



Debora Turon Wagner

**Quantificação automática, por microscopia digital, do ferro
metálico em briquetes autorredutores de minério de ferro**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Sidnei Paciornik
Co-Orientador: Prof. José Carlos D'Abreu

Rio de Janeiro
Março de 2012



Debora Turon Wagner

Quantificação automática, por microscopia digital, de ferro metálico em briquetes autorredutores de minério de ferro

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos da PUC-Rio.

Prof. Sidnei Paciornik

Orientador

Departamento de Engenharia de Materiais - PUC-Rio

Prof. José Carlos D'Abreu

Co-Orientador

Departamento de Engenharia de Materiais - PUC-Rio

Dr. Helio Kohler

Departamento de Engenharia de Materiais – PUC-Rio

Dr. Otávio da Fonseca Martins Gomes

CETEM-MCT

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de março de 2012

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Debora Turon Wagner

Formada em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela Faculdade Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2010. As áreas de interesse são Ciência dos Materiais, Processamento Químico e Metalúrgico dos Materiais e Siderurgia.

Ficha Catalográfica

Wagner, Debora Turon

Quantificação automática, por microscopia digital, ferro metálico em briquetes autorredutores de minério de ferro / Debora Turon Wagner ; orientador: Sidnei Paciornik ; co-orientador: José Carlos D'Abreu. – 2012.

143 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia de Materiais, 2012.

Inclui bibliografia

1. Engenharia de materiais – Teses. 2. Autorredução. 3. Tecnoed. 4. Microscopia digital. 5. Análise de imagens. I. Paciornik, Sidnei. II. D'Abreu, José Carlos. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia de Materiais. IV. Título.

CDD: 620.11

Dedico este trabalho aos meus pais, Valeria e Wagner, minhas irmãs, Carla e Carolina, e ao meu namorado, Pedro, com amor e carinho.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Valéria e Wagner, pelo carinho, dedicação, empenho e às palavras de conforto nos momentos de dificuldade. Às minhas irmãs, Carla e Carolina, por todo o incentivo, carinho, paciência e apoio técnico. Ao meu namorado, Pedro Henrique, por estar ao meu lado durante toda a minha vida acadêmica, sempre me apoiando, e por nunca deixar eu desistir dos meus sonhos. Família, vocês são tudo na minha vida!

Aos meus amigos acadêmicos pela força e paciência do dia a dia. Principalmente, o pessoal do LPDI.

A Karen Augusto pela amizade, lealdade, companheirismo, apoio técnico e pela incansável paciência ao me ajudar a analisar os resultados, até mesmo nos fins de semana!

Ao meu orientador Sidnei Paciornik por ser uma pessoa maravilhosa, extremamente ética e totalmente comprometida com sua carreira, por ter paixão em exercer a profissão que escolheu e desempenhar com excelência o papel de orientador! Obrigada por todos os ensinamentos durante os cinco anos de convivência, pelos conselhos de valor inestimável e por toda confiança depositada em mim! Você é um dos grandes responsáveis pelo meu crescimento profissional e pessoal!

Ao meu co-orientador José Carlos D'Abreu por toda paciência em responder as

inúmeras perguntas que eu fazia, por todo o conhecimento passado e pelo incentivo.

Ao José Henrique Noldin pela possibilidade de desenvolver o mestrado em tecnologia de autorredução TecnoRed, por abrir as portas da empresa para interagir com os funcionários, pelo material cedido para as análises, e por toda a contribuição técnica.

Ao Helio Kohler pela paciência e dedicação na ajuda com as estatísticas do trabalho. Você foi incrível!

Ao Otávio Gomes pelo suporte técnico e disponibilidade em todos os momentos que necessitei. Suas contribuições foram de grande valor.

À Thais Fernandes, por ter despertado o meu interesse pela produção acadêmica durante a iniciação científica, pela grande amizade, apoio, palavras de conforto nos momentos de necessidade e por toda vibração nos momentos de vitória.

À Vale, pela dedicação na preparação das amostras, que foi um grande desafio para todos, pelas passagens e liberação para que eu pudesse receber o título de mestra em engenharia de materiais.

A todos os membros do Departamento de Engenharia de Materiais da PUC-Rio e aos técnicos dos laboratórios, pelo apoio em tudo. Vocês são ótimos!

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

E a todas as pessoas que não citei explicitamente, mas foram fundamentais para que eu me tornasse mestra!

Resumo

Wagner, Debora Turon; Paciornik, Sidnei; D'Abreu, José Carlos. **Quantificação automática, por microscopia digital, de ferro metálico em briquetes autorredutores de minério de ferro.** Rio de Janeiro, 2012. 143p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A produção do ferro primário, intermediário na produção do aço, é realizada majoritariamente pela rota tradicional do alto-forno. No entanto, tecnologias alternativas estão aumentando suas participações no mercado. Dentre elas, a tecnologia emergente brasileira de autorredução Tecnored é bastante promissora e é objeto de estudo desta dissertação. A tecnologia Tecnored utiliza briquetes autorredutores de minério de ferro em fornos de cuba para obter metal líquido como produto final. Os aglomerados autorredutores, curados a frio, são produzidos a partir de uma mistura de fluxantes, ligantes, finos de minério de ferro e/ou resíduos ferrosos, e um agente redutor carbonoso. A caracterização do insumo para a produção de ferro-primário se faz necessária, de modo a conhecer a distribuição de poros para avaliar a integridade estrutural e a mecânica dos fluidos durante a redução, e quantificar e avaliar a distribuição do ferro metálico presente no aglomerado. Esta dissertação objetiva desenvolver uma metodologia para quantificação de ferro metálico nos briquetes autorredutores de minério de ferro, por meio de rotinas automáticas de processamento de imagens capturadas em microscópio ótico de luz refletida (MLR), e mapear os poros e o ferro metálico ao longo das seções retiradas para análise, também de forma automática. Para a pesquisa realizada, foram utilizados dois tipos de redutores – Carvão Mineral (CM) e Coque Verde de Petróleo (CVP), e diferentes condições de tempo e espessura de briquete. O processo experimental apresentou alguns desafios, desde o corte realizado na preparação das seções polidas para observação em MRL, até a identificação e mapeamento das fases presentes no briquete. Para a validação da metodologia, os resultados da quantificação do ferro metálico realizada por análise de imagens foram comparados com a técnica tradicional de análise química. Os mapas de porosidade e ferro metálico permitiram uma avaliação qualitativa das variáveis tempo e espessura do briquete, para cada tipo de redutor.

Palavras-chave

Autorredução; Tecnored; Microscopia Digital; Análise de Imagens.

Abstract

Wagner, Debora Turon; Paciornik, Sidnei; D'Abreu, José Carlos. **Automatic quantification of metallic iron in self-reducing iron ore briquettes by digital microscopy.** Rio de Janeiro, 2012. 143p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The production of primary iron, intermediate step in steelmaking chain, is mostly done by the traditional route of blast furnace. However, alternative technologies are increasing their market share. Among the technologies, Tecnored is a very promising Brazilian ironmaking process and the goal of this master dissertation is the study of its iron-bearing burden. The Tecnored technology utilizes self-reduced iron ore briquettes in a modulate shaft furnace to obtain hot metal. The self-reduced agglomerates, cold bonded, are produced from a mixture of flux, binder, fines of iron ore, residues containing iron and carbonaceous material as a reducing agent. The burden characterization in ironmaking process is essential to study the pores distribution and evaluate the structural integrity and mechanics of fluids during the reduction process, and quantify and analyze the metallic iron distribution along the briquette's volume. This dissertation main goal is to develop a new methodology of quantification of the metallic iron in self-reduced iron ore briquettes, through automatic routines of image processing, captured in bright field of a reflected light optical microscopy (MRL), and mapping pores and metallic iron automatically along the cross-sections analyzed. The tested briquettes utilized two reducing agents – coal fines (CM) and coke of petroleum (CVP), and it was submitted in two different reduction times and two different briquettes' thickness. The experimental process presented some challenges, from the cross section cut to be polished and observed in MRL, to the identification and mapping of the phases in the briquettes. To validate the methodology, the results of the quantification of metallic iron through image analysis were compared to the results of the traditional technique of chemical analysis. The porosity and metallic iron maps provided a qualitative evaluation of reduction time and the effect of briquettes' thickness, for each type of carbonaceous reducing agents.

Keywords

Self-reduction; Tecnored; Digital Microscopy; Image Analysis.

Sumário

1	Introdução	20
2	Objetivos	22
3	Revisão Bibliográfica	23
3.1.	Produção de ferro-primário	23
3.1.1.	Tecnologias	24
3.1.2.	Fenômenos de Redução	27
3.1.3.	Tecnored	30
3.2.	Dados de mercado do aço, seus insumos e intermediários	33
3.3.	Caracterização	36
3.3.1.	Microscopia	37
3.3.2.	Processamento Digital de Imagens	48
4	Materiais e Métodos	56
4.1.	Preparação dos briquetes	56
4.2.	Redução dos briquetes	57
4.3.	Preparação da Seção Polida	57
4.4.	Visualização e captura de imagens no MLR	59
4.5.	Análise de Imagens	59
4.6.	Análise Química via úmida	64
4.7.	Picnometria	65
4.8.	Determinação da %mFe(AI) para comparação com resultados experimentais de %mFe(AQ), obtidos por meio de análise química	66
4.9.	Estudos estatísticos	67
5	Resultados e Discussões	69
5.1.	Extração automática de atributos por análise de imagens	69
5.2.	Análise qualitativa do briquete autorredutor de minério de ferro, por meio dos mapas de porosidade e de ferro metálico	71

5.3. Validação da metodologia de análise de imagens utilizada para quantificação de ferro metálico	80
6 Conclusões	89
7 Trabalhos Futuros	91
8 Referências Bibliográficas	92
9 Apêndice I	95
10 Apêndice II	140

Lista de Figuras

Figura 1 – Fluxograma da produção do aço	23
Figura 2 – Tecnologias de produção de ferro-primário (D'Abreu, 2007)	24
Figura 3 – Redução sólido-sólido (D'Abreu, 2007)	29
Figura 4 – Seção transversal do Forno Tecnoired (Noldin Junior, 2002)	32
Figura 5 – Produção mundial de minério de ferro (UNCTAD - United Nations Conference on trade and development)	33
Figura 6 - Exportação mundial de minério de ferro (UNCTAD - United Nations Conference on trade and development)	34
Figura 7 – Importação mundial de minério de ferro (UNCTAD - United Nations Conference on trade and development)	35
Figura 8 – Microscopia Digital	38
Figura 9 – Histogramas com diferentes contrastes para uma mesma tensão de iluminação: (A) pequeno tempo de exposição; (B) tempo de exposição ideal; e (C) alto tempo de exposição (Wagner, D.T., 2010)	39
Figura 10 – Efeito da temperatura do filamento da lâmpada de tungstênio avaliado através da intensidade de radiação e do comprimento de onda refletido na imagem capturada (Paciornik, 2010)	40
Figura 11 – Avaliação do efeito da tensão na iluminação – 3,0 V: (A) imagem capturada sem ajustes de câmera e (B) imagem com <i>White balance</i> (Wagner, D.T., 2010)	42
Figura 12 – Avaliação do efeito da tensão na iluminação – 7,0 V: (A) imagem capturada sem ajustes de câmera e (B) imagem com <i>White balance</i> (Wagner, D.T., 2010)	43
Figura 13 – Avaliação do efeito da tensão na iluminação – 9,5 V: imagem capturada sem ajustes de câmera (Wagner, D.T., 2010)	44
Figura 14 – Função de transferência de modulação (Paciornik, 2010)	45
Figura 15 – Esquema de Aquisição do Mosaico (Wagner, D.T., 2010)	47
Figura 16 – Fluxograma de processamento digital de imagens (Paciornik, 2010)	48
Figura 17 – Imagem sem delineamento (Wagner, D.T., 2010)	50

Figura 18 – Imagem após delimitação (Wagner, D.T., 2010)	50
Figura 19 – Segmentação de quatro fases em uma imagem: (A) Imagem Inicial; (B) Fase Hematita; (C) Fase Magnetita; (D) Fase Cálcio-Ferrito; (E) Fases Poros, Silicatos e Resina; e (F) Visualização de todas as fases (Wagner, D.T., 2010)	52
Figura 20 – Esquema de imagens que demonstram operadores lógicos (Paciornik, 2010)	53
Figura 21 – Linha experimental	57
Figura 22 – Corte do Briquete: (A) Máquina de Corte; (B) Corte Transversal em duas partes; (C) e (D) Cortes transversais do Briquete.	58
Figura 23 – Separação dos canais de cores RGB (Vermelho, Verde e Azul)	60
Figura 24 – Imagem, e respectivo histograma, antes e depois do processo de delimitação	60
Figura 25 – Segmentação das fases sólidas presentes no briquete, e a discriminação das fases presentes	60
Figura 26 – Segmentação do ferro metálico a partir da imagem das fases sólidas presentes no briquete	61
Figura 27 – Imagens binárias do ferro metálico e das frações sólidas, e suas respectivas áreas	61
Figura 29 – Imagens antes e depois do procedimento de borrachamento.	62
Figura 31 – Mapa de ferro metálico	62
Figura 32 – Separação dos canais de cores RGB (Vermelho, Verde e Azul)	63
Figura 33 – Imagem, e respectivo histograma, antes e depois do processo de delimitação	63
Figura 34 – Imagem referente à segmentação dos poros	63
Figura 35 – Resultado do borrachamento da imagem referente aos poros segmentados	63
Figura 37 – Mapa de porosidade	64
Figura 38 – Imagem Mosaico da seção transversal do briquete	72
Figura 39 – Segmentação das fases Ferro metálico, Poros e Outras fases	72
Figura 40 – Mapa de porosidade	73
Figura 41 – Mapa de ferro metálico	73
Figura 42 – Imagens mosaico para os testes 1, 2, 3 e 4	74

Figura 43 – Segmentação das fases ferro metálico, poros e outras fases para os testes 1, 2, 3 e 4	74
Figura 44 – Mapa de porosidade para os testes 1, 2, 3 e 4	75
Figura 46 – Falha de compactação no briquete de 20 mm de espessura antes da redução	76
Figura 47 – Imagens mosaico para os testes 5, 6, 7 e 8	77
Figura 48 – Segmentação das fases ferro metálico, poros e outras fases para os testes 5, 6, 7 e 8	78
Figura 49 – Mapa de porosidade para os testes 5, 6, 7 e 8	78
Figura 51 – Desenho esquemático da retirada das alíquotas para realização dos ensaios de análise de imagens, análise química e picnometria	80
Figura 52 – Comparação entre análise química e análise de imagens, com os limites inferiores e superiores de erro para cada técnica, e o provável intervalo de confiança para o redutor CM	82
Figura 53 – Comparação entre análise química e análise de imagens, com os limites inferiores e superiores de erro para cada técnica, e o provável intervalo de confiança para o redutor CVP	83
Figura 54 – Correlação entre as técnicas de análise química e análise de imagens, corrigida um fator representado pela razão de massas específicas, para os redutores CM e CVP	84
Figura 55 – Correlação entre as técnicas de análise química e análise de imagens, corrigida por um fator representado pela razão de massas específicas, para o redutor CM	85
Figura 56 – Correlação entre as técnicas de análise química e análise de imagens, corrigida por um fator representado pela razão de massas específicas, para o redutor CM	86
Figura 57 – Aplicação dos resultados de análise de imagens de briquetes de 25 mm para verificação da correlação	87
Figura 58 – Aplicação dos resultados de análise de imagens de briquetes de 25 mm para verificação da correlação	88
Figura 59 – Original como resultado do comando <i>Open Image</i>	95
Figura 60 – Original como <i>Input</i> do comando <i>Split RGB Extractions</i>	96
Figura 61 – Red Channel como <i>output 1</i> do comando <i>Split RGB Extractions</i>	96

Figura 62 – Green Channel como <i>output</i> 2 do comando <i>Split RGB</i>	
<i>Extractions</i>	97
Figura 63 – Blue Channel como <i>output</i> 3 do comando <i>Split RGB</i>	
<i>Extractions</i>	97
Figura 64 – Red Channel como <i>input</i> do comando <i>Delineate</i>	98
Figura 65 – Delineated Image como <i>output</i> do comando <i>Delineate</i>	98
Figura 66 – Delineated Image como <i>input</i> do comando <i>Thresholds</i>	
<i>Interactive</i>	99
Figura 67 – Fases Sólidas como <i>output</i> do comando <i>Thresholds Interactive</i>	99
Figura 68 – Fases Sólidas como <i>input</i> do comando <i>Thresholds Interactive</i>	100
Figura 69 – Fundo como <i>output</i> do comando <i>Thresholds Interactive</i>	100
Figura 70 – Fases Sólidas como <i>input</i> do comando <i>Thresholds Interactive</i>	101
Figura 71 – Ferro Metálico como <i>output</i> do comando <i>Thresholds</i>	
<i>Interactive</i>	101
Figura 72 – Ferro Metálico como <i>input</i> do comando <i>Lowpass</i>	102
Figura 73 – Ferro Metálico Borrada como <i>output</i> do comando <i>Lowpass</i>	102
Figura 74 – Fases Sólidas como <i>input</i> do comando <i>Lowpass</i>	103
Figura 75 – Brique Borrada como <i>output</i> do comando <i>Lowpass</i>	103
Figura 76 – Brique Borrada como <i>input</i> do comando <i>Thresholds</i>	
<i>Interactive</i>	104
Figura 77 – Binária Brique Borrada como <i>output</i> do comando	
<i>Thresholds Interactive</i>	104
Figura 78 – Binária Brique Borrada como <i>input</i> do comando <i>Close</i>	105
Figura 79 – Close Binária Brique Borrada como <i>output</i> do comando	
<i>Close</i>	105
Figura 80 – Close Binária Brique Borrada como <i>input</i> do comando	
<i>Clean</i>	106
Figura 81 – Máscara Brique como <i>output</i> do comando <i>Clean</i>	106
Figura 82 – Red Channel como <i>DensImage</i> do comando <i>Start</i>	
<i>Measurement</i>	107
Figura 83 – Máscara Brique como <i>Mask Image</i> do comando <i>Start</i>	
<i>Measurement</i>	107
Figura 84 – Red Channel como <i>Dens Image</i> do comando <i>Start</i>	

<i>Measurement</i>	108
Figura 85 – Ferro Metálico como <i>Mask Image</i> do comando <i>Start</i>	
<i>Measurement</i>	108
Figura 86 – Fundo como <i>input</i> do comando <i>Not</i>	110
Figura 87 – Máscara Briquete Poros Abertos como <i>output</i> do comando	
<i>Not</i>	110
Figura 88 – Red Channel como <i>Dens Image</i> do comando <i>Start</i>	
<i>Measurement</i>	111
Figura 89 – Máscara Briquete Poros Abertos como <i>Mask Image</i> do comando	
<i>Start Measurement</i>	111
Figura 90 – Máscara Briquete Poros Abertos como <i>input</i> do comando <i>Close</i>	113
Figura 91 – Close Máscara Briquete Poros Abertos como <i>output</i> do comando	
<i>Close</i>	113
Figura 92 – Close Máscara Briquete Poros Abertos como <i>input</i> do	
comando <i>Not</i>	114
Figura 93 – Poros + Resina como <i>output</i> do comando <i>Not</i>	114
Figura 94 – Poros + Resina como <i>input 1</i> do comando <i>And</i>	115
Figura 95 – Máscara Briquete como <i>input 2</i> do comando <i>And</i>	115
Figura 96 – Poros como <i>output</i> do comando <i>And</i>	116
Figura 97 – Ferro Metálico Borrada como <i>input</i> do comando <i>Multiply</i>	
<i>Constant</i>	117
Figura 98 – Ferro Metálico Borrada Intensidade Ajustada como <i>output</i> do	
comando <i>Multiply Constant</i>	117
Figura 99 – Ferro Metálico Borrada Intensidade Ajustada como <i>Image</i> do	
comando <i>Load Look-up Table</i>	118
Figura 100 – Mapa de Ferro Metálico como <i>output</i> do comando <i>Load</i>	
<i>Look-up Table</i>	118
Figura 101 – Poros como <i>input</i> do comando <i>Lowpass</i>	119
Figura 102 – Poros Borrada como <i>output</i> do comando <i>Lowpass</i>	119
Figura 103 – Poros Borrada como <i>input</i> do comando <i>Multiply Constant</i>	120
Figura 104 – Poros Borrada Intensidade Ajustada como <i>output</i> do	
comando <i>Multiply Constant</i>	120
Figura 105 – Poros Borrada Intensidade Ajustada como <i>input</i> para o	

comando <i>Load Look-up Table</i>	121
Figura 106 – Mapa de Porosidade como <i>output</i> do comando <i>Load Look-up Table</i>	121
Figura 107 – Poros como <i>input</i> R do comando <i>Combine RGB Extractions</i>	122
Figura 108 – Ferro Metálico como <i>input</i> G do comando <i>Combine RGB Extractions</i>	122
Figura 109 – Máscara Briquete como <i>input</i> B do comando <i>Combine RGB Extractions</i>	123
Figura 110 – Combined Channels Image como <i>output</i> do comando <i>Combine RGB Extractions</i>	123
Figura 111 – Imagem-mosaico para as condições: CM, 20 mm e 20 min	124
Figura 112 – Segmentação das fases ferro metálico, poros e outras fases para as condições: CM, 20 mm e 20 min	124
Figura 113 – Mapa de ferro metálico para as condições: CM, 20 mm e 20 min	125
Figura 114 – Mapa de porosidade para as condições: CM, 20 mm e 20 min	125
Figura 115 – Condições: CM, 20 mm e 40 min	126
Figura 116 – Segmentação das fases ferro metálico, poros e outras fases para as condições: CM, 20 mm e 40 min	126
Figura 117 – Mapa de ferro metálico para as condições: CM, 20 mm e 40 min	127
Figura 118 – Mapa de porosidade para as condições: CM, 20 mm e 40 min	127
Figura 119 – Condições: CM, 25 mm e 20 min	128
Figura 120 – Segmentação das fases ferro metálico, poros e outras fases para as condições: CM, 25 mm e 20 min	128
Figura 121 – Mapa de ferro metálico para as condições: CM, 25 mm e 20 min	129
Figura 122 – Mapa de porosidade para as condições: CM, 25 mm e 20 min	129
Figura 123 – Condições: CM, 25 mm e 40 min	130
Figura 124 – Segmentação das fases ferro metálico, poros e outras fases	

para as condições: CM, 25 mm e 40 min	130
Figura 125 – Mapa de ferro metálico para as condições: CM, 25 mm e 40 min	131
Figura 126 – Mapa de porosidade para as condições: CM, 25 mm e 40 min	131
Figura 127 – Condições: CVP, 20 mm e 20 min	132
Figura 128 – Segmentação das fases ferro metálico, poros e outras fases para as condições: CVP, 20 mm e 20 min	132
Figura 129 – Mapa de ferro metálico para as condições: CVP, 20 mm e 20 min	133
Figura 130 – Mapa de porosidade para as condições: CVP, 20 mm e 20 min	133
Figura 131 – Condições: CVP, 20 mm e 40 min	134
Figura 132 – Segmentação das fases ferro metálico, poros e outras fases para as condições: CVP, 20 mm e 40 min	134
Figura 133 – Mapa de ferro metálico para as condições: CVP, 20 mm e 40 min	135
Figura 134 – Mapa de porosidade para as condições: CVP, 20 mm e 40 min	135
Figura 135 – Condições: CVP, 25 mm e 20 min	136
Figura 136 – Segmentação das fases ferro metálico, poros e outras fases para as condições: CVP, 25 mm e 20 min	136
Figura 137 – Mapa de ferro metálico para as condições: CVP, 25 mm e 20 min	137
Figura 138 – Mapa de porosidade para as condições: CVP, 25 mm e 20 min	137
Figura 139 – Condições: CVP, 25 mm e 40 min	138
Figura 140 – Segmentação das fases ferro metálico, poros e outras fases para as condições: CVP, 25 mm e 40 min	138
Figura 141 – Mapa de ferro metálico para as condições: CVP, 25 mm e 40 min	139
Figura 142 – Mapa de porosidade para as condições: CVP, 25 mm e 40 min	139

Lista de tabelas

Tabela 1 – Produção siderúrgica brasileira	36
Tabela 2 – Exportações Brasileiras	36
Tabela 3 – Quantificação de ferro metálico, por análise de imagens, para oito testes.	70
Tabela 4 – Resultados relativos às técnicas de análise química, análise de imagens e picnometria, para briquetes de espessura de 20 mm.	81

Lista de siglas e abreviaturas

Abertura numérica – NA;

Alto forno – AF;

Análise de imagens – AI.

Análise digital de imagens – ADI;

Análise química – AQ;

Blast furnace – BF;

Briquetes autorredutores de minério de ferro – BQT;

Capital expenditure – CAPEX;

Cold bonded – CB;

Coque verde de petróleo – CVP;

Direct reduced iron – DRI;

Finos de carvão mineral – CM;

Hot briquetted iron – HBI;

Lente objetiva – LO;

Look-up table – LUT;

Microscópio ótico de luz refletida em campo claro – MLR;

Operational expenditure – OPEX;

Processamento digital de imagens – PDI;

Rotary hearth furnace – RHF;

Visual basic for applications – VBA;