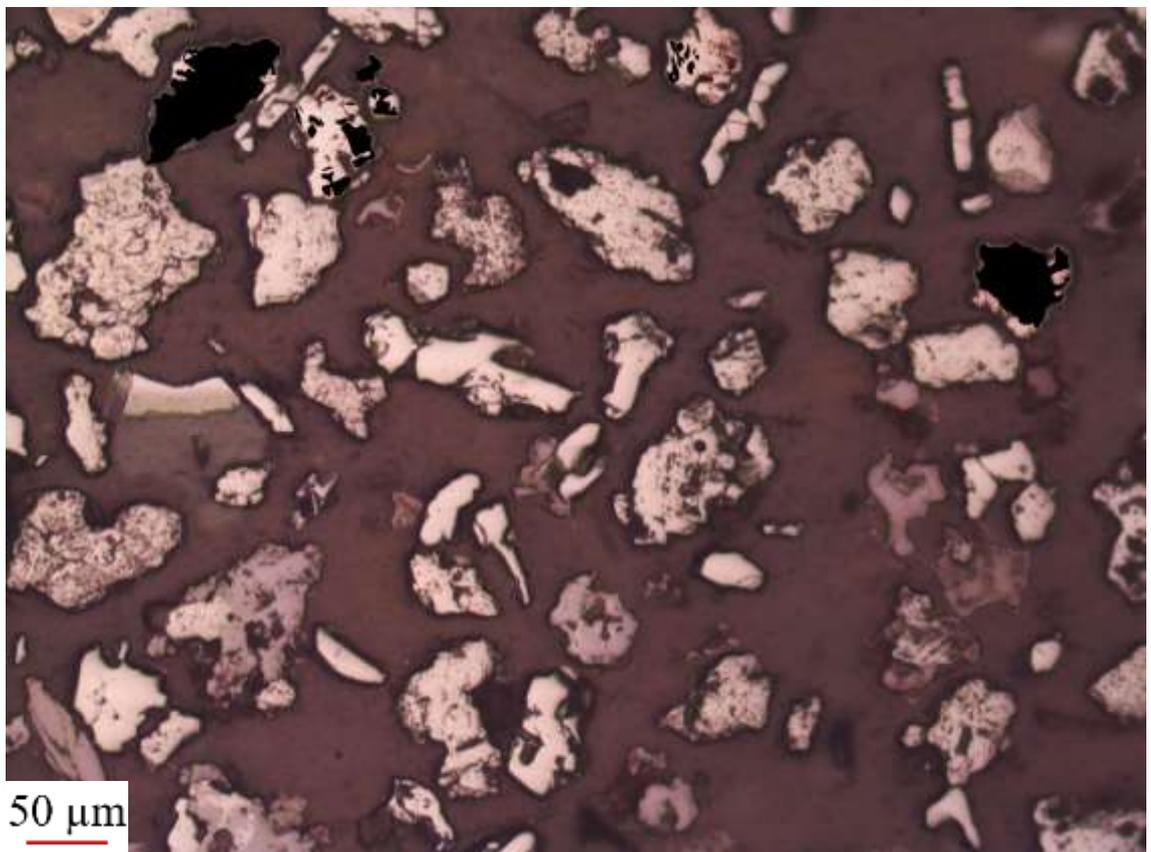
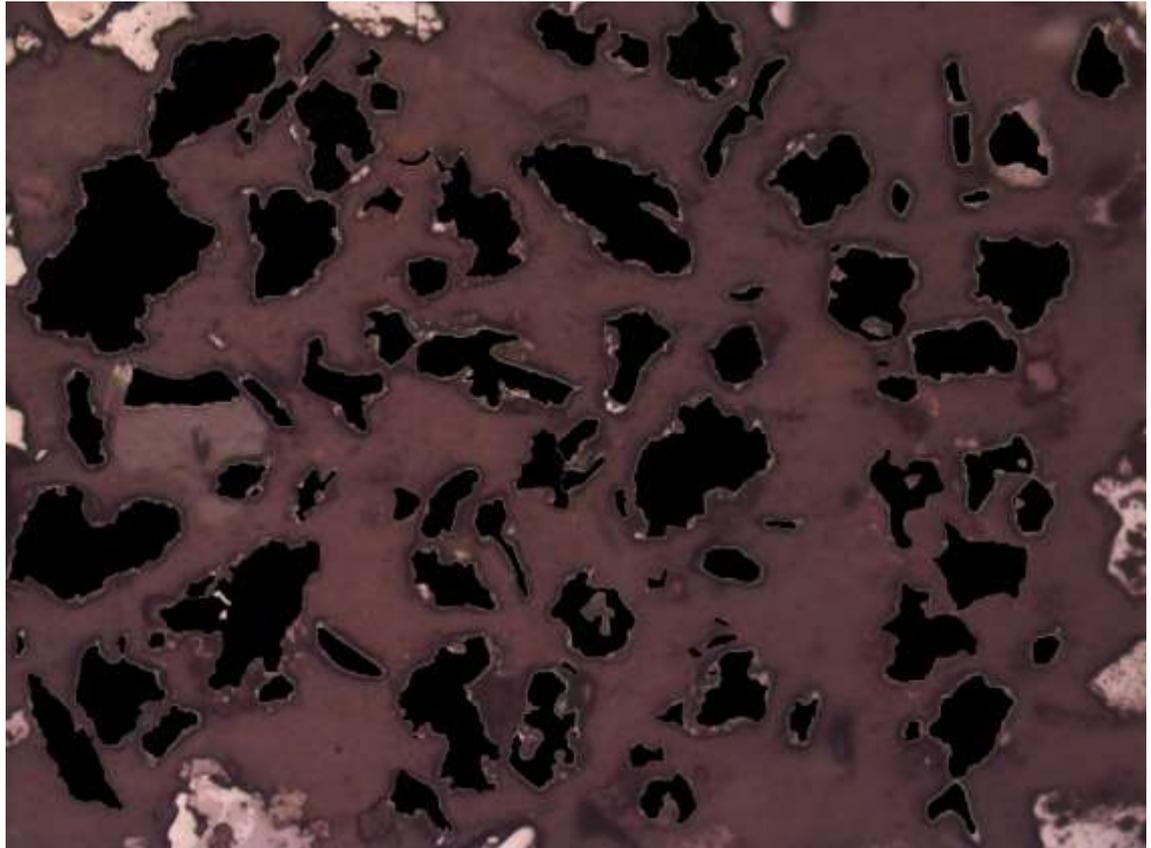


P2-25

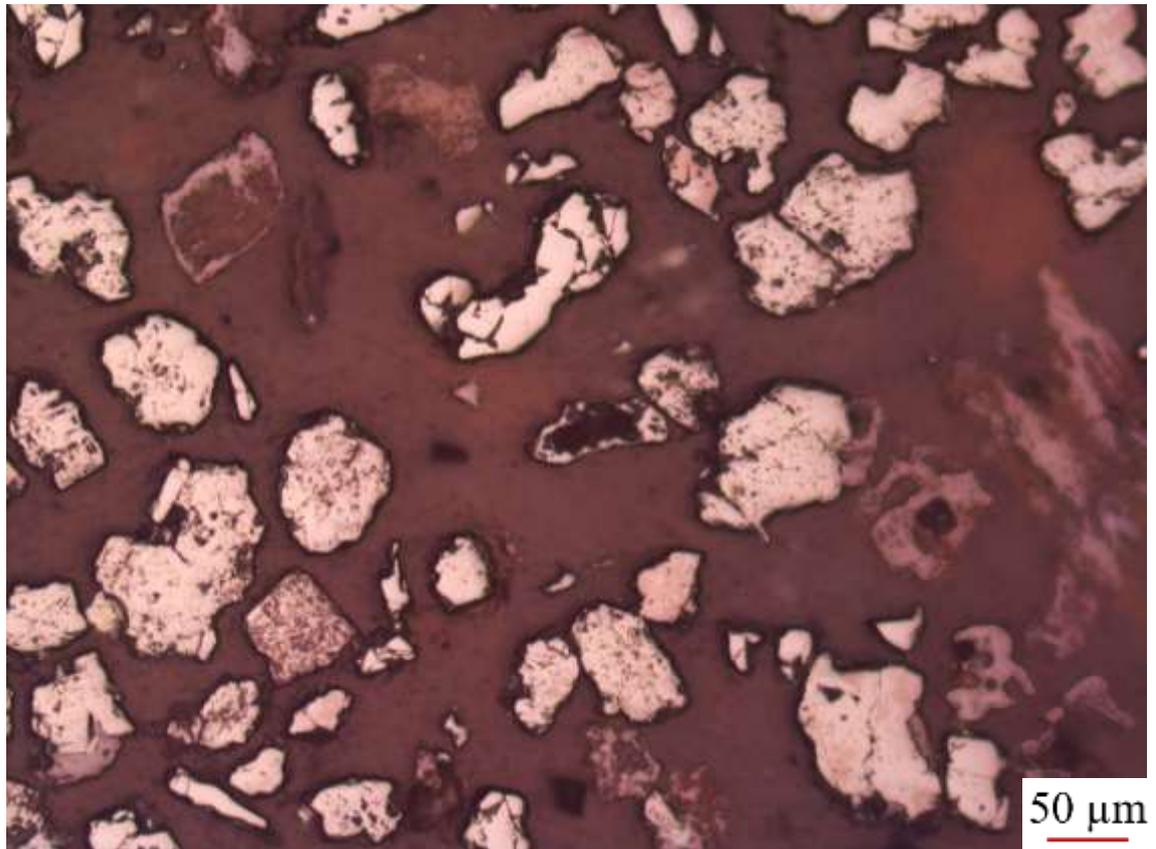


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	89	20
Área dos grãos (μm^2)	1225355	87092

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	81,651%	18,349%
Determinação de áreas	93,364%	6,636%

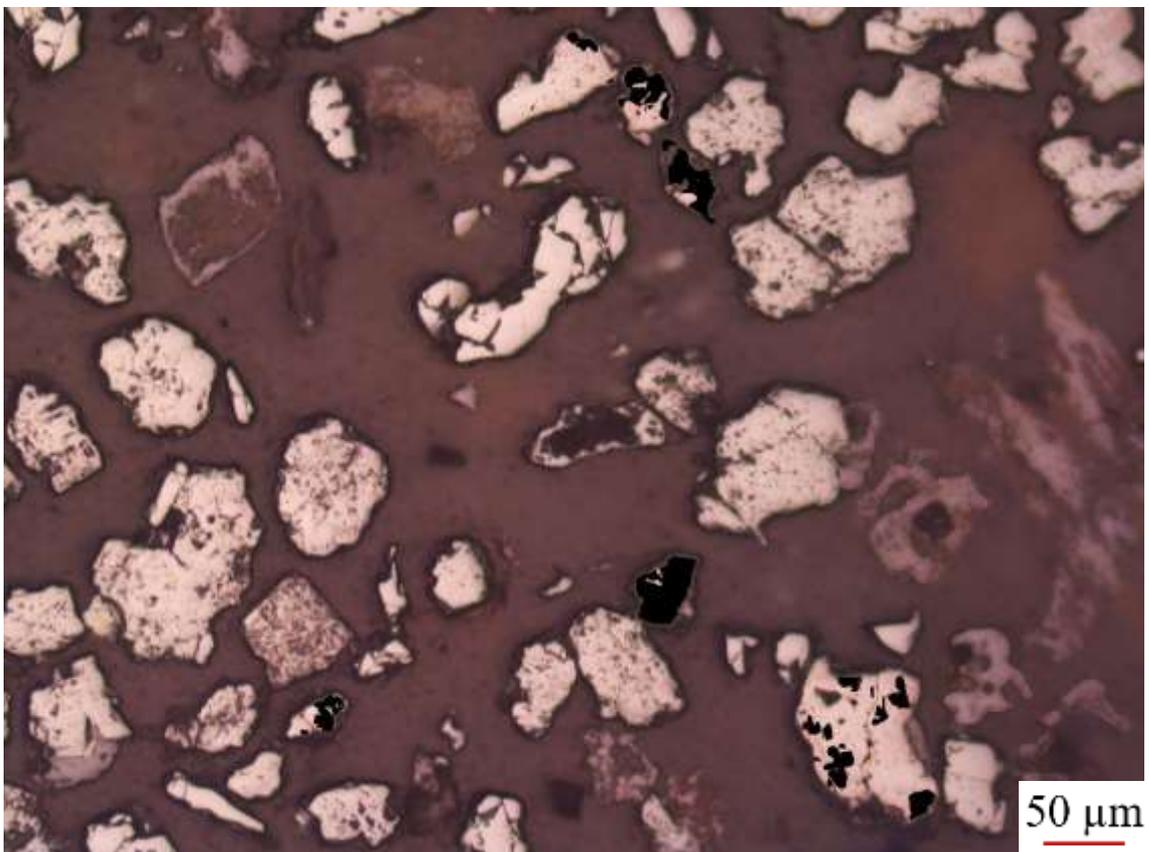
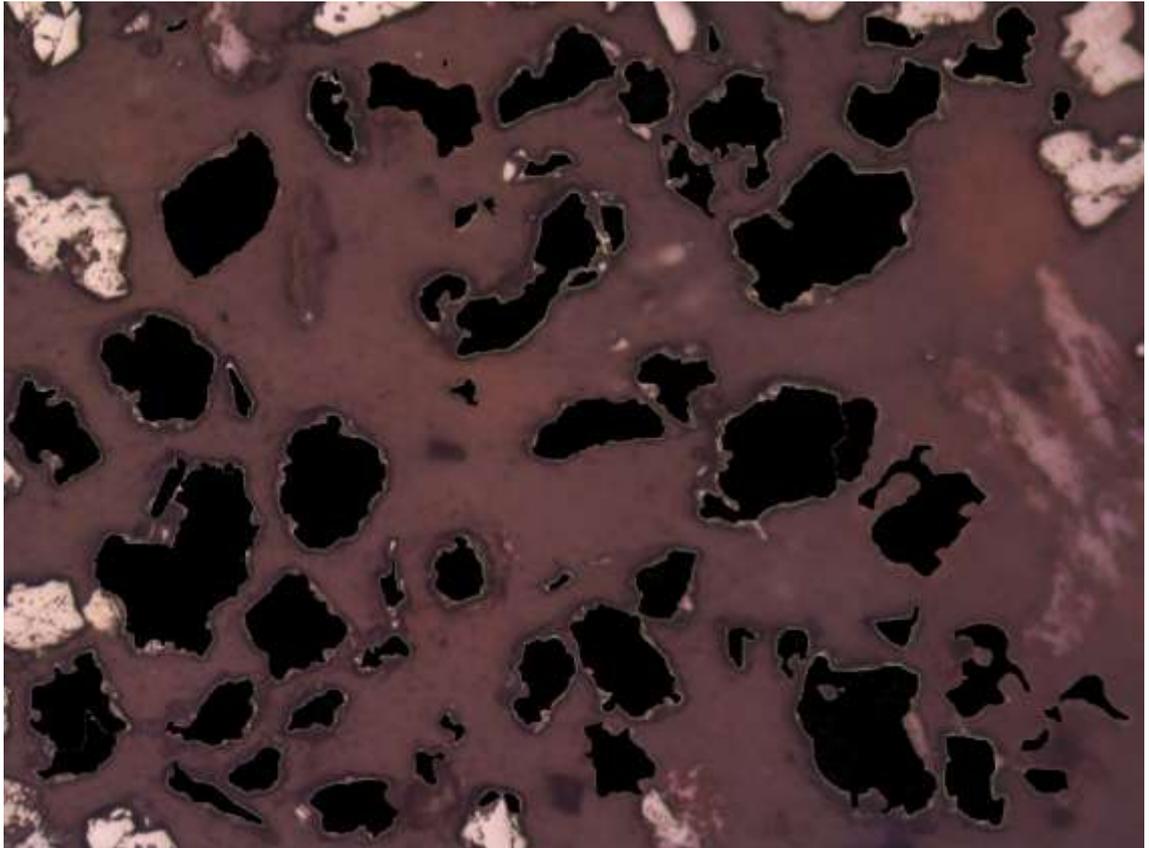


P2-26

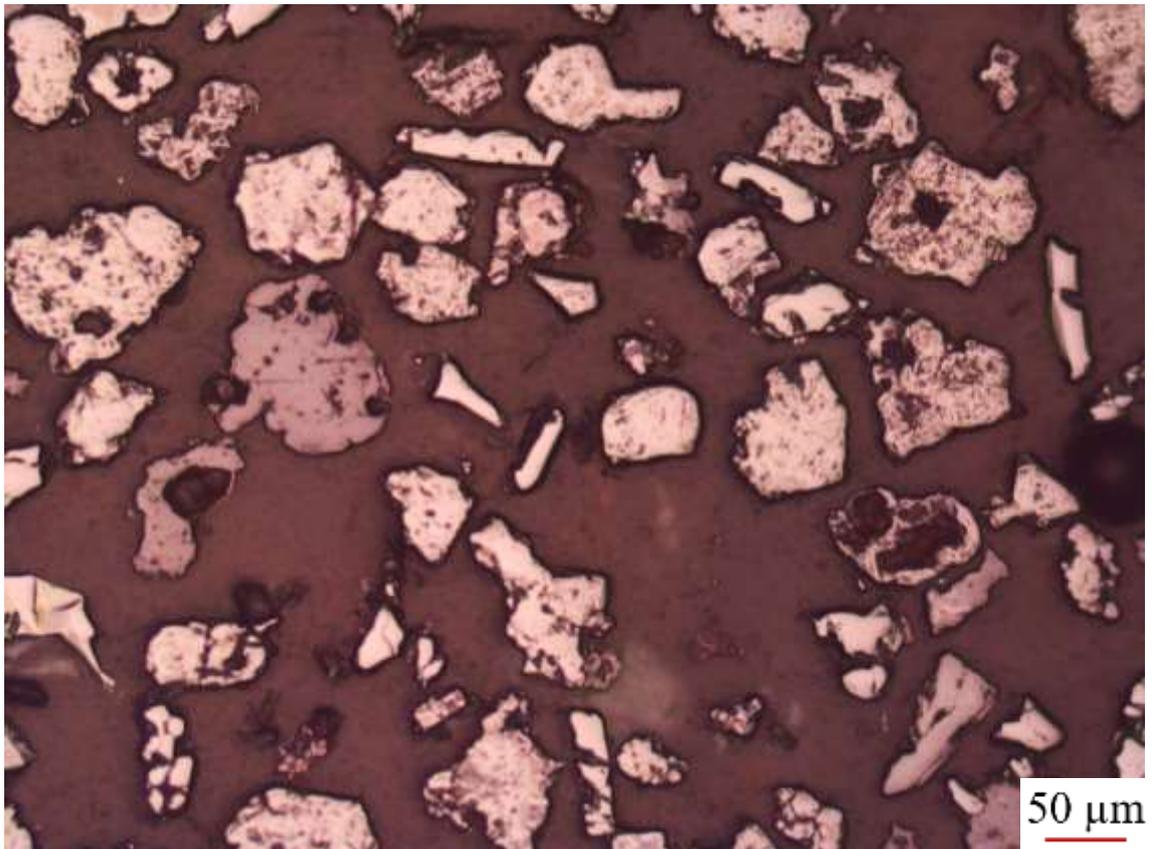


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	67	23
Área dos grãos (μm ²)	1134239	48111

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	74,444%	25,556%
Determinação de áreas	95,930%	4,070%

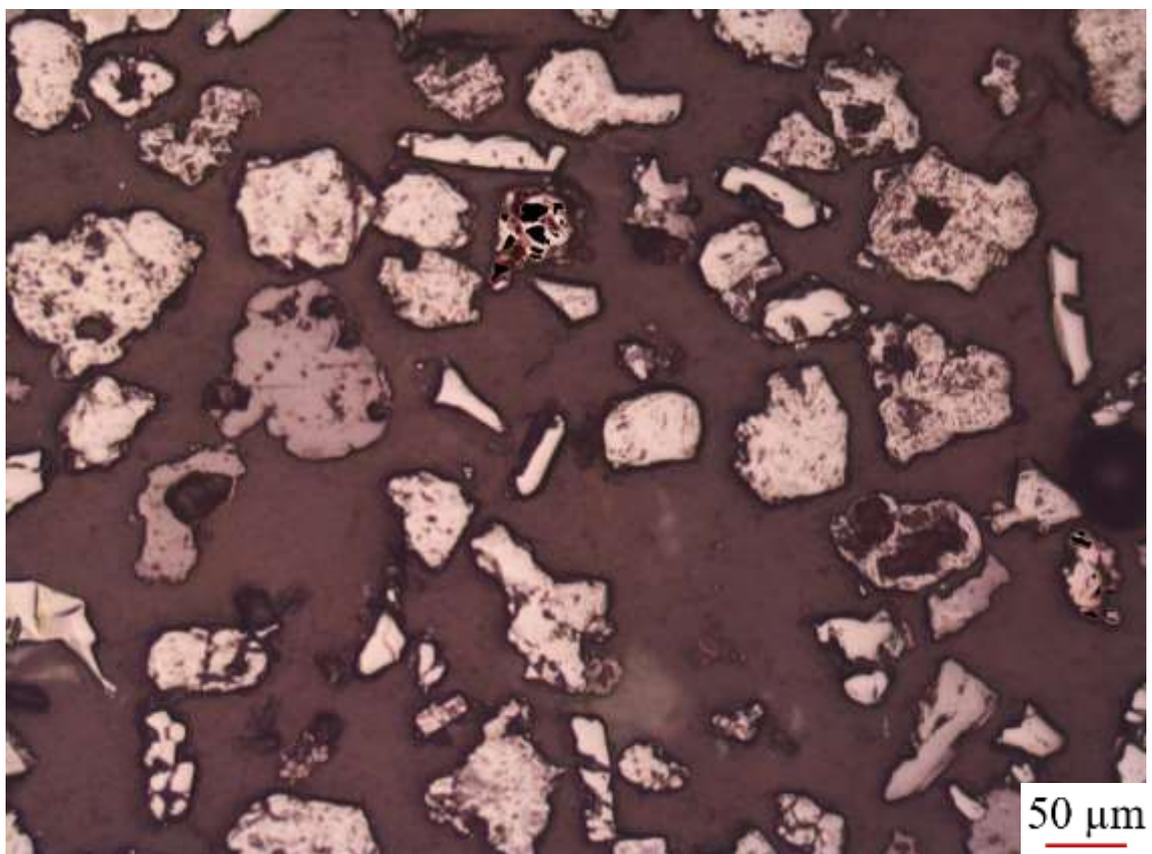
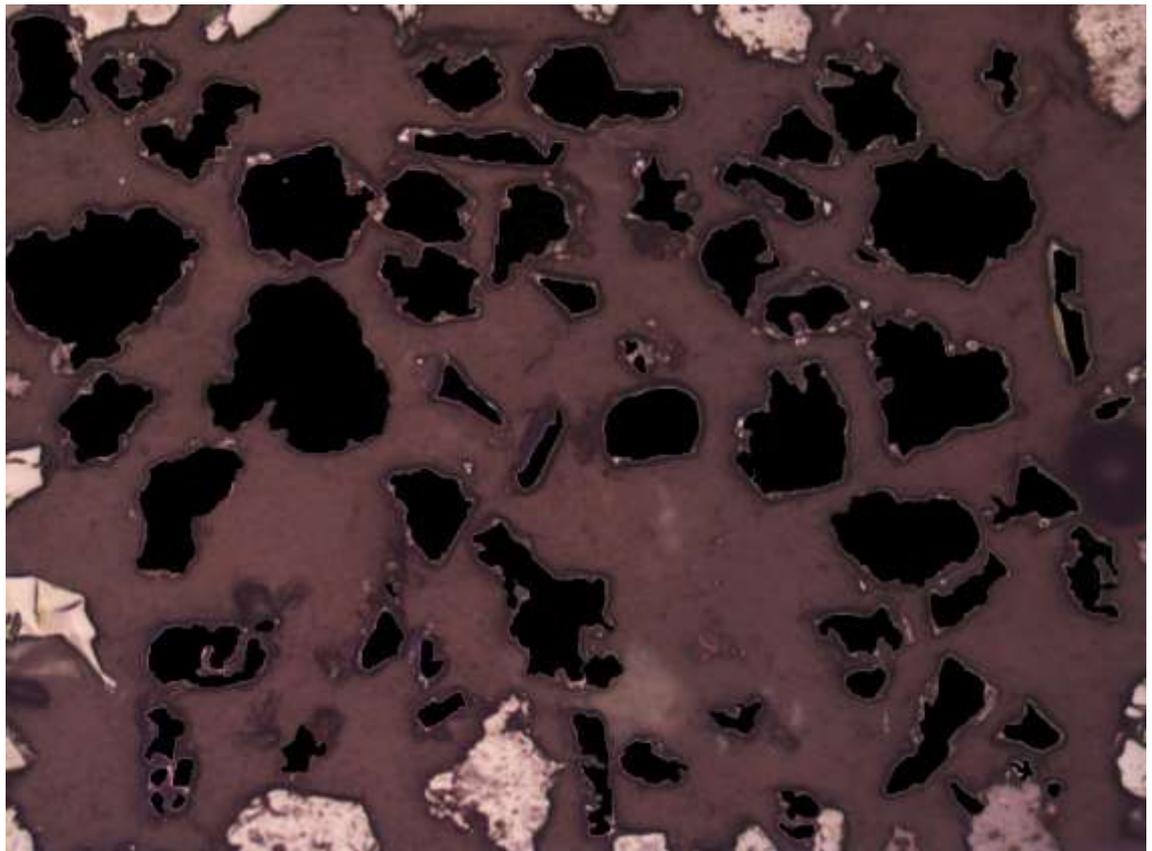


P2-27

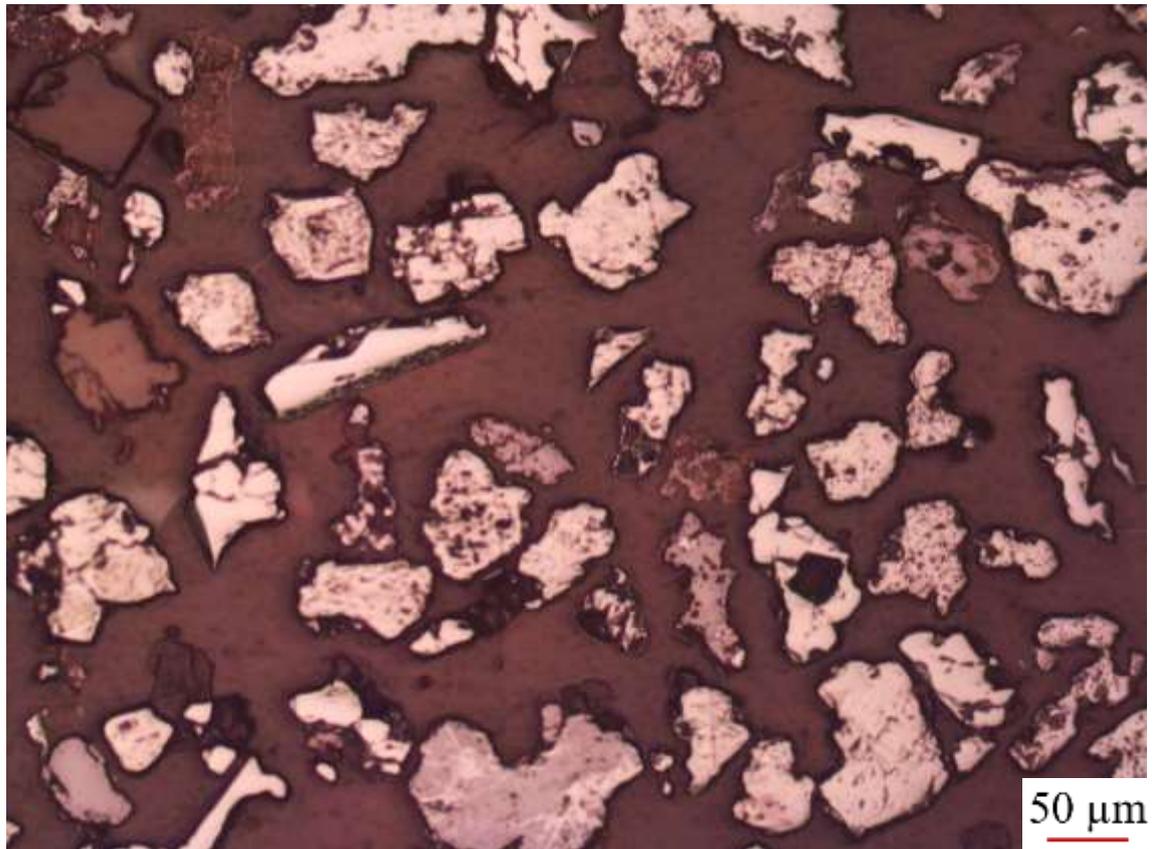


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	65	21
Área dos grãos (μm ²)	1226355	8347

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	75,581%	24,419%
Determinação de áreas	99,323%	0,677%

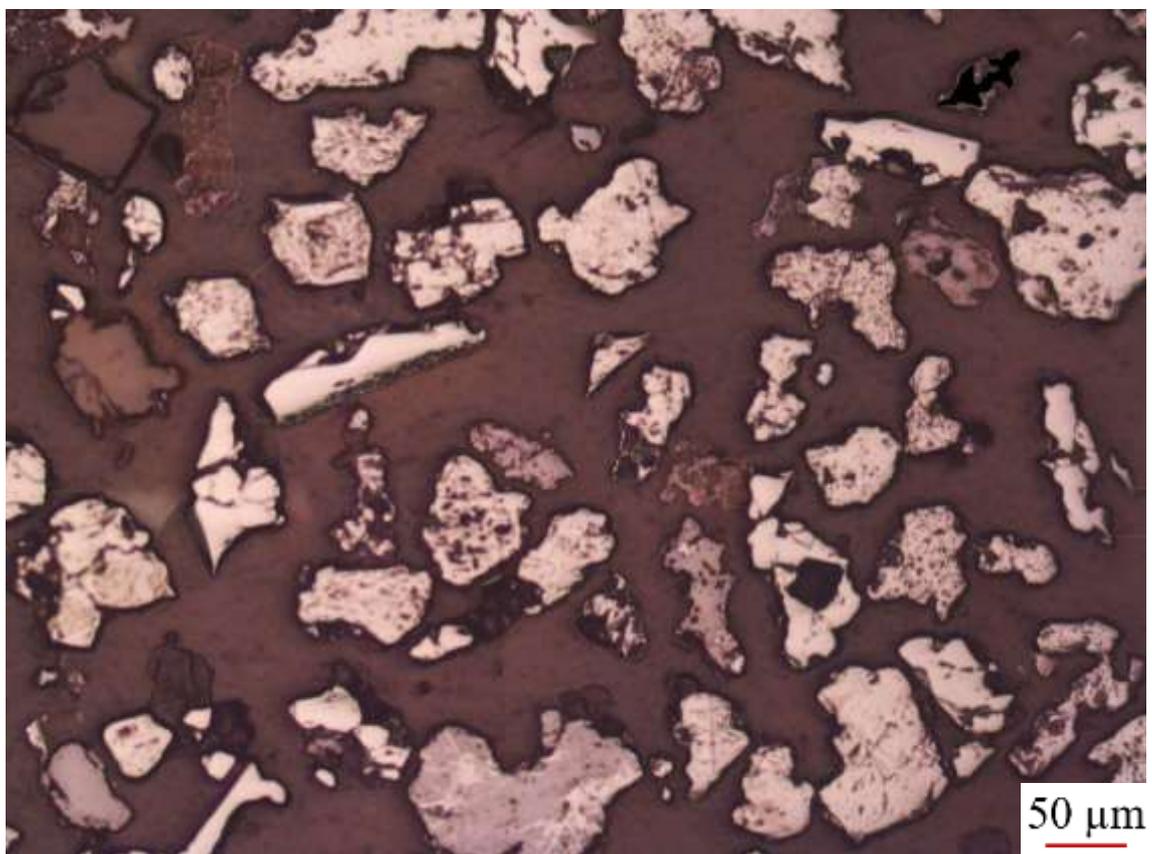
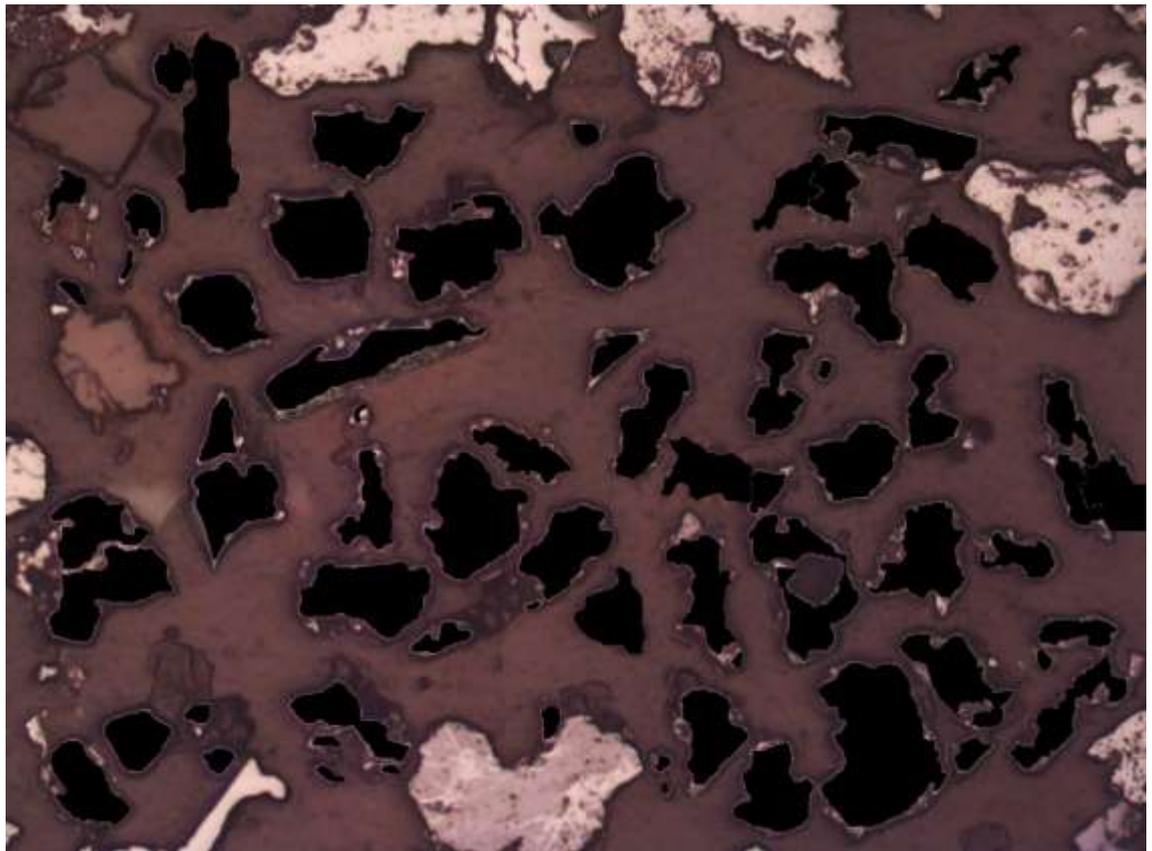


P2-28

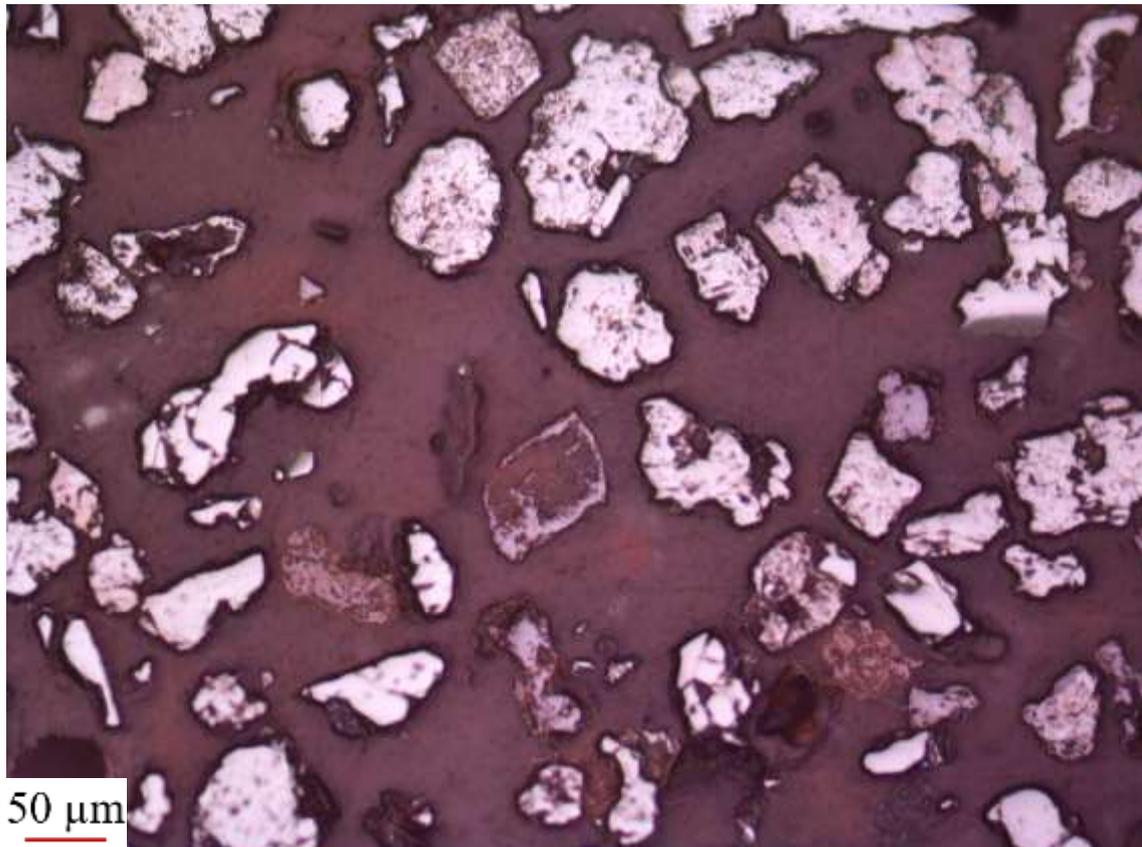


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	74	6
Área dos grãos (μm^2)	1103420	11146

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	92,500%	7,500%
Determinação de áreas	98,999%	1,001%

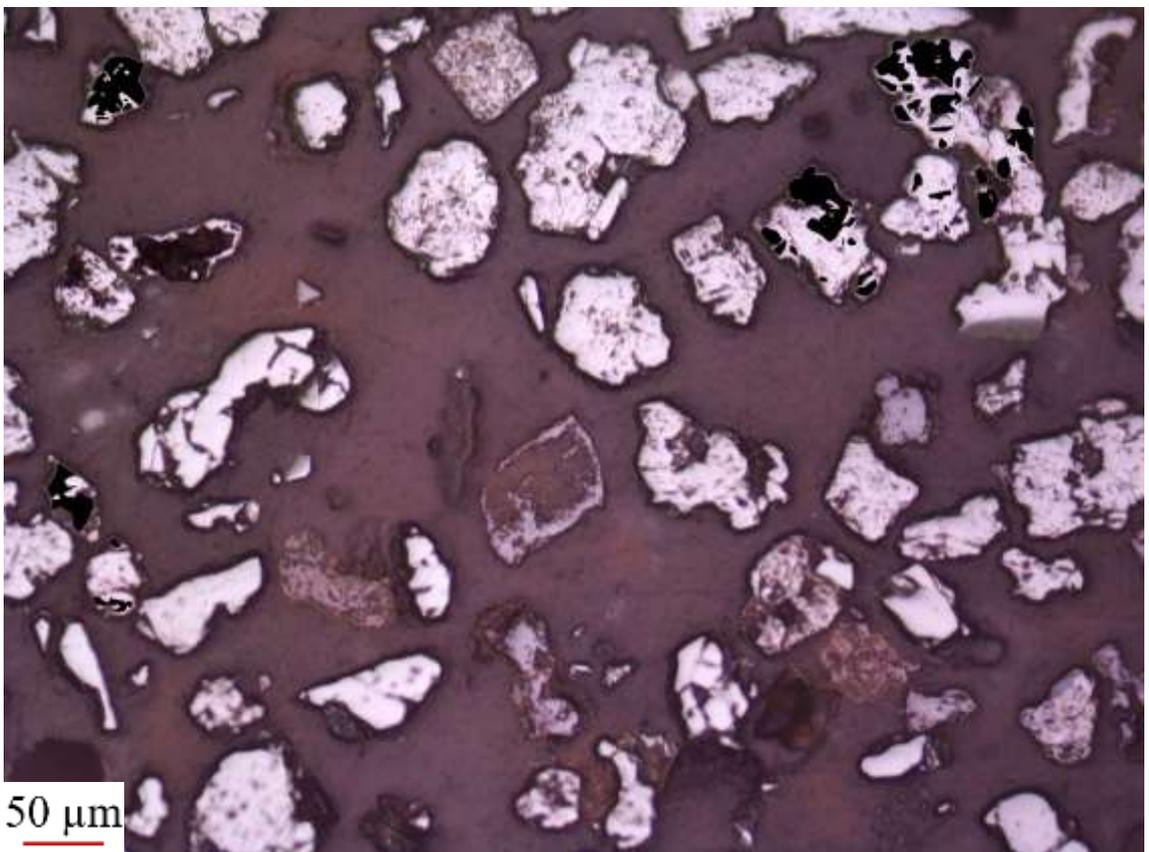
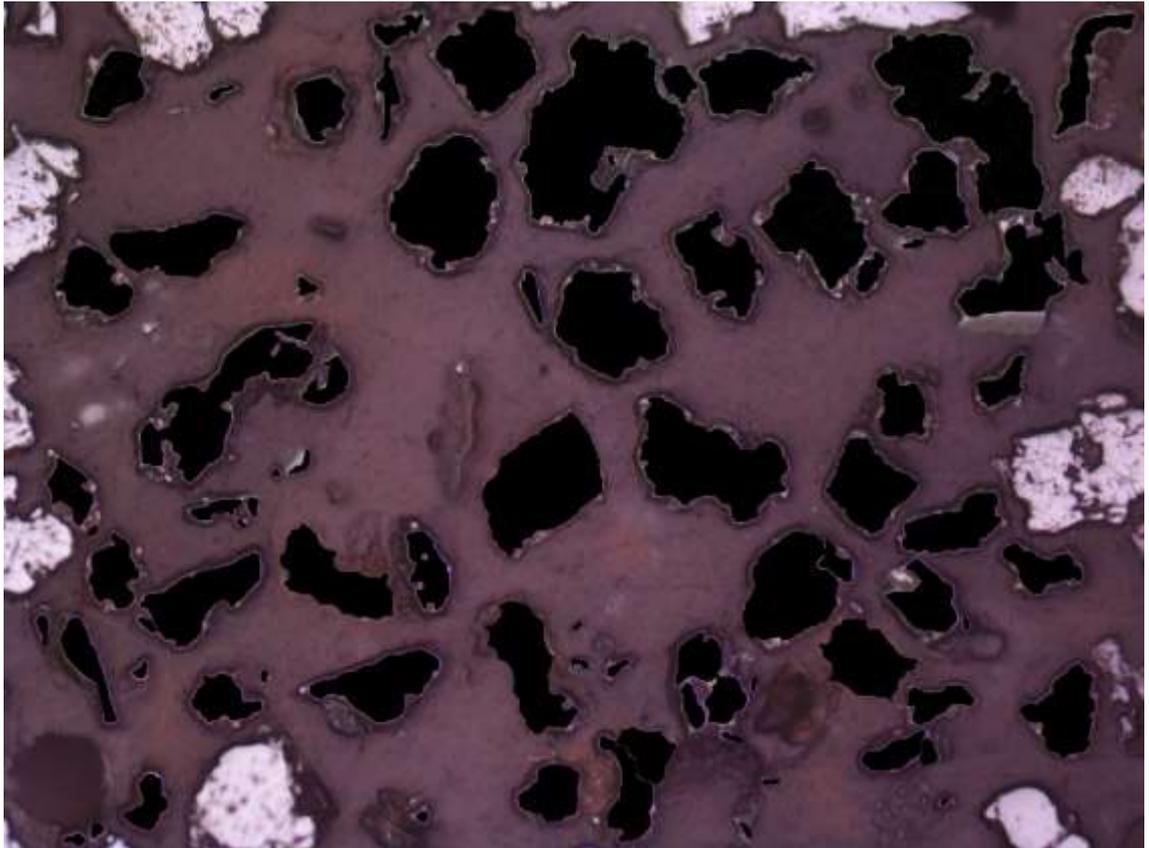


P2-29

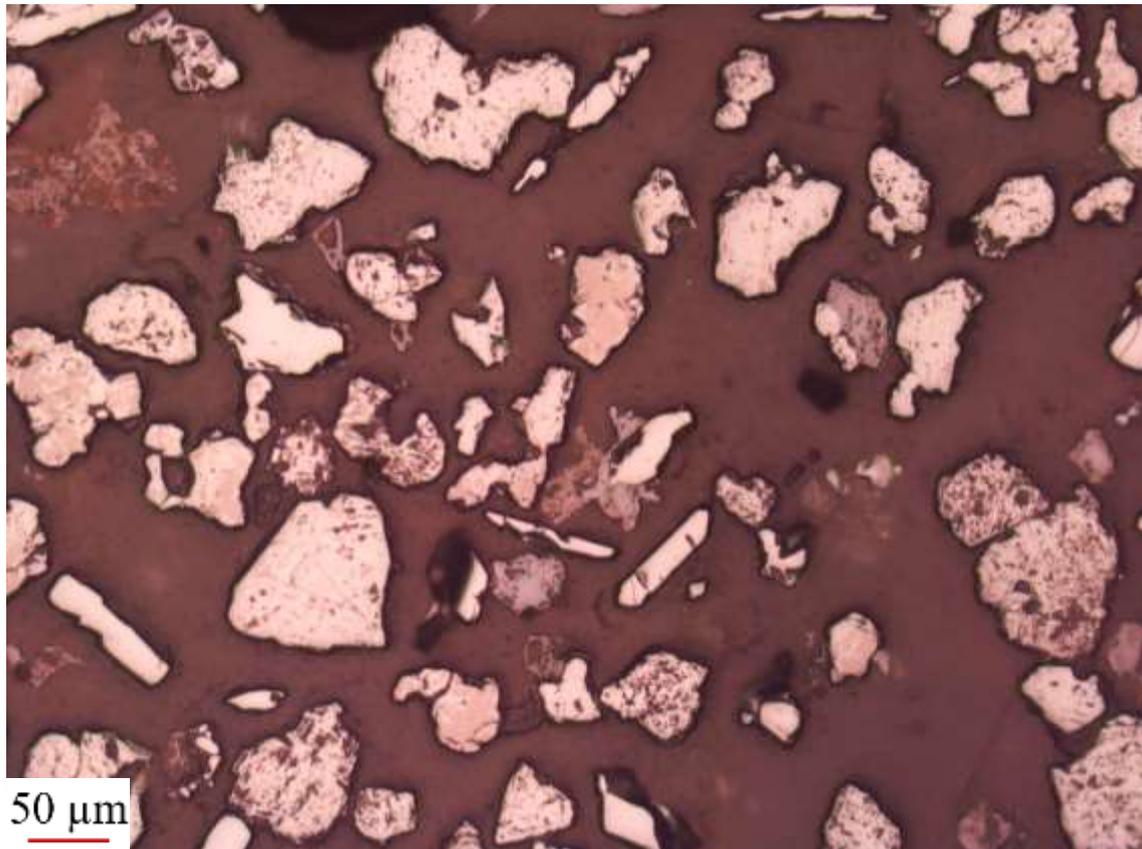


	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	75	36
Área dos grãos (μm ²)	1168603	66164

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	67,568%	32,432%
Determinação de áreas	94,640%	5,360%

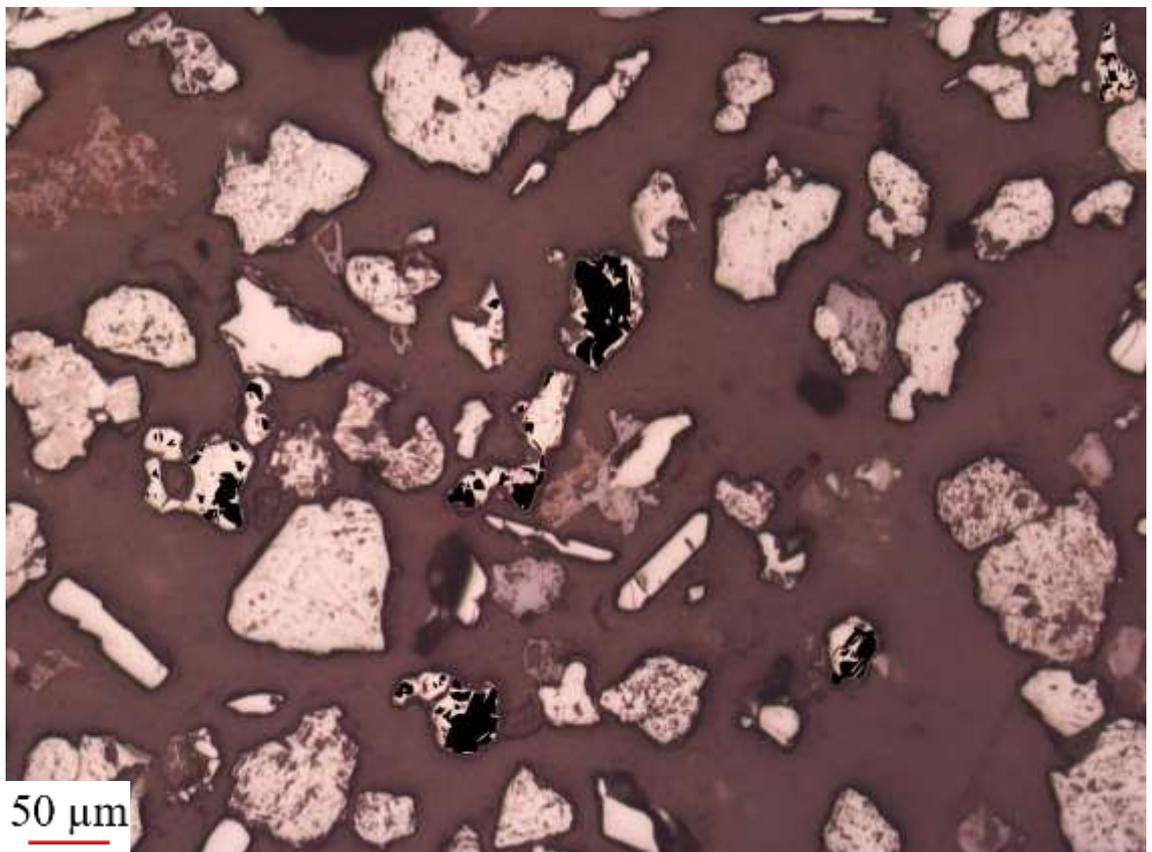
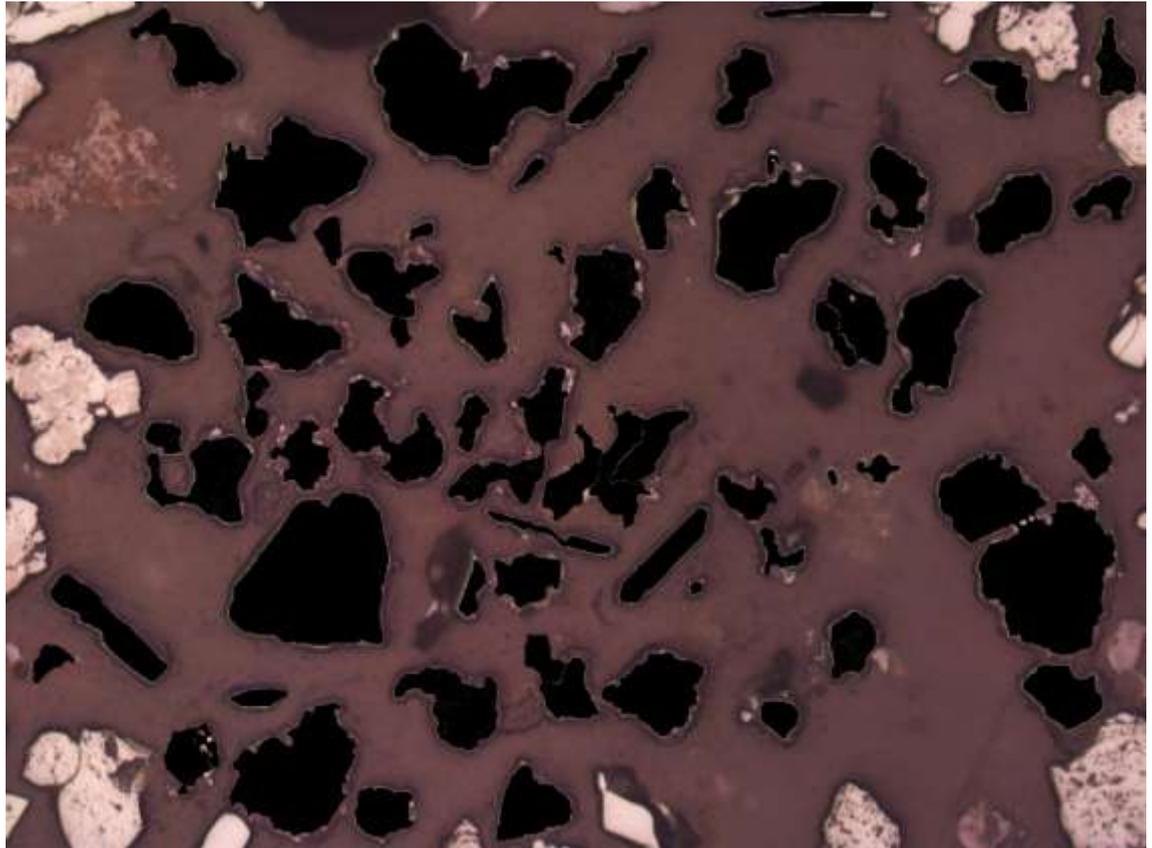


P3-1

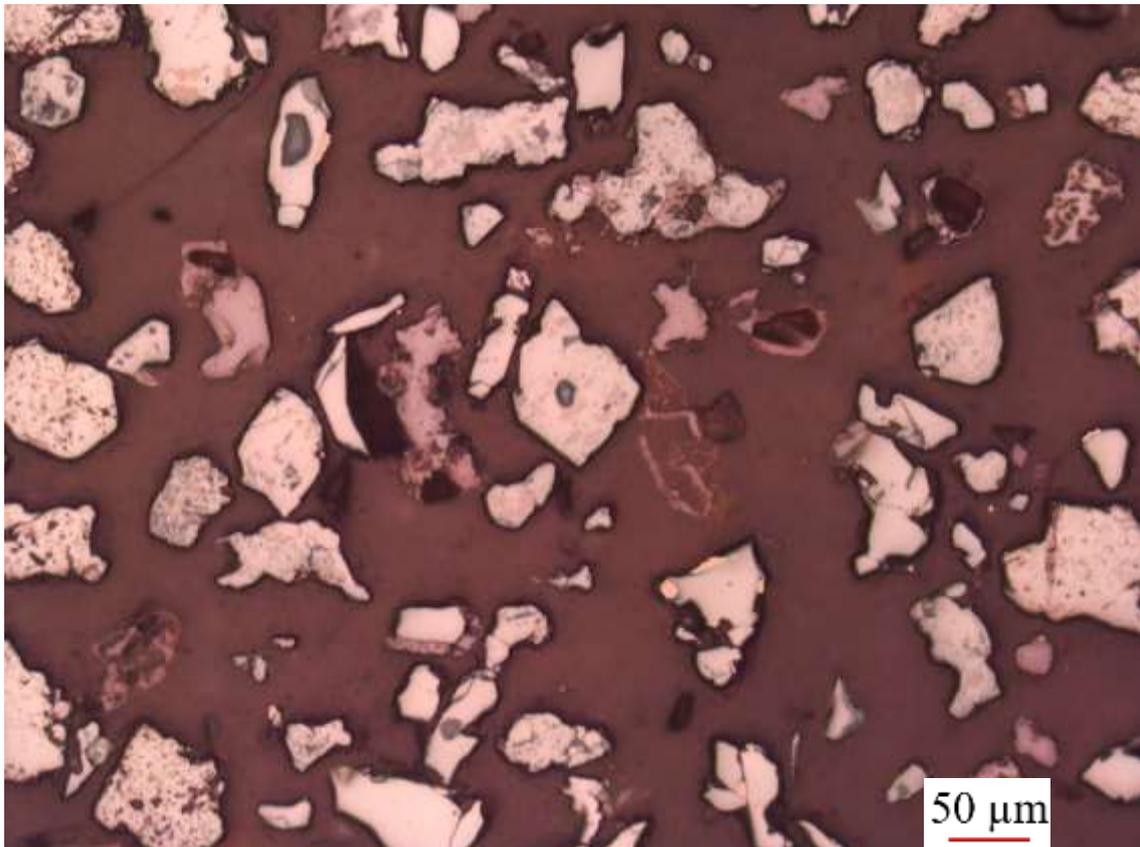


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	63	64
Área dos grãos (μm^2)	1143315	64465

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	49,606%	50,394%
Determinação de áreas	94,661%	5,339%

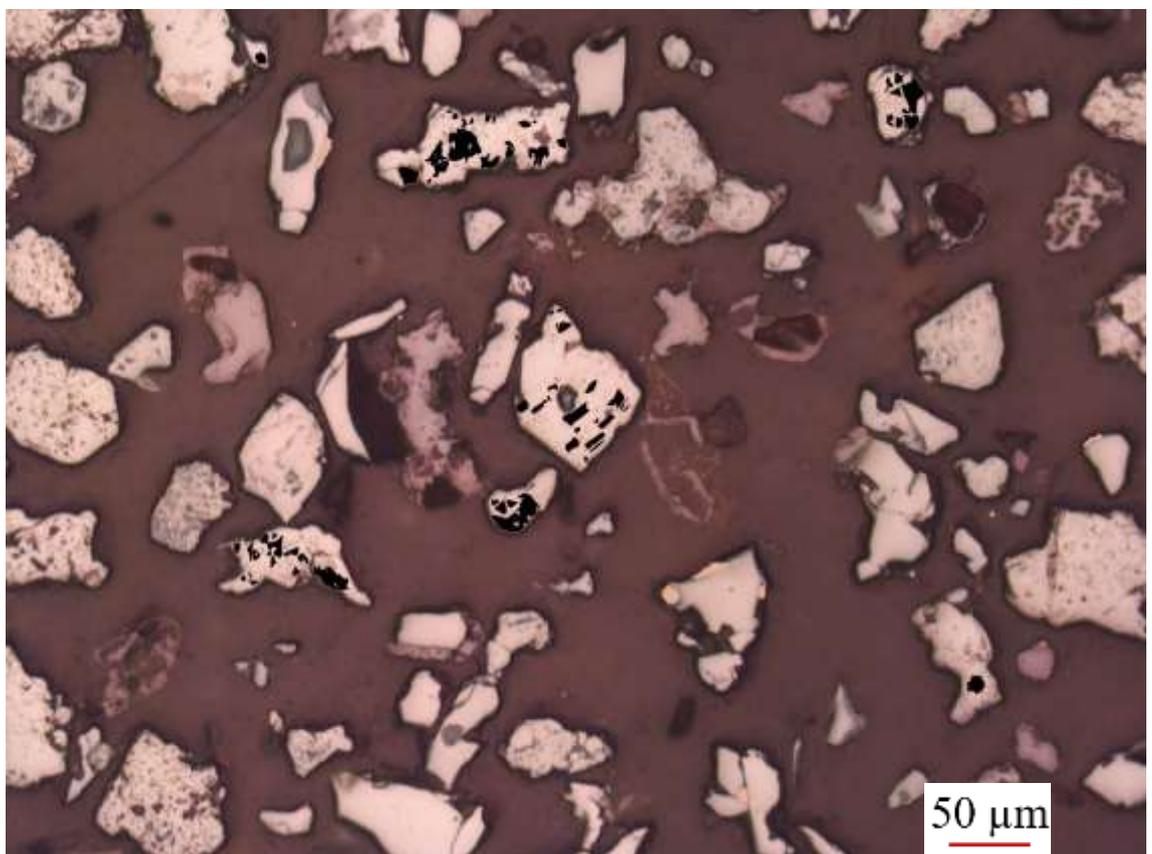
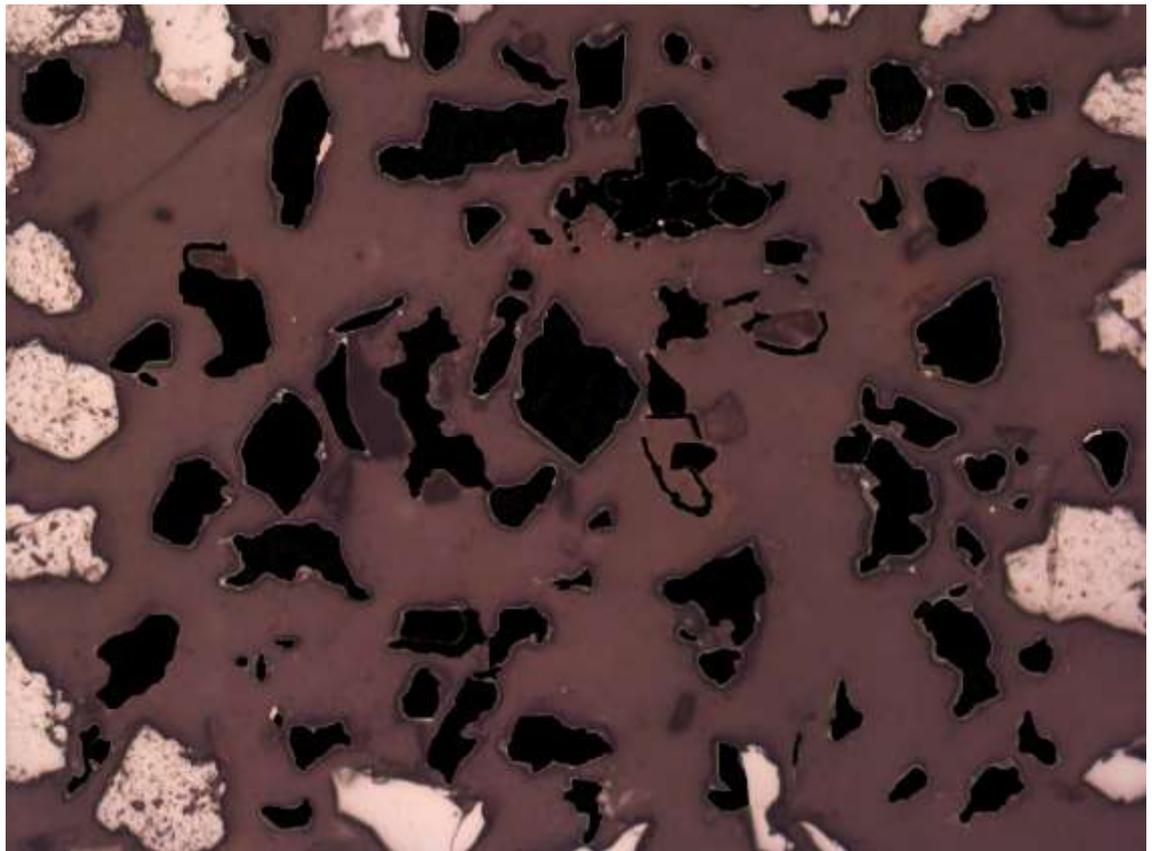


P3-2

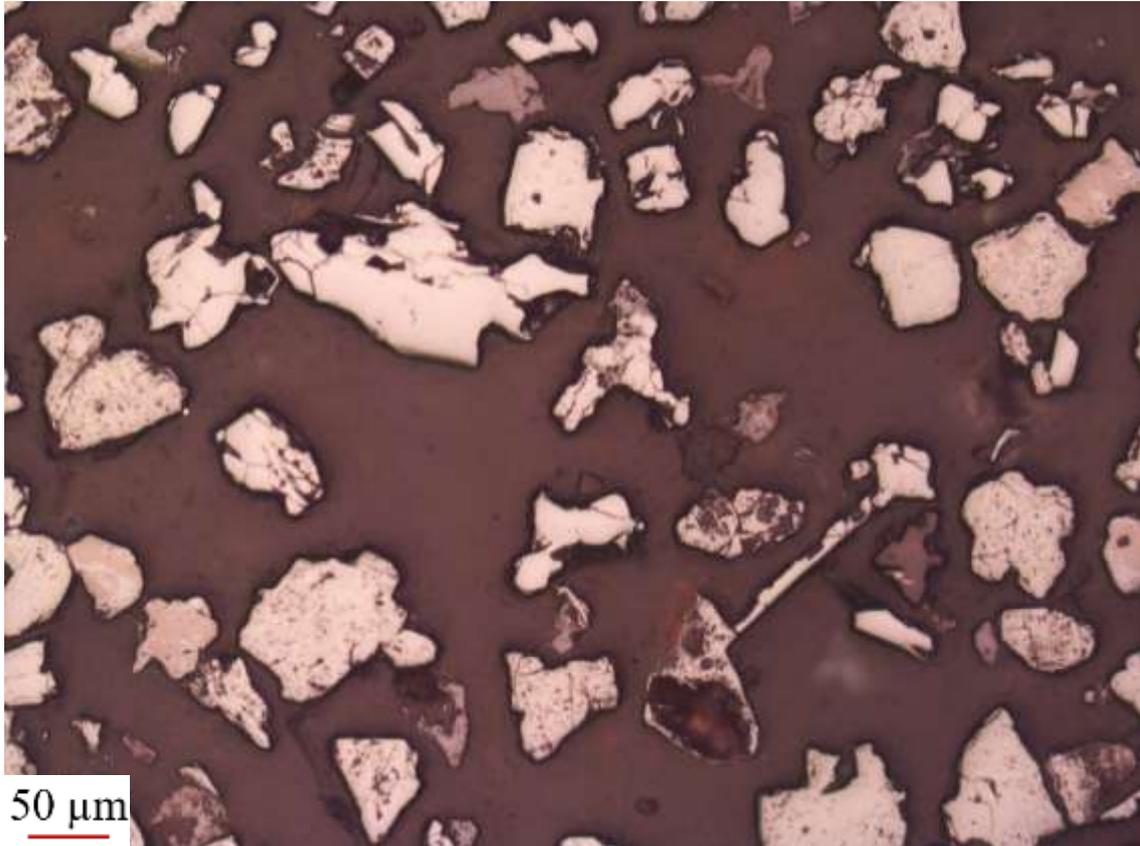


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	81	65
Área dos grãos (μm^2)	956443	36289

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	55,479%	44,521%
Determinação de áreas	96,347%	3,653%

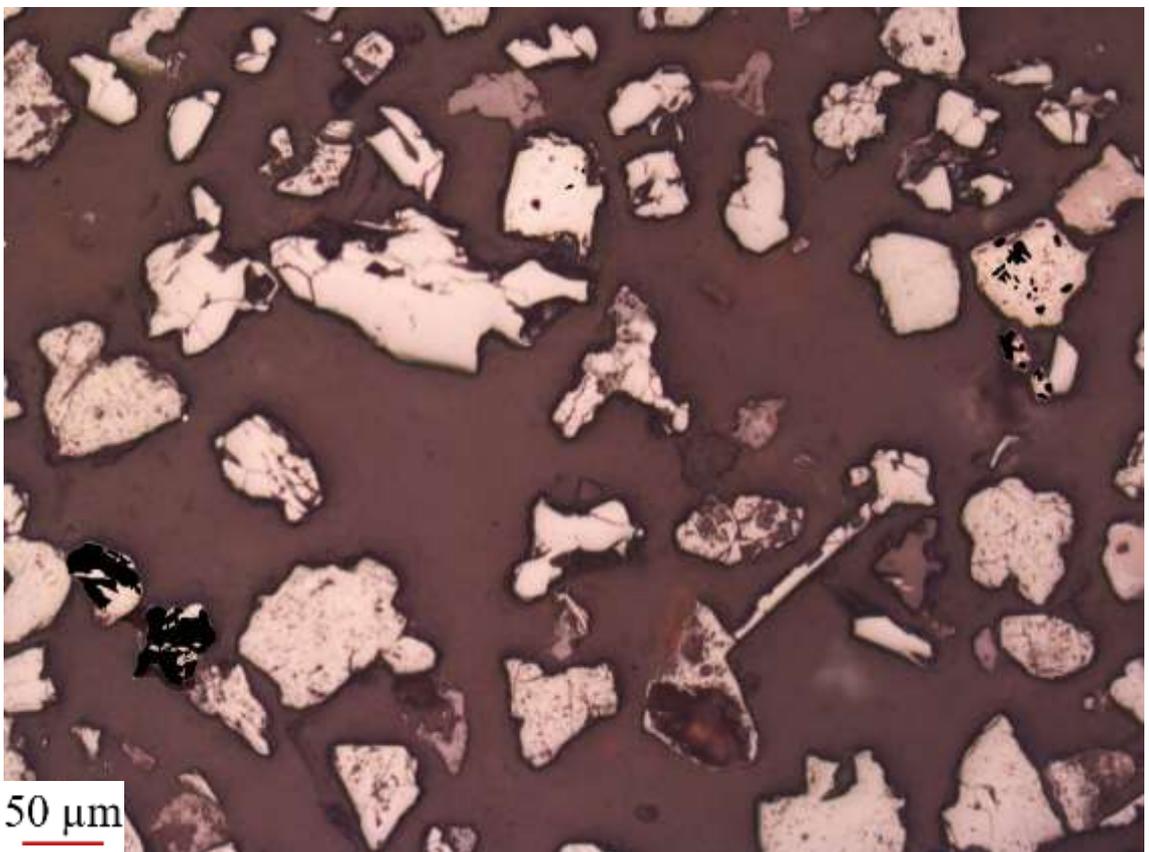
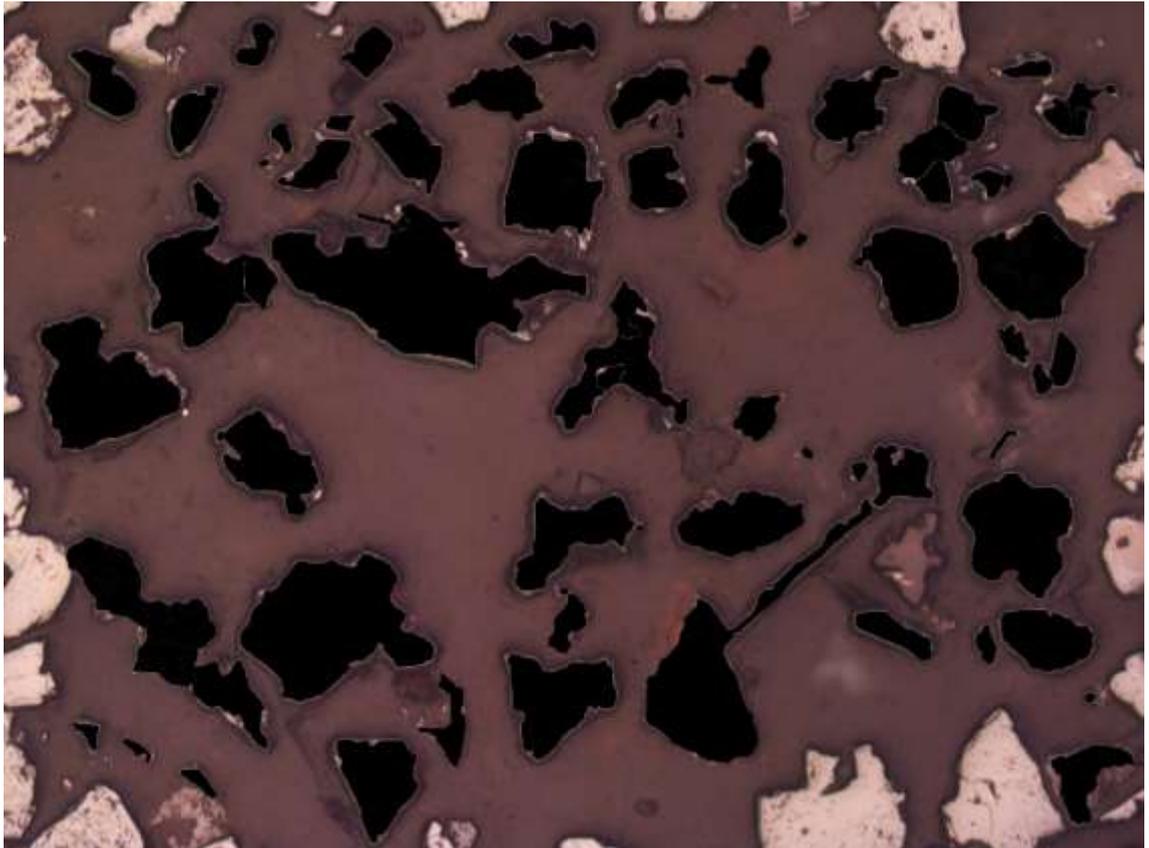


P3-3

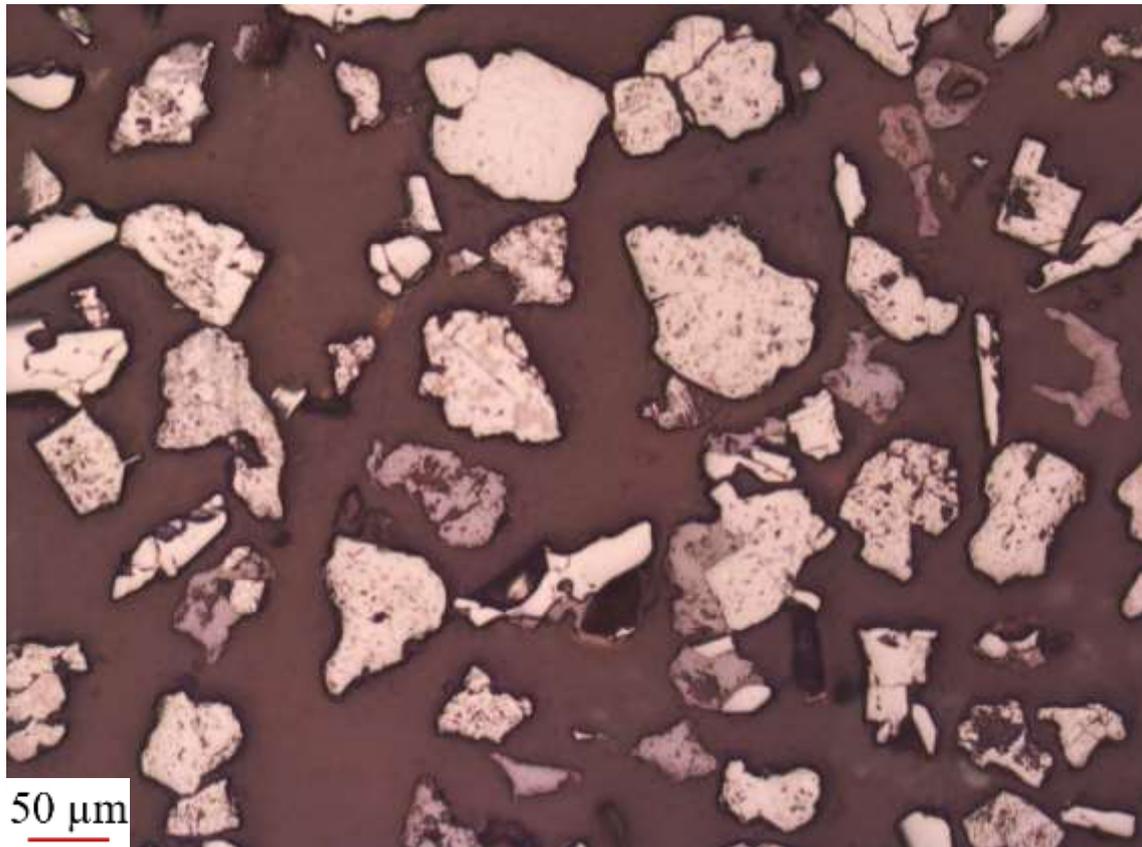


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	62	24
Área dos grãos (µm ²)	1119711	40648

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de Grãos	72,093%	27,907%
Determinação de áreas	96,495%	3,505%

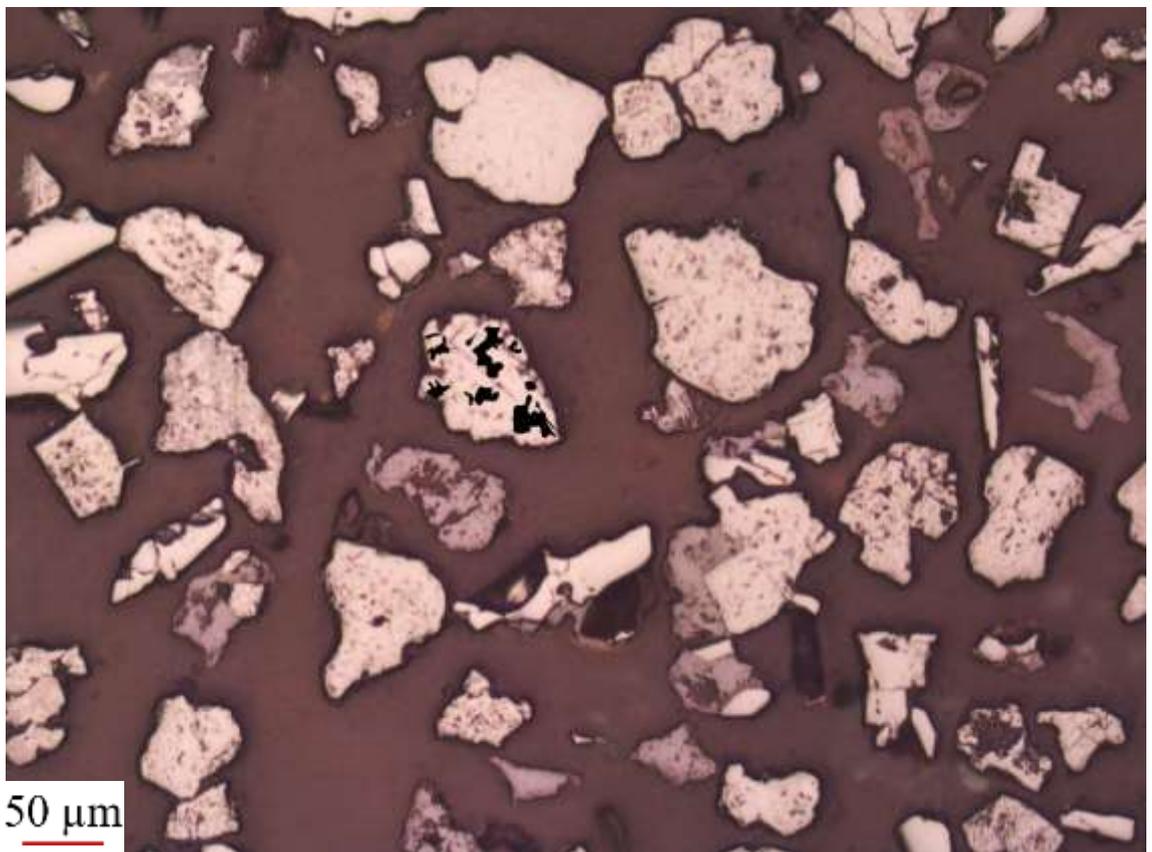
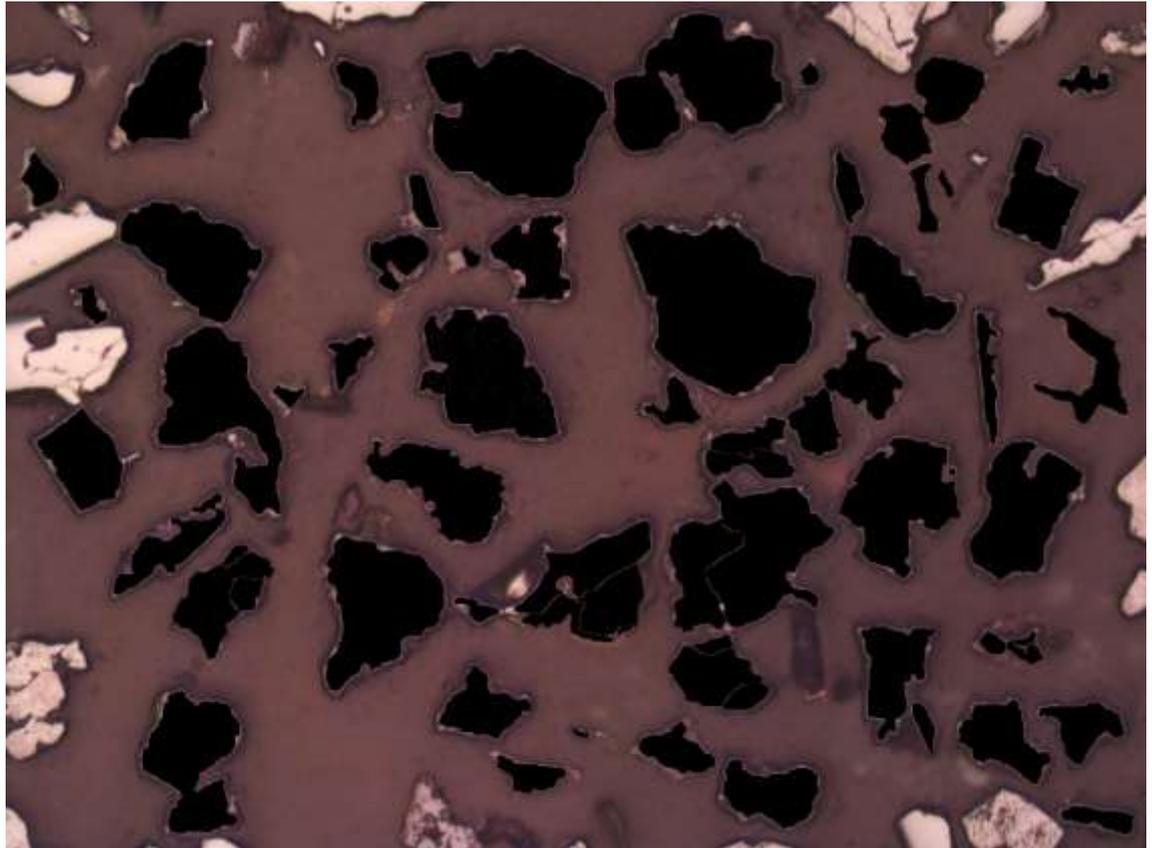


P3-4

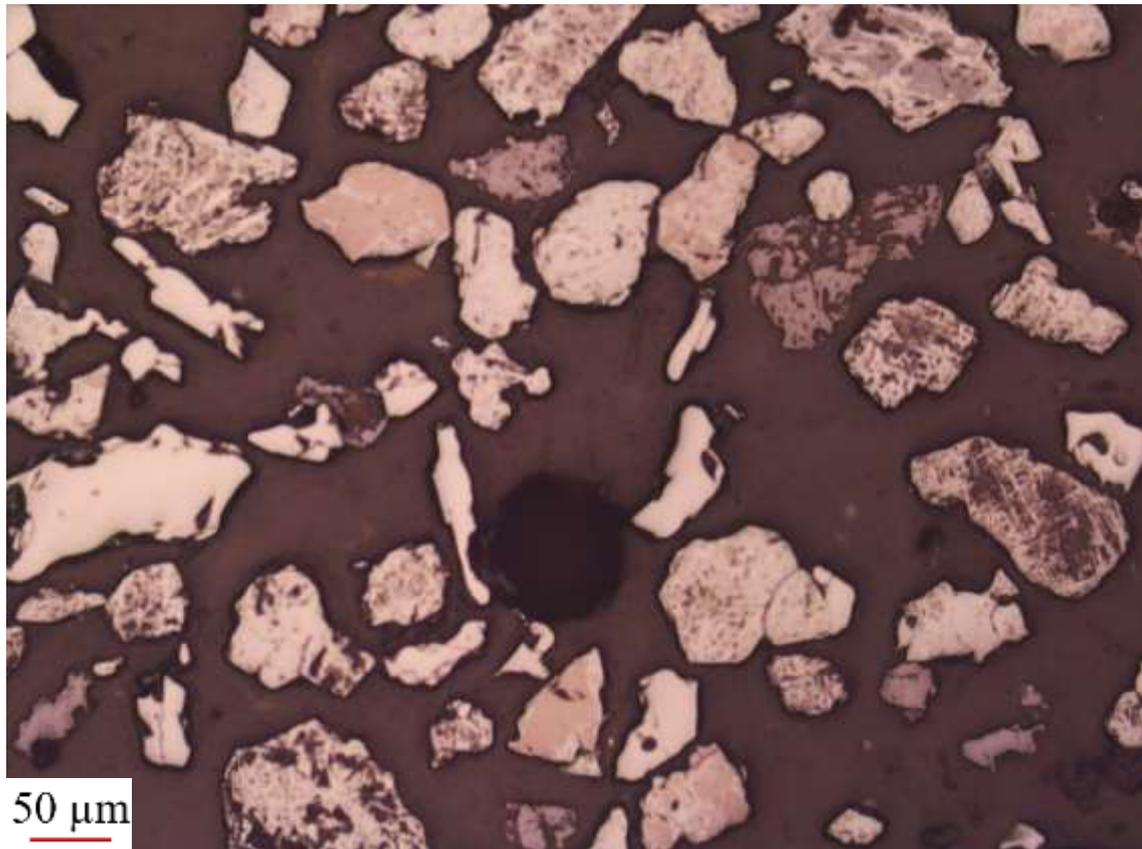


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	56	10
Área dos grãos (µm ²)	1355936	14108

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	84,848%	15,152%
Determinação de áreas	98,970%	1,030%

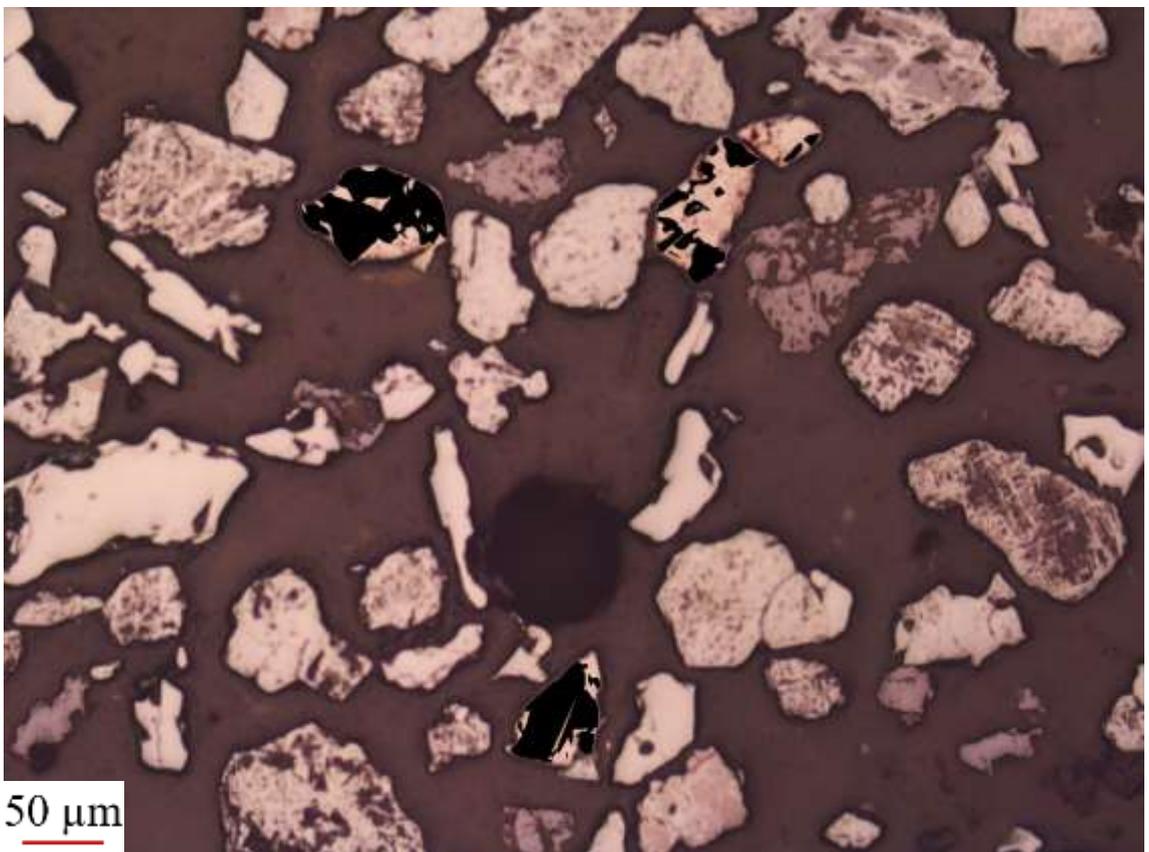
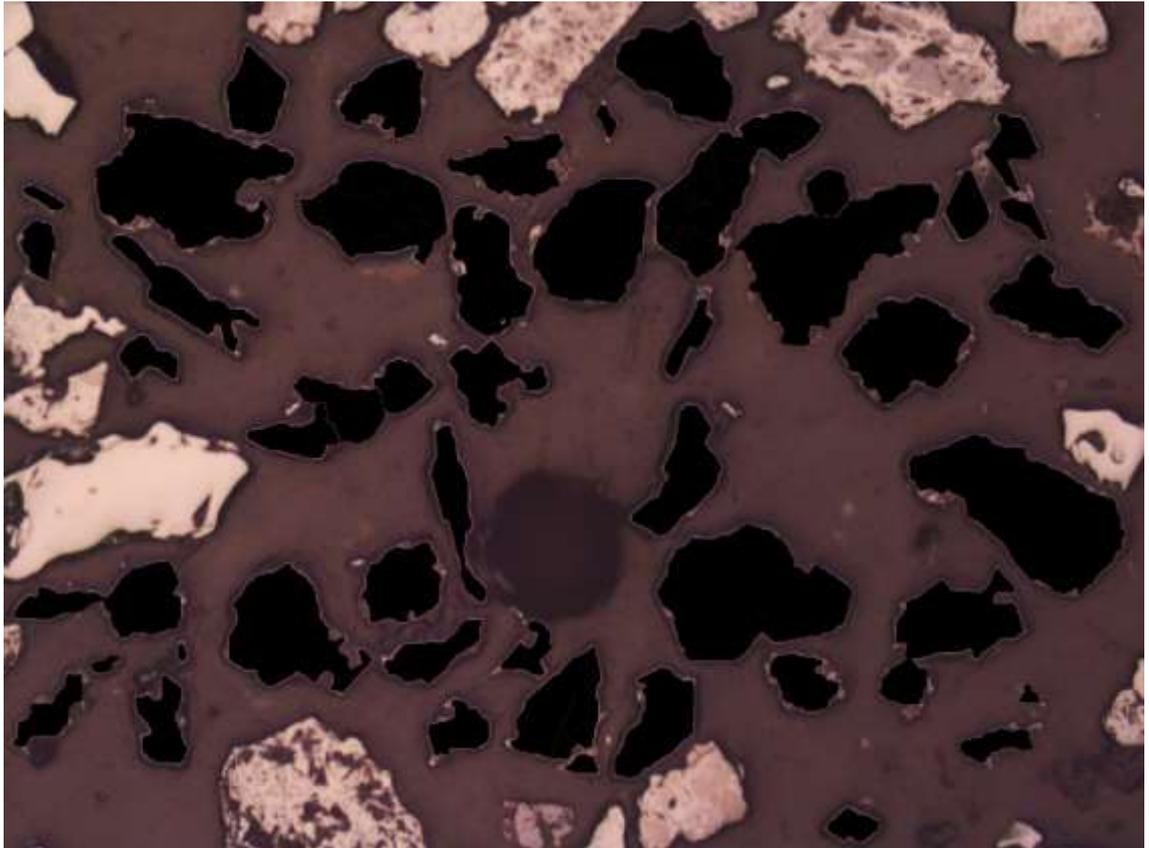


P3-5

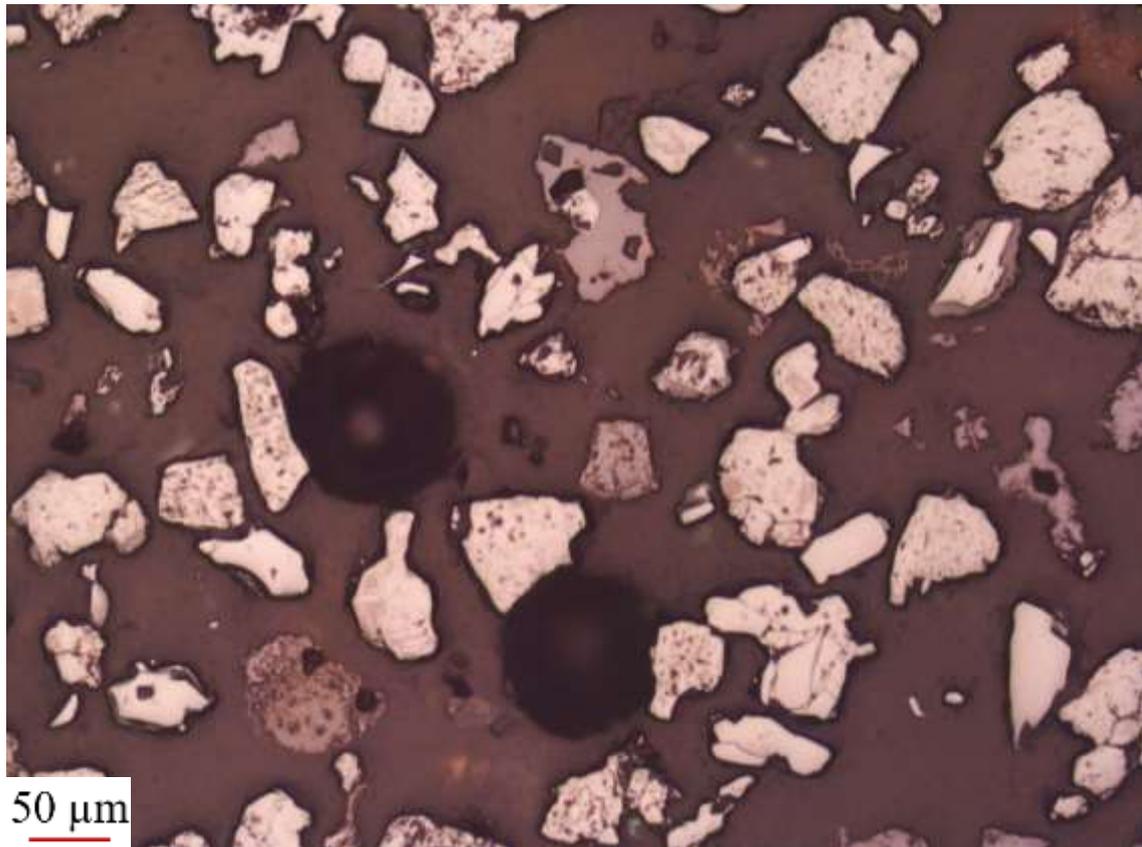


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	46	13
Área dos grãos (µm ²)	1236873	86022

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	77,966%	22,034%
Determinação de áreas	93,496%	6,504%

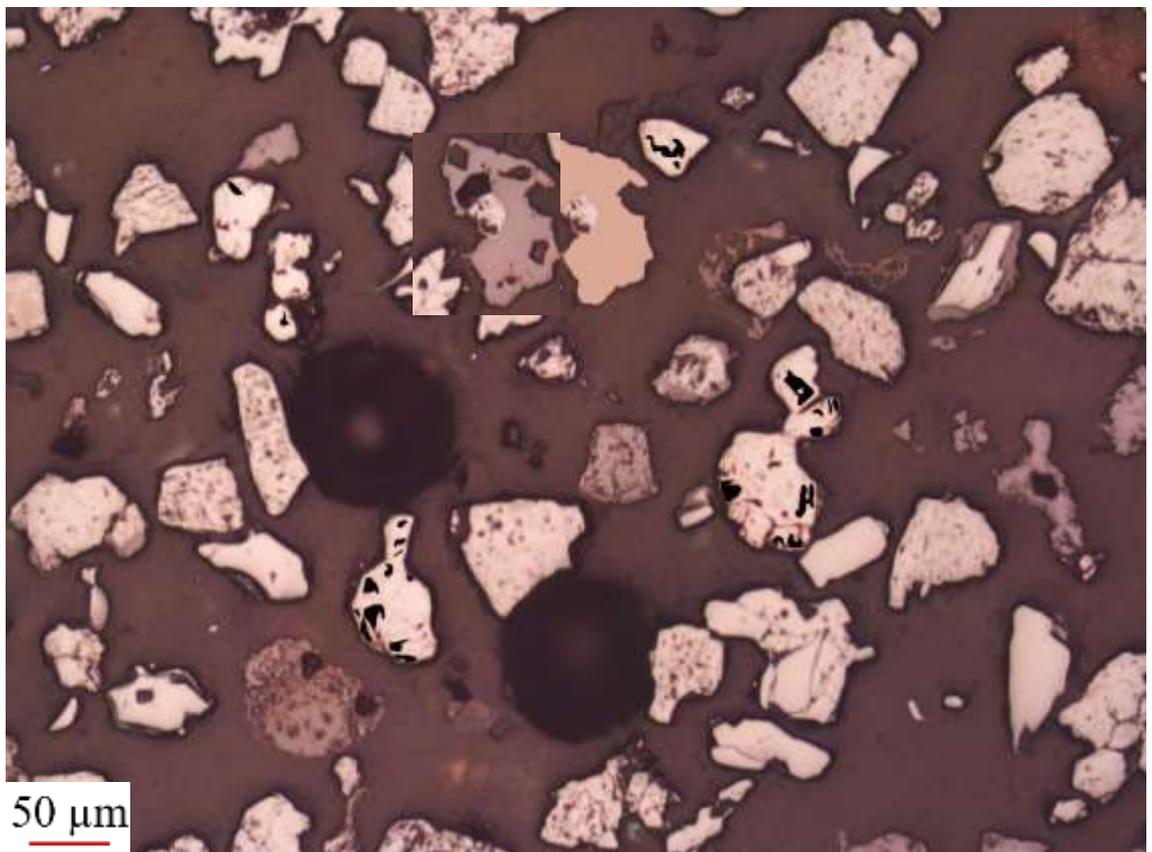
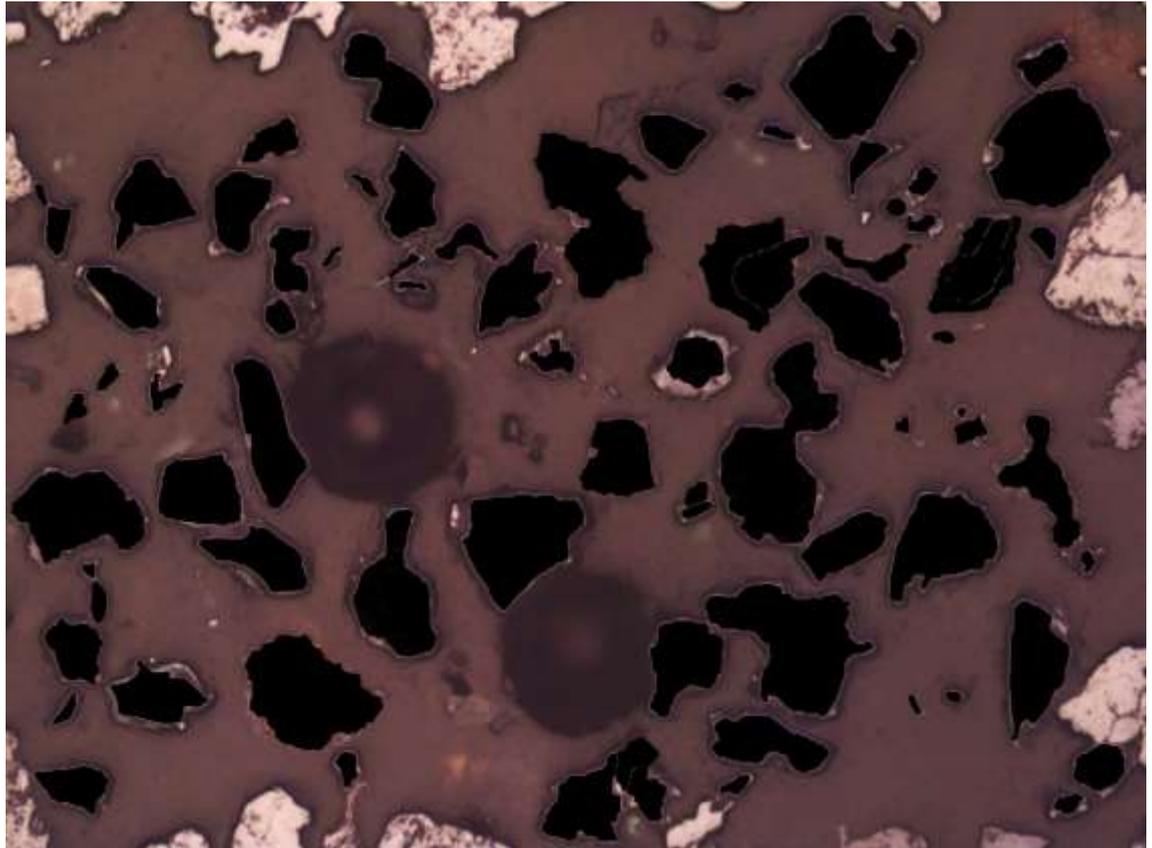


P3-6

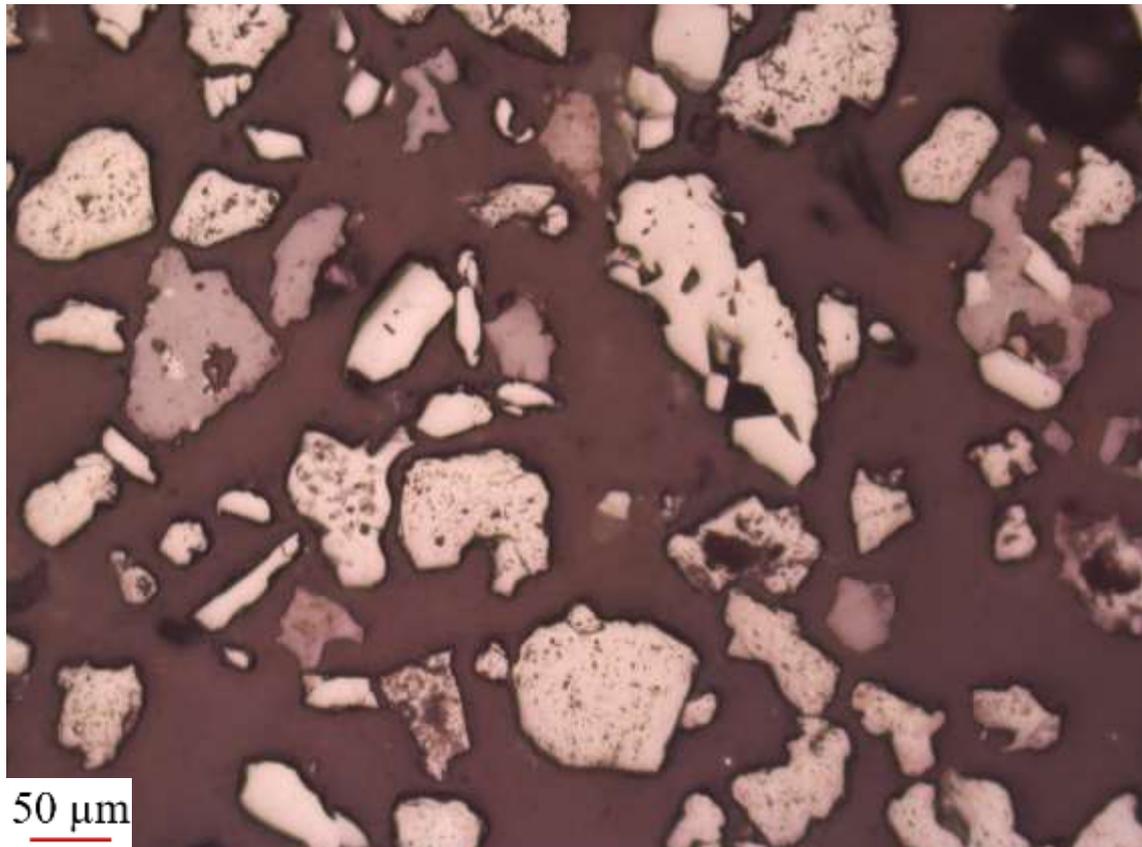


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	80	28
Área dos grãos (µm ²)	1145754	18331

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	74,074%	25,926%
Determinação de áreas	98,427%	1,573%

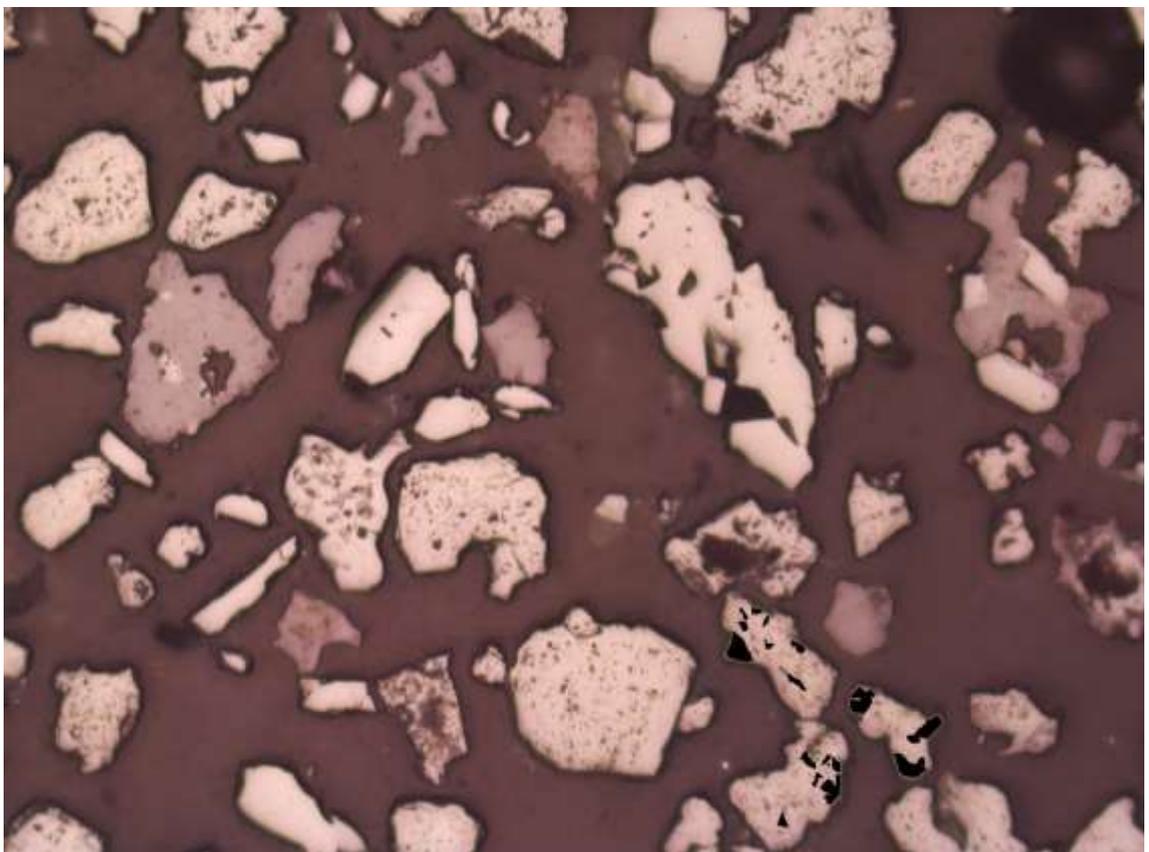
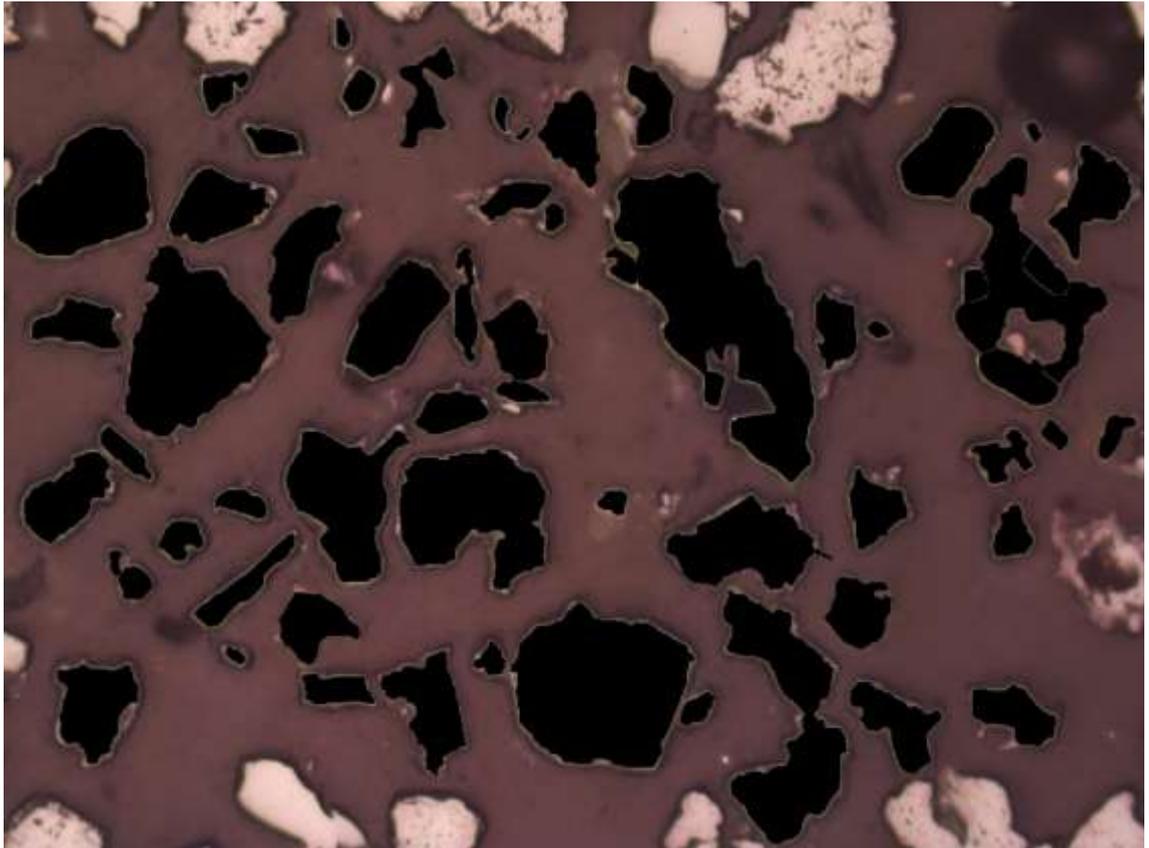


P3-7

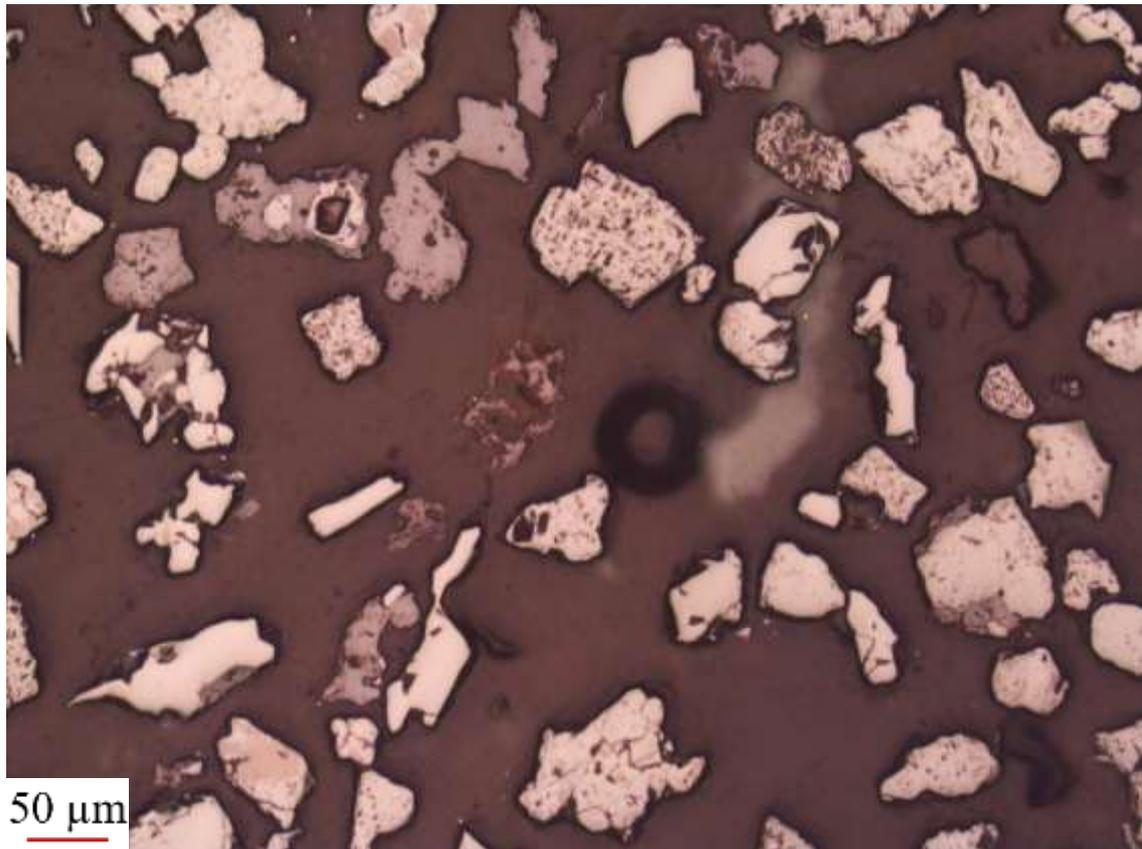


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	54	19
Área dos grãos (µm ²)	1272129	15826

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	73,973%	26,027%
Determinação de áreas	98,773%	1,227%

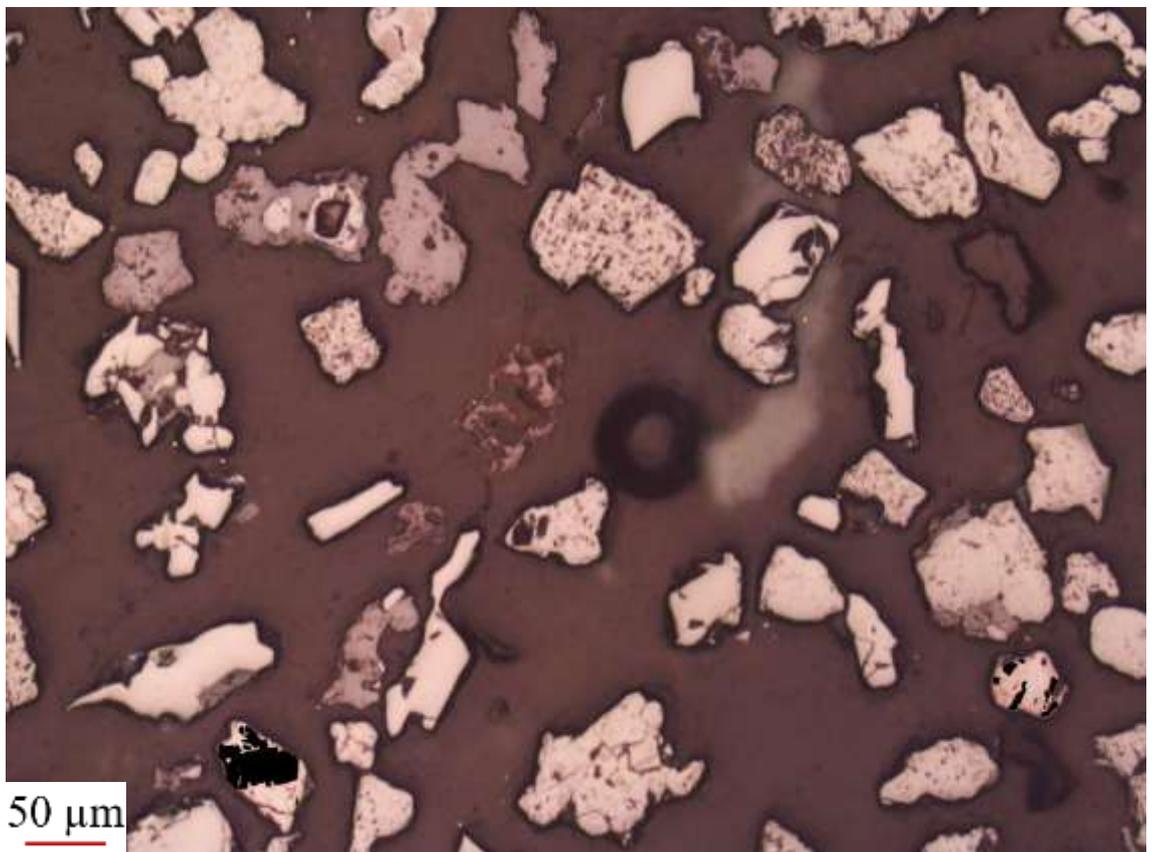
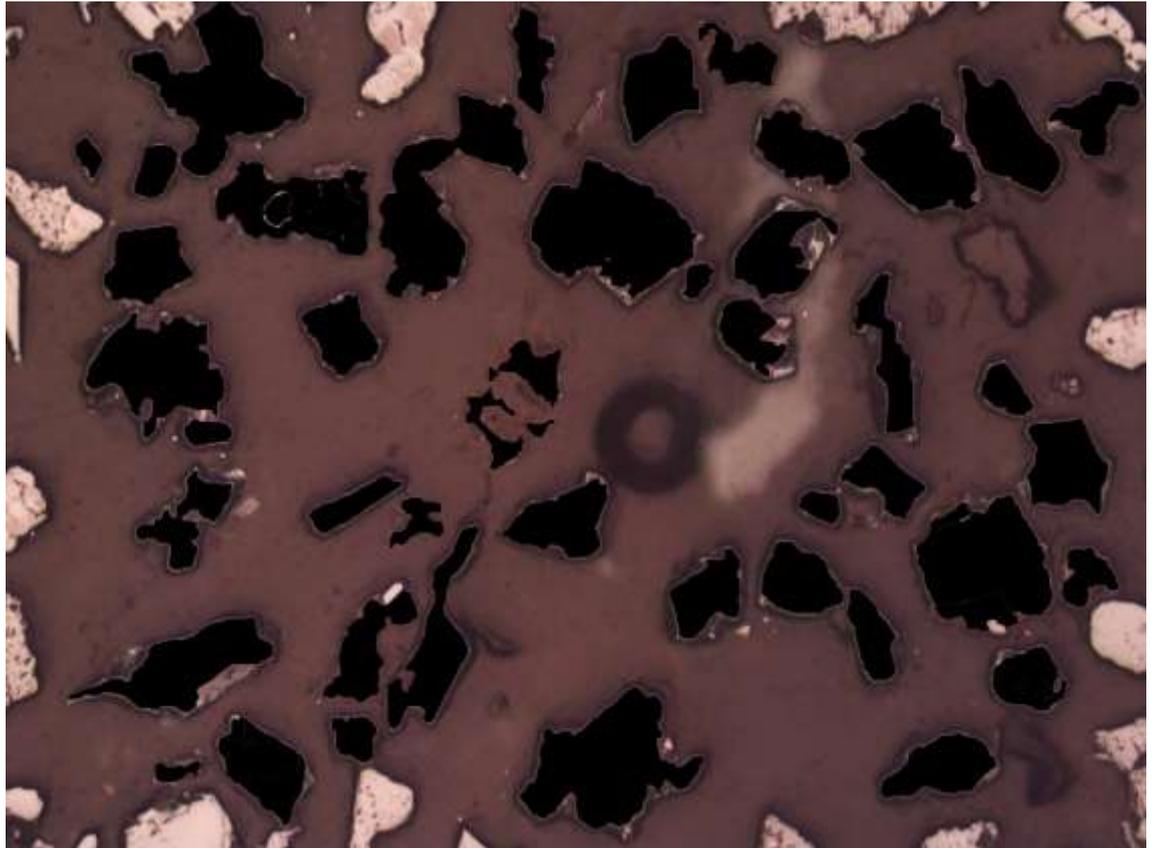


P3-8

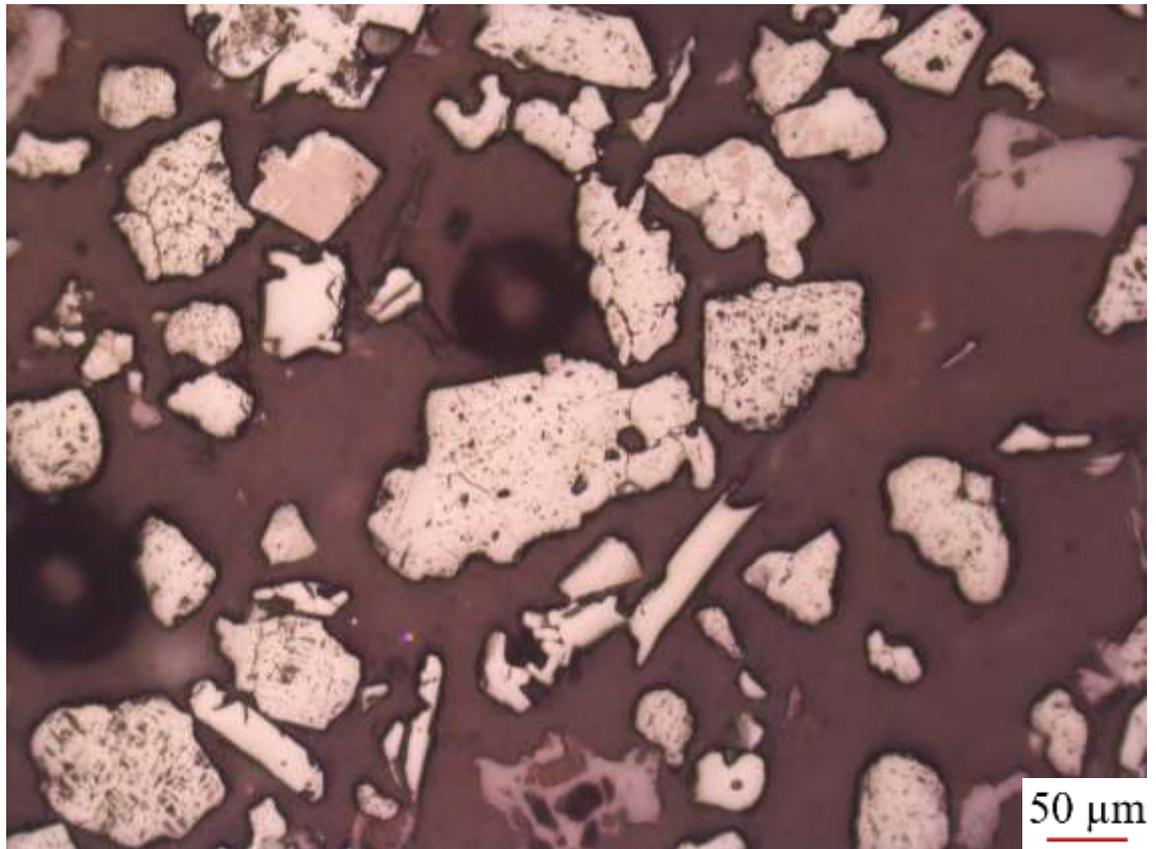


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	48	12
Área dos grãos (µm ²)	1133752	19299

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de Grãos	80,000%	20,000%
Determinação de áreas	98,325%	1,675%

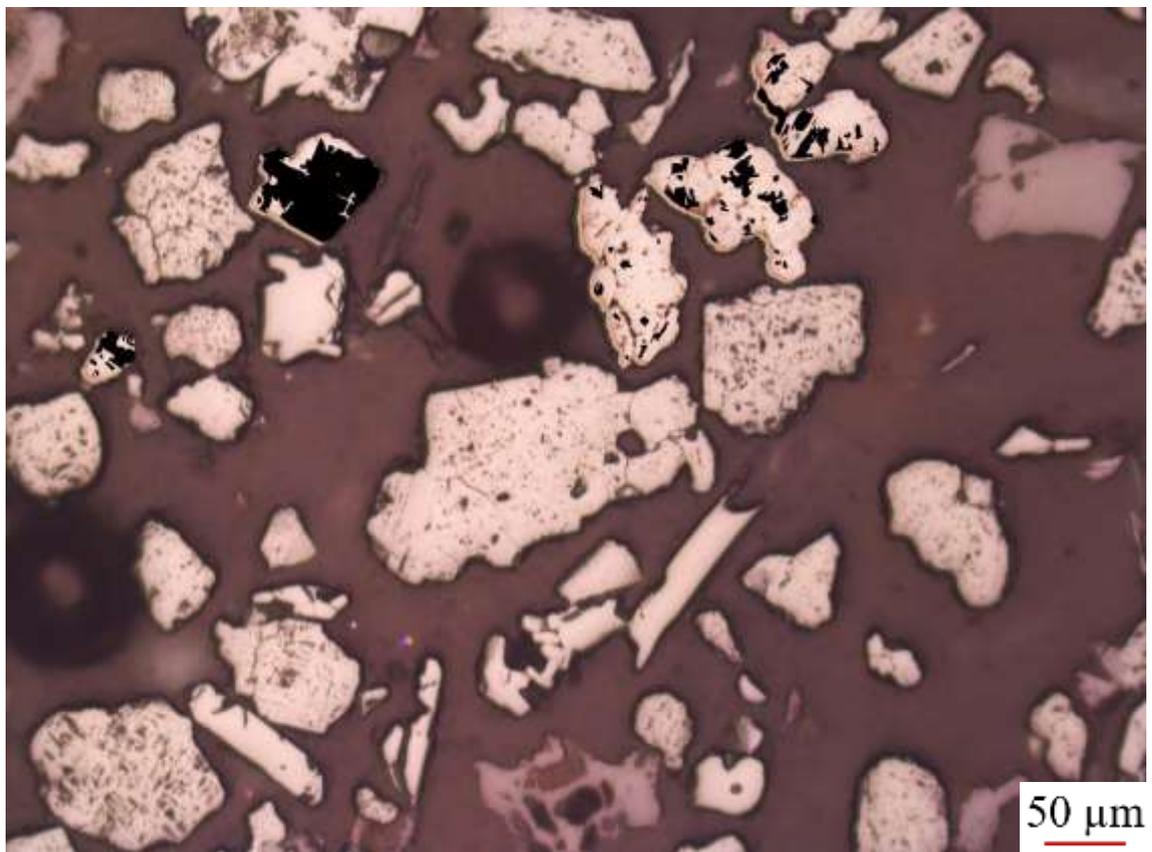
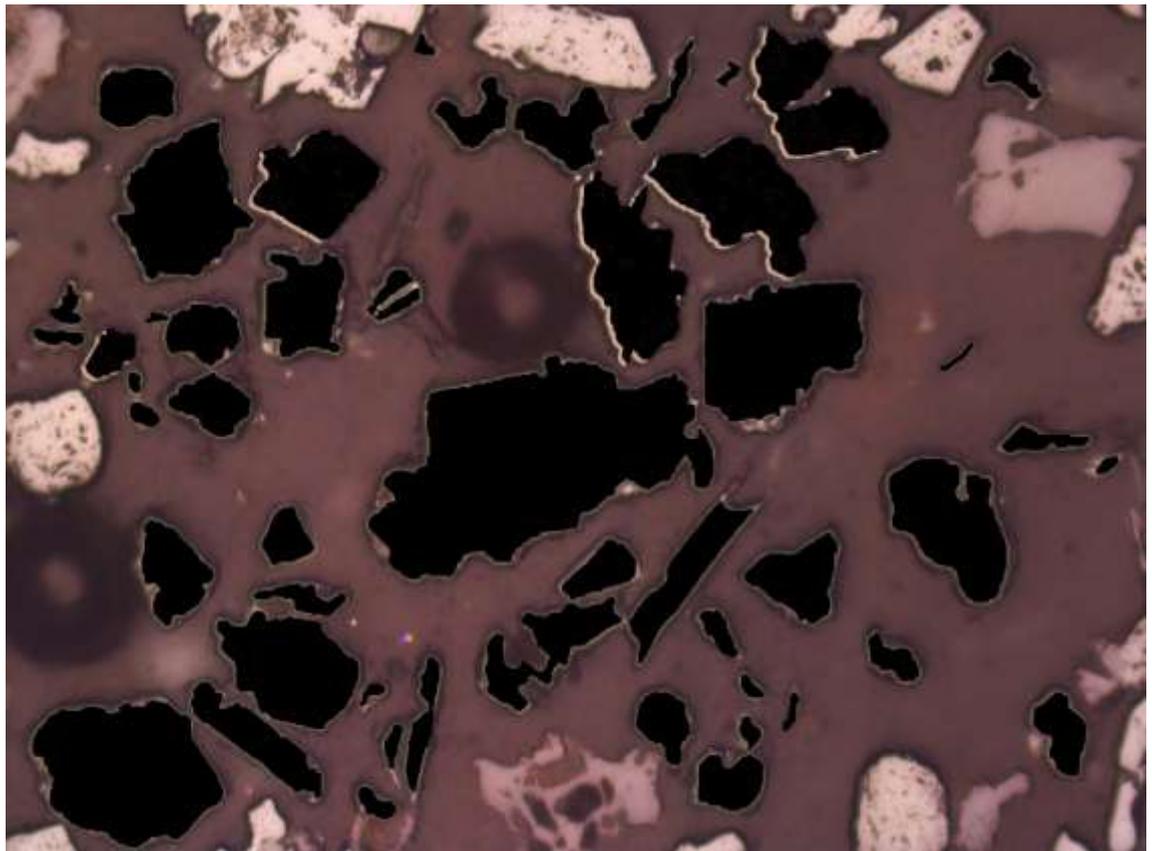


P3-9

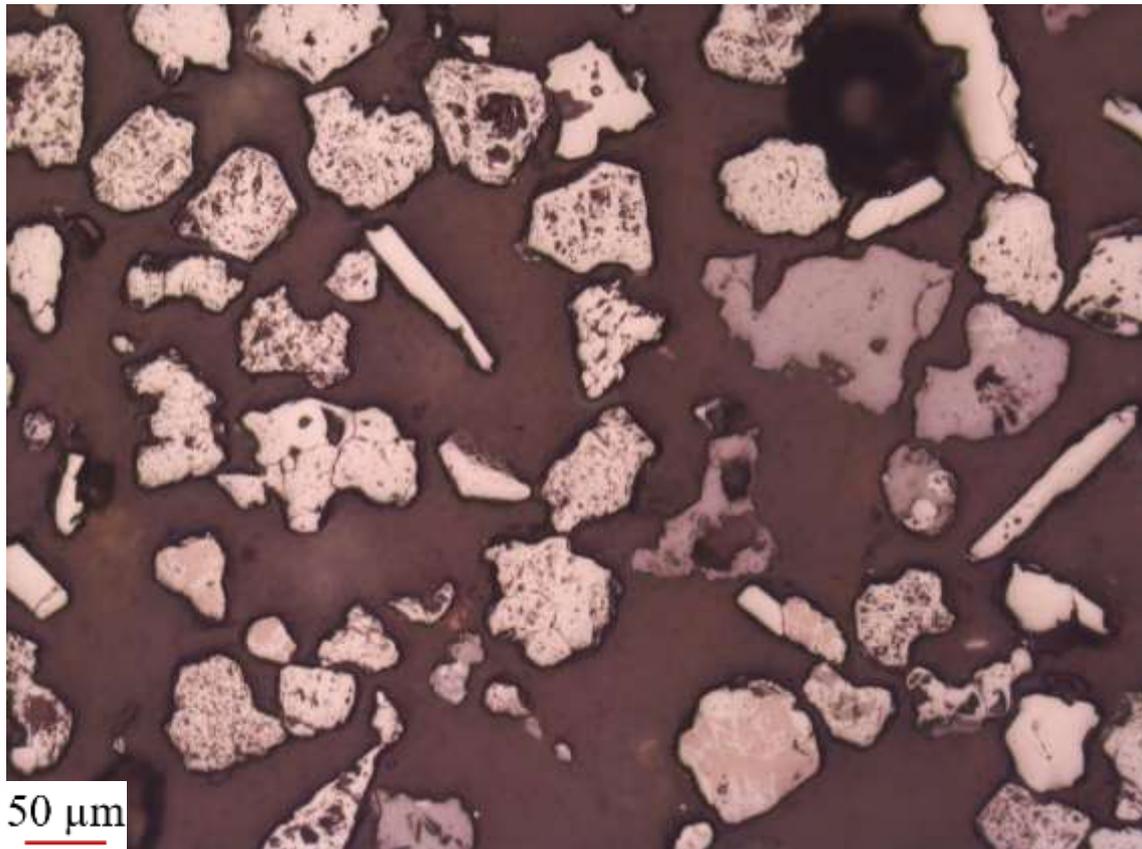


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	51	59
Área dos grãos (μm ²)	1227719	67295

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	46,364%	53,636%
Determinação de áreas	94,804%	5,196%

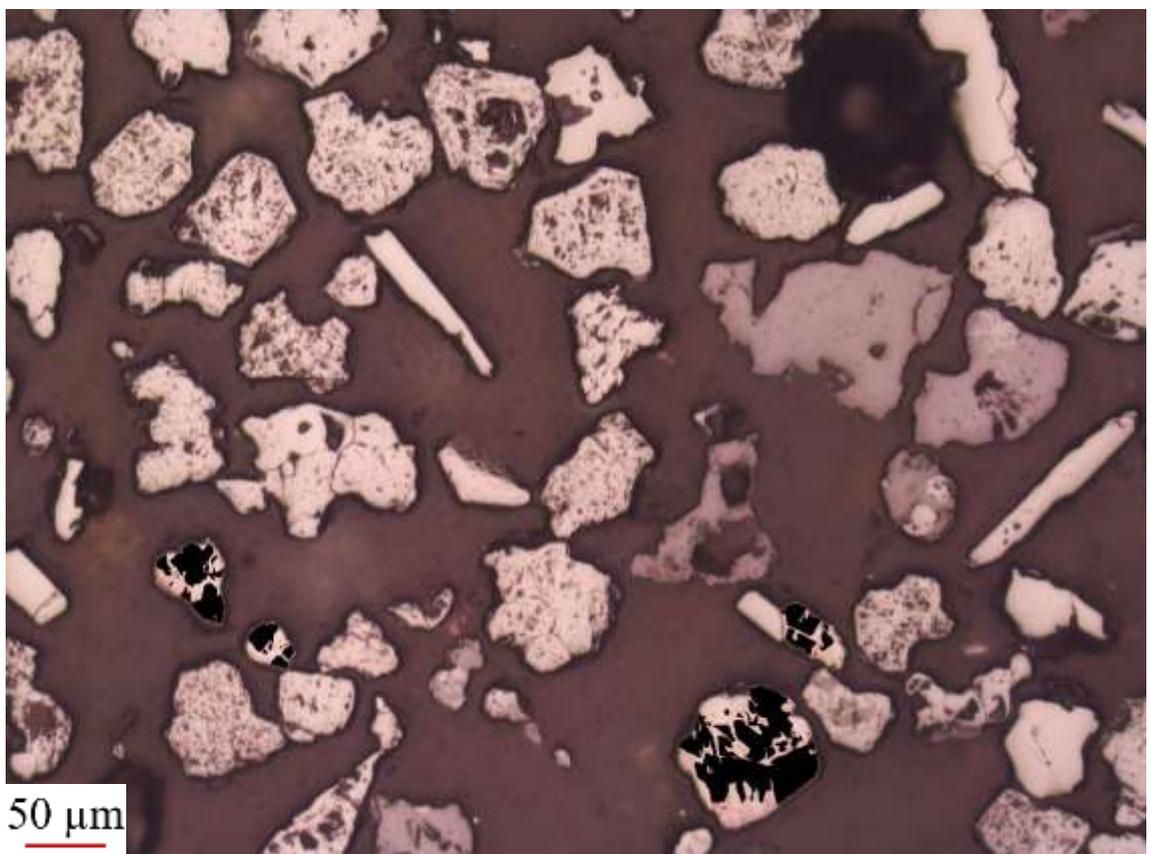
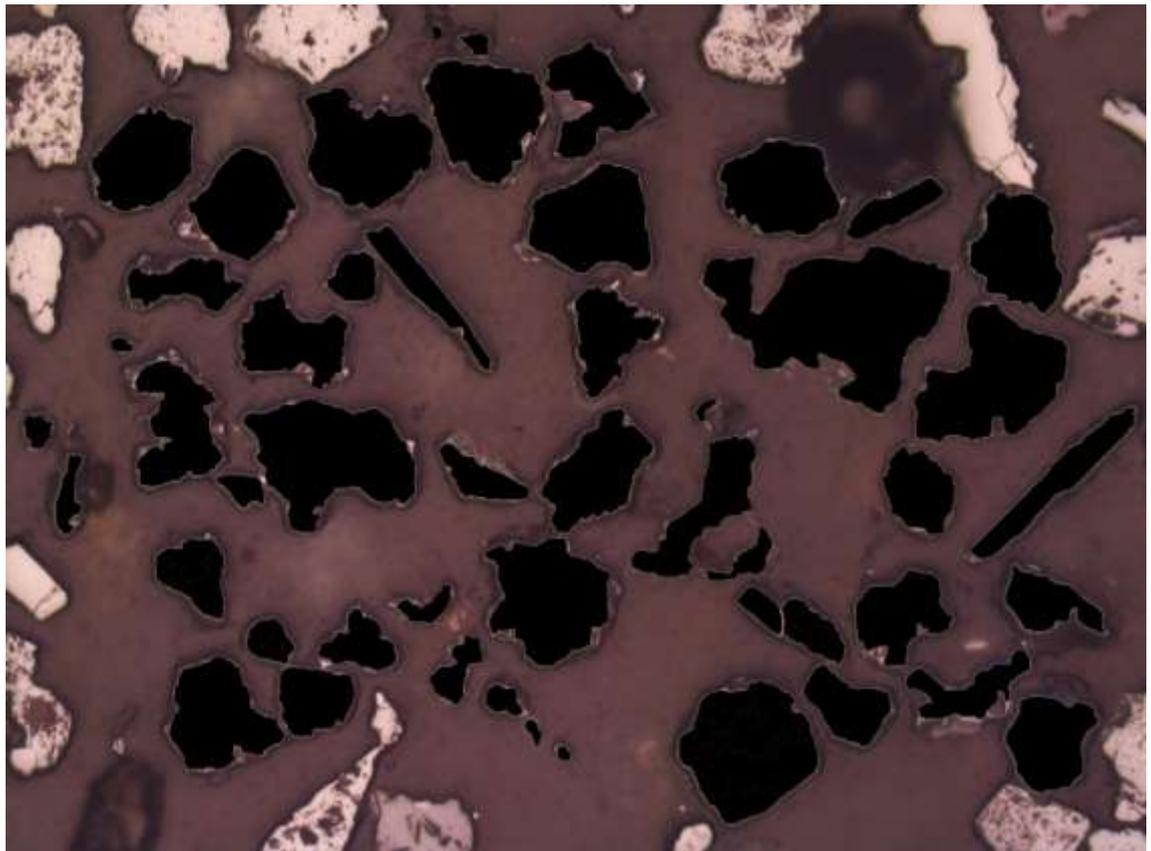


P3-10

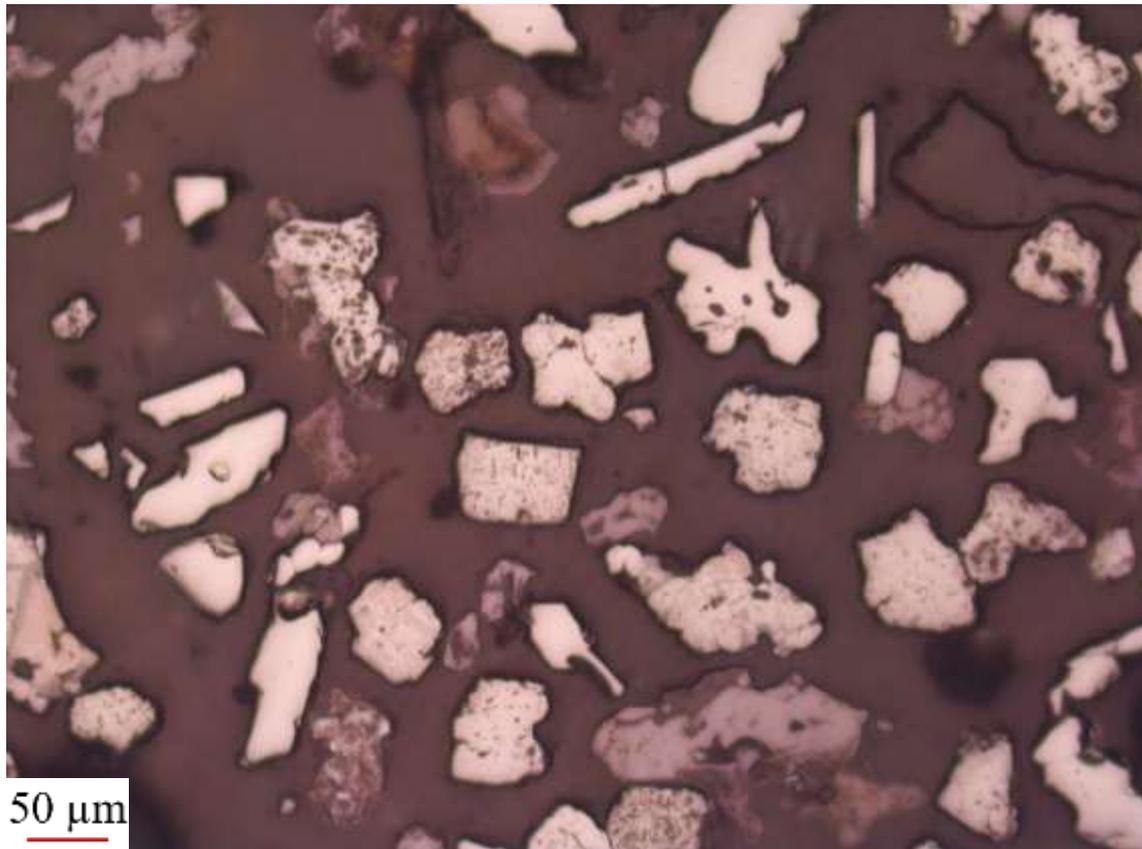


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	51	24
Área dos grãos (µm ²)	1302908	64609

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	68,000%	32,000%
Determinação de áreas	95,274%	4,726%

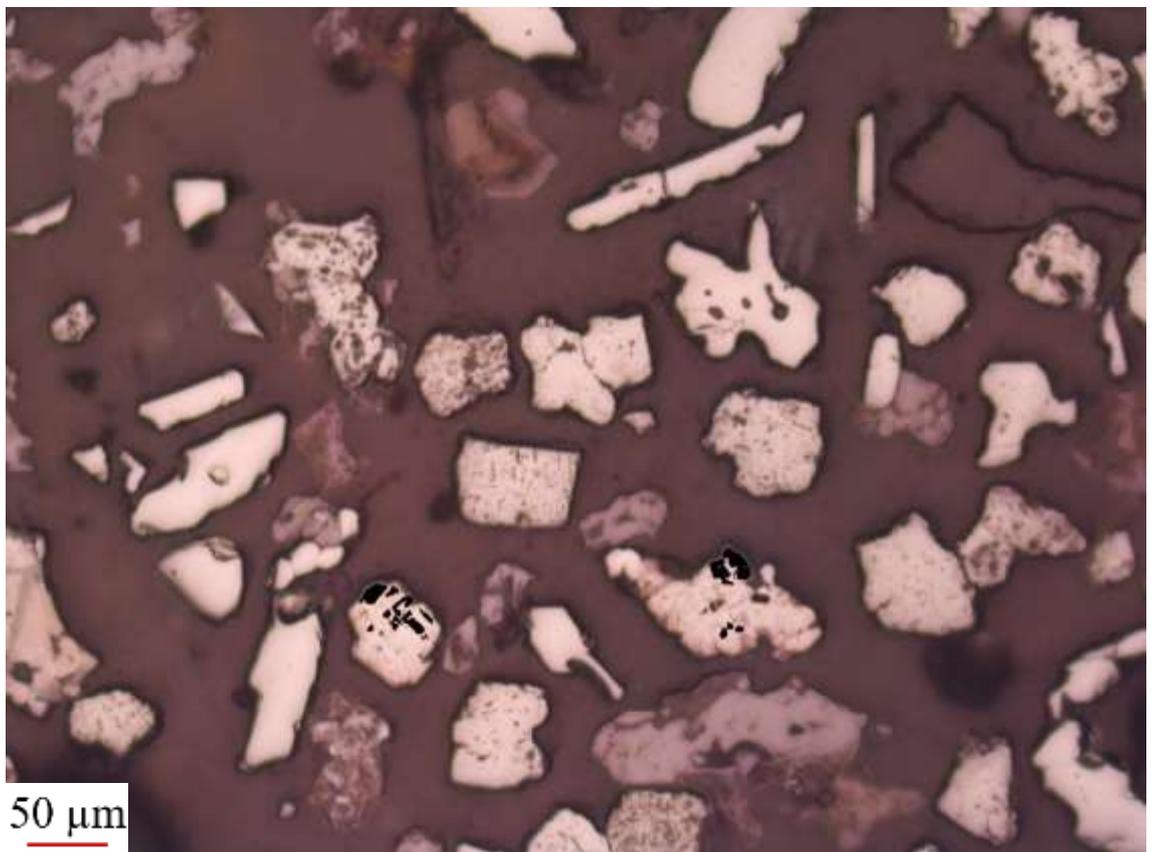
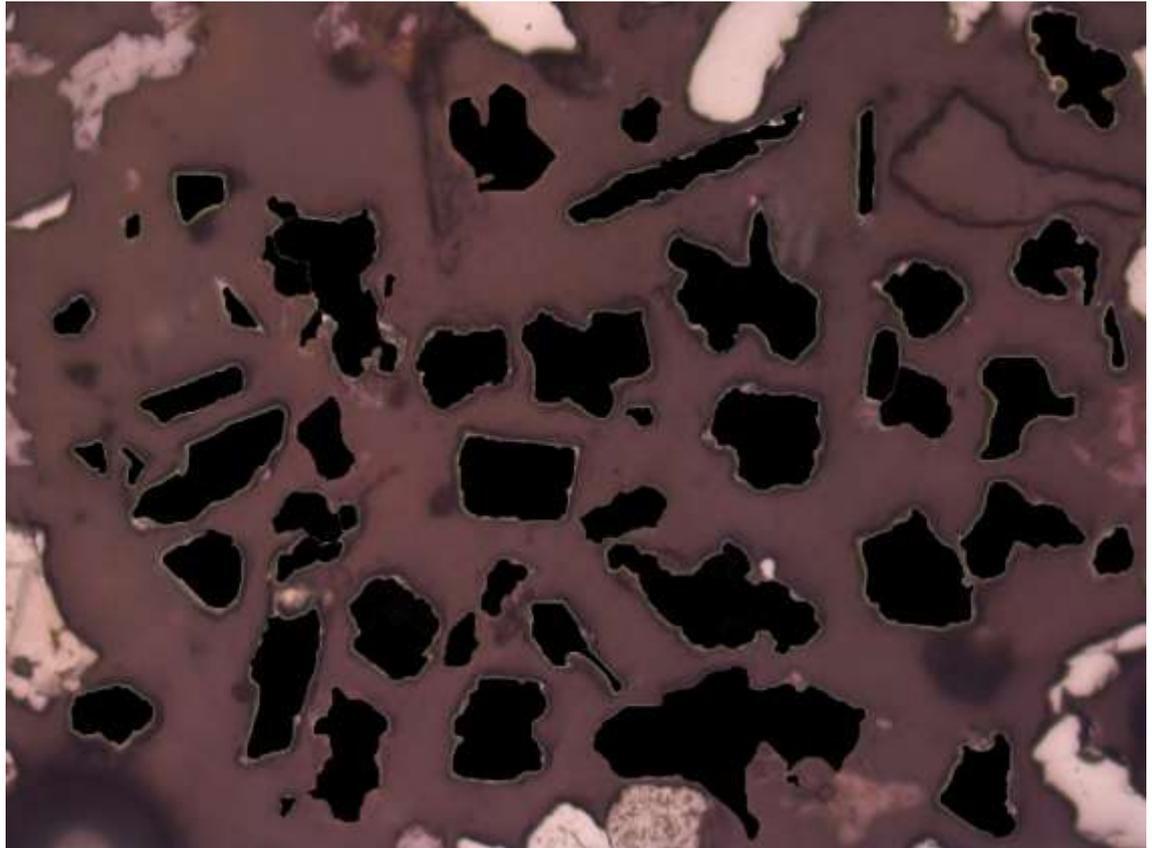


P3-11

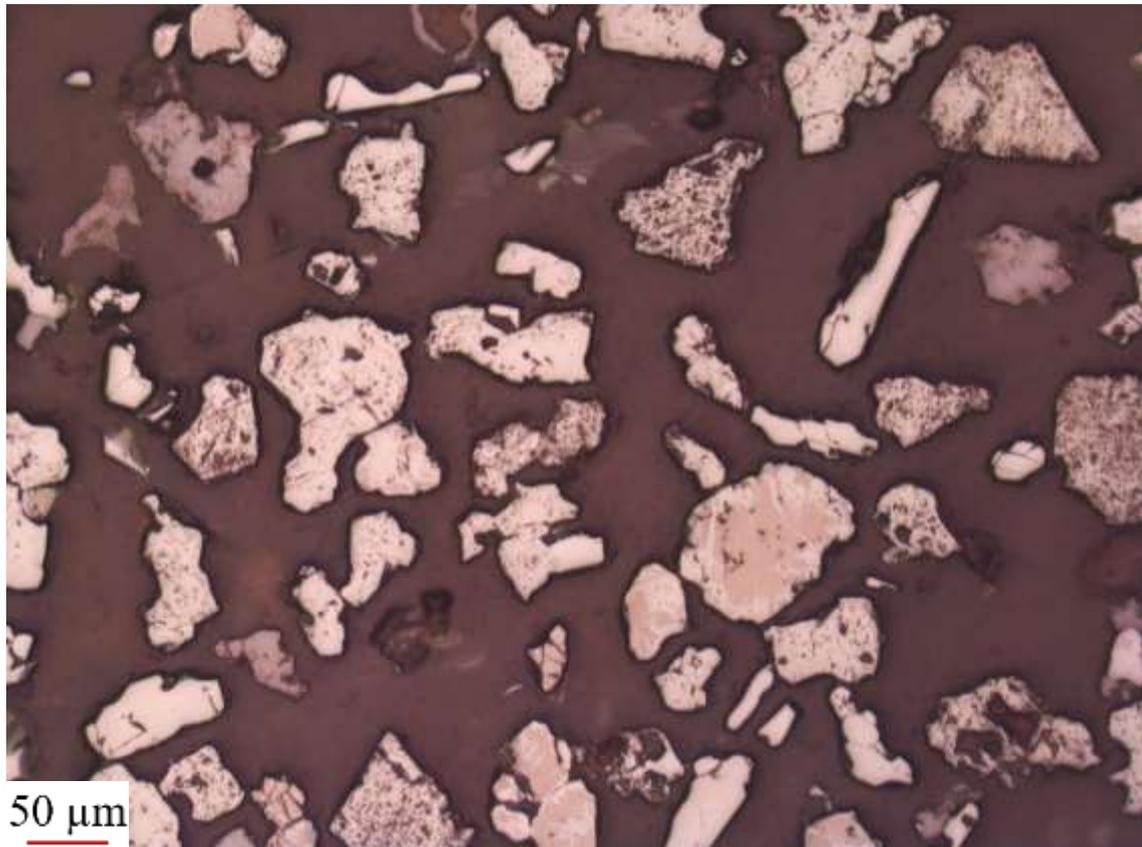


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	51	15
Área dos grãos (μm ²)	1127167	10508

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	77,273%	22,727%
Determinação de áreas	99,077%	0,923%

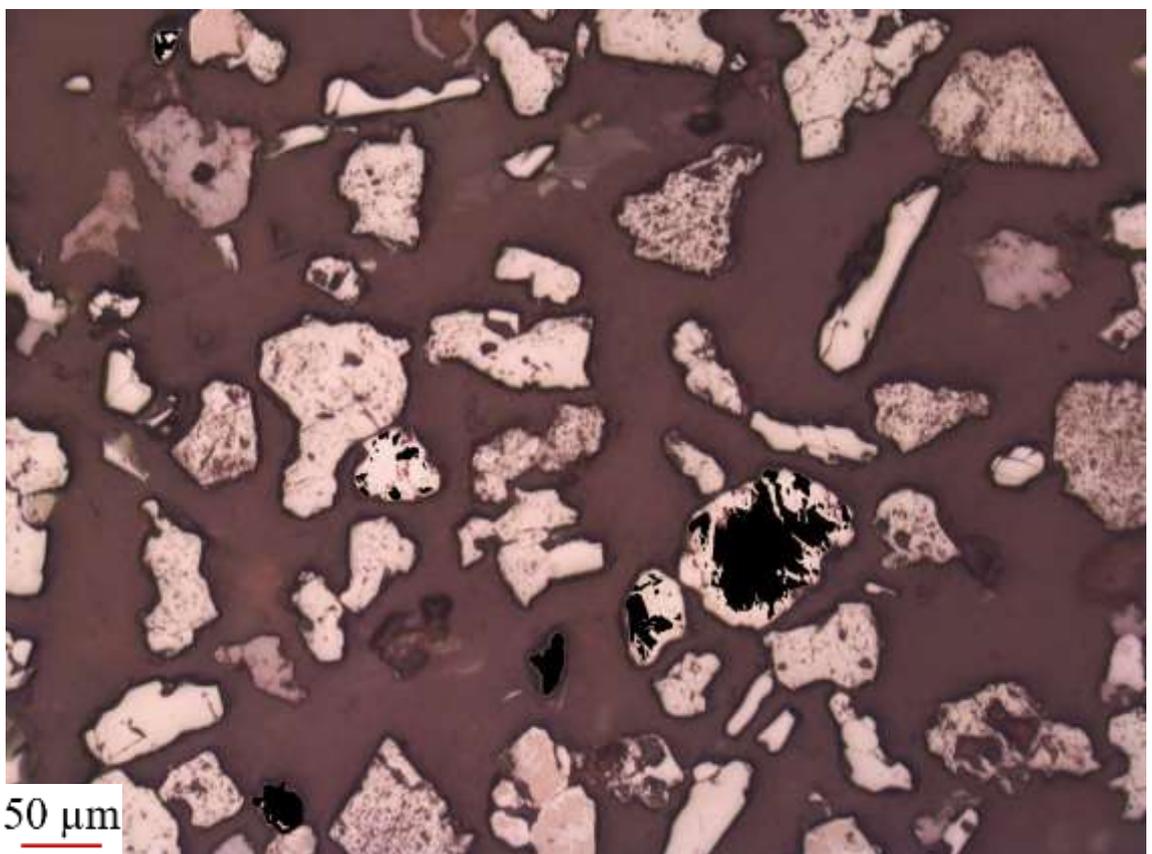
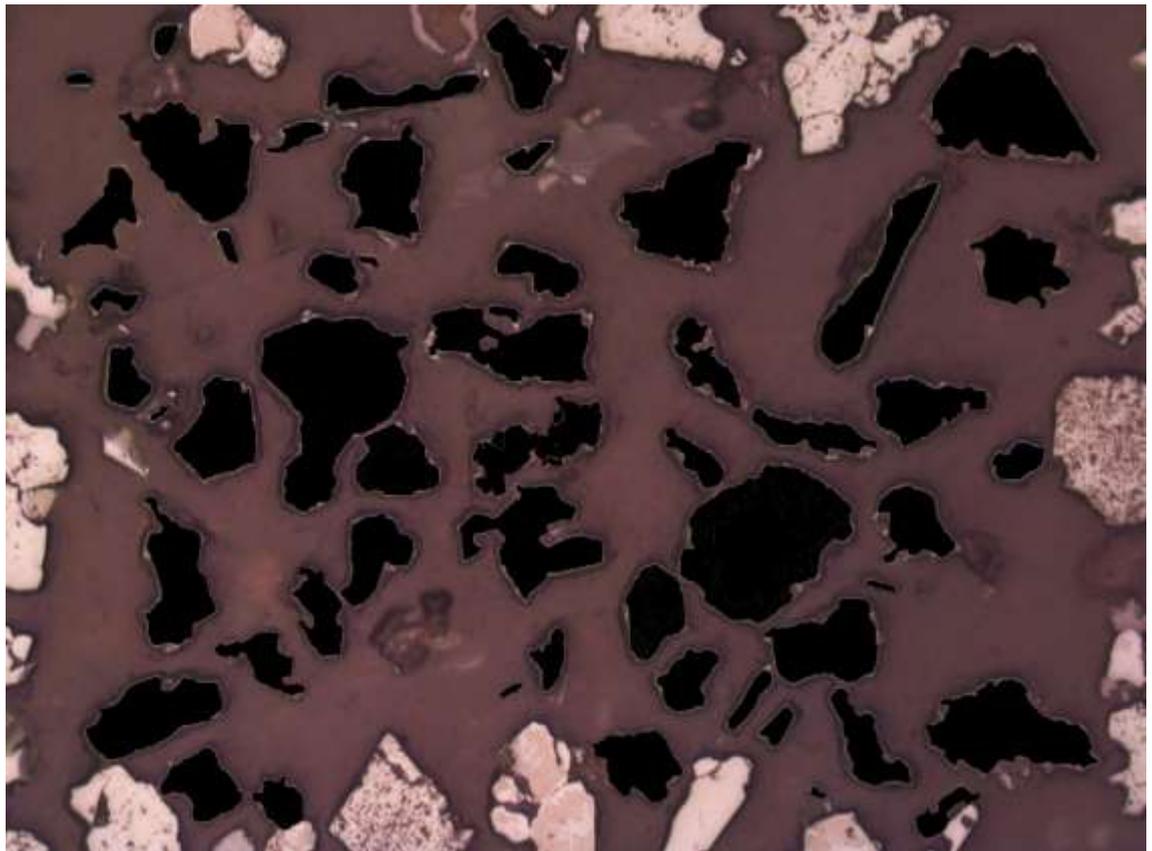


P3-12

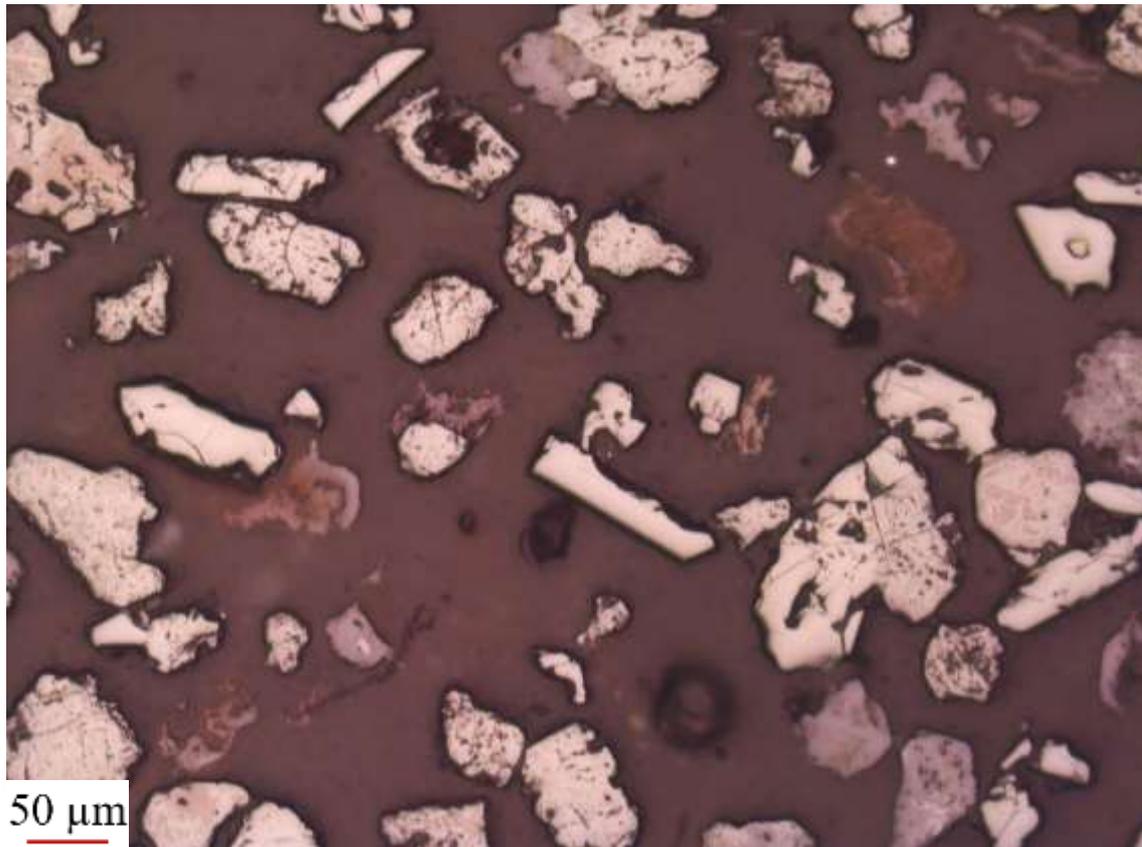


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	58	54
Área dos grãos (µm ²)	1088245	82350

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	51,786%	48,214%
Determinação de áreas	92,966%	7,034%

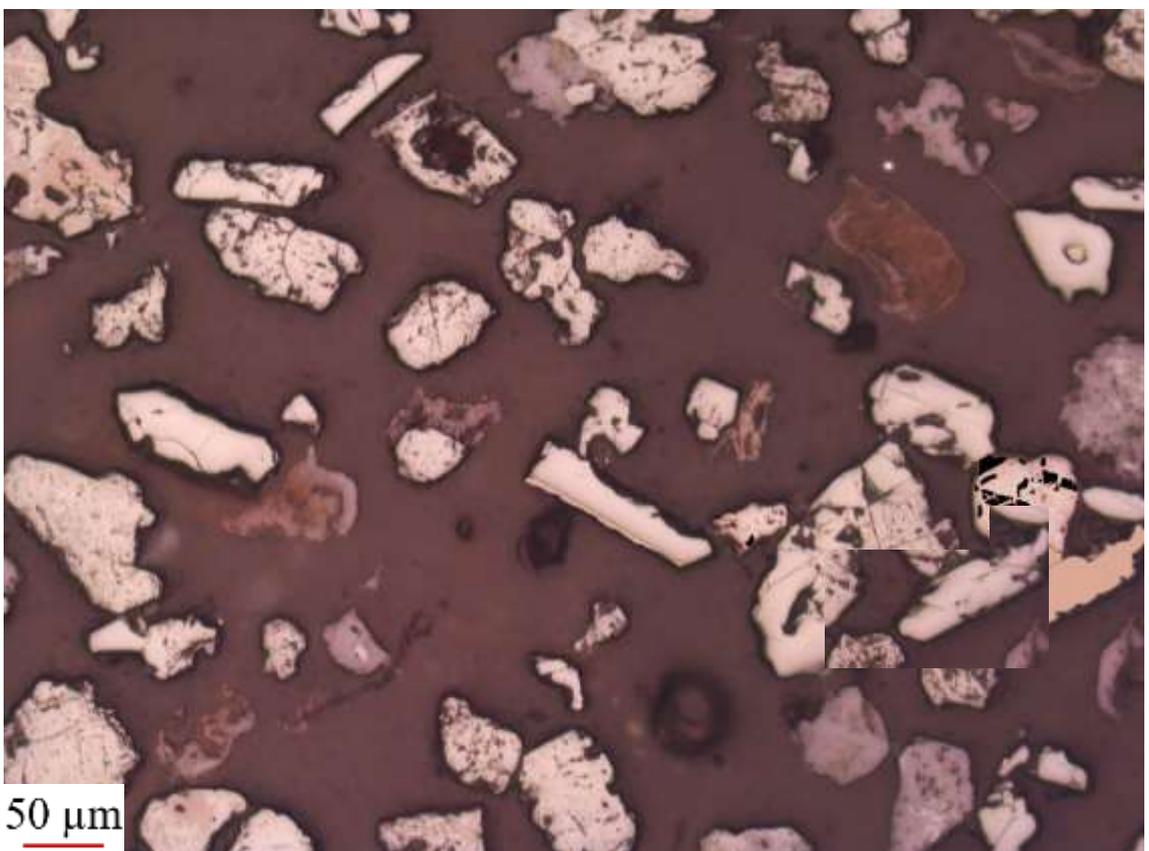
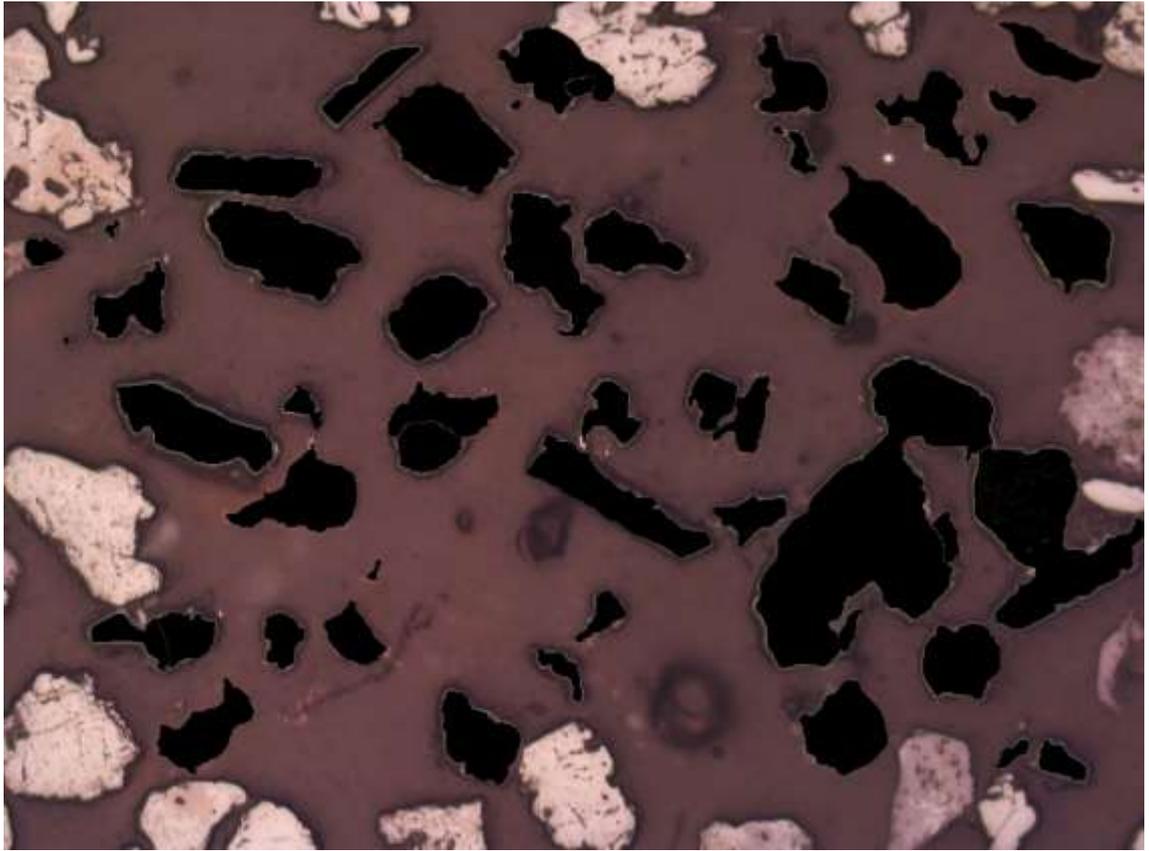


P3-13

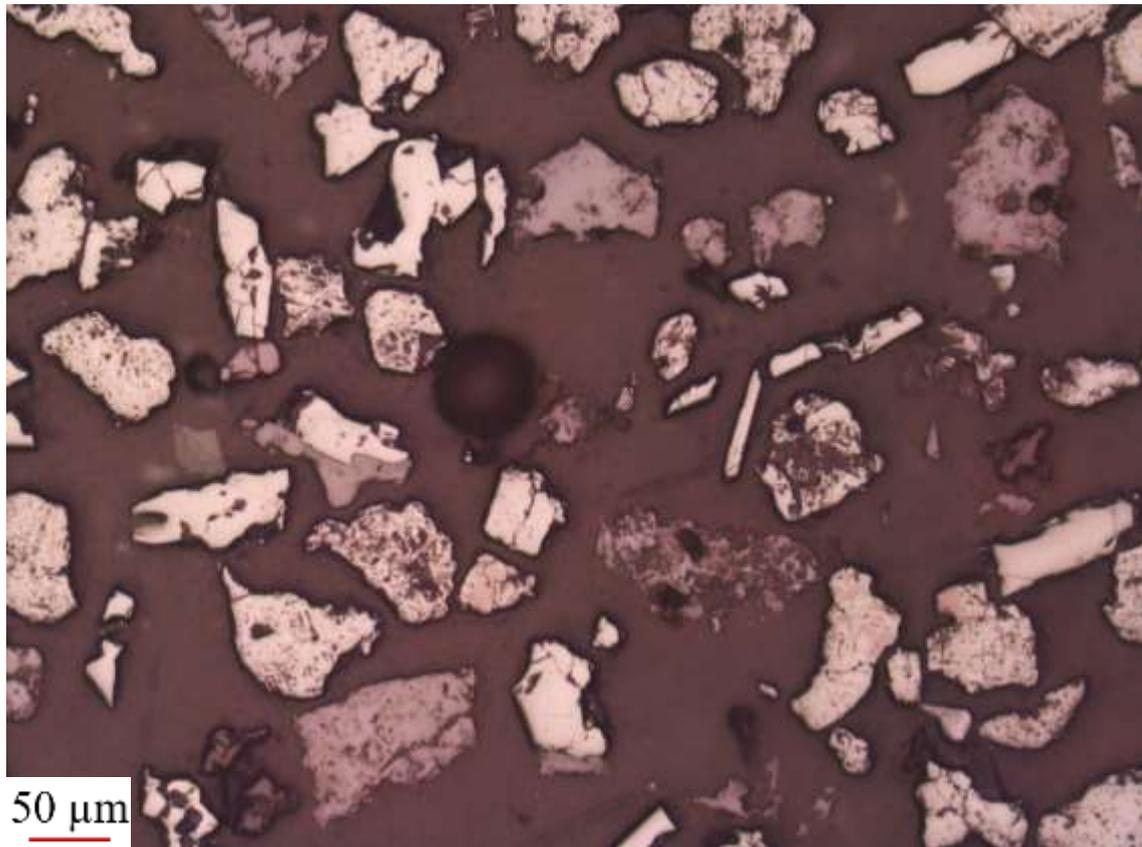


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	46	29
Área dos grãos (µm ²)	1028074	10360

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	61,333%	38,667%
Determinação de áreas	99,003%	0,997%

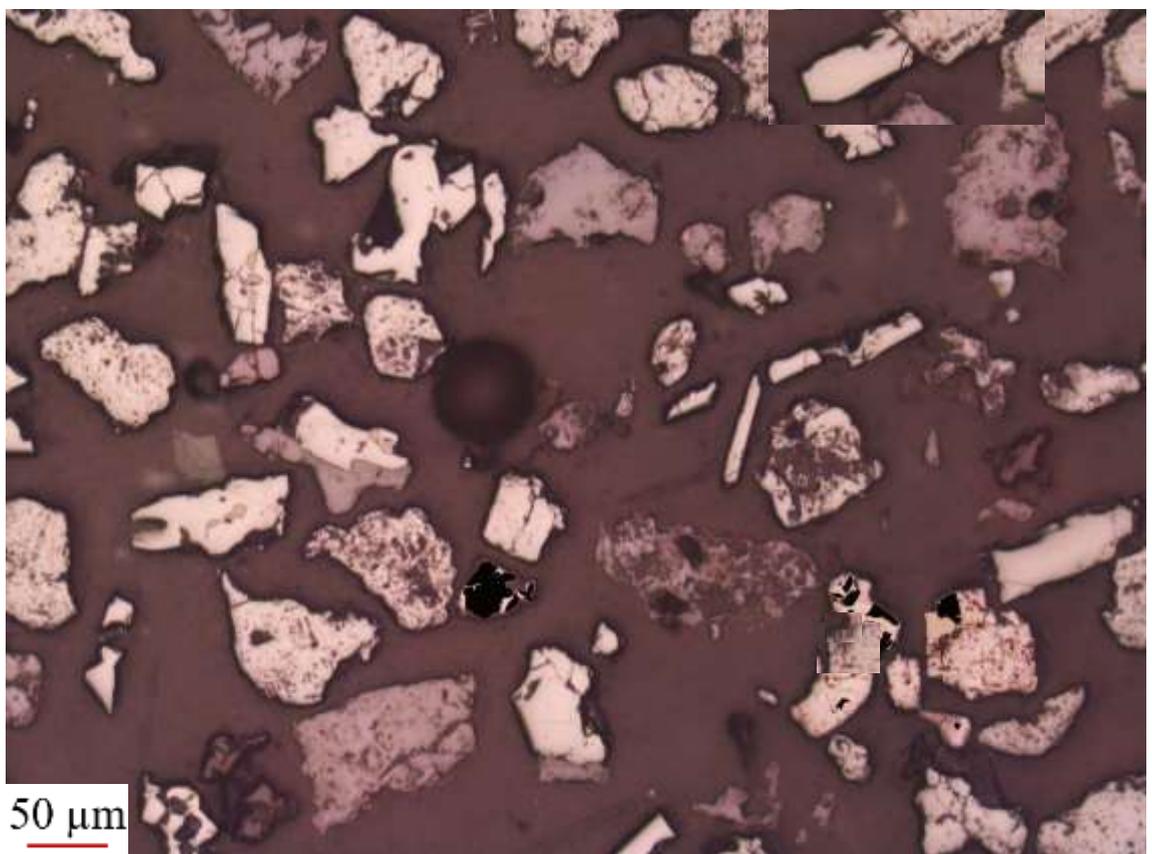
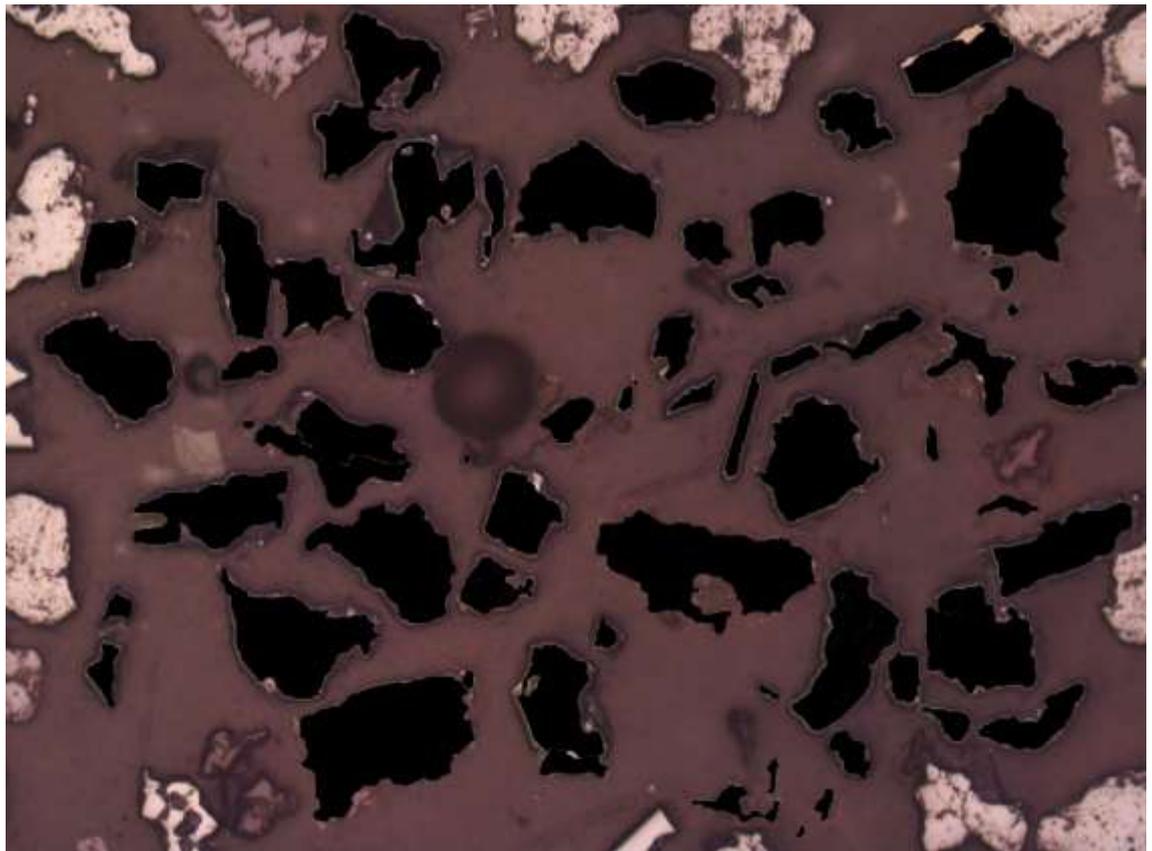


P3-14

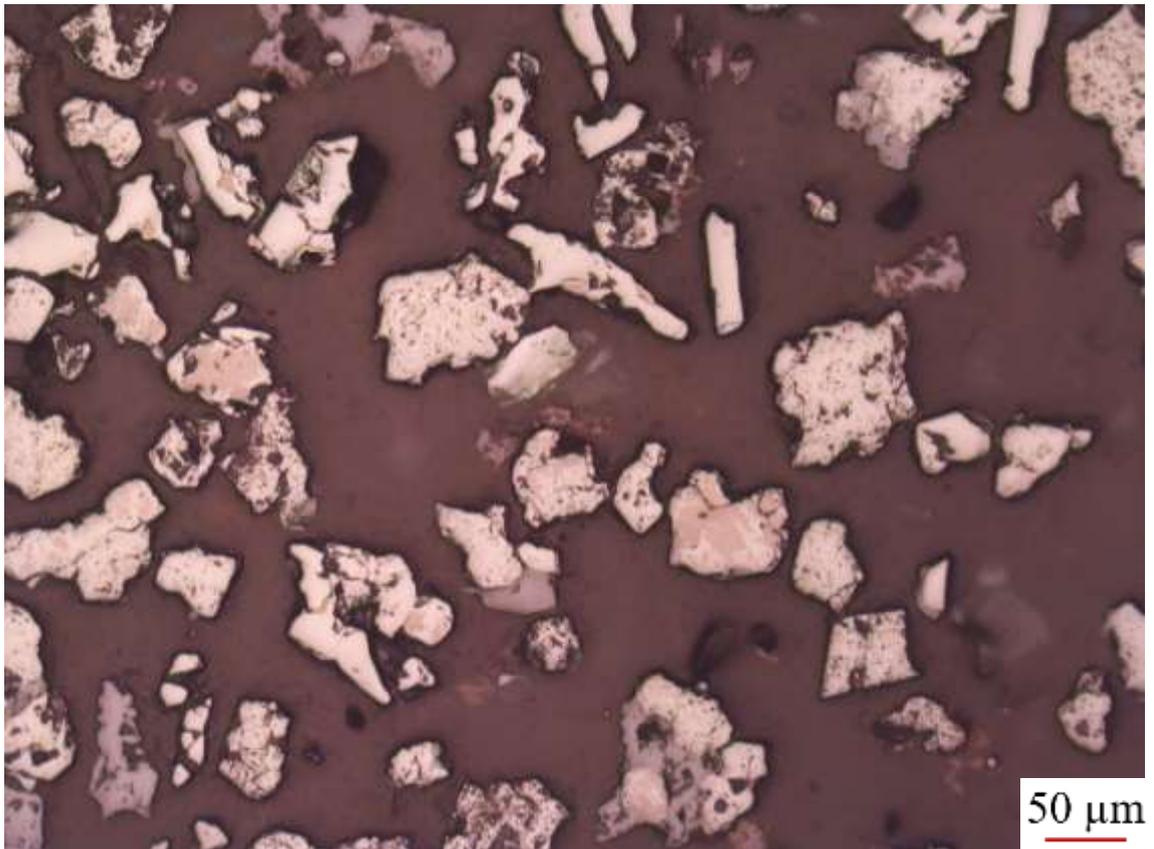


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	63	23
Área dos grãos (μm ²)	1161881	21987

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de Pontos	73,256%	26,744%
Determinação de áreas	98,141%	1,859%

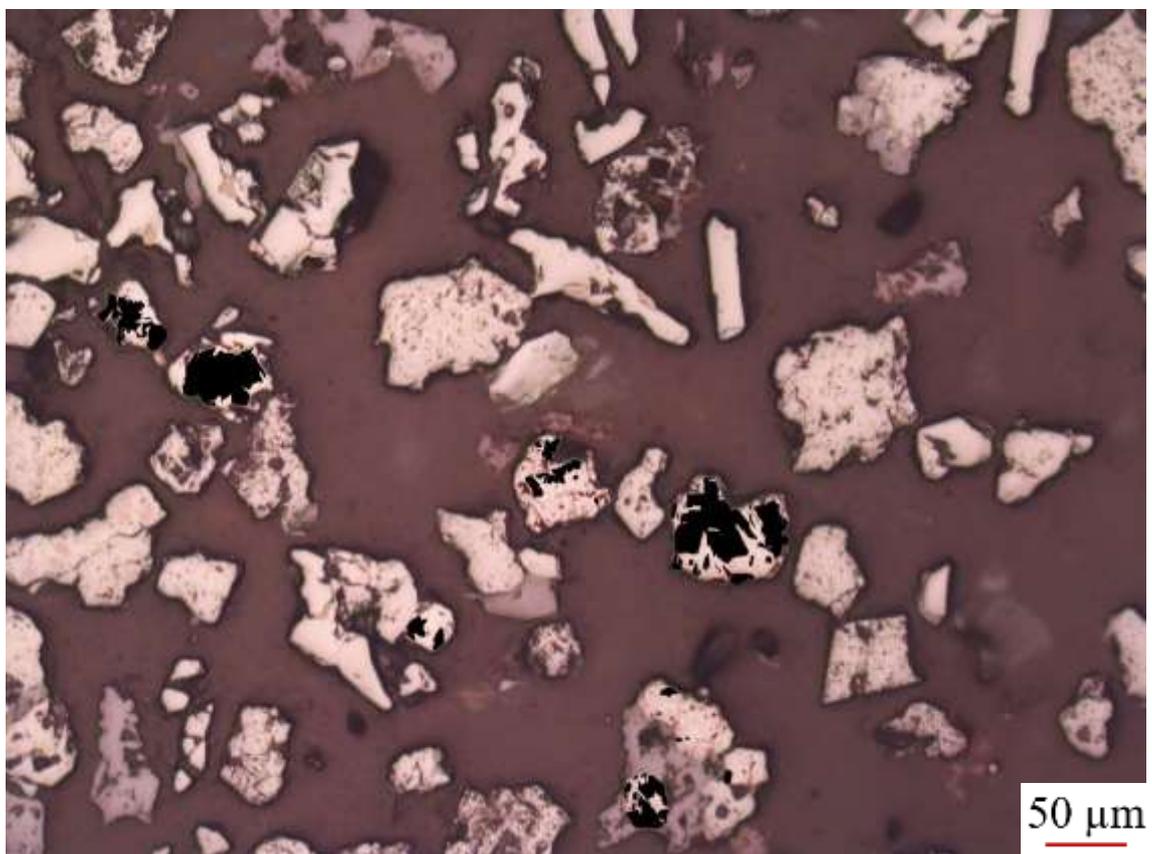
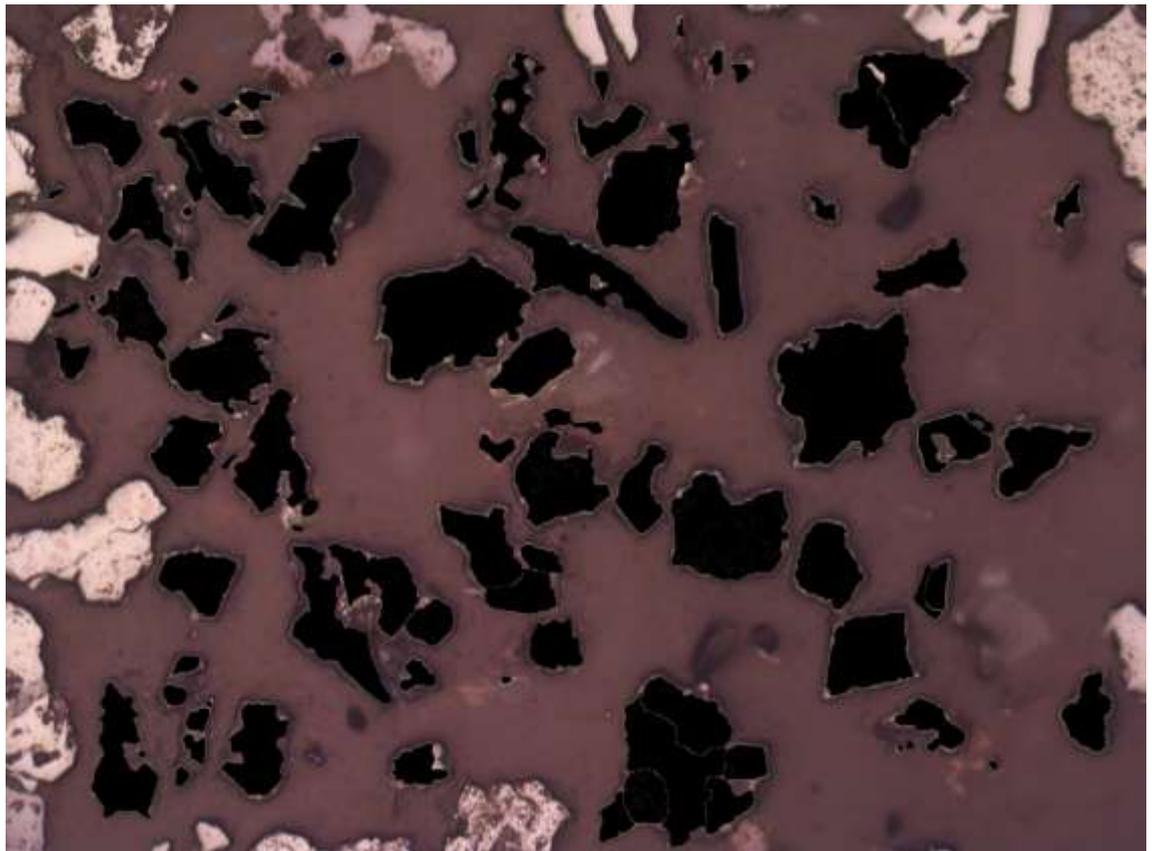


P3-15

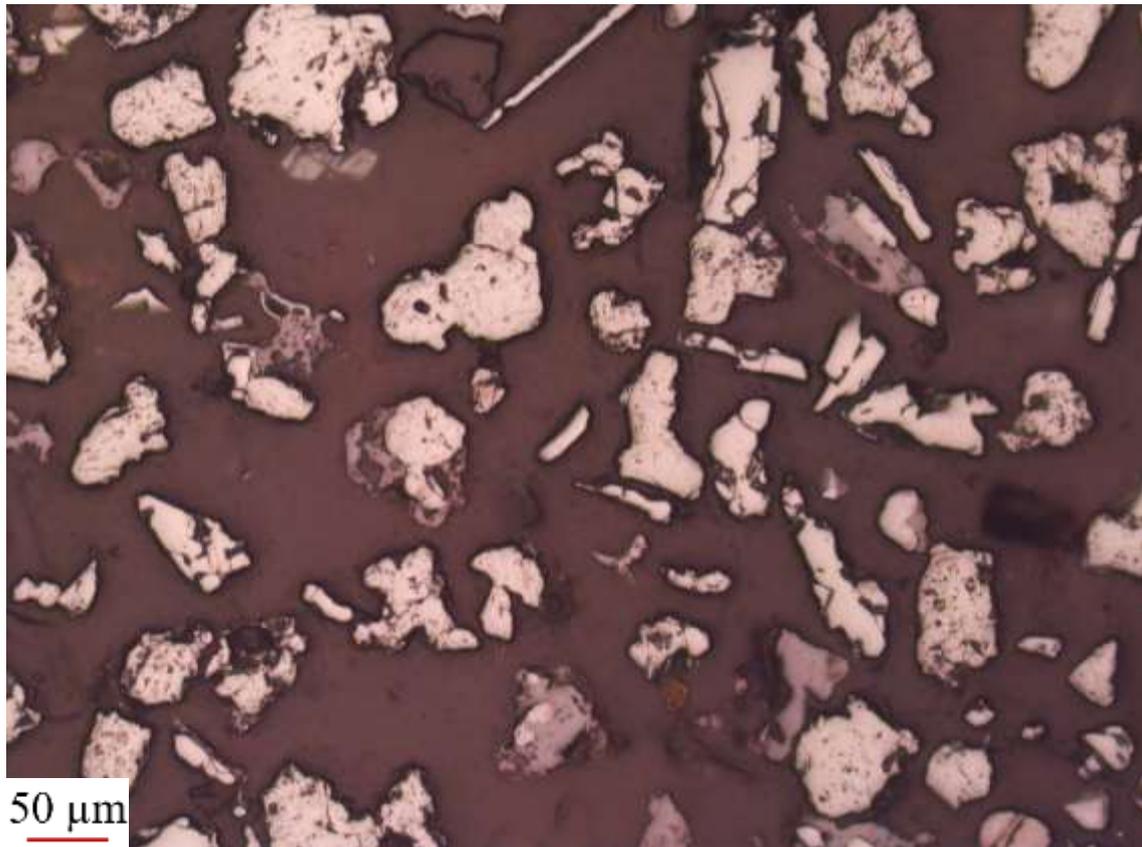


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	80	47
Área dos grãos (µm ²)	1029509	70782

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	62,992%	37,008%
Determinação de áreas	93,566%	6,434%

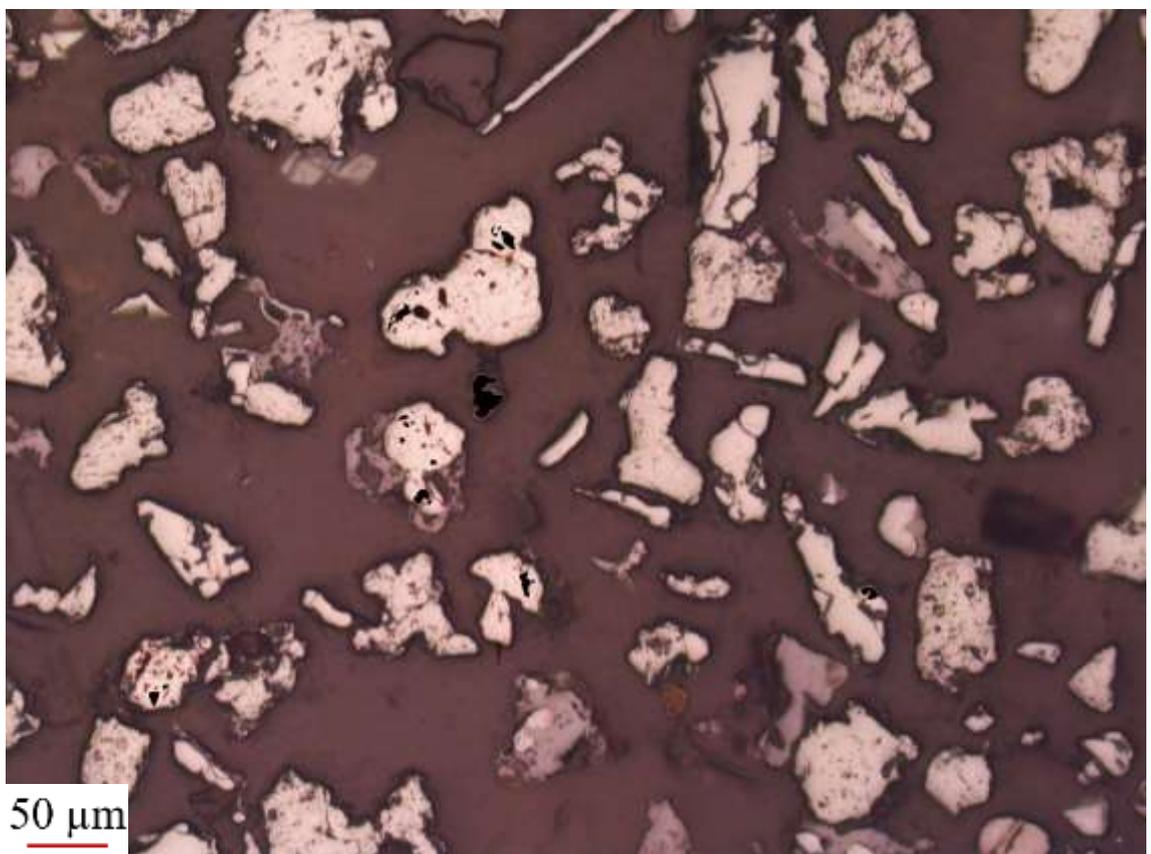
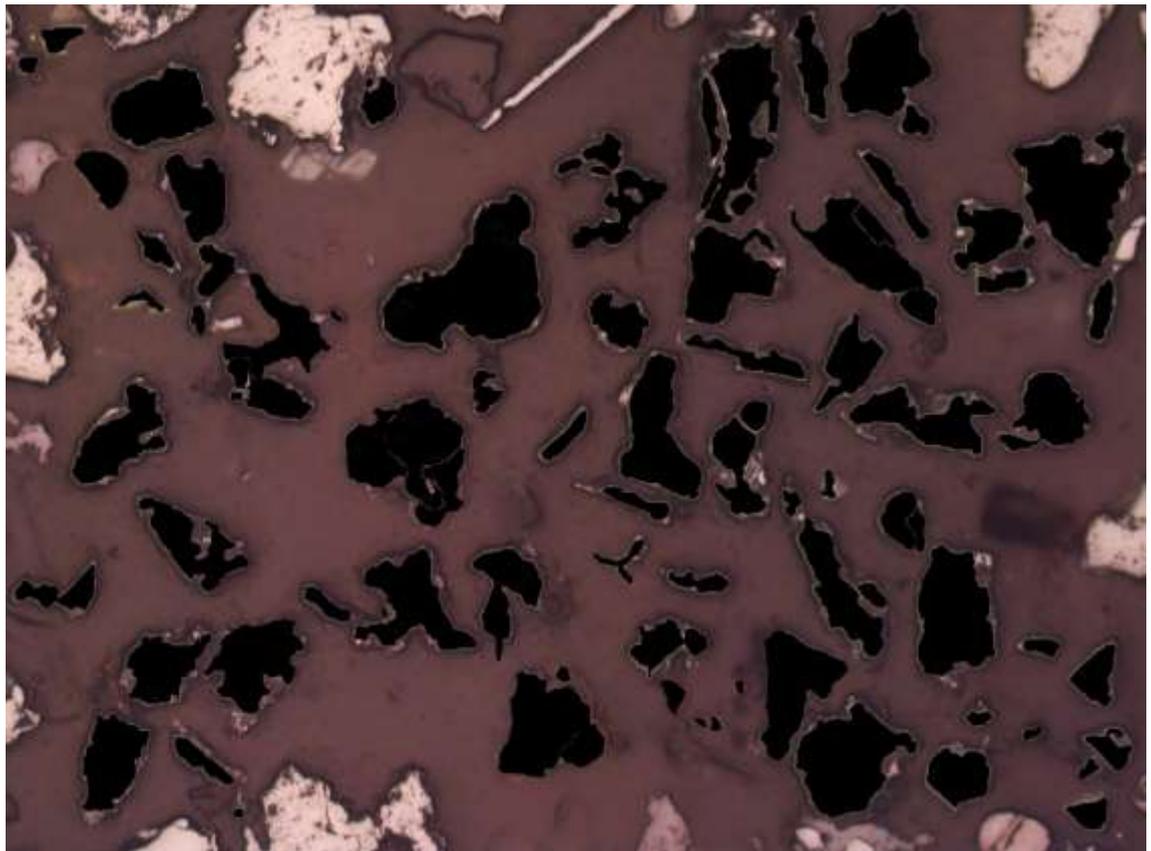


P3-16

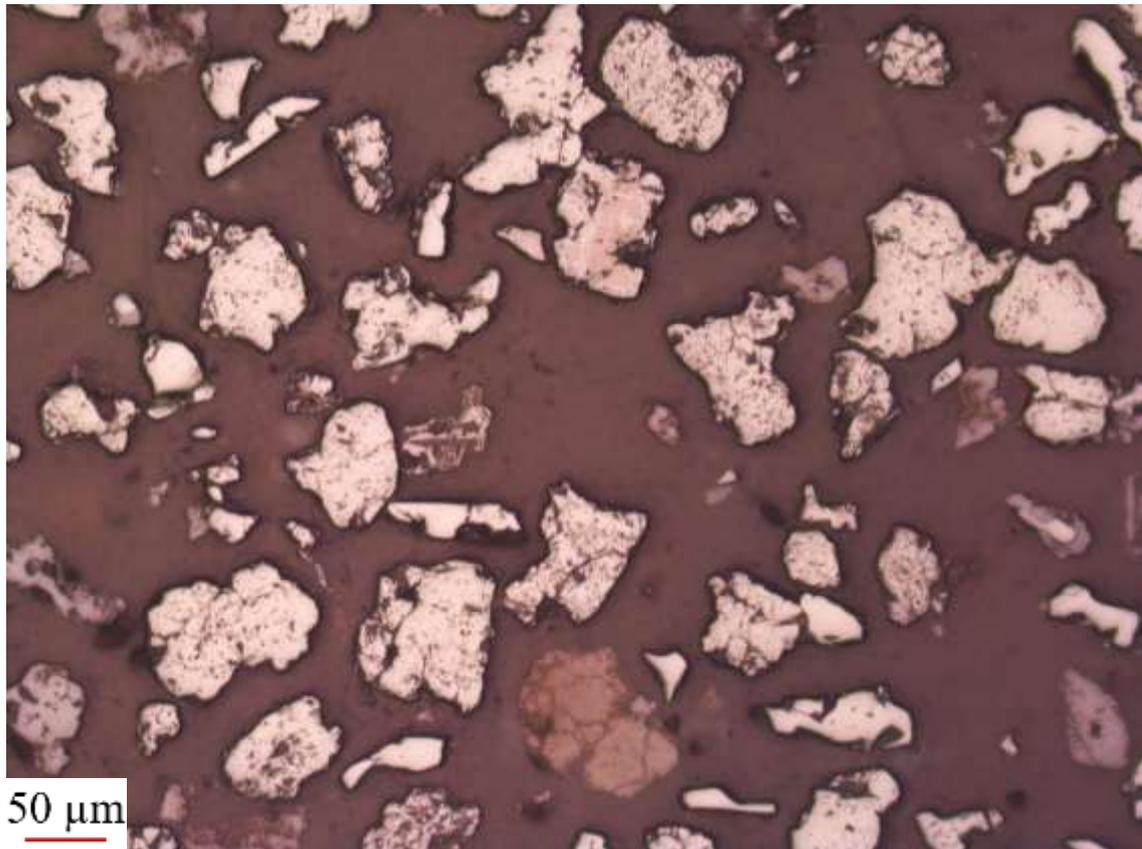


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	81	20
Área dos grãos (μm^2)	1071503	10231

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	80,198%	19,802%
Determinação de áreas	99,052%	0,948%

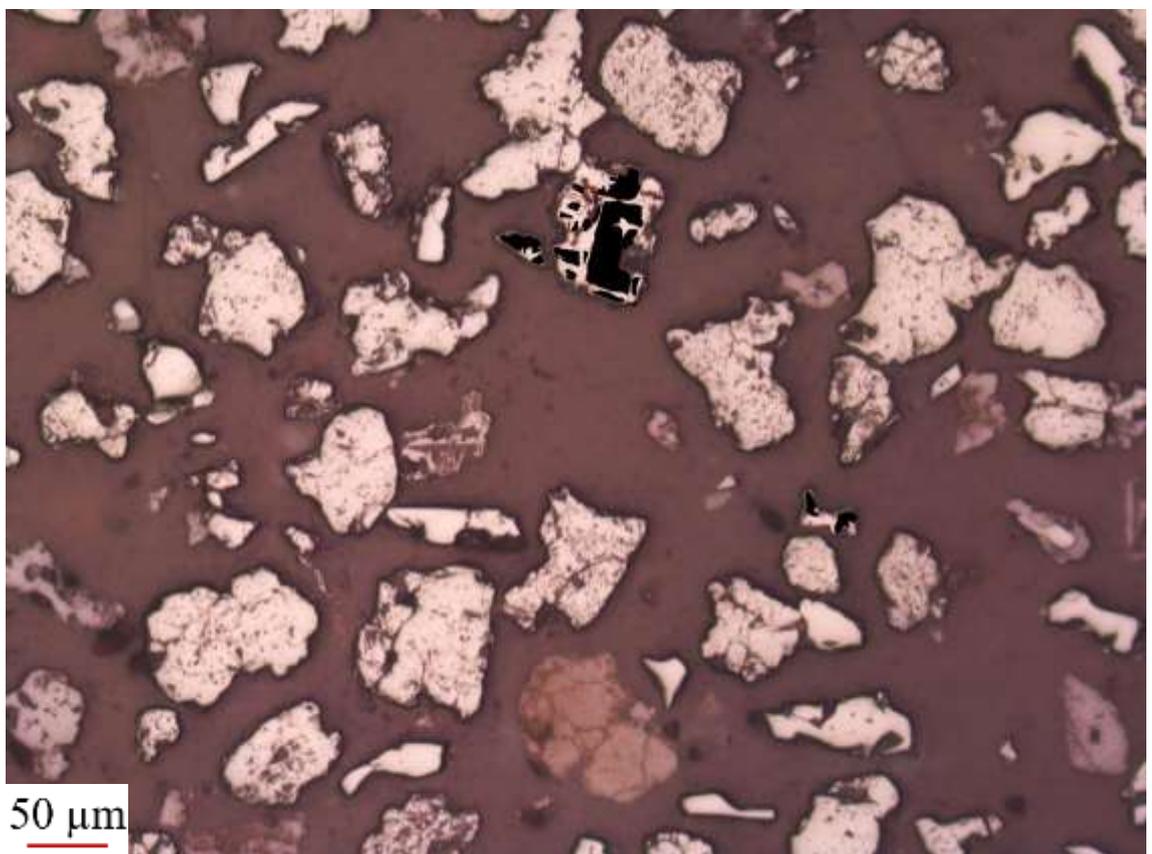
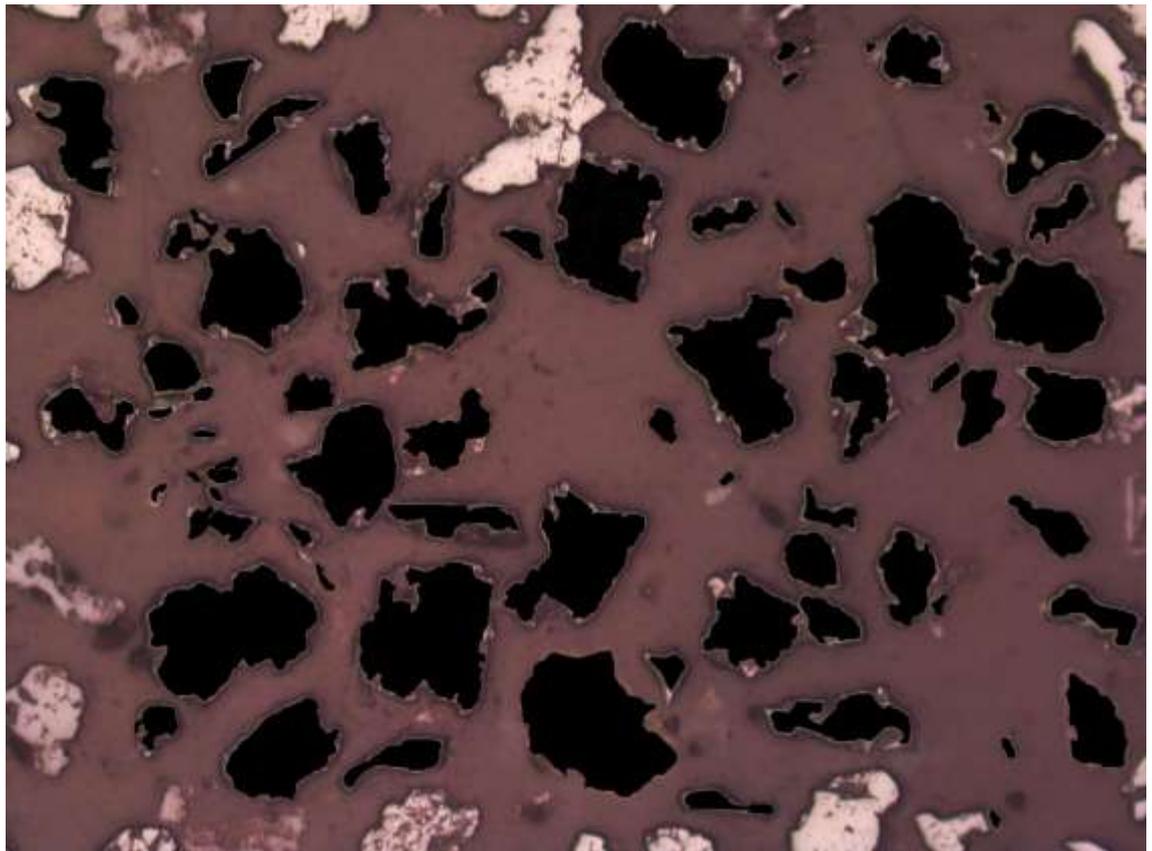


P3-17

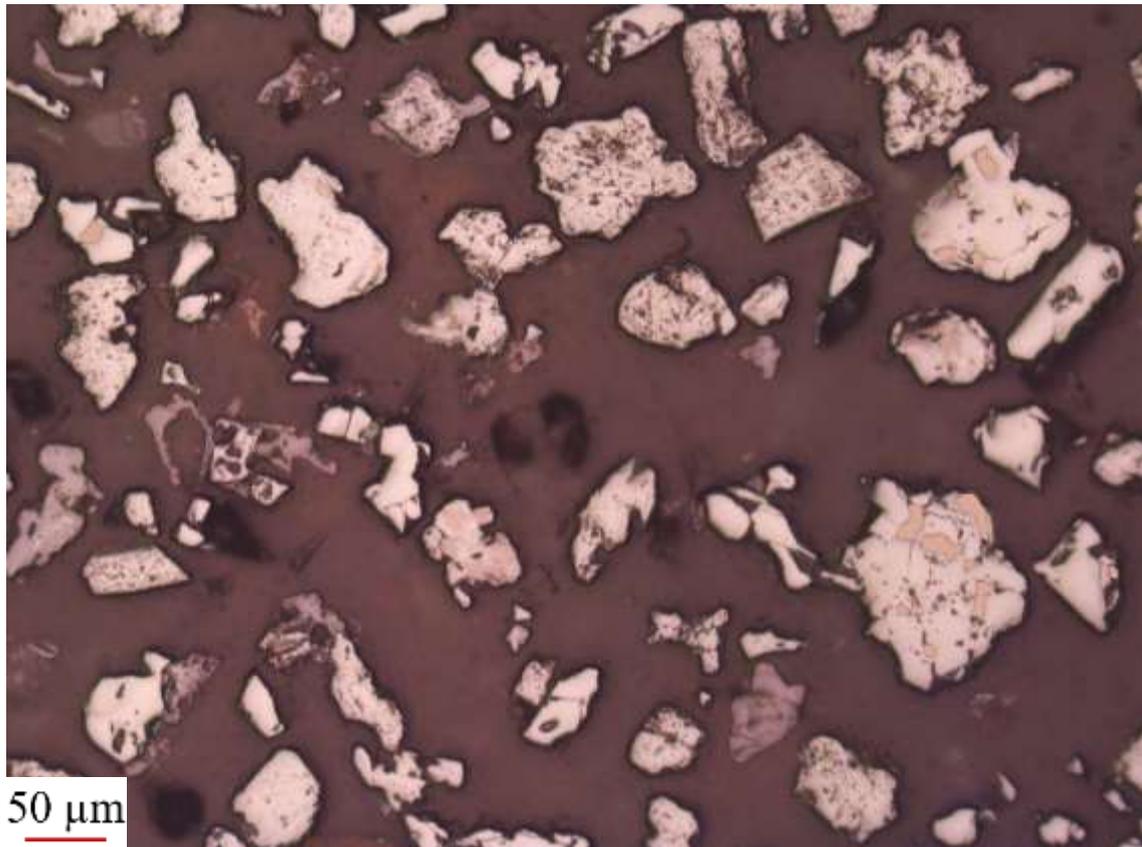


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	71	18
Área dos grãos (μm^2)	1161452	33222

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de Grãos	79,775%	20,225%
Determinação de áreas	97,220%	2,780%

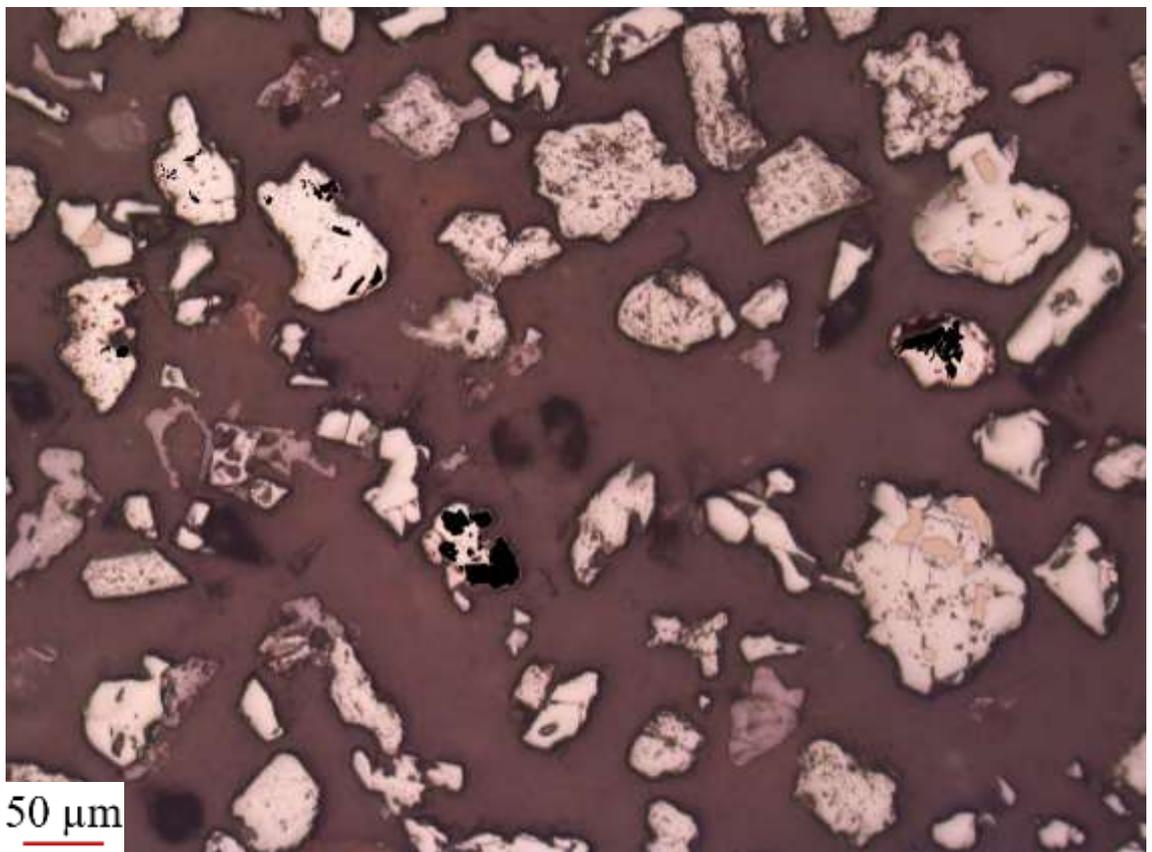
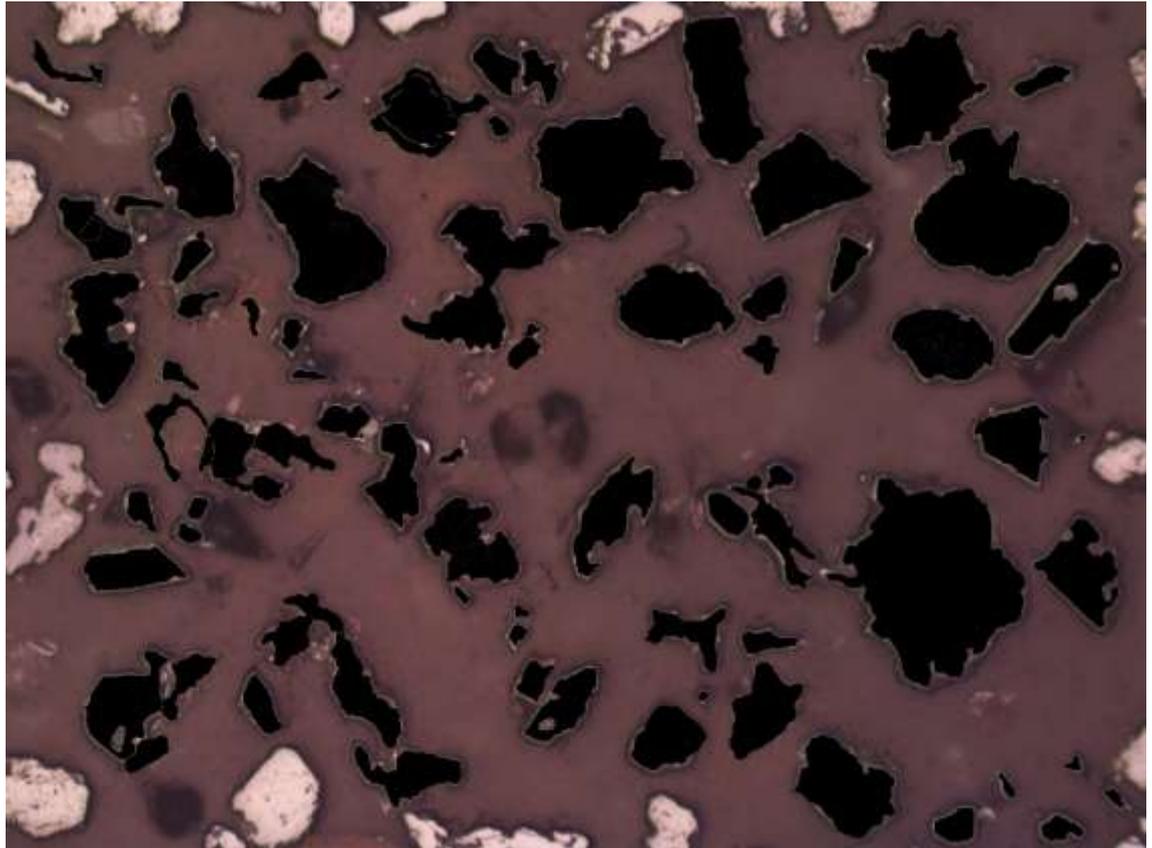


P3-18

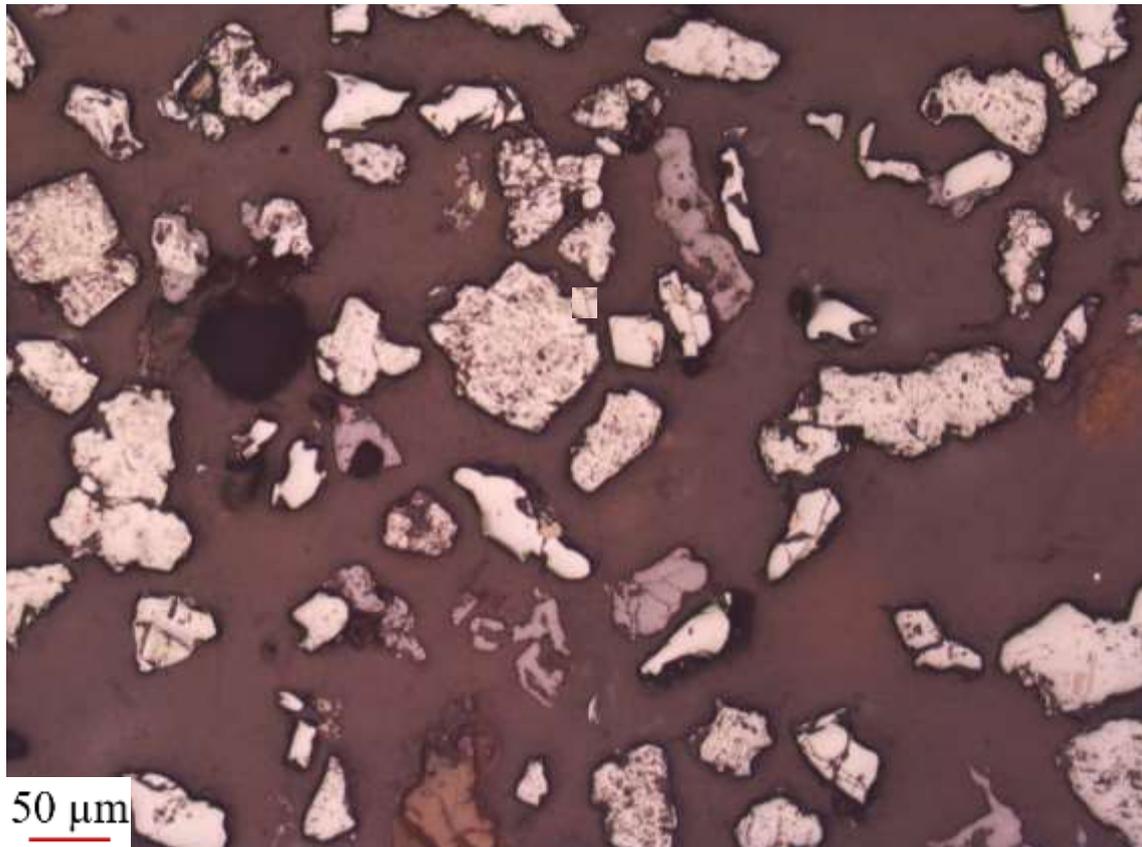


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	71	35
Área dos grãos (μm ²)	1148600	28577

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	66,981%	33,019%
Determinação de áreas	97,573%	2,427%

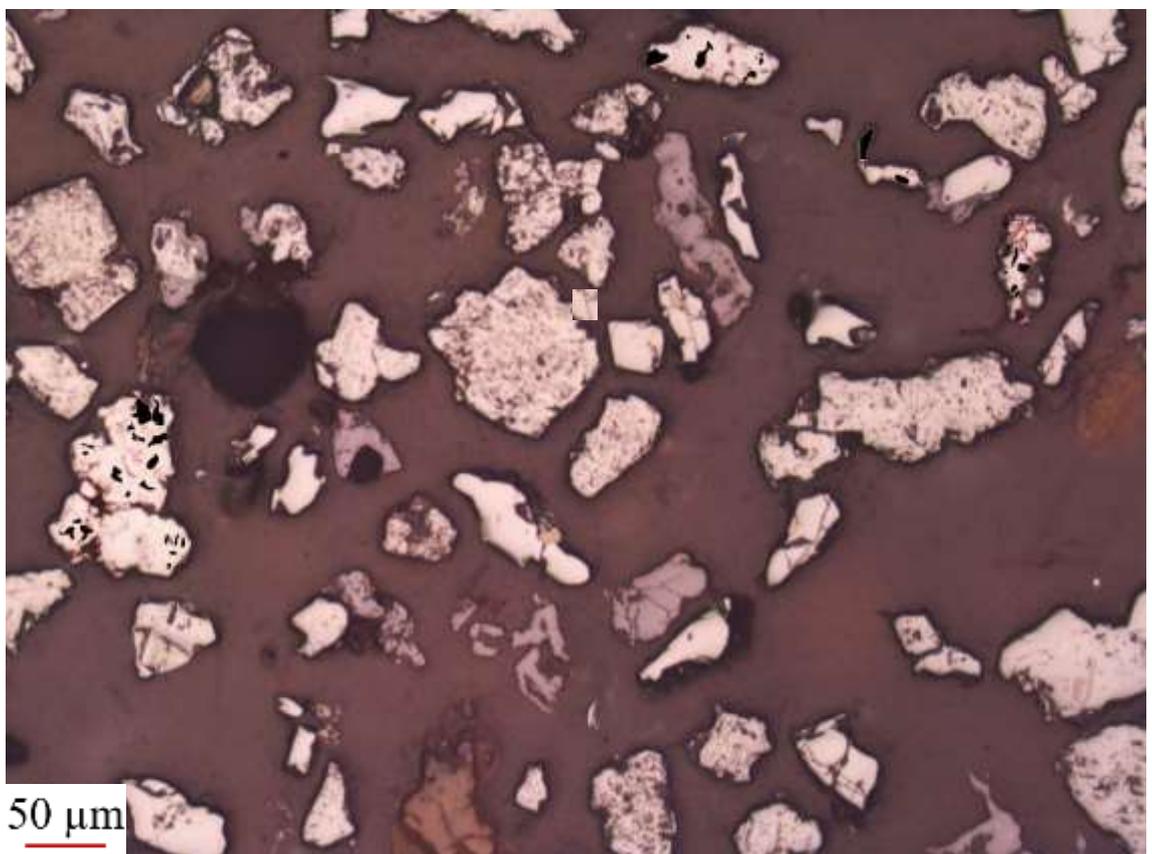
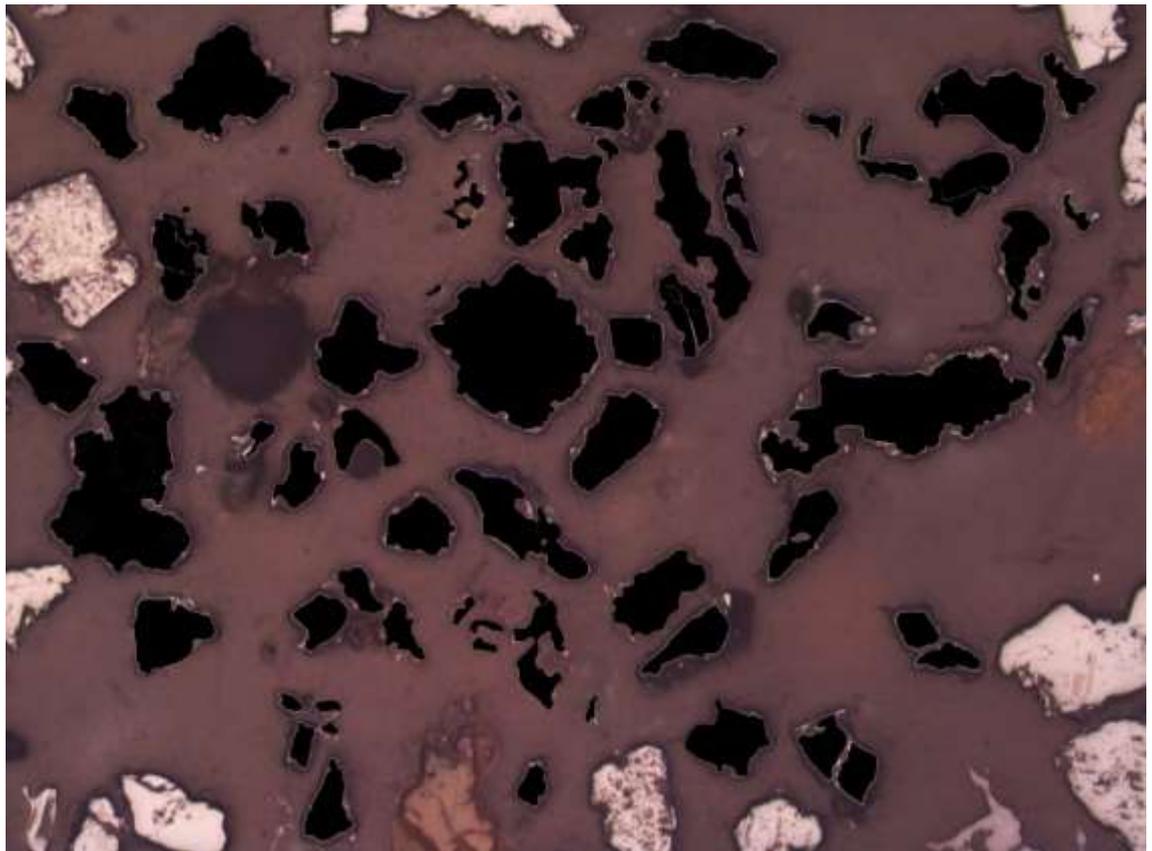


P3-19

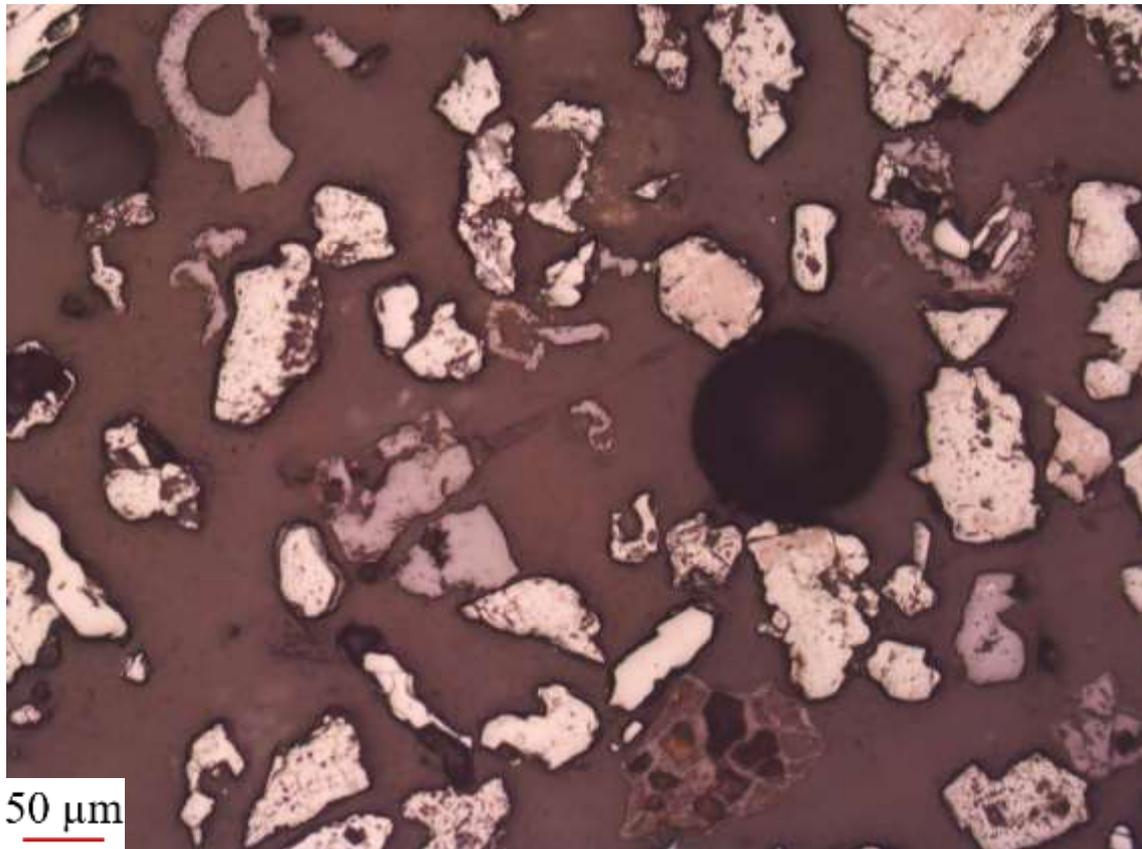


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	72	37
Área dos grãos (μm ²)	937355	13053

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	66,055%	33,945%
Determinação de áreas	98,626%	1,374%

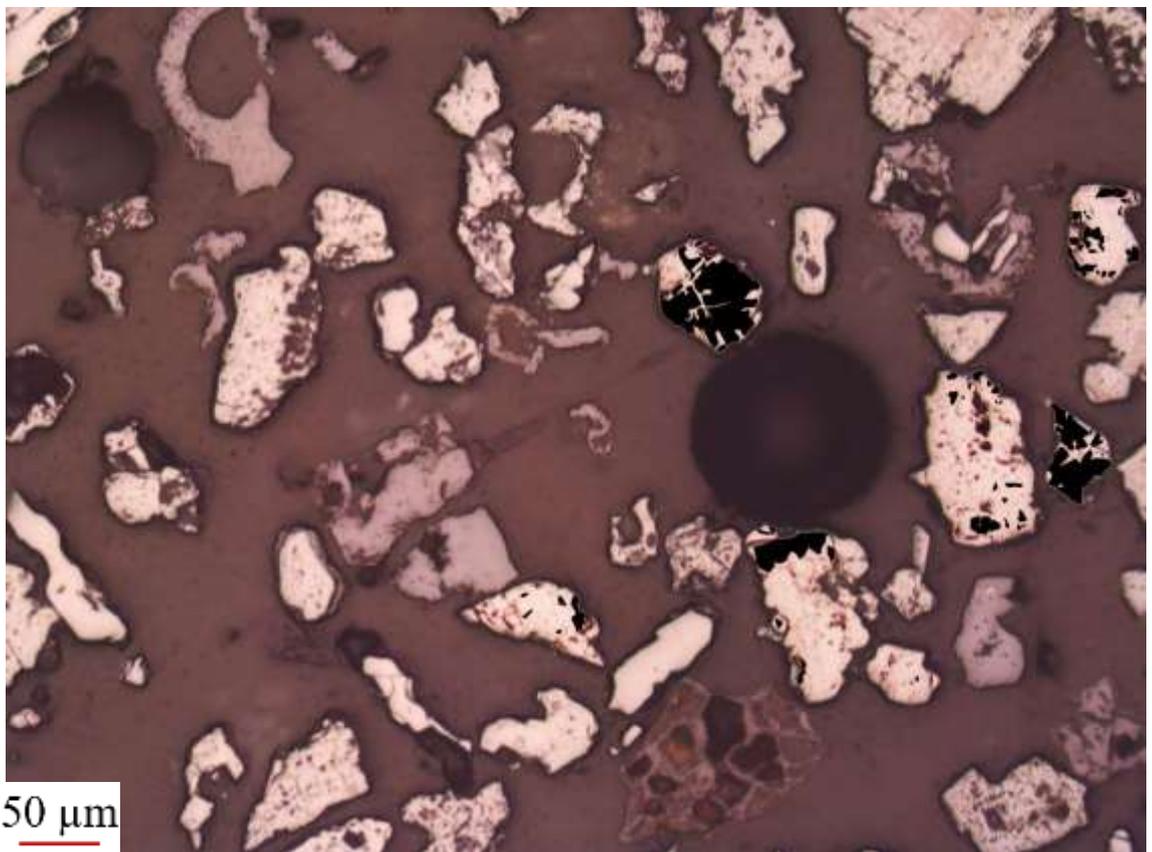
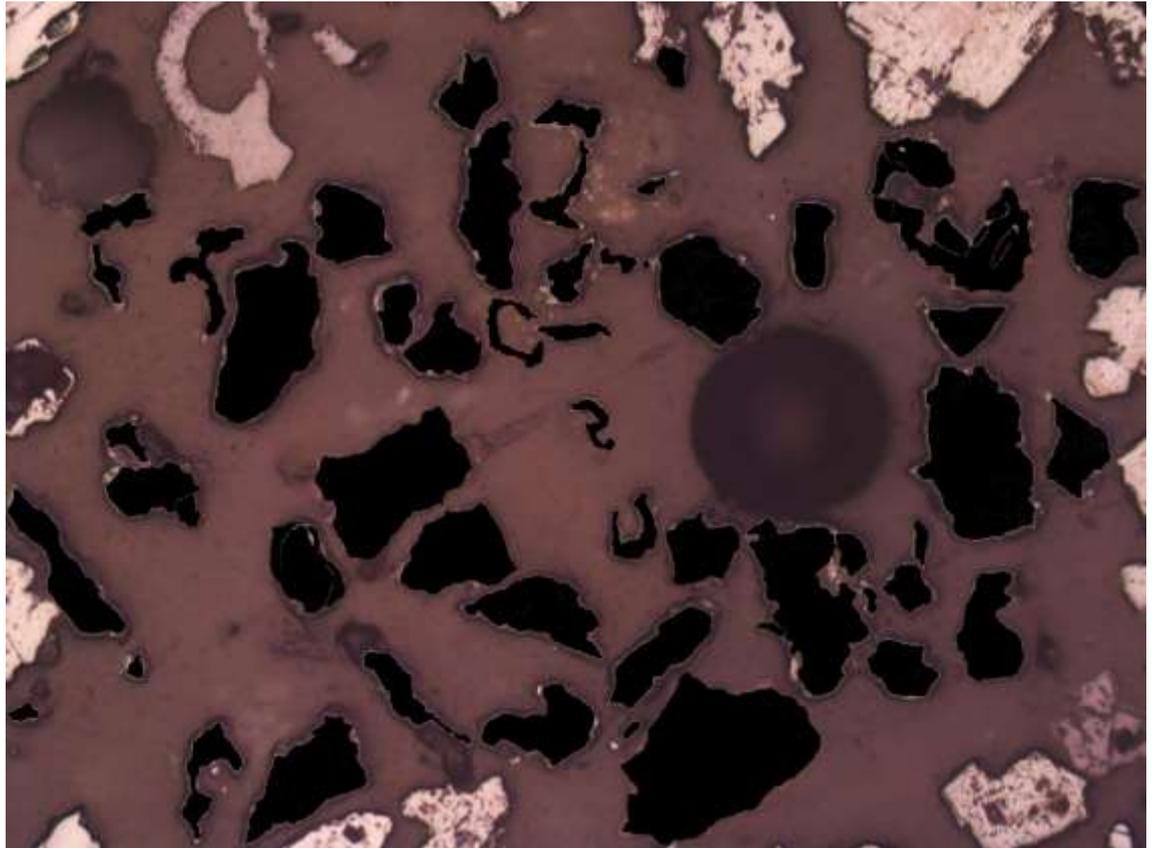


P3-20

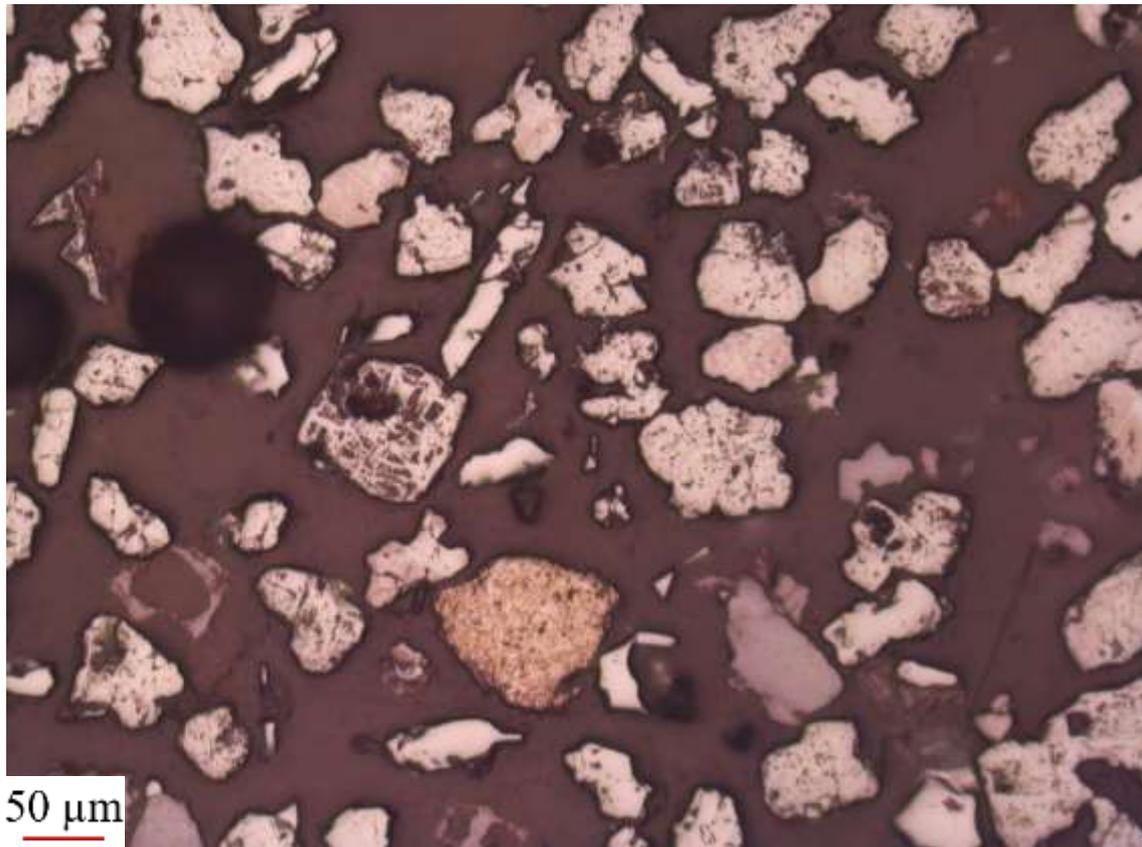


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	55	64
Área dos grãos (µm ²)	1057899	65763

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	46,218%	53,782%
Determinação de áreas	94,146%	5,854%

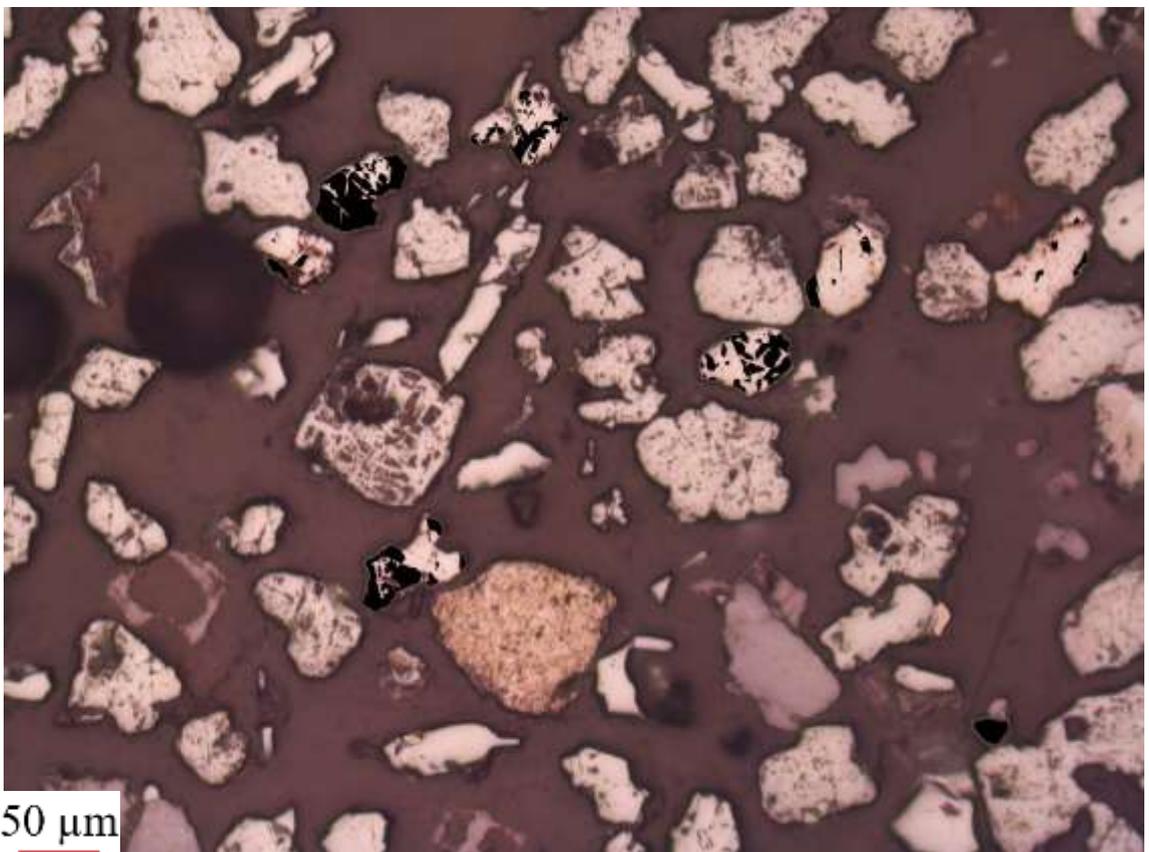
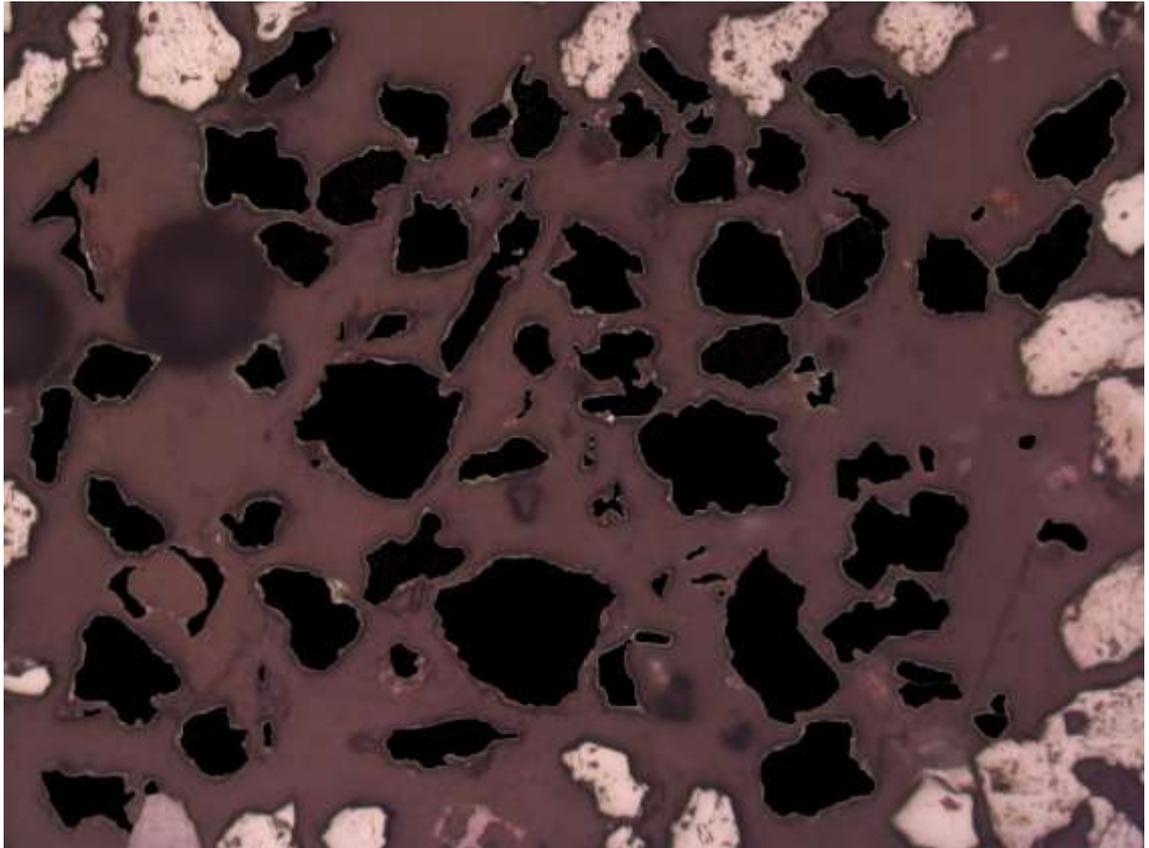


P3-21

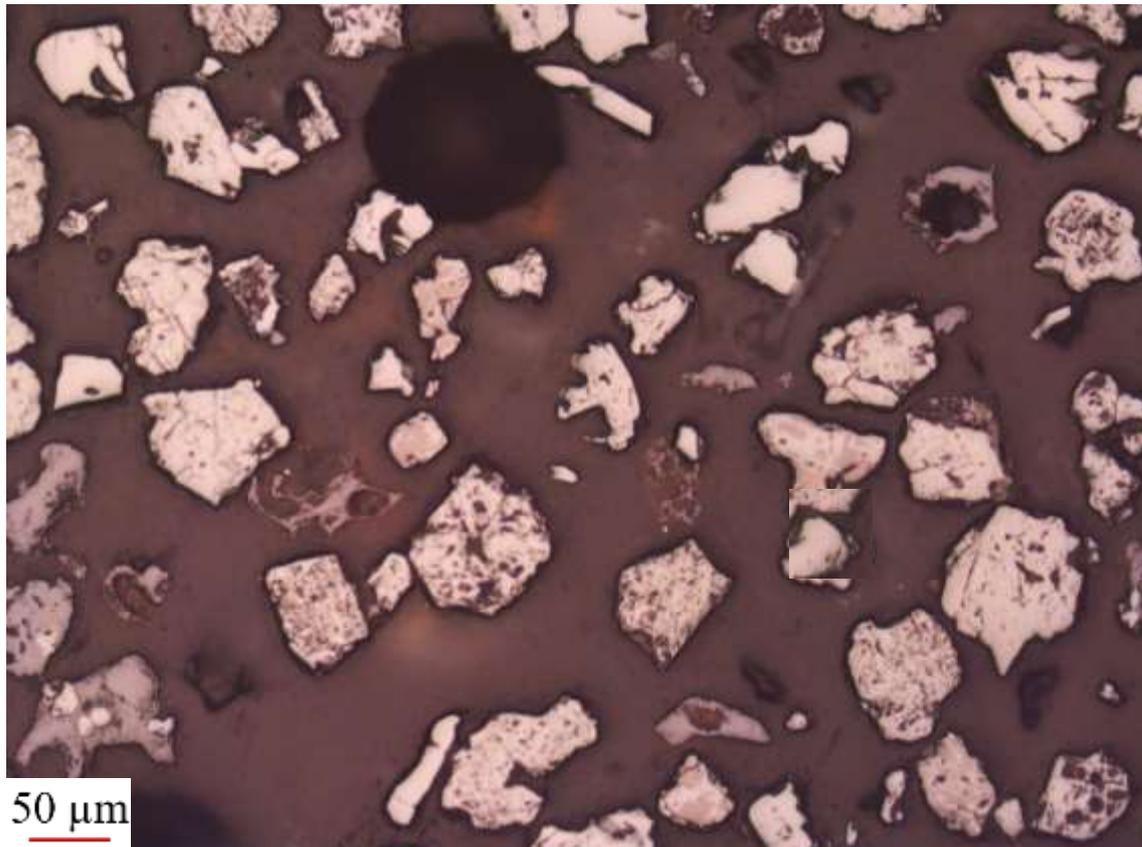


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	79	54
Área dos grãos (μm^2)	1209721	56648

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	59,398%	40,602%
Determinação de áreas	95,528%	4,472%

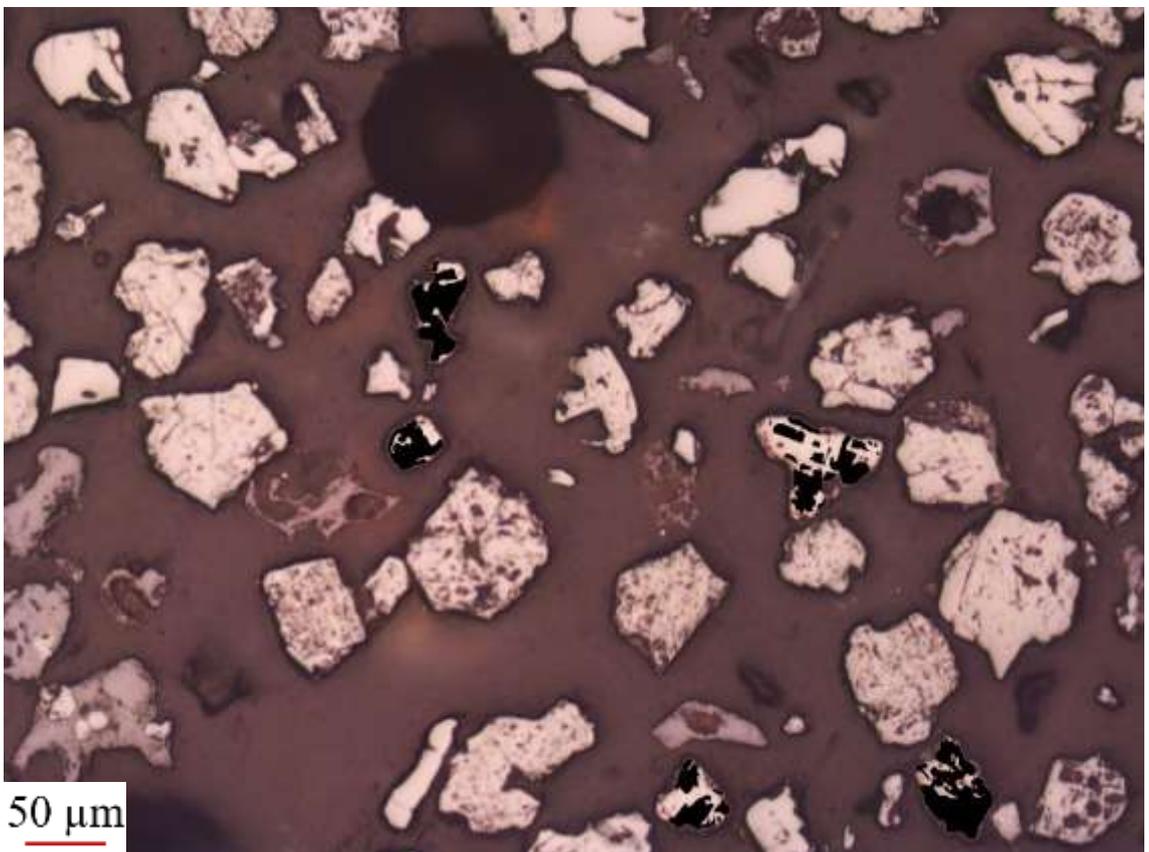
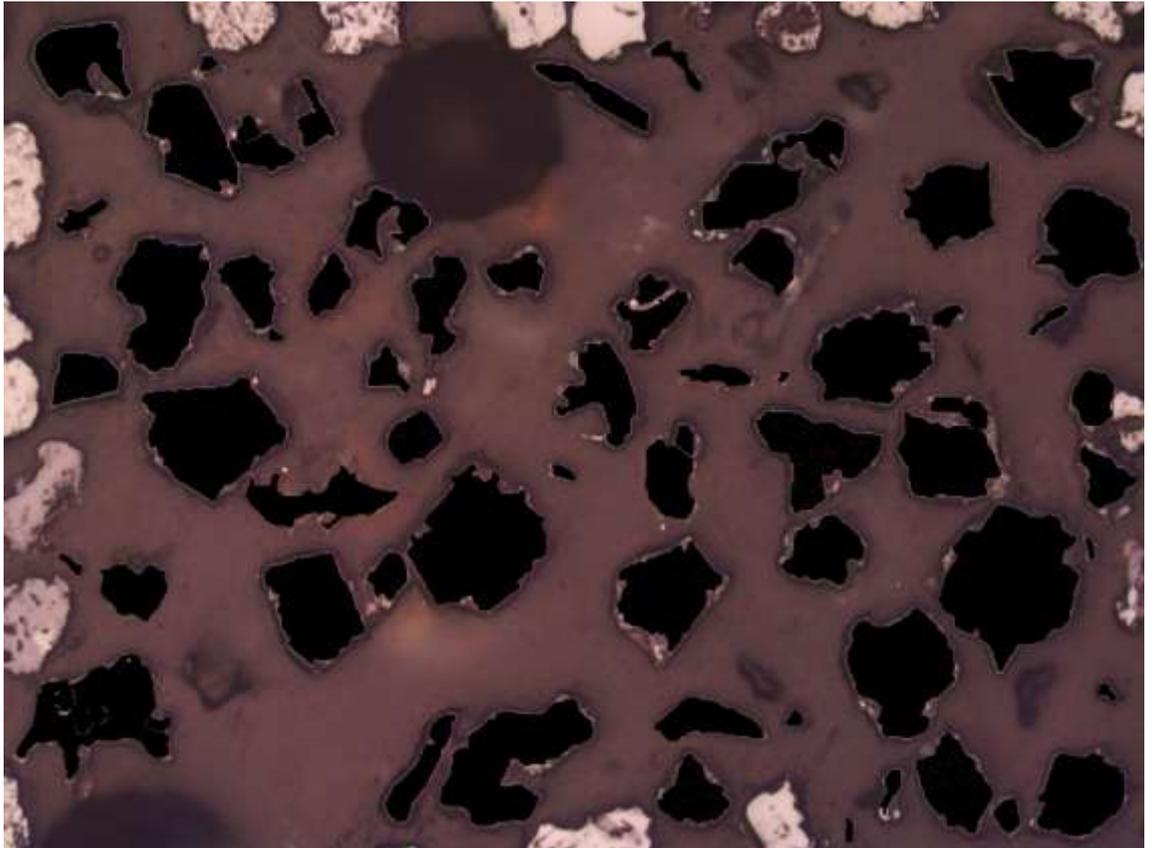


P3-22

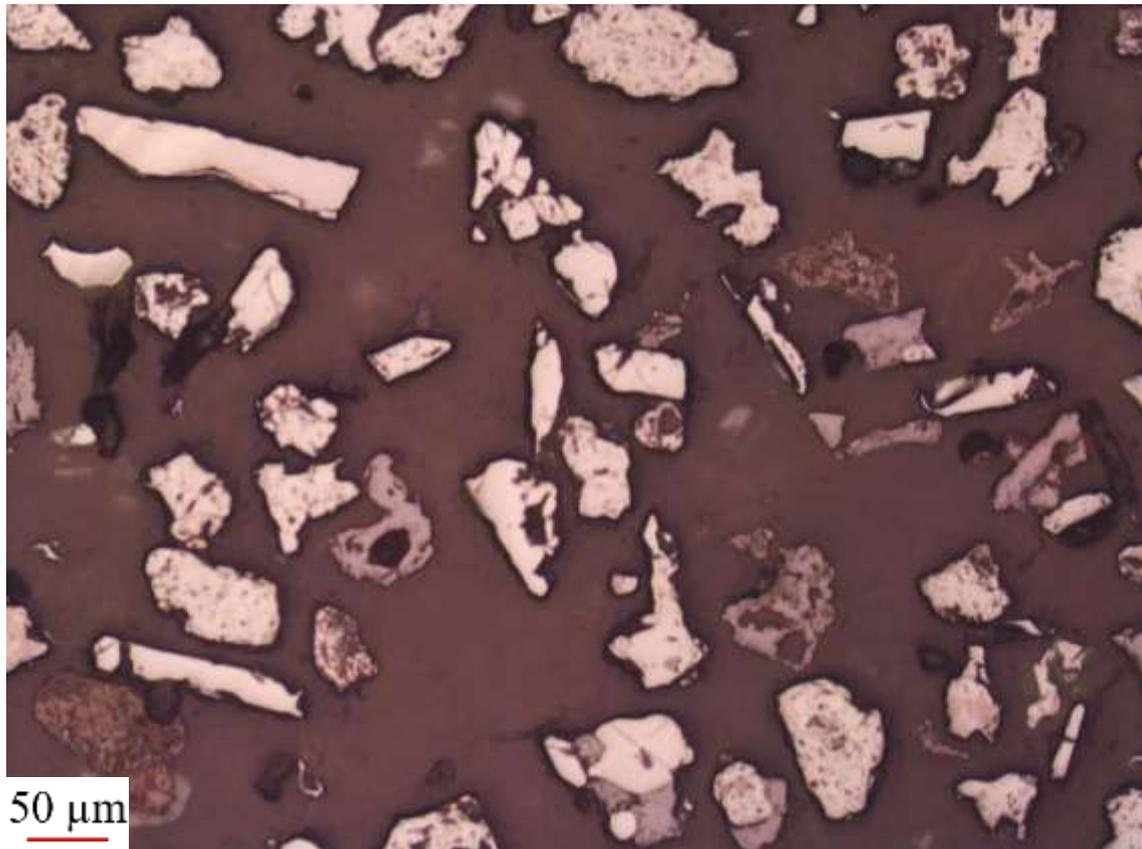


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	65	25
Área dos grãos (μm ²)	1171798	65349

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	72,222%	27,778%
Determinação de áreas	94,719%	5,281%

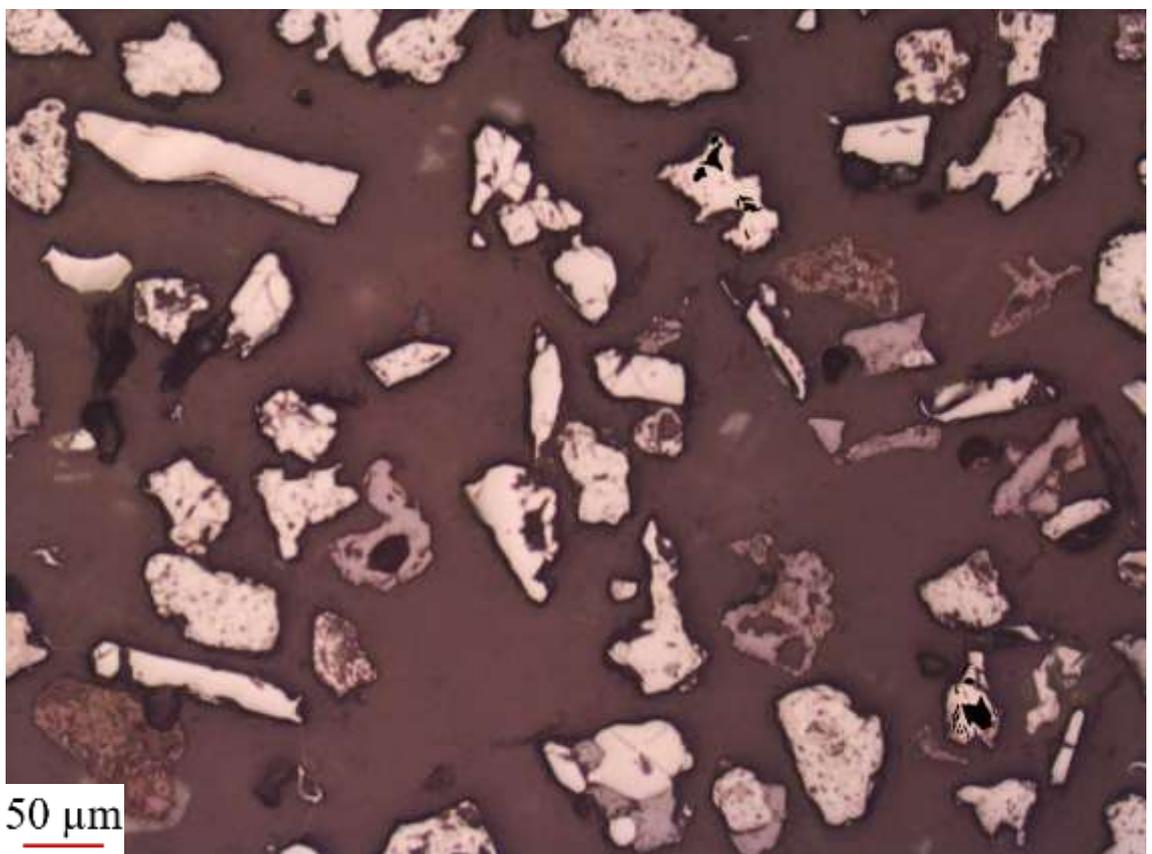
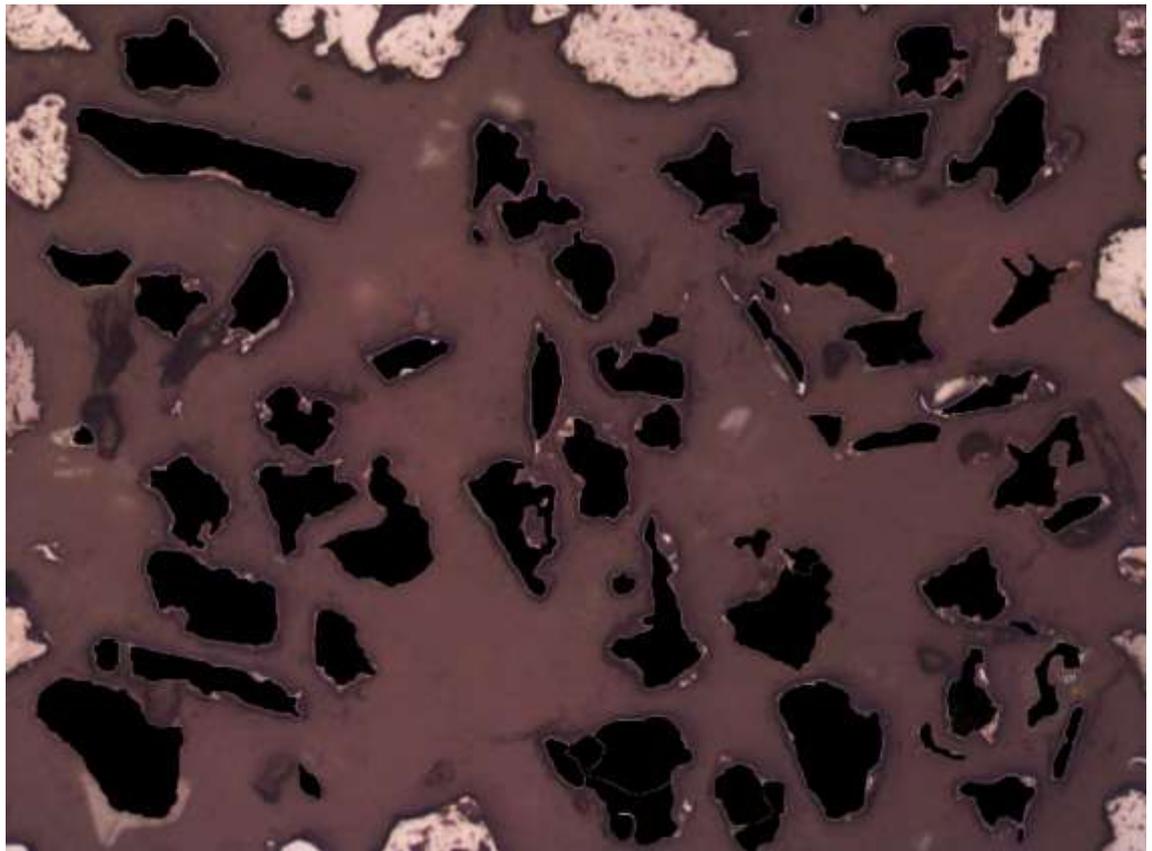


P3-23



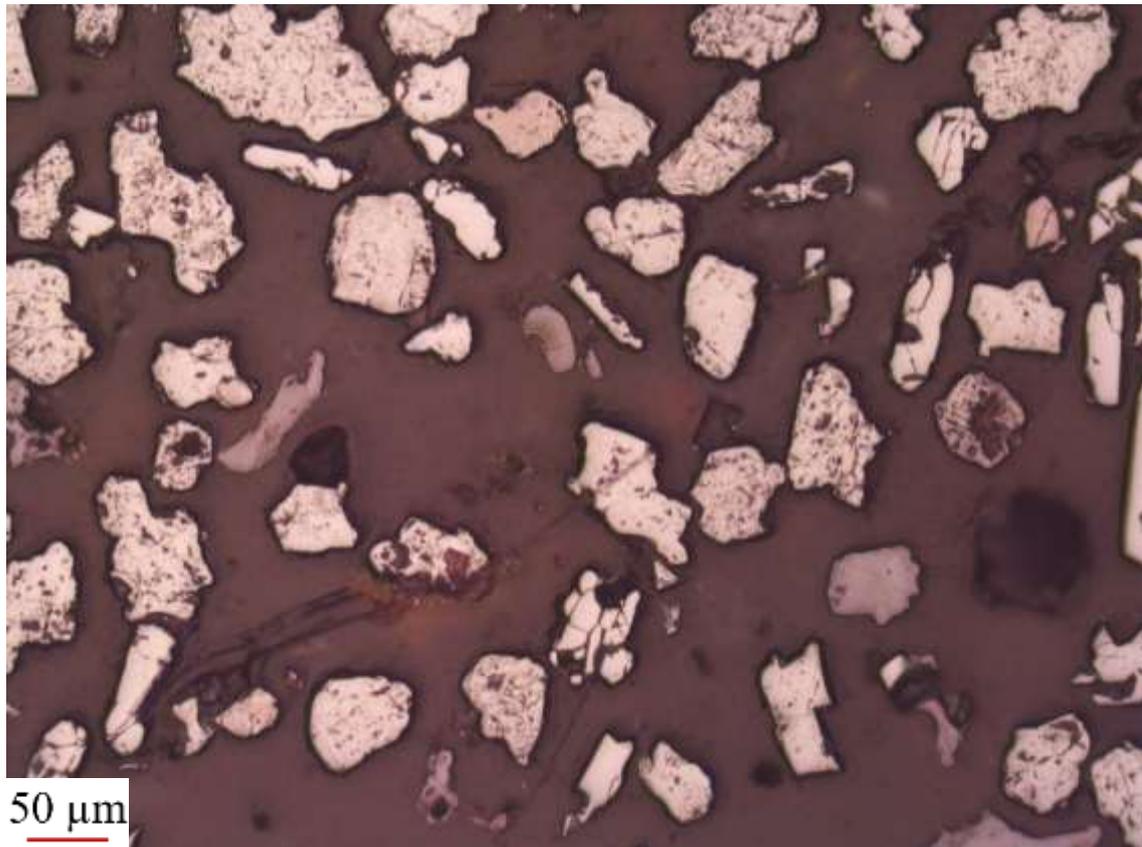
	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	64	19
Área dos grãos (µm ²)	990928	7631

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	77,108%	22,892%
Determinação de áreas	99,234%	0,766%



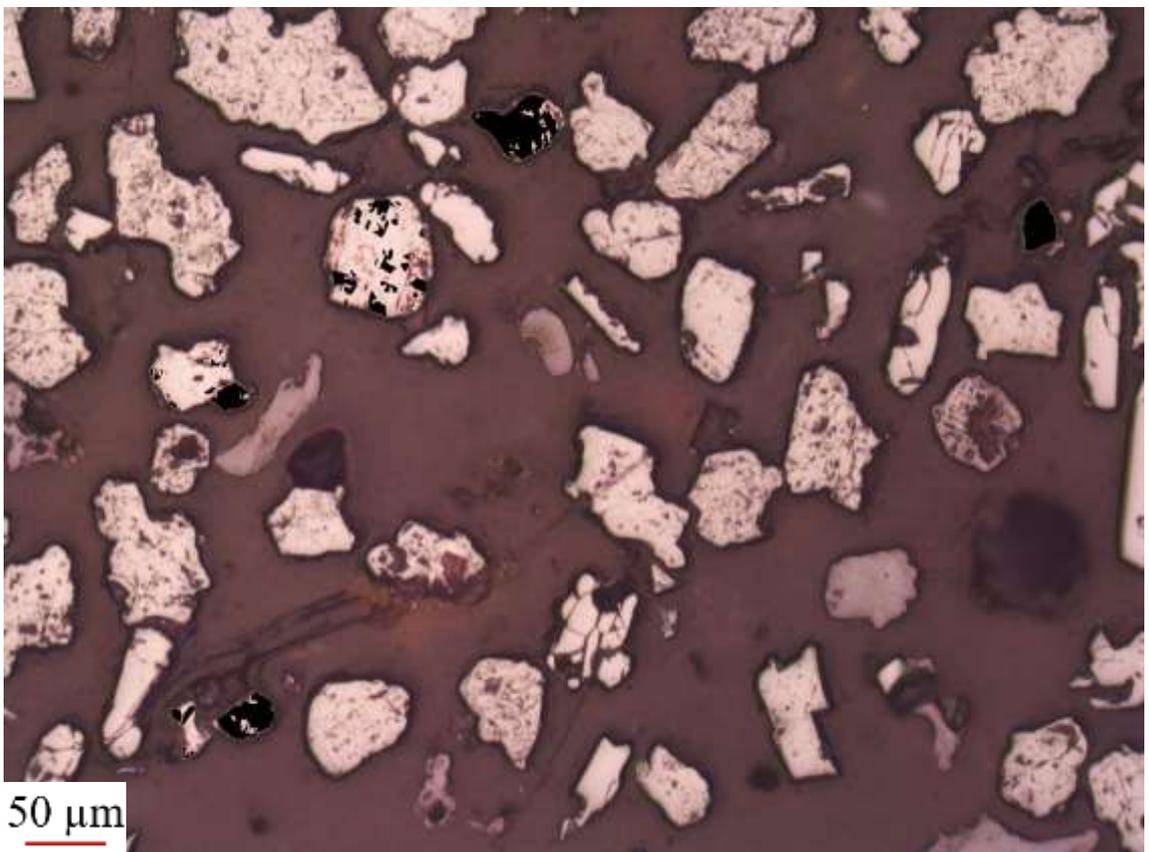
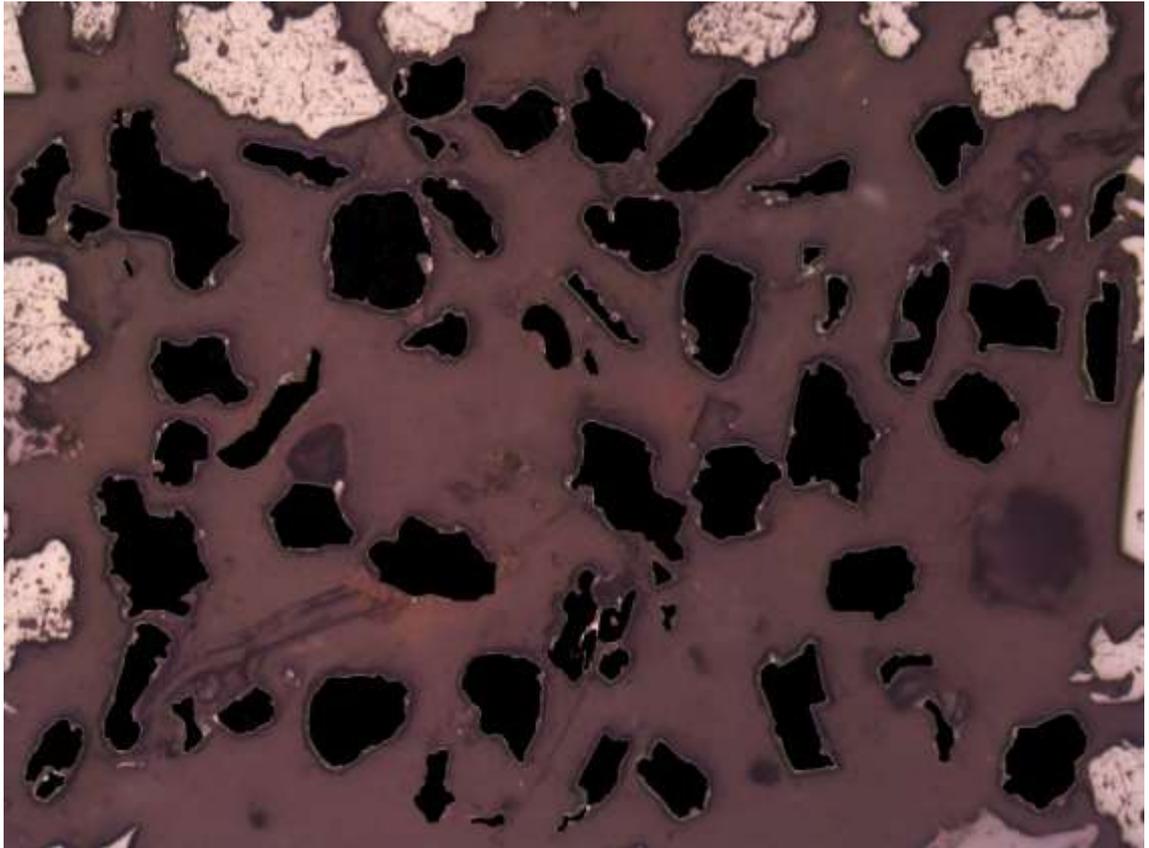
50 μm

P3-24

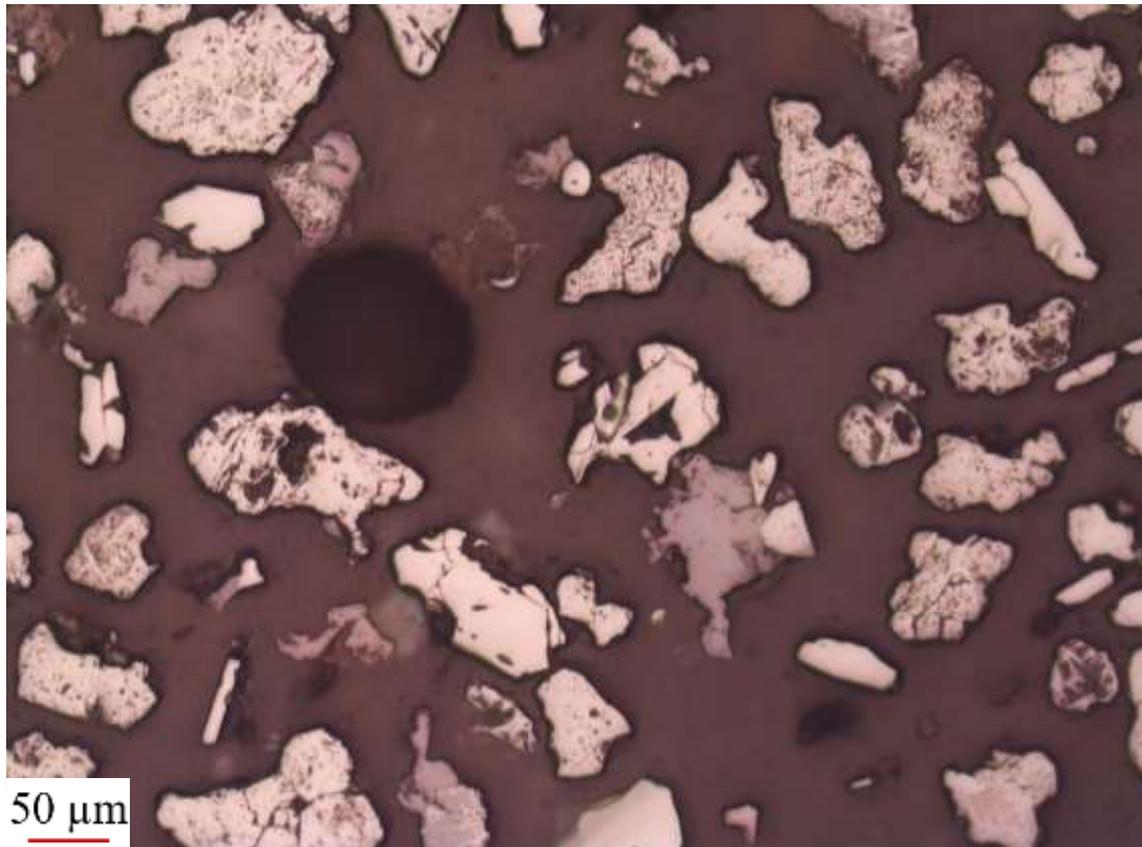


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	61	36
Área dos grãos (µm ²)	1020155	44214

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	62,887%	37,113%
Determinação de áreas	95,845%	4,155%

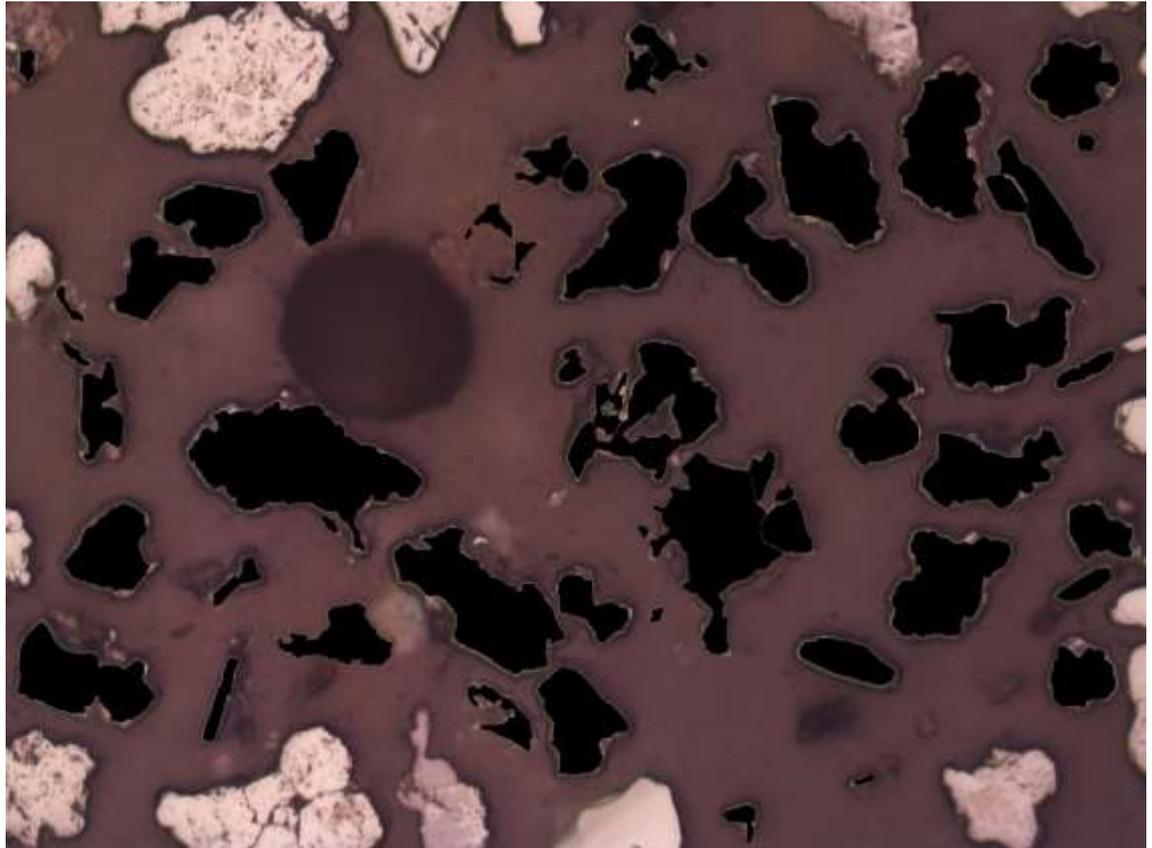


P3-25

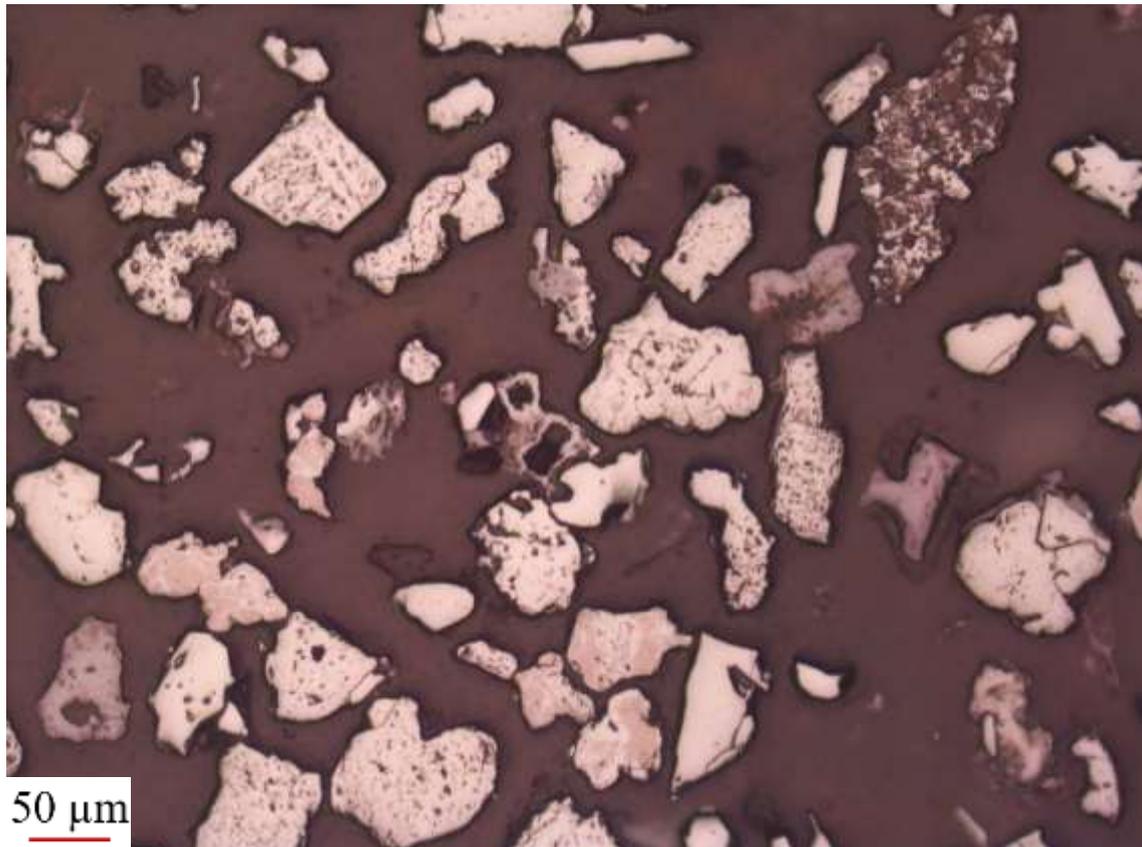


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	51	0
Área dos grãos (µm ²)	985072	0

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	100,000%	0,000%
Determinação de áreas	100,000%	0,000%

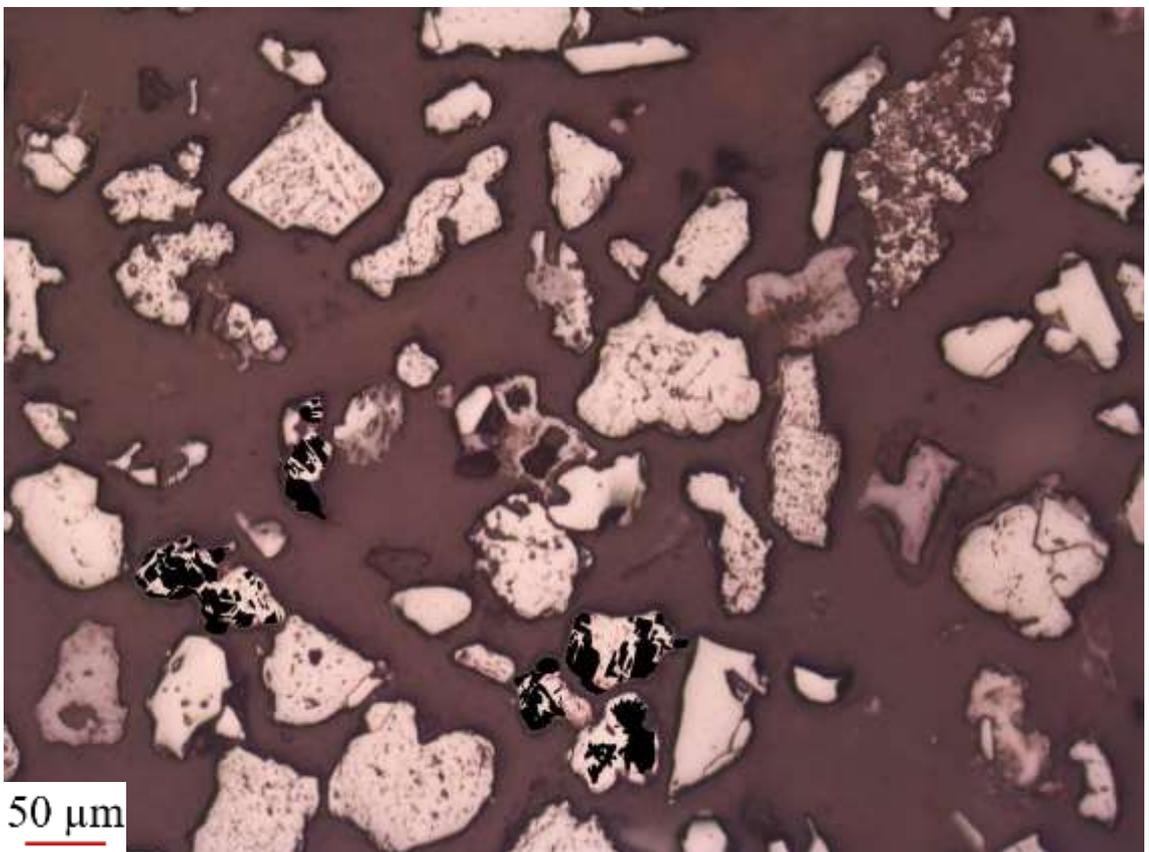
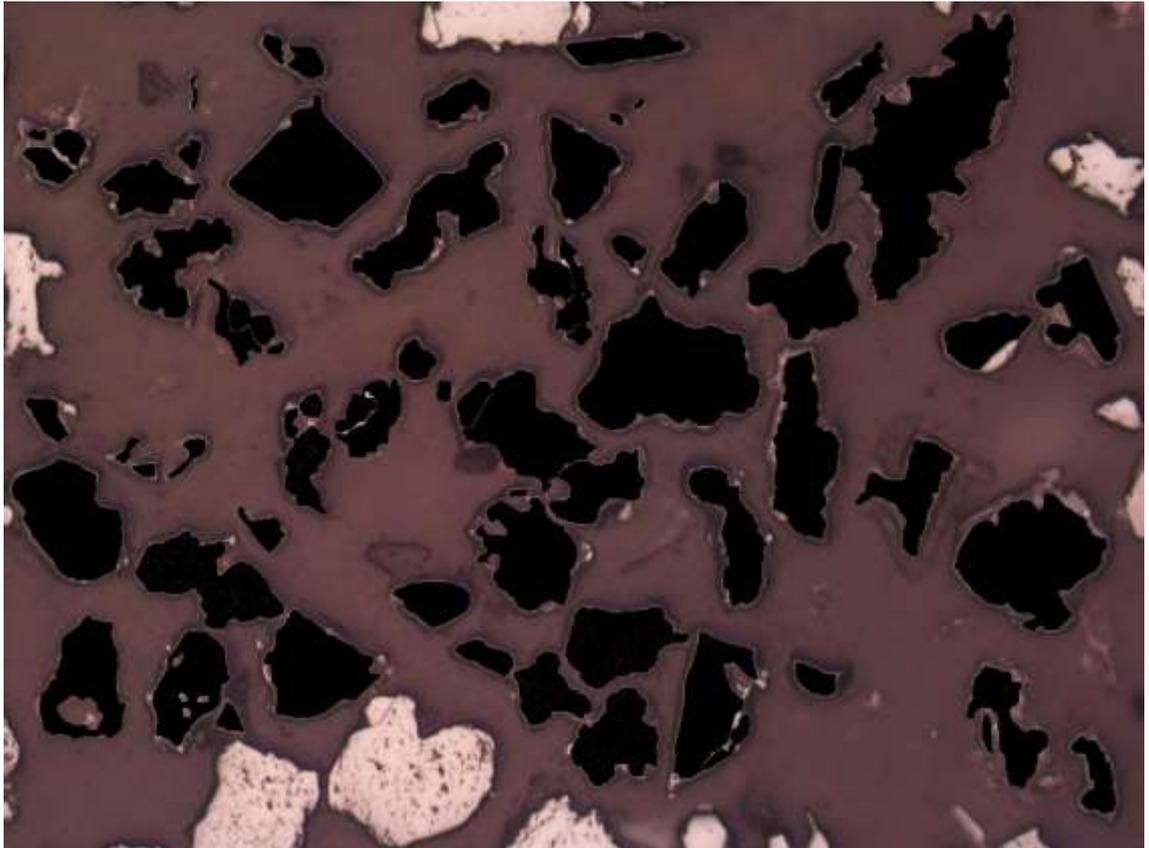


P3-26

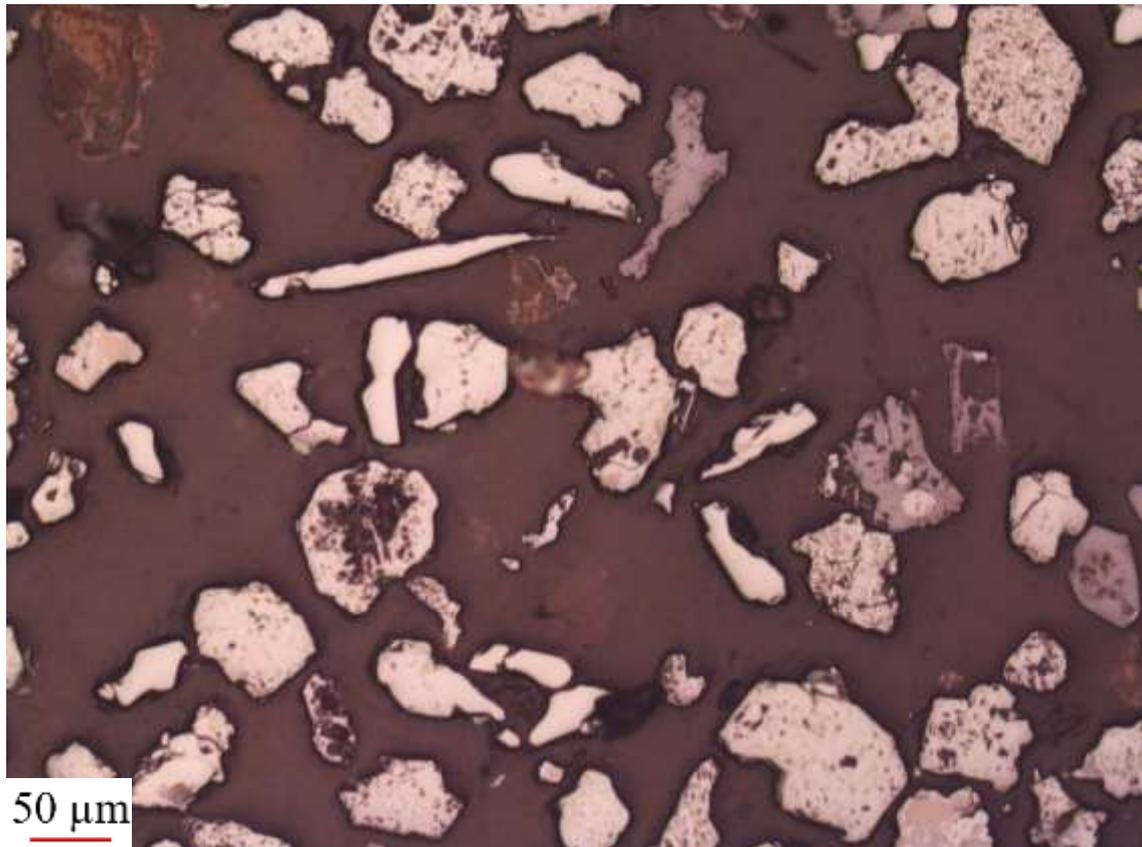


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	67	43
Área dos grãos (µm ²)	1246245	77126

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	60,909%	39,091%
Determinação de áreas	94,171%	5,829%

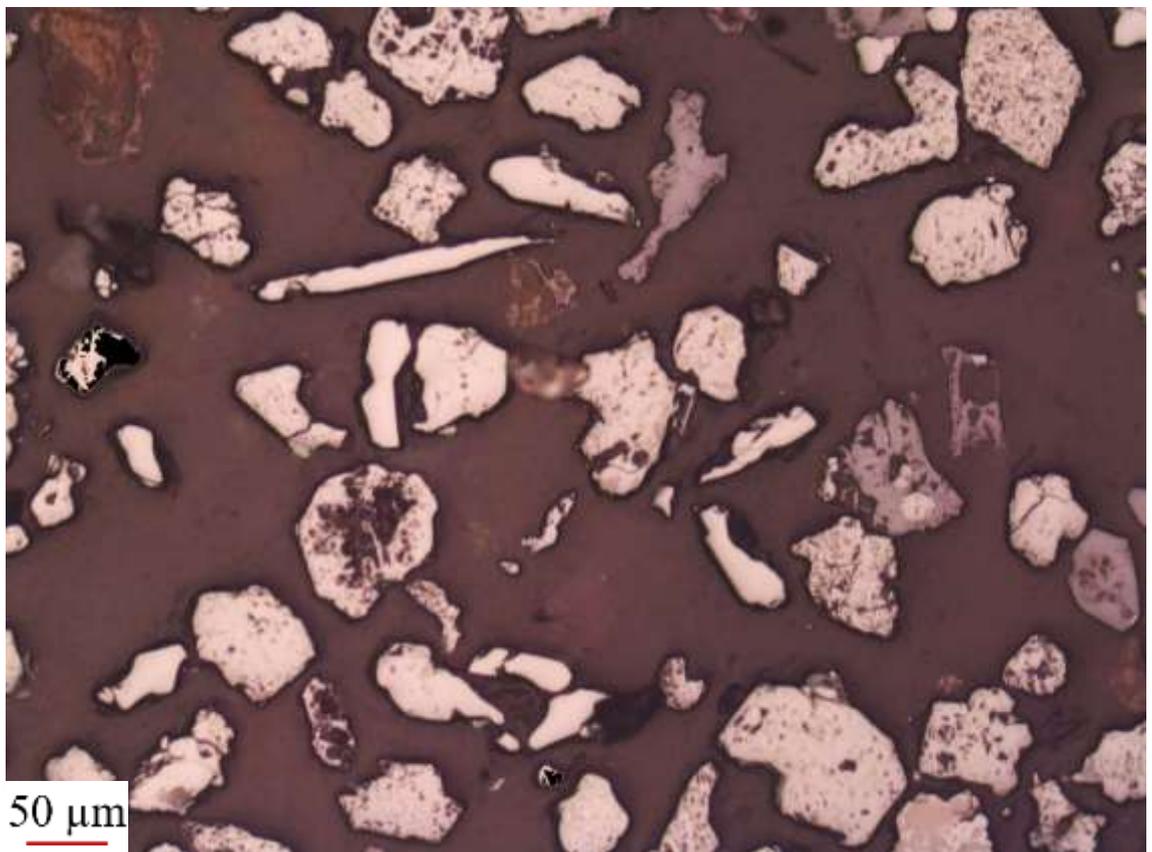
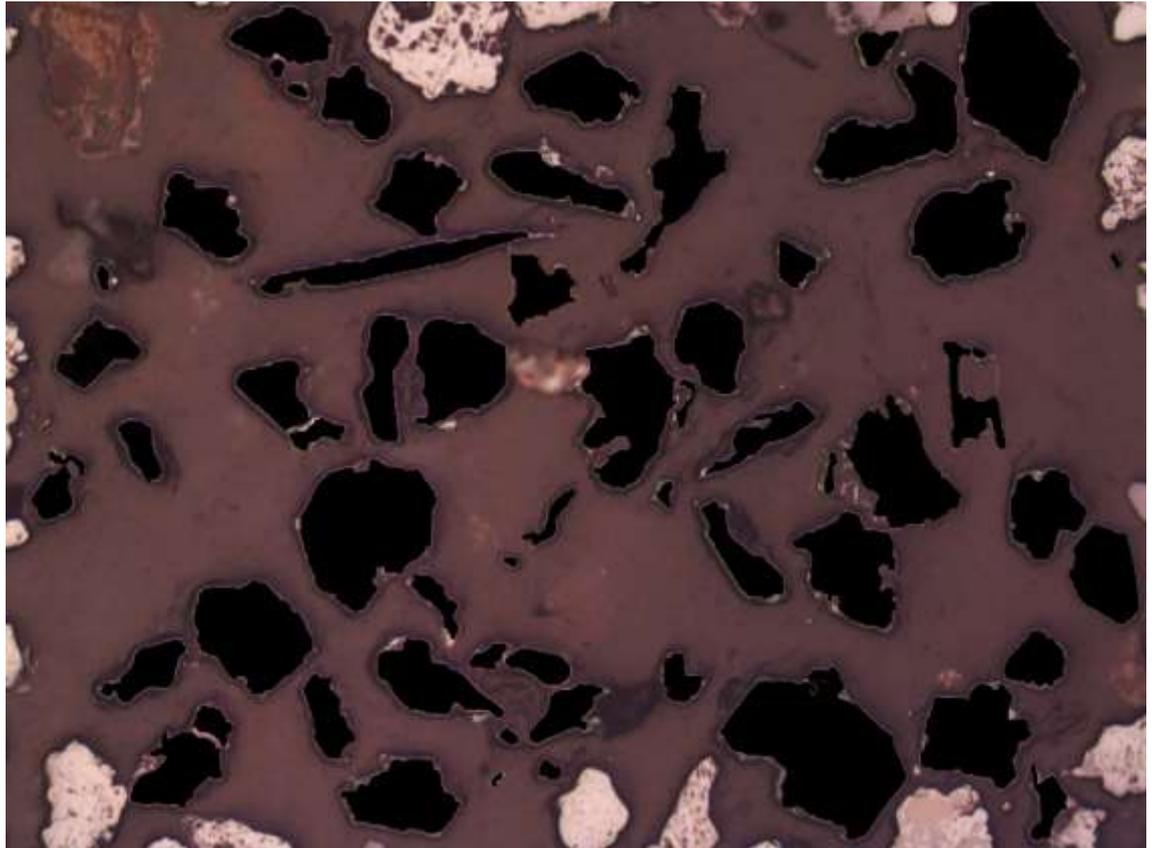


P3-27

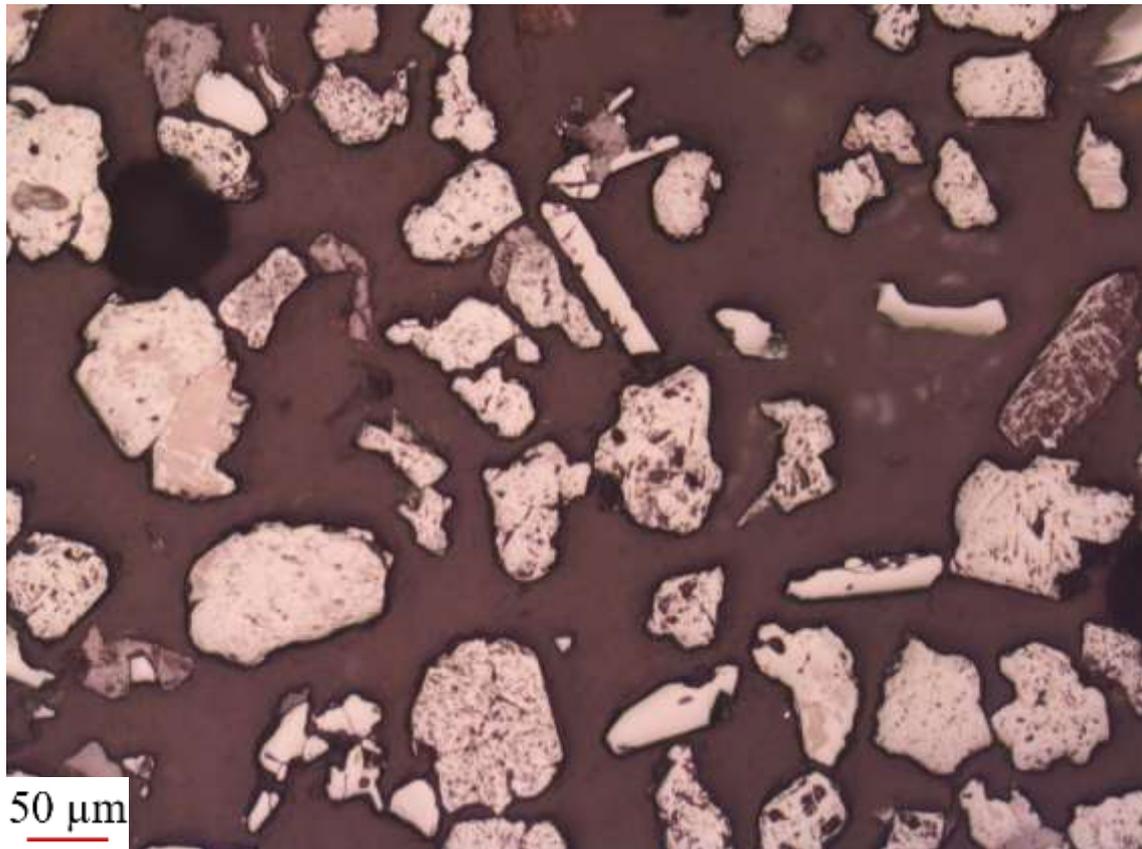


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	60	11
Área dos grãos (μm ²)	1164417	10470

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	84,507%	15,493%
Determinação de áreas	99,110%	0,890%

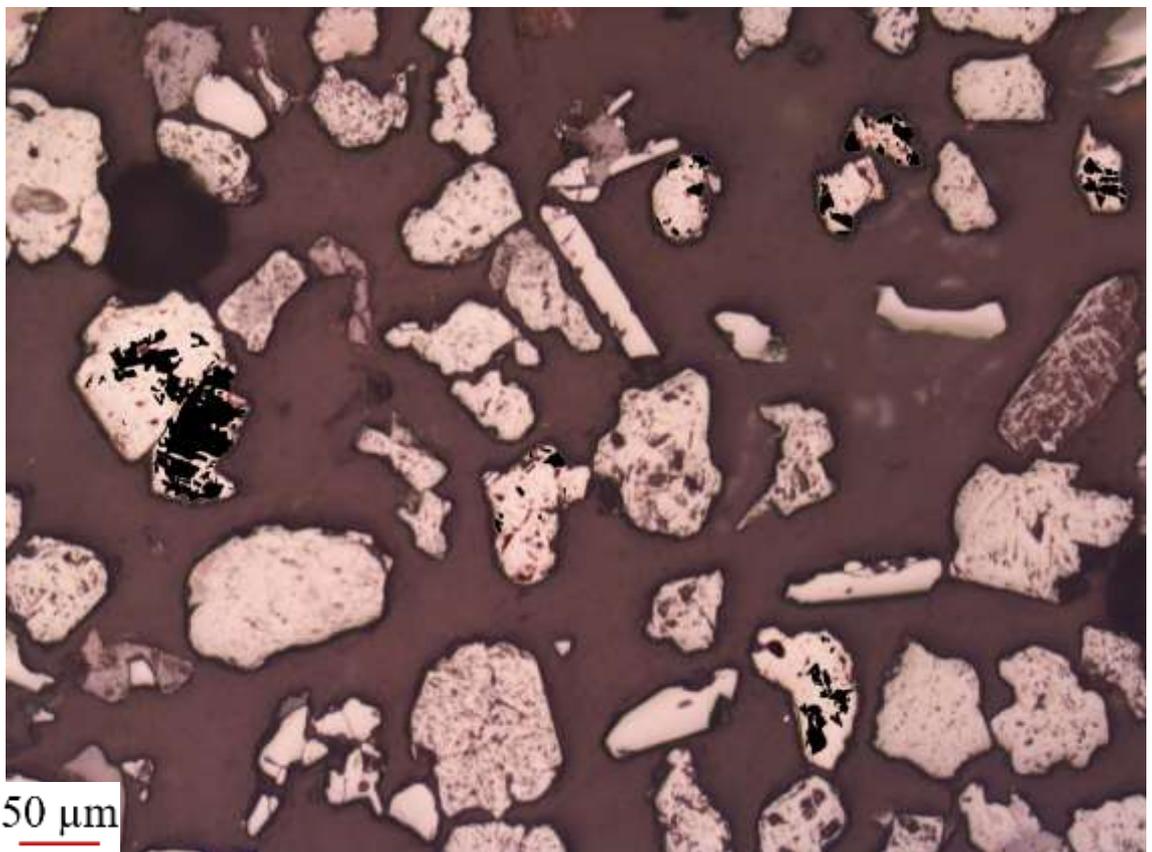
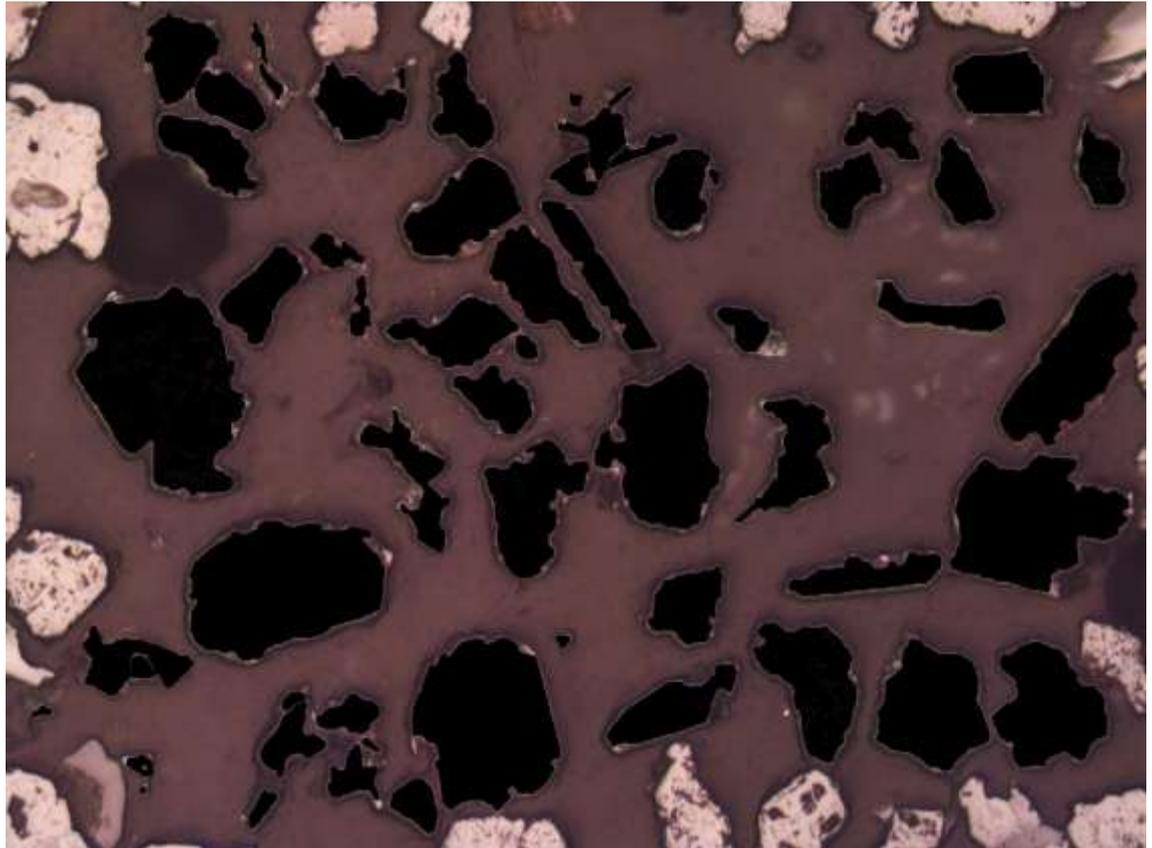


P3-28

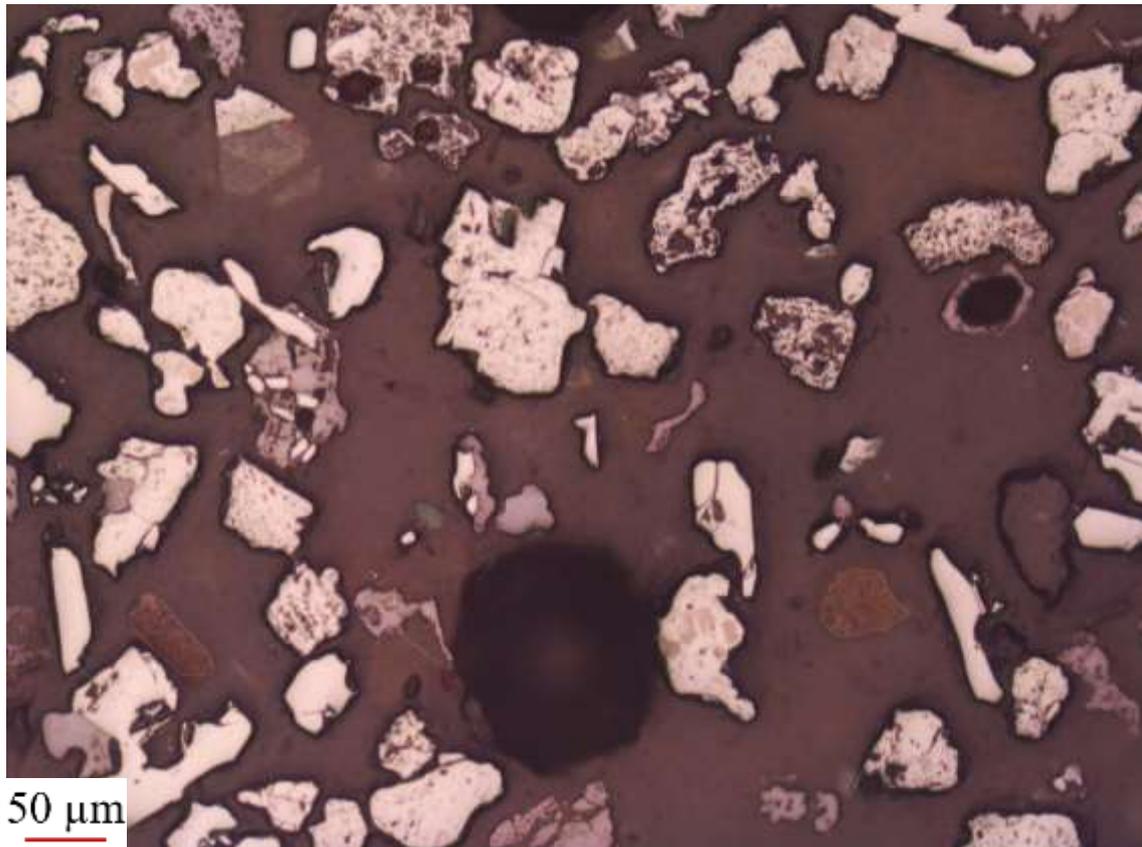


	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	54	64
Área dos grãos (µm ²)	1321857	72057

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	45,763%	54,237%
Determinação de áreas	94,832%	5,168%

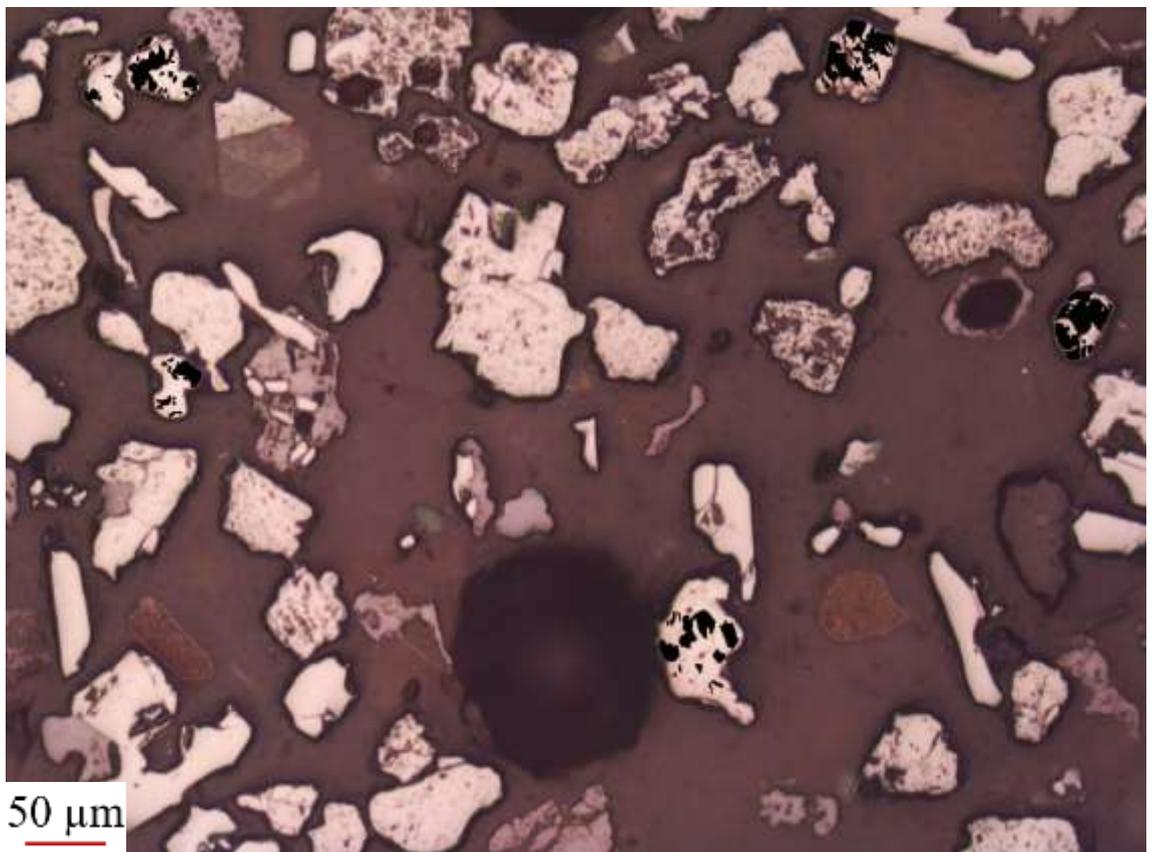
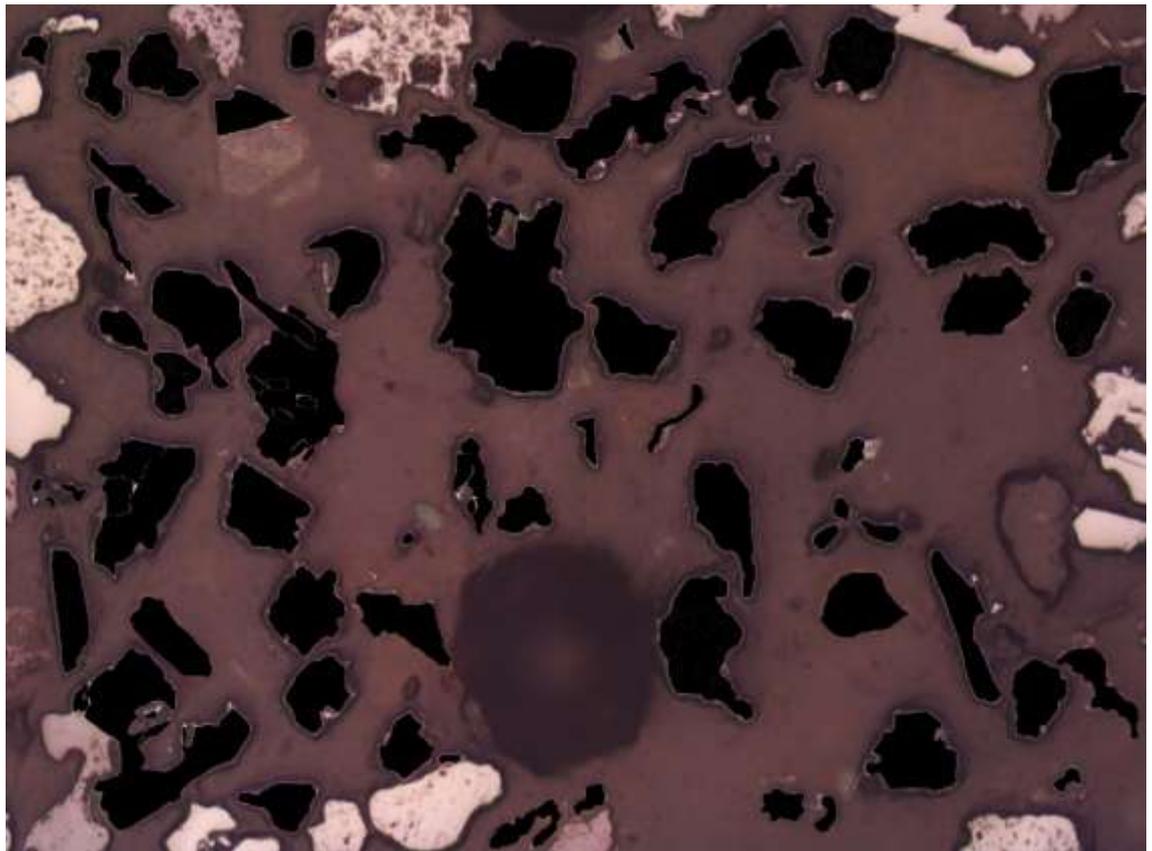


P3-29



	Hematita + Goethita	Magnetita
Pontos contados	71	43
Área dos grãos (μm^2)	1089513	42846

Método	Hematita + Goethita	Magnetita
Contagem de pontos	62,281%	37,719%
Determinação de áreas	96,218%	3,782%



APÊNDICE 2

Imagem	Hematita + Goethita		Magnetita	
	Contagem de Grãos (%)	Área dos Grãos (%)	Contagem de Grãos (%)	Área dos Grãos (%)
P1-1	66,25	96,30	33,75	3,70
P1-2	51,52	97,39	48,49	2,61
P1-3	61,11	96,62	38,89	3,38
P1-4	74,47	99,11	25,53	0,89
P1-5	82,31	98,83	17,69	1,17
P1-6	86,79	99,68	13,21	0,32
P1-7	60,00	98,00	40,00	1,97
P1-8	61,42	98,29	38,58	1,71
P1-9	43,53	89,31	56,47	10,69
P1-10	67,68	98,35	32,32	1,65
P1-11	70,00	94,05	30,00	5,95
P1-12	69,07	99,05	30,93	0,95
P1-13	66,09	97,66	33,91	2,34
P1-14	47,15	97,04	52,85	2,96
P1-15	54,86	97,25	45,14	2,75
P1-16	51,39	97,52	48,61	2,48
P1-17	72,92	98,69	27,08	1,31
P1-18	65,08	96,78	34,92	3,22
P1-19	70,55	99,20	29,55	0,80
P1-20	64,93	98,71	35,08	1,29
P1-21	76,36	98,65	23,64	1,36
P1-22	64,34	94,72	35,66	5,28
P1-23	73,83	98,45	26,17	1,55
P1-24	40,00	94,12	60,00	5,88
P1-25	70,21	93,52	29,79	6,48
P1-26	60,33	93,85	25,50	6,15
P1-27	81,52	96,45	19,48	3,55
P1-28	74,56	95,82	25,44	4,18
P1-29	79,37	99,36	20,64	0,64
MÉDIA	66,25%	97,52%	32,32%	3,01%

Imagem	Hematita + Goethita		Magnetita	
	Contagem de Grãos (%)	Área dos Grãos (%)	Contagem de Grãos (%)	Área dos Grãos (%)
P2-1	66,92	97,38	33,08	2,62
P2-2	80,73	98,70	19,27	1,30
P2-3	87,23	97,79	12,77	2,21
P2-4	99,01	99,00	0,99	1,00
P2-5	87,62	98,60	12,38	1,41
P2-6	69,29	95,27	30,71	4,73
P2-7	76,32	97,37	23,68	2,63
P2-8	90,79	99,56	9,21	0,44
P2-9	60,18	92,54	39,82	7,46
P2-10	53,03	98,58	46,97	1,42
P2-11	65,59	94,02	34,41	5,98
P2-12	75,28	98,02	24,72	1,98
P2-13	92,41	98,26	7,59	1,74
P2-14	78,85	98,70	21,15	1,30
P2-15	81,63	96,84	18,37	3,16
P2-16	83,50	97,72	16,51	2,28
P2-17	95,12	99,23	4,88	0,77
P2-18	68,53	95,84	31,47	4,16
P2-19	79,86	98,19	20,14	1,81
P2-20	78,00	93,58	22,00	6,42
P2-21	55,37	89,73	44,63	10,27
P2-22	74,56	97,10	25,44	2,90
P2-23	77,94	96,41	22,06	3,59
P2-24	73,68	99,18	26,32	0,83
P2-25	81,65	93,36	18,35	6,64
P2-26	74,44	95,93	25,56	4,07
P2-27	75,58	99,32	24,42	0,68
P2-28	92,50	99,00	7,50	1,00
P2-29	67,57	94,64	32,43	5,36
MÉDIA	77,35%	96,89%	22,65%	3,11%

Imagem	Hematita + Goethita		Magnetita	
	Contagem de Grãos (%)	Área dos Grãos (%)	Contagem de Grãos (%)	Área dos Grãos (%)
P3-1	49,61	94,66	50,39	5,34
P3-2	55,48	96,35	44,52	3,65
P3-3	72,09	96,50	27,91	3,51
P3-4	84,85	98,97	15,15	1,03
P3-5	77,97	93,50	22,03	6,50
P3-6	74,07	98,43	25,93	1,57
P3-7	73,97	98,77	26,03	1,23
P3-8	80,00	98,33	20,00	1,68
P3-9	46,36	94,80	53,64	5,20
P3-10	68,00	95,27	32,00	4,73
P3-11	77,27	99,08	22,73	0,92
P3-12	51,79	92,97	48,21	7,03
P3-13	61,33	38,67	99,00	1,00
P3-14	73,26	98,14	26,74	1,86
P3-15	62,99	93,57	37,01	6,43
P3-16	80,20	99,05	19,80	0,95
P3-17	79,78	97,22	20,23	2,78
P3-18	66,98	97,57	33,02	2,43
P3-19	66,06	98,63	33,95	1,37
P3-20	46,22	94,15	53,78	5,85
P3-21	59,40	95,53	40,60	4,47
P3-22	72,22	94,72	27,78	5,28
P3-23	77,11	99,23	22,89	0,77
P3-24	62,89	95,85	37,11	4,16
P3-25	100,00	100,00	0,00	0,00
P3-26	60,91	94,17	39,09	5,83
P3-27	84,51	99,11	15,49	0,89
P3-28	45,76	94,83	54,24	5,17
P3-29	62,28	96,22	37,72	3,78
MÉDIA	68,05%	94,63%	34,03%	3,29%