

ALBERTO ELOY ANDUZE NOGUEIRA

**ESTUDO DA REDUÇÃO CARBOTÉRMICA DE MINÉRIOS DE FERRO
NA FORMA DE PELOTAS OU MISTURAS AUTORREDUTORAS EM
FORNO ROTATIVO.**

SÃO PAULO

2010

ALBERTO ELOY ANDUZE NOGUEIRA

**ESTUDO DA REDUÇÃO CARBOTÉRMICA DE MINÉRIOS DE FERRO
NA FORMA DE PELOTAS OU MISTURAS AUTORREDUTORAS EM
FORNO ROTATIVO.**

**Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Doutor em engenharia.**

SÃO PAULO

2010

ALBERTO ELOY ANDUZE NOGUEIRA

**ESTUDO DA REDUÇÃO CARBOTÉRMICA DE MINÉRIOS DE FERRO
NA FORMA DE PELOTAS OU MISTURAS AUTORREDUTORAS EM
FORNO ROTATIVO.**

**Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Doutor em engenharia.**

**Área de concentração:
Engenharia Metalúrgica e de Materiais.**

**Orientador:
Professor Associado
Marcelo Breda Mourão**

**SÃO PAULO
2010**

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 11 de outubro de 2010.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Nogueira, Alberto Eloy Anduze

Estudo da redução carbotérmica de minérios de ferro na forma de pelotas ou misturas autorredutoras em forno rotativo / A.E.A. Nogueira. -- ed.rev. -- São Paulo, 2010.

152 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1. Aglomeração de minérios (Redução) 2. Minérios 3. Redução 4. Forno rotatório 5. Fornos metalúrgicos 6. Gusa I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II. t.

DEDICATÓRIA

Dedico esta obra a minha esposa Geni Aparecida de Oliveira Faria Anduze, que não está mais entre nós, e sem cuja ajuda não poderia realizá-la.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se a colaboração das seguintes pessoas e instituições: Ao prof. Dr. Marcelo Breda Mourão por sua orientação e paciência; ao prof. Dr. Cyro Takano, por compartilhar sua experiência e supervisão; ao CNPq por financiar esta pesquisa, a Companhia do Vale do Rio Doce por ter cedido gentilmente amostras de minério de ferro com seus respectivos análises químicos e físicos. Ao IPT por ter prestado acessória e equipamentos, a meus pais, Lucia Nogueira Martins e Gustavo Jose Anduze Garnier por sua dedicação, a meus companheiros de laboratório Adolfo Pillihuaman Zambrano e John Bernardo Vilca Neira por sua colaboração.

RESUMO

A finalidade deste trabalho é estudar a redução carbotérmica de minério hematítico com misturas e pelotas autorredutoras em um forno rotativo experimental. Trabalhou-se com duas temperaturas, a 1673 e 1773 K (1400 a 1500 °C), em fluxo de argônio de 1NI/min, em um forno rotativo experimental aquecido por resistências, com uma rotação fixa de 5 rpm. Foram realizadas diversas experiências, alterando variáveis como a temperatura, composição e quantidade da escória, tipo de redutor, e tipo de conformação. Foi estudado o tempo de residência das pelotas e misturas autorredutoras dentro do forno e sua interrelação com a inclinação do mesmo. Mediu-se a resistência a compressão de diferentes composições de pelotas. Foi analisada a fração de redução atingida nas experiências com ajuda de um método indireto proposto neste trabalho, atingindo-se frações de redução acima de 98%. Especial atenção foi dada para os casos limites estudados, o primeiro com uma mistura autorredutora de 81% de minério hematítico de baixo teor, 19% de coque de petróleo,+10% cimento ARI, processada a 1773 K (1500 °C) com 33% de escória final, a qual, apesar da grande quantidade de escória, atingiu uma fração de redução de 98,7%; e o segundo, para uma mistura autorredutora de 43,5% de minério hematítico de baixo teor, 56,5% de pó de serragem, processada a 1773 K (1500 °C), a qual atingiu uma fração de redução de 99,2%, provando, com as ressalvas cabíveis, a factibilidade de reduzir diretamente com pó de serragem. Com base nas observações experimentais sugeriram-se modelos do processo de redução-fusão tanto das misturas como das pelotas autorredutoras no forno rotativo. Analisaram-se a composição da escória e a composição da fase metálica obtida. Para comparar o grau de coalescimento entre as amostras, foram levantadas as análises granulométricas de cada uma delas, comparando-se as porcentagens em massa dos nódulos de ferro-carbono com diâmetro superior a 7,93 mm. Atenção especial foi dada ao método de desagregação do produto; pela ausência de normas técnicas específicas para processos autorredutores, foi empregada uma adaptação do método de desagregação por tambor (ASTM E279-95), e validada por moagem manual. Estudou-se o efeito das variáveis: temperatura de processamento,

temperatura *liquidus* da escória, da quantidade de escória de alta temperatura *liquidus*, da quantidade de voláteis do redutor, da quantidade do redutor, e da ausência de conformação. Entre os resultados destas experiências tem-se que a maior temperatura de processamento leva a maior grau de coalescimento. Na medida em que a escória do sistema não se liquefaz, o processo de coalescimento é prejudicado. Na medida em que a quantidade de escória com alta temperatura *liquidus* aumenta, o grau de coalescimento decresce. Ao se aumentar a quantidade do redutor acima do necessário para a correta redução, carburação e coalescimento, prejudica-se o processo de formação dos nódulos de ferro-carbono. Ao se comparar o grau de coalescimento obtido entre as misturas e as pelotas autorredutoras, tem-se que o desempenho das misturas autorredutoras é superior. Para aclarar o efeito da temperatura *liquidus* da escória no processo de carburação e coalescimento, foram realizadas experiências paralelas para estudar como a temperatura *liquidus* da escória e a ausência do FeO afetava o coalescimento. Ao estudar o transporte de carbono pelas escórias sem e com a presença de um óxido redutível, tem-se que o transporte do óxido de ferro na escória sem agitação é um fenômeno difusivo.

Palavras-chave: Autorredução. Pelotas autorredutoras. Misturas autorredutoras. Fornos Rotativos. Redução Carbotérmica. Minério de ferro. Nódulos de ferro-carbono.

Abstract

The purpose of this work is to study the carbothermal reduction of hematite ore as self-reducing mixtures or pellets in an experimental rotary kiln. Two different temperatures were employed, 1673 and 1773 K (1400-1500 ° C) in an experimental rotary kiln heated by resistors, with a fixed rotation of 5 rpm and under an argon flow of 1Nl/min. Several experiments were performed by changing variables such as temperature, composition and quantity of slag, type of carbonaceous material, and type of conformation. The residence time inside the furnace and its interrelation with the slope of the kiln containing self-reducing pellets or mixtures was studied. It was measured the compressive strength of pellets of different compositions. It has been analyzed the fractional reduction achieved in the experiments with the help of an indirect method proposed in this work, reaching fractional reduction above 98%. Special attention was given to some cases, the first one with a self-reducing mixture of 81% low –grade ore, 19% petroleum coke, ARI +10%, processed to 1773 K (1500 ° C) with 33% final slag, which despite the large amount of slag reached a fractional reduction of 98.7%, and the second for a self-reducing mixture of 43.5% low-grade ore, 56.5% of sawdust processed to 1773 K (1500 ° C) which reached a fractional reduction of 99.2%, proving, with reasonable exceptions, the feasibility of reducing directly with sawdust. Based on experimental observations, process models of both the reduction-melting of self-reducing mixtures and pellets in the rotary kiln were proposed. The composition of slag and composition of the metallic phase obtained were analyzed. To compare the degree of coalescence between the samples, particle size analysis of each one was performed, comparing the percentages by weight of iron-carbon nuggets with a diameter greater than 7.93 mm. Regarding the method of disintegration of the product, due to the lack of technical standards for specific self-reducing processes, the drum method (ASTM E279-95) was adapted and validated by manual grinding. It was studied the effect of the following parameters: processing temperature, slag *liquidus* temperature, the amount of high *liquidus* temperature slag, amount of volatile matter of the reducing agent, the amount of reducing agent, and the absence of conformation. These experiments

have shown that the higher the processing temperature, the greater the degree of coalescence, and also that as long as the slag does not melt, the coalescence process is impaired. As the amount of slag with high *liquidus* temperature increases, the degree of coalescence decreases. Increasing the amount of carbonaceous material above to that necessary to reduction and carburization undermines the process of formation of iron-carbon nuggets. When comparing the degree of coalescence obtained between the self-reducing mixtures and pellets, it has been shown that the performance of self-reducing mixtures is superior. To clarify the effect of the slag *liquidus* temperature in the carburization and coarsening process, experiments were conducted to study how the *liquidus* temperature of the slag and the absence of FeO affected the coarsening. By studying the transport of carbon in slags with and without the presence of a reducible oxide, it has been shown that the transport of iron oxide in the slag without agitation is a diffusive phenomenon.

Keywords: Self-reduction. Self-reducing pellets. Self-reducing mixtures. Rotary Kiln. Carbothermic reduction. Iron ore. Iron-carbon nuggets.

SUMÁRIO

| | |
|---|----------|
| 1.0 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2.0 OBJETIVOS..... | 2 |
| 3.0 REVISÃO DA LITERATURA..... | 3 |
| 3.1 Etapas para a formação de um nódulo de ferro-carbono..... | 3 |
| 3.2 Estudo do processo de redução..... | 3 |
| 3.3 Fatores que influenciam a redução carbotérmica do óxido de ferro..... | 9 |
| 3.3.1 Temperatura..... | 9 |
| 3.3.2 Efeito da velocidade de aquecimento..... | 9 |
| 3.3.3 Redutores..... | 10 |
| 3.3.4 Tamanho da pelota..... | 11 |
| 3.3.5 Efeito de outras substâncias no processo de redução..... | 12 |
| 3.3.6 Aglomeração a frio..... | 12 |
| 3.3.7 Utilização do cimento <i>Portland</i> tipo ARI como aglomerante..... | 14 |
| 3.4 Processo de carburação do ferro..... | 15 |
| 3.5 Inter-relação entre a escória e o processo de carburação..... | 17 |
| 3.5.1 Transporte de carbono por gravidade..... | 17 |
| 3.5.2 Transporte de carbono por efeito Marangoni..... | 18 |
| 3.5.3 Transporte de carbono por escórias carbetadas..... | 18 |
| 3.5.4 Barreira física..... | 20 |
| 3.5.5 Barreira de silício..... | 20 |
| 3.6 Fatores que influenciam a fusão das pelotas autorredutoras..... | 21 |
| 3.7 Estudo do processo de coalescimento dos nódulos de ferro-carbono em pelotas autorredutoras..... | 23 |
| 3.7.1 Causas da não coalescência dos líquidos..... | 23 |
| 3.7.2 Efeito da fase líquida da escória no processo de obtenção de nódulos de ferro-carbono..... | 25 |
| 3.7.3 Efeito do incremento do redutor..... | 26 |
| 3.8 Morfologia da fase de ferro em pelotas autorredutoras..... | 27 |
| 3.9 Procedimentos tradicionais de redução de minério de ferro..... | 29 |

| | |
|--|-----------|
| 3.9.1 Problemas atuais da indústria siderúrgica..... | 30 |
| 3.9.2 Métodos para a produção de ferro e aço..... | 31 |
| 3.10 Métodos alternativos..... | 32 |
| 3.10.1 TECNORED..... | 35 |
| 3.10.2 FASTMET..... | 36 |
| 3.10.3 ITmk3..... | 37 |
| 3.10.4 PRIMUS..... | 39 |
| 3.11 Fornos rotativos..... | 40 |
| 3.11.1 Processo <i>Waelz</i> | 40 |
| 3.11.2 Processo SL/RN..... | 42 |
| 3.11.3 Processo SL/RN, experiência brasileira..... | 44 |
| 3.12 Desenvolvimentos em Fornos Rotativos..... | 45 |
| 3.12.1 Queimadores..... | 45 |
| 3.12.2 Zona de correntes e cruzes..... | 47 |
| 3.12.3 Sistema TREFOIL..... | 47 |
| 3.12.4 Refratários com geometria especial..... | 48 |
| 3.12.5 Sistemas de vedação..... | 48 |
| 3.13 Formação e destruição de anéis nos fornos rotativos..... | 49 |
| 3.13.1 Passo do material através do forno rotativo..... | 50 |
| 3.13.2 Causas que dependem do forno e seus mecanismos..... | 51 |
| 3.13.3 Causas que dependem da combustão..... | 52 |
| 3.13.4 Causas que dependem da matéria prima..... | 53 |
| 3.14 Procedimentos recomendados para a destruição de anéis..... | 54 |
| 3.15 Transferência de calor em fornos rotativos..... | 54 |
| 3.15.1 Transferência de calor no plano transversal do leito..... | 57 |
| 4.0 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS..... | 60 |
| 4.1 Materiais..... | 60 |
| 4.1.1 Minério de ferro..... | 60 |
| 4.1.2 Redutores..... | 61 |
| 4.1.3 Aglomerantes..... | 62 |
| 4.1.4 Gás inerte..... | 63 |
| 4.2 Equipamentos..... | 63 |
| 4.3 Métodos..... | 64 |

| | |
|--|-----------|
| 4.3.1 Seleção e tratamento das matérias primas..... | 64 |
| 4.3.2 Cálculo da relação minério-redutor para cada caso..... | 64 |
| 4.3.3 Seleção das amostras estudadas..... | 66 |
| 4.3.4 procedimento de fabricação das misturas autorredutoras..... | 67 |
| 4.3.5 Procedimento de fabricação das pelotas..... | 69 |
| 4.3.6 Medida da resistência à compressão a frio das pelotas..... | 70 |
| 4.3.7 Medição do tempo de residência..... | 71 |
| 4.3.8 Processamento das misturas e pelotas autorredutoras no forno rotativo..... | 71 |
| 4.3.9 Cálculo da fração de redução..... | 74 |
| 4.3.10 Medição da fração de redução por métodos indiretos..... | 74 |
| 4.3.11 Medição do grau de coalescimento dependendo da composição, do tipo de conformação e da temperatura..... | 77 |
| 4.3.12 Desagregação do material pelo método do tambor (norma ASTM E 279-97)..... | 78 |
| 4.3.13 Desagregação do material por moagem manual..... | 81 |
| 4.3.14 Estudo do efeito da recarga do material de saída, no processo de coalescimento dos nódulos de ferro-carbono..... | 81 |
| 4.3.15 Efeito do excesso de carbono..... | 82 |
| 4.3.16 Efeito da fase líquida da escória no processo de carburação e coalescimento do ferro em pelotas autorredutoras..... | 83 |
| 4.3.17 Influência da escória líquida no transporte de carbono a 1673 K..... | 85 |
| 4.3.18 Cálculo do erro..... | 86 |
| 5.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 88 |
| 5.1 Determinação do tempo de residência em função da inclinação do forno rotativo..... | 88 |
| 5.2 Medições da resistência mecânica a compressão das pelotas autorredutoras de minério de ferro..... | 90 |
| 5.3 Análises do processo de redução e fusão em forno rotativo..... | 92 |

| | |
|---|-----|
| 5.3.1 Processo de redução e fusão na presença de diferentes concentrações de escória e redutores com diferentes concentrações de voláteis..... | 94 |
| 5.3.2 Ação oxidante das misturas e pelotas autorredutoras..... | 95 |
| 5.3.3 Medição da fração de redução..... | 98 |
| 5.3.4 Medição da concentração de carbono nos nódulos de ferro-carbono..... | 99 |
| 5.4 Estudo do processo de coalescimento dos nódulos de ferro-carbono..... | 100 |
| 5.4.1 Validação do teste do tambor (ASTM E279-97) como método de desagregação do material obtido..... | 102 |
| 5.4.2 Análise granulométrica dos nódulos de ferro-carbono desagregada pelo método do tambor (ASTM E279-97)..... | 104 |
| 5.4.3 Estudo do efeito da temperatura de processamento na distribuição granulométrica dos nódulos de ferro-carbono das misturas autorredutoras..... | 107 |
| 5.4.4 Estudo do efeito da recarga de material na distribuição granulométrica dos nódulos de ferro-carbono..... | 109 |
| 5.4.5 Comparação das granulometrias dos nódulos de ferro-carbono obtidas com redutor com voláteis e sem voláteis..... | 113 |
| 5.4.6 Estudo do efeito do incremento do redutor acima das quantidades necessárias na distribuição granulométrica dos nódulos de ferro-carbono..... | 115 |
| 5.4.7 Comparação das análises granulométricas dos nódulos de ferro-carbono obtidas com misturas e pelotas autorredutoras, com a mesma composição e variáveis de processamento..... | 119 |
| 5.4.8 Comparações das vantagens e desvantagens das pelotas e misturas autorredutoras..... | 121 |
| 5.4.9 Estudo da influência da temperatura <i>liquidus</i> da escória no processo de coalescimento de nódulos de ferro-carbono de misturas autorredutoras processadas no forno rotativo..... | 123 |

| | |
|---|------------|
| 5.4.10 Influencia da quantidade de escória com elevada temperatura <i>liquidus</i> no processo de coalescimento dos nódulos de ferro-carbono..... | 127 |
| 5.4.11 Comparação das granulometrias dos nódulos de ferro-carbono obtidas com o mesmo material de base nas mesmas condições de processamento com aglomerante orgânico e inorgânico..... | 129 |
| 5.4.12 Comparação da distribuição granulométrica dos nódulos de ferro-carbono de misturas autorredutoras elaboradas com minério hematítico de baixo teor, em diferentes condições..... | 130 |
| 5.4.13 Estudo do efeito da temperatura <i>liquidus</i> da escória no processo de carburação e coalescimento do ferro-carbono em pelotas autorredutoras..... | 133 |
| 5.4.14 Estudo da influência da escória líquida no transporte de carbono a 1673 K..... | 136 |
| 6.0 CONCLUSÕES..... | 145 |
| 7.0 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 147 |
| 8.0 REFERENCIAS..... | 148 |
| ANEXOS A..... | 153 |
| ANEXOS B..... | 154 |

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | | |
|---------------------|--|----|
| Figura 3.1- | Classificação das reações de redução..... | 4 |
| Figura 3.2- | Linhas de equilíbrio do sistema Fe-C-O..... | 7 |
| Figura 3.3- | Variação do conteúdo de CO e CO ₂ nos gases de saída. T=1623 K..... | 7 |
| Figura 3.4- | Modelação das espécies e fases como função do tempo presentes na pelota autorredutora..... | 8 |
| Figura 3.5- | Comparação das curvas de redução não isotérmicas, segundo o redutor e a velocidade de aquecimento..... | 10 |
| Figura 3.6- | Modelação da carburação do ferro sólido..... | 16 |
| Figura 3.7- | Transporte de ferro-carbono por gravidade..... | 17 |
| Figura 3.8- | Processo de carburação por efeito Marangoni..... | 18 |
| Figura 3.9- | Barreira física entre uma partícula de carvão e outra de ferro criada pela escória..... | 20 |
| Figura 3.10- | Barreira a carburação pelo silício dissolvido..... | 21 |
| Figura 3.11- | Curva limite da fusão das pelotas autorredutoras e sua separação da escória no diagrama Fe-C..... | 22 |
| Figura 3.12- | Representação esquemática de duas gotas com alta tensão superficial..... | 24 |
| Figura 3.13- | Separação de duas gotas pela convecção térmica de Marangoni..... | 24 |
| Figura 3.14- | Pelota de minério de ferro e grafita com escória de alta e baixa temperatura <i>liquidus</i> | 25 |
| Figura 3.15- | Comparação dos resultados obtidos com pelotas autorredutoras projetadas para se ter composição eutética e excesso de carbono..... | 27 |
| Figura 3.16- | Representação esquemática dos nódulos de ferro-carbono separados pelo redutor em pelotas autorredutoras projetadas para se ter composição eutética e excesso de carbono..... | 27 |
| Figura 3.17- | Imagem esquemática do processo de produção de nódulos de ferro-carbono..... | 29 |
| Figura 3.18- | Área de operação dos processos de redução..... | 35 |
| Figura 3.19- | Processo TECNORED..... | 36 |
| Figura 3.20- | Processo FASTMET..... | 37 |

| | | |
|---------------------|---|----|
| Figura 3.21- | Processo ITmk3..... | 39 |
| Figura 3.22- | Processo WAELZ..... | 42 |
| Figura 3.23- | Fluxograma de uma usina de redução direta pelo processo SL/RN..... | 43 |
| Figura 3.24- | Queimadores projetados especificamente para fornos rotativos e queimador em funcionamento..... | 46 |
| Figura 3.25- | Definição das diferentes misturas aplicadas nos queimadores, e temperaturas de chama, eficiências atingidas por elas e volumes de ar de combustão e exaustão..... | 46 |
| Figura 3.26- | Sistema de recuperação de calor TREFOIL..... | 47 |
| Figura 3.27- | Levantadores (<i>lifters</i>) cerâmicos moldados em concreto e refratários com geometria especial..... | 48 |
| Figura 3.28- | Representação esquemática de um sistema de vedação no forno rotativo e o sistema de vedação em funcionamento..... | 49 |
| Figura 3.29- | Aumento da velocidade dos gases e de arraste de partículas no anel.. | 51 |
| Figura 3.30- | Esquema da movimentação do leito mostrando as camadas de partículas finas e grosas..... | 58 |
| Figura 4.1- | Misturador Turbula da WAB..... | 68 |
| Figura 4.2- | Pelota autorredutora de 80% de minério hematítico de alto teor, 20% de grafita aglomerada com +10% de cimento ARI, e aglomerada com melaço líquido de cana..... | 69 |
| Figura 4.3- | Prensa EMIC, de 30 toneladas, utilizada no teste de resistência a compressão a frio das pelotas autorredutoras..... | 70 |
| Figura 4.4- | Vista frontal do forno rotativo empregado..... | 72 |
| Figura 4.5- | Vista posterior do forno rotativo..... | 72 |
| Figura 4.6- | Perfil interno de temperatura em [°C] do forno rotativo utilizado nesta pesquisa..... | 73 |
| Figura 4.7- | Recobrimento interno do tubo de mulita com um tubo de grafita..... | 73 |
| Figura 4.8- | Forno Vertical Lindberg/Blue adaptado para ensaios termogravimétricos..... | 75 |
| Figura 4.9- | Forno Vertical Lindberg/Blue adaptado para ensaios termogravimétricos..... | 75 |
| Figura 4.10- | Cadinho de alumina com perfuração para sustentação..... | 76 |

| | | |
|---------------------|--|-----|
| Figura 4.11- | Representação esquemática da medição da fração de redução por métodos indiretos..... | 77 |
| Figura 4.12- | Montagem empregada na avaliação da resistência ao desgaste das pelotas de minério de ferro convencionais e sinter em concordância com a norma ASTM E 279-97..... | 79 |
| Figura 4.13- | Jarra de cerâmica empregada no teste do tambor..... | 80 |
| Figura 4.14- | Montagem para a realização do teste do tambor..... | 80 |
| Figura 4.15- | Almofariz de porcelana para moagem manual..... | 81 |
| Figura 4.16- | Localização das composições da escória no diagrama ternário..... | 84 |
| Figura 4.17- | Representação esquemática da experiência, e localização dos pontos de amostragem..... | 86 |
| Figura 5.1- | Tempo de residência no forno rotativo experimental. Mistura autorredutora, diâmetro interno=48 mm, L=1500 mm, rotação= 5 R.P.M..... | 89 |
| Figura 5.2- | Tempo de residência no forno rotativo experimental. Pelotas autorredutoras, diâmetro interno=48 mm, L=1500 mm, rotação= 5 R.P.M..... | 89 |
| Figura 5.3.- | Imagens ilustrativas, obtidas a frio, do (a) processamento de uma mistura autorredutora, e (b) do processamento de pelotas autorredutoras..... | 92 |
| Figura 5.4- | Processo esquemático de redução e fusão de mistura autorredutora... | 93 |
| Figura 5.5- | Esquema do processo de redução e fusão de pelotas autorredutoras.. | 94 |
| Figura 5.6- | Consumo do tubo de grafita na zona quente do forno, secção transversal. Região sem consumir, e região consumida..... | 96 |
| Figura 5.7- | Esquema do consumo do tubo de grafita na zona quente do forno, na direção axial..... | 97 |
| Figura 5.8- | Anel de ferro-carbono produto do consumo do tubo de grafita..... | 97 |
| Figura 5.9- | Mistura autorredutora de 80% de minério hematítico de alto teor, 20% de grafita, processada a 1773 K, microscopia óptica, Nital 4%..... | 100 |
| Figura 5.10- | Comparação da pelota processada de forma estática e no forno rotativo..... | 101 |
| Figura 5.11- | Representação esquematizada da formação dos nódulos de ferro-carbono em um sistema (a)estático e em um sistema com (b) rodagem como no forno rotativo..... | 101 |

| | | |
|---------------------|--|-----|
| Figura 5.12- | Comparação da granulometria final obtida por moagem manual e pelo teste do tambor..... | 103 |
| Figura 5.13- | Comparação da granulometria final obtida por moagem manual e pelo teste do tambor..... | 103 |
| Figura 5.14- | Curva retida e acumulada da análise granulométrica de uma pelota autorredutora..... | 104 |
| Figura 5.15- | Curva retida e acumulada da análise granulométrica da mistura autorredutora de 80% de minério hematítico de alto teor, 20% de Grafita, processada a 1773 K (1500 °C)..... | 105 |
| Figura 5.16- | . Efeito da temperatura de processamento sobre a granulometria dos nódulos de ferro-carbono no caso da mistura autorredutora de 81% de minério hematítico de baixo teor, 19% de coque de petróleo, + 10% de cimento Portland tipo ARI..... | 107 |
| Figura 5.17. | Efeito da temperatura de processamento sobre a granulometria dos nódulos de ferro-carbono no caso da mistura autorredutora de 81% de minério hematítico de baixo teor, 19% de coque de petróleo + 5% de cal..... | 108 |
| Figura 5.18- | Aglomerado de nódulos de ferro-carbono e escória..... | 109 |
| Figura 5.19- | Comparação da distribuição granulométrica da mesma matéria prima com e sem recarga, nas mesmas condições de tempo e temperatura.. | 110 |
| Figura 5.20- | Nódulos de ferro-carbono..... | 111 |
| Figura 5.21- | Corte transversal de Nódulo de ferro-carbono fixado em baquelita..... | 111 |
| Figura 5.22- | Comparação esquematizada do processamento de misturas ou pelotas autorredutoras com e sem recarga do produto de saída..... | 112 |
| Figura 5.23- | Comparação granulométrica dos nódulos de ferro-carbono obtidos a partir de uma mistura autorredutora elaborada com redutor com e sem voláteis..... | 113 |
| Figura 5.24- | Comparação das granulometrias dos nódulos de ferro-carbono obtidos a partir de pelotas autorredutoras com redutor com e sem voláteis..... | 114 |
| Figura 5.25- | Vista geral do produto obtido com a pelota de 80% de minério hematítico de alto teor, 20% de grafita, +7% ARI processada a 1773 K (1500°C) e detalhe dos nódulos de ferro-carbono da mesma amostra..... | 115 |

| | | |
|---------------------|--|-----|
| Figura 5.26- | Comparação das granulometrias dos nódulos de ferro-carbono obtidas a partir de misturas autorredutoras elaboradas com 20 e 30% de grafita da relação minério-redutor..... | 116 |
| Figura 5.27- | Comparação das granulometrias dos nódulos de ferro-carbono obtidas a partir de pelotas autorredutoras elaboradas com 20 e 30% de grafita da relação minério-redutor..... | 117 |
| Figura 5.28- | Vista geral da mistura autorredutora de 70% de minério hematítico de alto teor, 30% de grafita processada a 1773 K (1500 °C)..... | 118 |
| Figura 5.29- | Corte transversal de uma pelota de 70% de minério hematítico de alto teor, 30% de grafita, +10% ARI processada a 1773 K (1500°C)..... | 118 |
| Figura 5.30- | Representação esquematizada do processo de coalescimento das partículas de ferro-carbono com uma mistura ou pelota autorredutora com (a) quantidade suficiente (b) excesso de redutor..... | 119 |
| Figura 5.31- | Comparação das análises granulométricas dos nódulos de ferro-carbono obtidas com misturas e pelotas autorredutoras, com a mesma composição e variáveis de processamento..... | 120 |
| Figura 5.32- | Comparação das granulometrias dos nódulos de ferro-carbono obtidos com a mesma mistura autorredutora com igual quantidade de escória com diferentes temperaturas <i>liquidus</i> | 125 |
| Figura 5.33- | Comparação das granulometrias dos nódulos de ferro-carbono obtidos com a mesma composição de mistura autorredutora e escória, com a diferença de que a uma foi adicionada fluorita..... | 126 |
| Figura 5.34- | Nódulo de ferro-carbono obtido a partir da mistura autorredutora de 81% de minério hematítico de baixo teor, 19% de coque de petróleo, +5% de cal processado a 1673 K..... | 127 |
| Figura 5.35- | Comparação das granulometrias dos nódulos de ferro-carbono obtidos com a mesma mistura autorredutora com diferentes quantidades de escória..... | 128 |
| Figura 5.36- | Nódulos de ferro-carbono obtidos a partir de uma mistura autorredutora de 78% de minério hematítico de alto teor, 22% de coque de petróleo, processada a 1773 K..... | 129 |
| Figura 5.37- | Comparação das granulometrias dos nódulos de ferro-carbono obtidas com o mesmo material de base nas mesmas condições de processamento com aglomerante orgânico e inorgânico..... | 130 |

| | | |
|---------------------|--|-----|
| Figura 5.38- | Comparação da distribuição granulométrica dos nódulos de ferro-carbono de misturas autorredutoras elaboradas com minério hematítico de baixo teor, em diferentes condições..... | 132 |
| Figura 5.39- | Produto geral obtido a partir da mistura autorredutora de 43,5% de minério hematítico de baixo teor, 56,5 % de pó de serragem, processado a 1773 K (1500°C)..... | 133 |
| Figura 5.40- | Comparação dos diferentes produtos obtidos..... | 134 |
| Figura 5.41- | Ausência de coalescimento de duas gotas semelhantes pela contaminação superficial..... | 135 |
| Figura 5.42- | Reprodutibilidade das experiências: (a) pelotas padrão; (b) pelotas com escória de alta temperatura <i>liquidus</i> ; (c) pelotas com escória de baixa temperatura <i>liquidus</i> | 135 |
| Figura 5.43- | MEV de elétrons retro espalhados mostrando a camada de escória com FeO a direita e a camada de ferro sinterizado a esquerda..... | 137 |
| Figura 5.44- | MEV de elétrons retro espalhados mostrando a camada de escória sem FeO a direita e a camada de ferro sinterizado a esquerda..... | 138 |
| Figura 5.45- | Localização dos pontos de amostragem..... | 139 |
| Figura 5.46- | EDS no ponto 5 da amostra com FeO..... | 139 |
| Figura 5.47- | EDS no ponto 5 da amostra sem FeO..... | 140 |
| Figura 5.48- | Perfil de composição em % atômica de acordo com a posição para os elementos presentes na escória contendo FeO..... | 141 |
| Figura 5.49- | Aumento da viscosidade da escória pela diminuição do FeO na interface escória-redutor..... | 142 |
| Figura 5.50- | Perfil de composição em % atômica de acordo com a posição para os elementos presentes na escória sem FeO..... | 143 |
| Figura 9.1- | Pelota autorredutora de 70% de minério hematítico de alto teor, 30% de grafita, +10% ARI processada a 1773 K (1500 °C)..... | 153 |
| Figura 9.2- | Pelota autorredutora de 80% de minério hematítico de alto teor, 20% de coque de petróleo, +7% ARI processada a 1773 K (1500 °C)..... | 153 |
| Figura 10.1- | Mistura autorredutora de 81% de minério hematítico de baixo teor, 19% de coque de petróleo, +10% ARI processada a 1673 K (1400°C). | 154 |
| Figura 10.2- | Pelota autorredutora de 80% de minério hematítico de alto teor, 20% de grafita, aglomerada com Melaço, processada a 1773 K (1500°C).... | 154 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|---------------------|---|----|
| Tabela 3.1- | Dados termodinâmicos sobre a formação de carbetos..... | 19 |
| Tabela 3.2- | Materiais consumidos no processo SL/RN por t de esponja..... | 44 |
| Tabela 3.3- | Composição dos gases de saída do processo SL/RN, AFP..... | 45 |
| Tabela 4.1- | Composição química do minério hematítico de baixo e alto teor (% em massa)..... | 61 |
| Tabela 4.2- | Análise granulométrica do minério hematítico de alto teor (% em massa)..... | 61 |
| Tabela 4.3- | Análise imediata dos redutores (% em massa)..... | 61 |
| Tabela 4.4- | Composição química das cinzas do pó de serragem (% em massa)..... | 62 |
| Tabela 4.5- | Composição química da cal hidratada, (% em massa)..... | 62 |
| Tabela 4.6- | Composição do cimento Portland tipo ARI..... | 62 |
| Tabela 4.7- | Composição do gás argônio..... | 63 |
| Tabela 4.8- | Diferentes relações entre o minério hematítico e o redutor empregadas, tanto para alto como para baixo teor..... | 66 |
| Tabela 4.9- | Descrição das amostras selecionadas neste estudo..... | 67 |
| Tabela 4.10- | Medidas <i>Tyler</i> com suas aberturas em mm associadas..... | 78 |
| Tabela 4.11- | Composição das misturas empregadas para estudar o efeito do excesso de redutor, tanto para mistura como para pelotas autorredutoras, com minério hematítico de alto e baixo teor..... | 83 |
| Tabela 4.12- | Composição da escória de alta e baixa temperatura <i>liquidus</i> | 84 |
| Tabela 5.1- | Inclinação do forno rotativo para atingir um tempo de processamento aproximado de 10 minutos..... | 90 |
| Tabela 5.2- | Resultados da resistência mecânica a compressão das pelotas autorredutoras de minério de ferro sem processar, com tempo de cura superior a os 28 dias..... | 91 |
| Tabela 5.3- | Fração de redução por métodos indiretos para diferentes composições e temperaturas..... | 98 |
| Tabela 5.4- | Análise de concentração de carbono em um nódulo de ferro-carbono representativo da amostra via LECO..... | 99 |

| | | |
|---------------------|--|-----|
| Tabela 5.5- | Valores obtidos de porcentagem de material retido e acumulado para cada granulometria das amostras em estudo..... | 106 |
| Tabela 5.6- | Cálculo da porcentagem média de nódulos de ferro-carbono com diâmetro superior a 7,93 mm para misturas e pelotas elaboradas com minério hematítico de alto teor..... | 121 |
| Tabela 5.7- | Composição calculada das diferentes escórias empregadas com o minério hematítico de baixo teor..... | 123 |
| Tabela 5.8- | Basicidade binária e quaternária, temperatura <i>liquidus</i> e porcentagem final das escórias empregadas com o minério hematítico de baixo teor..... | 123 |
| Tabela 5.9- | Composição calculada das diferentes escórias empregadas com o minério hematítico de alto teor..... | 124 |
| Tabela 5.10- | Basicidade binária e quaternária, temperatura <i>liquidus</i> e porcentagem final das escórias empregadas com o minério hematítico de baixo teor..... | 124 |
| Tabela 5.11- | Concentração de carbono no ferro via LECO. Média de três determinações..... | 136 |
| Tabela 5.12- | Concentração por EDS do Si no ferro..... | 143 |
| Tabela 5.13- | Viscosidades e temperatura de referencia das escórias em estudo.. | 144 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM -. American Society for testing materials.

ITmk3 - Iron Technology mark three.

RHF - Rotary Hearth Furnace.

EAF - Electric Arc Furnace.

BOF - Basic Oxygen Furnace.

DR - Direct Reduction.

ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial.

MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura.

EDS - Energy Dispersion Spectroscopy.

LISTA DE SÍMBOLOS

K - Kelvin

fr - Fração de redução no instante t.

Mi - Massa inicial da pelota, seca [g].

Mt - Massa da pelota no instante t [g].

m - Fração de redução máxima.

Rp - Resistência à compressão da pelota [kgf].

R_{15 mm} - Resistência à compressão da pelota padronizada a 15 mm [kgf].

α - coeficiente de transferência de calor (ao respeito da transferência de calor do gás ao material) [W/mK].

Θ gás - temperatura do gás [K].

Θ material - temperatura do material [K].

Q – Calor [J].

F- área de superfície do material em contato com os gases [m²].

T- tempo [s].

\bar{x} - Média.

s - Desvio padrão sobre a média.

ε - Erro padrão da média.