



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE MARABÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

MYCHELLANGELO DOS SANTOS SOARES

**DESENVOLVIMENTO DE BRIQUETES AUTORREDUTORES
A PARTIR DE PÓ DE ACIÁRIA**

MARABÁ
2011

MYCHELLANGELO DOS SANTOS SOARES

**DESENVOLVIMENTO DE BRIQUETES AUTORREDUTORES
A PARTIR DE PÓ DE ACIÁRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará.

Orientador: Prof.º Dr. Adriano Alves Rabelo

MARABÁ
2011

MYCHELLANGELO DOS SANTOS SOARES

DESENVOLVIMENTO DE BRIQUETES AUTORREDUTORES A PARTIR DE PÓ DE ACIÁRIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará.

Orientador: Prof.º Dr. Adriano Alves Rabelo

Defendido e aprovado em ____/____/____.

Banca examinadora:

____ – Orientador

Prof. Dr. Adriano Alves Rabelo
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Elias Fagury Neto
Universidade Federal do Pará

Prof. MSc. Alacid Siqueira neves
Universidade Federal do Pará

DEDICATÓRIA

À Deus pela vida, saúde e fé para realização deste trabalho, a minha amada mãe, Eremita de Jesus dos Santos Soares, e aos amigos que me acompanharam nessa caminhada

AGRADECIMENTOS

À DEUS pela minha vida, pelo conforto, pela proteção, pelo fiel cuidado. Por mais uma etapa vencida, por ter-me acompanhado dia após dia, noite após noite, por ter me direcionado e me aconselhado em todas as escolhas e decisões.

Agradeço também por ter me dado uma família abençoada, pela minha mãe Eremita, meu fiel anjo da guarda que sempre esteve presente em toda a minha vida, pelas minhas irmãs Andressa e Rafaela pela torcida, pelo meu pai que apesar das limitações e da distância esteve presente.

As famílias que me adoram em Marabá; Família Alves Ferreira: Elizabeth, Elaine, Flavio, Gislane e Lucas, que me deram um grande suporte para esta realização; Família Almeida Vida: Rita, Talita, pelo companheirismo, apoio, e força; Família Sampaio Ribeiro: Deusa, Neto, Raylla e Rayan pelo carinho, amor e cumplicidade.

Agradeço aos amigos de faculdade Elizeth, Mirly e Clélia que me apoiaram aqui em Marabá.

Agradeço ao grupo de pesquisa do Laboratório de Materiais Cerâmicos.

Agradeço ao meu orientador, Professor Dr. Adriano Alves Rabelo, que acreditou na capacidade da realização de um bom trabalho, pela paciência e atenção para a conclusão deste trabalho.

Agradeço aos professores que ajudaram na minha formação acadêmica em especial aos professores: Alacid Siqueira Neves e Elias Fagury Neto que participaram ativamente em nossa formação.

A todos os funcionários do Campus.

Agradeço a todos aqueles que direta ou indiretamente tiveram influência nesta vitória que Deus me concedeu. A cada um o meu MUITO OBRIGADO.

Agradeço a Universidade Federal do Pará, por todo o suporte e estrutura para a minha formação.

E finalmente, as empresas: SINOBRAS que dispôs da matéria prima para realização do estudo e MAGNESITA REFRÁTARIOS que possibilitou a realização dos testes para a composição deste trabalho.

A todos vocês meu MUITO OBRIGADO.

Toda a engenharia depende dos
Materiais: quanto melhores forem,
melhores serão as obras de engenharia.
Por isso, todas as engenharias são, ou
deveriam ser,
em certo grau,...

Engenharia de Materiais

W. F. Smith

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE SIGLAS	xii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo geral.....	3
2.1.1. Objetivos específicos.....	3
3. REVISÃO DA LITERATURA	4
3.1. A FABRICAÇÃO DO AÇO.....	4
3.1.1. O Forno Elétrico a Arco – FEA.....	8
3.1.2. O Processo Siderúrgico Para a Produção do Aço.....	10
3.1.3. Pó de Aciaria Elétrica.....	14
3.1.4. Geração do PAE.....	14
3.1.5. A Geração e a Reciclagem de Resíduos nos Processos Siderúrgicos.....	16
3.1.6. A Reciclagem de Resíduos nas Usinas Integradas.....	17
3.1.7. A Reciclagem de Resíduos nas Usinas Semi-Integradas.....	18
3.2. AUTORREDUÇÃO.....	20
3.2.1. Fundamentos da Redução Carbotérmica dos Óxidos de Ferro.....	22
3.2.2. Cinética da Redução dos Óxidos de Ferro.....	23
3.2.3. Variáveis Cinéticas no Processo da Autorredução.....	25
3.3. BRIQUETAGEM.....	27
3.3.1. Processo de Briquetagem.....	28
3.3.2. Briquetagem Com ligante.....	30
3.3.3. Briquetagem Sem ligante.....	31
3.3.4. Exemplos de briquetes.....	32
4. MATERIAIS	33
4.1. PÓ DE ACIARIA.....	33
4.2. ASPECTO FÍSICO DO PÓ DE ACIARIA.....	33
4.3. FINOS DE CARVÃO VEGETAL.....	33
4.4. CARACTERIZAÇÃO DOS FINOS DE CARVÃO VEGETAL.....	34
4.5. CIMENTO.....	34
5.1. ANÁLISES QUÍMICAS – ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X.....	35
5.2. ANÁLISES MINERALÓGICAS - DIFRAÇÃO DE RAIOS-X.....	35
5.3. ANÁLISE MORFOLÓGICA (MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA MEV).....	35

5.4.	ANÁLISE QUÍMICA VIA EDS	36
5.5.	ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL E TERMOGRAVIMÉTRICA (DTG/TG)..	36
5.6.	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR ESPALHAMENTO DE LASER VIA SECA	36
5.7.	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	37
5.8.	RESISTÊNCIA À AÇÃO DA ÁGUA	38
5.9.	RESISTÊNCIA À ABRASÃO	38
5.10.	DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE REAL.....	39
5.11.	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS BRIQUETES ^[22]	39
5.12.	CONFORMAÇÃO DOS BRIQUETES.....	40
5.13.	METODOLOGIA PARA A CONFECÇÃO DOS BRIQUETES AUTORREDUTORES	40
5.14.	REDUÇÃO DOS BRIQUETES SIDERÚRGICOS	41
5.14.1.	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS BRIQUETES DO ESTUDO	42
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
6.1.	ANÁLISE QUÍMICA	43
6.2.	ANÁLISE MINERALÓGICA	44
6.3.	ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL E TERMOGRAVIMÉTRICA (DTA/TG) ..	44
6.4.	ANÁLISE MORFOLÓGICA POR (MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA MEV E EDS)	45
6.5.	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	48
6.6.	CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA SINTERIZADOS	50
6.6.1.	ABSORÇÃO DE ÁGUA E POROSIDADE APARENTE	51
6.6.2.	Resultados das Propriedades Tecnológicas.....	51
6.6.3.	Curvas de Gresificação.....	53
6.6.4.	Densidade Real e Teste de Abrasão dos Briquetes	54
7.	CONCLUSÕES	55
	REFERÊNCIAS.....	56

RESUMO

O Pó de aciaria é um dos resíduos sólidos gerados pela indústria siderúrgica durante a produção de aço em forno elétrico a arco, este material não encontra utilização e geralmente tem destinação final em aterros de resíduos industriais. O objetivo do presente trabalho é buscar uma solução para a reciclagem do pó de aciaria gerada em usinas semi-integradas dentro do próprio processo produtivo. A solução proposta foi o desenvolvimento de briquetes autorredutores elaborado com o pó de aciaria e finos de carvão vegetal, com possibilidade de utilização na carga do forno elétrico à arco. Os corpos de prova, medindo cerca de 30 a 31 mm com geometria diametral, foram prensados e queimados em forno elétricos tipo mufla com resfriamento lento em laboratório. As temperaturas de queima foram de 700°C, 800°C, 900°C e 1000°C com patamares de queima de 30 e 60 minutos. Os briquetes foram submetidos a ensaios físico-químicos para determinação das propriedades tecnológicas. Os resultados mostraram-se significativos e satisfatórios indicando a importância do processo de reciclagem de resíduos sólidos metálicos, aproveitando cerca de 40% dos valores metálicos contidos no mesmo. A necessidade de aplicarmos as diretrizes ambientais no contexto produtivo de qualquer empresa é hoje uma realidade no cenário mundial. O beneficiamento e a comercialização de resíduos sólidos, em diversos seguimentos industriais têm levado as organizações a uma nova ideologia sobre a questão do gerenciamento desses materiais, sendo que a geração de receita, através da reciclagem, tem contribuído para a expansão dessa prática. As siderúrgicas integradas geram diversos tipos de resíduos sólidos ou subprodutos do processamento térmico dos resíduos ou operações de processo pirometalúrgico e em grande quantidade. Estes resíduos podem ser classificados em três grandes grupos: os ditos recicláveis contendo ferro, os finos de coque e as escórias.

Palavras - chave: resíduo; pó de aciaria; briquetagem; reciclagem.

ABSTRACT

The EAF dust is a solid waste generated by the steel industry during the production of steel in electric arc furnace, this material is used and is usually disposed of in landfills of industrial waste. The objective of this study is to seek a solution for the recycling of EAF dust generated in semi-integrated plants within the production process. The proposed solution was the development of autorreductores briquettes prepared with the EAF dust and fine charcoal, which can be used in charge of the electric arc furnace. The specimens, measuring about 30 to 31 mm diametrical geometry, were pressed and fired in an electric oven type furnace with slow cooling in the laboratory. The firing temperatures were 700°C, 800°C, 900°C and 1000°C with 30 levels of burning and 60 minutes. The briquettes were subjected to physical and chemical tests to determine the technological properties. The results were satisfactory and significant indicating the importance of the recycling process of solid metal, using about 40% of the metal values contained therein. The need to apply environmental rules in the context of any production company is now a reality on the world stage. The processing and marketing of solid waste in many industrial organizations have led to a new ideology about the management of those materials, and generating revenue through recycling, has contributed to the expansion of this practice. The integrated steel plants generate various types of solid waste or by-products of thermal processing of waste or pyrometallurgical process operations in large quantities. This waste can be classified into three major groups: the so-called recycled containing iron, coke fines and slag.

Keywords: waste; flue dust; briquetting; recycling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Linhas de produção de aço.	5
Figura 2. Forno Elétrico a Arco -Fonte: adaptado de Enciclopédia Britânica, 1999. ...	9
Figura 3. Processo Siderúrgico. Fonte: (Rizzo, 2005).....	11
Figura 4. Fluxograma esquemático do processo de sinterização. Fonte: (Rizzo, 2005)	12
Figura 5. Emissão de fumos durante o vazamento de aço em forno elétrico.	15
Figura 6. Representação pictórica de um aglomerado autorredutor.	21
Figura 7. Representação em corte da seqüência de redução em uma partícula densa	24
Figura 8. Etapas da autorredução Fonte: adaptado D'Abreu <i>et al.</i> (2008)	26
Figura 9 (a). Briquetagem através de rolos. Fonte: Carvalho e Brink (2004)	29
Figura 10. Briquetes de carepa fabricados.....	32
Figura 11. Briquetes utilizando Pó de despoejamento.	32
Figura 12. Briquete de prensa de pistão	32
Figura 16: Peneirador vibratório, do tipo ro-tap, utilizado nos ensaios de resistência à abrasão.	38
Figura 17. Fluxograma da metodologia de confecção dos briquetes.	41
Figura 21 (a/b/c/d). Imagem de partículas de pó de aciaria obtidas em MEV.	47
Figura 20. MEV de pó de aciaria	47
Figura 23. Curvas granulométricas dos finos de carvão vegetal, antes e após cominuição	50
Figura 184(a/b). (a) Absorção de Água, (b) Porosidade Aparente	51
Figura 26. Módulo de ruptura a flexão em função da temperatura.....	52
Figura 27 (C1/C2). Curvas de gresificação das amostras	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Produção Brasileira de aço bruto por processo de aciaria e lingotamento (unid 10^3 t).....	7
Tabela 2. Produção mundial de aço bruto (unid 10^6 t).	7
Tabela 3: Exemplos de tipos diferentes de aglutinantes.	30
Tabela 4. Alguns aglutinantes utilizados na briquetagem de partículas finas.	31
Tabela 5: Composição das misturas ensaiadas (% em massa).....	41
Tabela 6: Ciclo térmico 1.....	42
Tabela 7: Ciclo térmico 2.....	42
Tabela 8: Composição química elementar do pó de aciaria estudado.....	43
Tabela 9. (a) Análise granulométrica dos finos de carvão vegetal. (b) Análise granulométrica dos finos de carvão vegetal cominuidos.	49
Tabela 10. Abrasão dos briquetes.....	54

LISTA DE SIGLAS

AA	Absorção de Água
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BOF	Basic Oxygen Furnace
DRI	Direct Reduction Iron (ferro esponja)
DRX	Difração de Raios-X
Dap	Densidade Aparente
EAF	Electric Arc Furnace
FEA	Forno Elétrico a Arco
HBI	Hot Briquette Iron
LD	Linz-Donawitz
IBS	Instituto Brasileiro de Siderurgia
ILAFA	Instituto Latinoamericano del Fierro y el Acero
NBR	Norma Brasileira Registrada
PAE	Pó de Aciaria Elétrica
PA	Porosidade Aparente
WSA	World Steel Association
°C	Grau Celsius

1. INTRODUÇÃO

As atividades siderúrgicas são responsáveis pela geração de uma grande variedade e quantidade de resíduos passíveis de reciclagem, devido à crescente preocupação com as questões ambientais, várias indústrias passaram a investir em novas alternativas para solucionar os problemas decorrentes da sua geração e disposição.

Os resíduos industriais podem ter basicamente três destinos, o descarte, o reaproveitamento interno ou o reaproveitamento externo. O descarte puro e simples de resíduos tem sido cada vez mais desestimulado, principalmente devido às normas cada vez mais rígidas quanto às qualidades de aterros. A reciclagem de resíduos tem sido apontada como a solução mais interessante para os problemas dos resíduos industriais, pois é o principal componente para a realização de um desenvolvimento auto-sustentável.

O pó de aciaria é classificado como resíduo perigoso tanto no Brasil, pela norma NBR 10.004, quanto em outros países produtores de aço, como EUA, Japão e Alemanha, e sua composição depende do tipo de aço produzido. Sob esta classificação, os pós gerados em fornos elétricos a arco não podem ser depositados em aterros comuns. Toneladas de pó encontram-se abandonadas em aterros esperando uma destinação adequada. A disposição de resíduos em aterros, além de trazer problemas ambientais, aumenta os custos do processo, devido ao transporte deste material para locais cada vez mais distantes do ponto de geração.

A produção brasileira de aço bruto encontra-se atualmente em torno de 25 milhões de toneladas ^[28]. A produção mundial está em crescimento, assim como a produção nacional. Com o aumento destas, cresce também a quantidade de resíduos gerada no processo. Em torno de 15 a 20 kg de pó são gerados por tonelada de aço produzido em indústrias siderúrgicas.

A recuperação dos valores metálicos contidos nos resíduos sólidos passou a ser muito importante tanto do ponto de vista das restrições legais impostas pelas legislações relativas à proteção do meio ambiente, como do ponto de vista econômico, por contribuírem para a compensação dos custos de instalação e operação de equipamentos antipoluição instalados nas usinas. Por isso a importância de se implementar ações e métodos de custo benefício para uma maior integração sócio econômica ambiental no setor siderúrgico.

A briquetagem é um processo de aglomeração de partículas mediante a utilização de pressão, utilizando-se de aglutinantes ou aquecimento conforme o caso, como forma de manter os aglomerados unidos uma vez cessada a pressão de formação do elemento constituído, denominado briquete.

O processo de briquetagem é de interesse para o presente caso, uma vez que pode permitir o estabelecimento e manutenção de algumas das condições físicas necessárias à realização das reações de redução dos óxidos de ferro dos pó de aciaria, durante a sua inclusão na carga do FEA. As qualidades mais importantes geradas pela aglomeração do pó/agente redutor sob a forma de briquete são a manutenção da proximidade física entre os óxidos de ferro e o agente redutor, condição esta essencial à cinética química da redução destes óxidos, quando colocados no ambiente do FEA, bem como a formação de um aglomerado resistente e compacto dos materiais que o compõe, o que possibilitará sua manipulação e inclusão na carga sólida do forno.

Ao introduzir-se a idéia de reaproveitamento dos pós de processamento siderúrgico na forma de briquetes autorredutores para utilização como matéria-prima no FEA é necessário observar a dinâmica de funcionamento deste equipamento. Os fornos elétricos a arco utilizados na siderurgia têm sofrido constantes aperfeiçoamentos na sua operação. Fatores como o consumo energético, tempo que decorre entre as corridas, a composição, flexibilização da carga e tempo de fusão de cada cestão têm sido otimizados na busca de maior produtividade e eficiência energética

A proposta deste estudo é apontar a viabilidade técnica do reaproveitamento do pó de aciaria como matéria-prima, devolvendo-o para o processo, minimizando os danos que poderiam causar por não ter uma destinação adequada, tendo como contra partida uma alternativa significativa no que diz respeito à produtividade. A solução proposta é o desenvolvimento de um briquete autorredutor elaborado com pó de aciaria e finos de carvão vegetal, com possibilidade de utilização na carga do FEA.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Estudar a potencialidade de reciclagem do pó de aciaria gerado no processamento siderúrgico sob a forma de briquetes autorredutores de uma usina integrada do município de Marabá no próprio processo de fabricação do aço.

2.1.1. Objetivos específicos

- ✓ Estudar as características mineralógicas das partes constituintes do resíduo.
- ✓ Desenvolver e avaliar briquetes autorredutores tendo o pó de aciaria como principal matéria prima ferrosa.
- ✓ A recuperação dos valores metálicos contidos no pó de aciaria.
- ✓ Estudar as propriedades mecânicas dos briquetes.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. A FABRICAÇÃO DO AÇO

O aço é um material com intensa aplicação nas atividades humanas. Trata-se de uma liga de ferro com carbono e outros metais em proporções variadas, conforme o tipo e a finalidade de sua utilização. O incremento de sua fabricação deu-se com o aperfeiçoamento e aumento de capacidade dos altos-fornos, em meados do século XIX. Neste equipamento é possível executar-se a redução de grandes quantidades de minério de ferro, tornando-a economicamente mais viável que os antigos procedimentos. Entretanto, o metal produzido no alto-forno, denominado ferro-gusa, contém mais carbono que o requerido para o aço, bem como outras impurezas como silício, enxofre e fósforo, provenientes do coque e do minério de ferro empregados e que se incorporam ao gusa produzido devido às condições termodinâmicas do processo ^[1].

Em 1856, Bessemer desenvolveu um processo que permite converter ferro gusa fundido em aço líquido através da oxidação do carbono e do silício presentes no gusa, mediante a injeção de ar comprimido. Com este procedimento, a produção de aço teve um grande incremento. Em anos posteriores, o processo de Bessemer foi aperfeiçoado por Thomas, com o objetivo de aumentar a eficiência da retirada de fósforo do gusa, e melhorar a qualidade dos aços obtidos. Mais tarde, outros processos de fabricação de aço foram implementados, como o Siemens-Martin. Após a segunda guerra mundial, os procedimentos de refino do gusa com a utilização de convertedores à oxigênio (LD) acabaram se impondo pela melhor eficiência e maior produtividade.

Durante o século passado, com a queda dos processos Siemens-Martin, um novo processo de fabricação de aço começou a ser utilizado. Este processo visa a produção de aço em forno elétrico a arco, usando uma carga que consiste primordialmente de sucata ferrosa. Neste processo, a carga é introduzida num forno sobre o qual descem três eletrodos verticais. A tensão elétrica estabelecida entre os eletrodos e a carga promove o surgimento de um arco voltaico, que fornece o calor necessário à fusão. A temperatura de operação destes fornos varia de 1590 a 1700 °C. Durante a fusão, injeta-se oxigênio com a finalidade de reagir com o excesso de carbono da carga e gerar mais calor, favorecendo a fusão do material.

A produção de aço pode ser efetuada em usinas integradas, que são aquelas que operam as três etapas básicas: a redução do minério, o refino do gusa para transformá-lo em aço e a posterior transformação do aço em produtos siderúrgicos. O aço e seus produtos também podem ser elaborados em usinas denominadas semi-integradas, que são aquelas que operam somente as fases de refino e conformação mecânica. No município de Marabá, há usinas semi-integrada e integrada que operam com fornos elétricos a arco (FEA). A matéria prima utilizada se constitui basicamente de sucata de ferro e de ferro-gusa, constituindo uma carga sólida, juntamente com escorificantes. Após o refino, o aço passa pela etapa de lingotamento contínuo, formando tarugos para posterior processamento nos laminadores. Visualiza-se na Figura 1 as principais operações de fabricação do aço em linhas de produção integradas e semi-integradas.

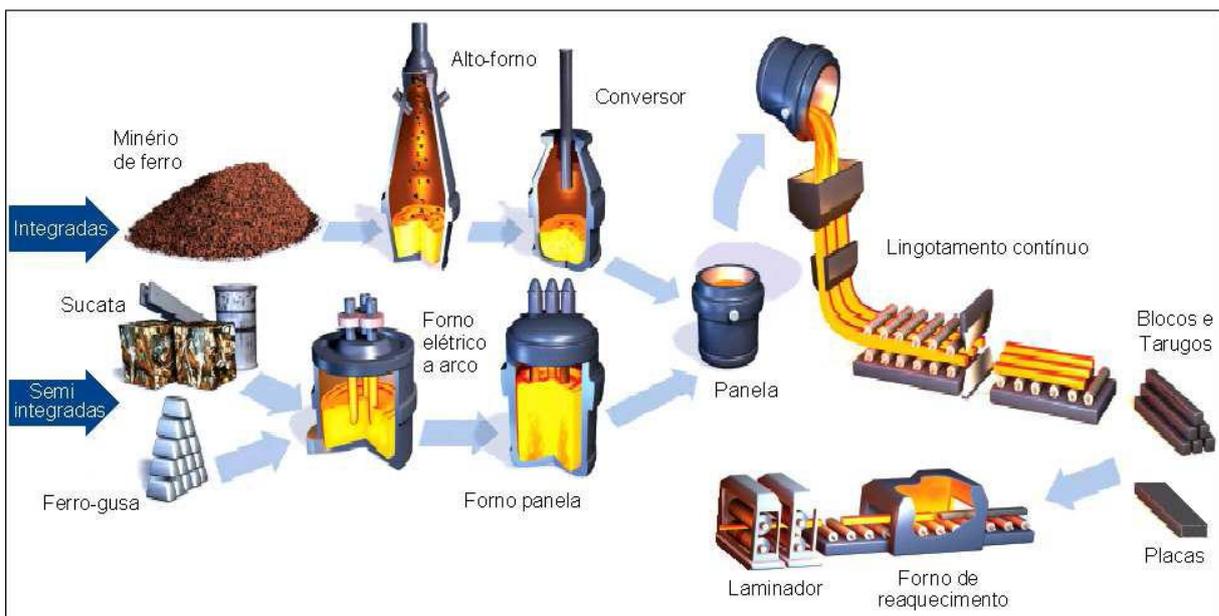


Figura 1. Linhas de produção de aço.

Fonte: Adaptado de <http://www.gerdau.com/upload/pt-BR/processo-de-producao-do-aco.pdf>

Outros métodos de obtenção de ferro metálico para posterior utilização na fabricação do aço são os processos de redução direta, onde é produzido ferro esponja (DRI). Estes processos têm a característica comum de efetuar a redução dos óxidos de ferro na fase sólida, através de atmosfera redutora de elevado percentual de monóxido de carbono ou mistura de monóxido de carbono e hidrogênio [2].

O ferro esponja obtido é resfriado ou briquetado á quente, para diminuir perdas por reoxidação. De forma geral, o ferro esponja é um insumo utilizado

principalmente nas usinas semi-integradas, integrando a carga dos fornos a arco elétricos, em substituição de parte da carga de sucata.

Nos processos tradicionais de redução dos óxidos de ferro, tal como a fabricação de gusa pelo alto-forno ou ainda na maioria dos processos de fabricação de ferro esponja em operação, existe a necessidade de um ajuste de granulometria, tanto do minério utilizado como do agente redutor sólido. Este ajuste é feito numa faixa granulométrica adequada de maneira a manter a uniformidade do fluxo de gases nos equipamentos, favorecendo a transferência térmica necessária à ocorrência das reações químicas de redução além de diminuir o percentual de pós nos gases de exaustão. Como decorrência, as frações mais finas tanto do agente redutor como do minério são descartadas por prévia classificação. Exemplificando: para os altos-fornos a carvão vegetal a fração abaixo de 12 mm é separada. Para o minério, a faixa ideal de granulometria está entre 12 e 25 mm ^[1].

Alguns processos mais recentes promovem o aproveitamento de finos de minério e carvão, além de outros resíduos siderúrgicos com alto teor metálico. Estes resíduos são utilizados na fabricação de pré-reduzidos para uso em aciaria elétrica ou ainda na fabricação de gusa. Dentre os processos há o Tecnored, desenvolvido no Brasil, e que segundo seus idealizadores propõe o aproveitamento de finos de minério de ferro, carepas e outros resíduos siderúrgicos contendo ferro, na forma de pelotas ou briquetes autorredutores, juntamente com carvão como combustível auxiliar, para fabricação de ferro gusa e posteriormente o aço ^[3].

Na siderurgia mundial têm sido desenvolvidas tecnologias alternativas de redução direta e redução-fusão, empregadas também na reciclagem de resíduos siderúrgicos. Duas são as vertentes principais destas tecnologias ^[4]:

- ✓ **Fusão-redutora:** nestes processos, os óxidos de ferro são dissolvidos em banhos metálicos ou escórias fundidas e são reduzidos pelo carbono dissolvido, produzindo metal líquido.
- ✓ **Autorredução:** utiliza uma mistura contendo finos de minério ou resíduos ferrosos e finos de materiais carbonosos, aglomerados na forma de pelotas ou briquetes. Nestes aglomerados ocorrem reações do tipo sólido-sólido, via intermediários gasosos, produzindo metal líquido ou ferro-esponja.

Baseados nestas tecnologias, vários processos emergentes foram desenvolvidos, como o já citado Tecnored, que apesar de possibilitar uma escala

menor de produção, dependem para sua implementação regionalizada de uma quantidade mínima de resíduos siderúrgicos para sua operação e viabilidade econômica. Em qualquer dos processos de fabricação de aço, a maior parte do aço líquido é solidificada em equipamentos de lingotamento contínuo para produzir semi-acabados, blocos, tarugos e placas para posterior laminação. Visualiza-se nas Tabelas 1 e 2, estatísticas de produção de aço no Brasil e em nível mundial, em função dos tipos de aciaria e de processo de lingotamento.

Tabela 1. Produção Brasileira de aço bruto por processo de aciaria e lingotamento (unid 10³t).

PROCESSO	2004	2005	2006	2007	2008
Aciaria	24.825	24.071	22.821	25.130	25.231
Oxigênio (LD)/BOF elétrico	7.513	6.959	7.541	8.081	7.933
EOF	571	580	539	571	552
TOTAL	32.909	31.610	30.901	33.782	33.716
Lingotamento convencional	2.357	2.364	2.337	2.228	1.918
Lingotamento Contínuo	30.514	29.206	28.523	31.511	31.751
Aço p/fundição	38	40	41	43	

Fonte: adaptado IBS (2009)

Tabela 2. Produção mundial de aço bruto (unid 10⁶ t).

PAIS	2004	2005	2006	2007	2008	2009
CHINA	280,5	355,8	423,0	494,9	500,5	37,7
JAPÃO	112,7	112,5	116,2	120,0	118,7	9,0
EUA	99,7	94,9	98,6	98,1	91,4	6,9
RUSSIA	65,6	66,1	70,8	72,4	68,5	5,2
INDIA	32,6	45,8	49,5	53,1	55,1	4,2
CORÉIA DO SUL	47,5	47,8	48,5	51,5	53,3	4,0
ALEMANHA	46,4	44,5	47,2	48,6	45,8	3,5
UCRÂNIA	38,7	38,6	40,9	42,8	37,1	2,8
BRASIL	32,9	31,6	30,9	33,8	33,7	2,5
ITÁLIA	28,6	29,4	31,6	31,6	30,6	2,3
TURQUIA	20,5	21,0	23,3	25,8	26,8	2,0
FORMOSA	19,6	18,9	20,1	20,9	19,9	1,5
OUTROS	243,8	239,8	250,5	257,6	244,7	18,4
TOTAL	1069,1	1146,7	1251,1	1351,3	1326,1	100,0

Fonte: Adaptado WSA/ILFA) IBS (2009)

3.1.1. O Forno Elétrico a Arco – FEA

Os fornos elétricos a arco tiveram sua origem em 1878, quando Wilhelm Von Siemens fundiu aço num cadinho por meio de um arco voltaico. Esta invenção, no entanto, somente começou a se desenvolver e ter uma maior aplicação na fabricação do aço em meados do século XX, quando os custos de energia elétrica começaram a viabilizar o uso desta tecnologia. Neste tipo de forno ocorre a transformação de energia elétrica em energia térmica através da formação de um arco voltaico que se forma entre os eletrodos de grafita e a carga metálica a ser fundida ^[1].

A operação de um forno elétrico a arco compreende etapas de carregamento, fusão em condições oxidantes mais ou menos intensas, fervura e formação de escória espumante, retirada da escória e vazamento do aço fundido na panela. O carregamento é efetuado com auxílio de transportadores chamados de “cestões”, providos de comportas na sua parte inferior. A carga do cestão é preparada em função da composição química do aço a ser fabricado e é escalonada dentro do cestão conforme critérios operacionais e considerando-se a proteção dos refratários e dos eletrodos. A carga ideal é aquela que além da segurança, atende aos requisitos operacionais, metalúrgicos e de menor custo. Em cada ciclo de fusão, é usual manter-se uma poça de metal líquido ao fundo do forno, com a finalidade de proteção da soleira.

No carregamento é feito o deslocamento lateral dos eletrodos e da abóbada do forno através da utilização de mecanismo hidráulico. O cestão é posicionado na abertura superior do forno, sendo as comportas inferiores abertas para a liberação da carga. A carga destes fornos, originariamente composta de sucata de ferro e aço, ou material de retrabalho da própria usina, comporta atualmente ferro gusa, como fornecedor de carbono para auxiliar na fusão da carga e como fonte de energia química. Nos locais onde exista carência de sucata, ou o custo desta for elevado, pode ser utilizado como parte da carga destes fornos o ferro esponja – DRI, proveniente de processos de redução direta de minério. Os fornos elétricos a arco são utilizados pelas “mini mills”(pequenas usinas)^[5].

Em cada corrida são feitos normalmente dois carregamentos, podendo ser em maior número, conforme a operação e o tipo de carga. Após cada carregamento, fecha-se a abóbada e baixam-se os eletrodos, ligando-se o arco. A

fusão inicia-se pela perfuração da sucata pelos primeiros arcos formados, prosseguindo a fusão até a parte inferior. Em determinado momento é introduzido o oxigênio, o qual representa uma fonte adicional de energia térmica, reagindo com o excesso de carbono da carga. Também são acionados os queimadores auxiliares à combustível, para efetuar a fusão e o aquecimento mais rápido. O tempo de cada corrida é variável, dependendo da prática operacional de cada usina, da capacidade e potência de cada forno e do tipo de aço que está sendo produzido. Normalmente, o segundo cestão é adicionado após cerca de 12 a 15 minutos de tempo de fusão do primeiro. O tempo total das corridas varia de 50 a 60 minutos.

Visualiza-se na Figura 2 um esquema simplificado de funcionamento de um forno elétrico a arco e a posição dos eletrodos por ocasião da fusão da carga. O forno possui uma abertura lateral para remoção da escória, inspeção, adição de materiais e injeção de oxigênio por lança. A base da carcaça denominada soleira apresenta uma curvatura achatada, evitando que o banho fundido apresente uma profundidade exagerada, acelerando o aquecimento da carga ^[6].

O sistema de basculamento do corpo do forno permite tanto a retirada da escória pela porta de escória como do aço fundido através do furo de corrida, situado na soleira do forno, em uma posição excêntrica.

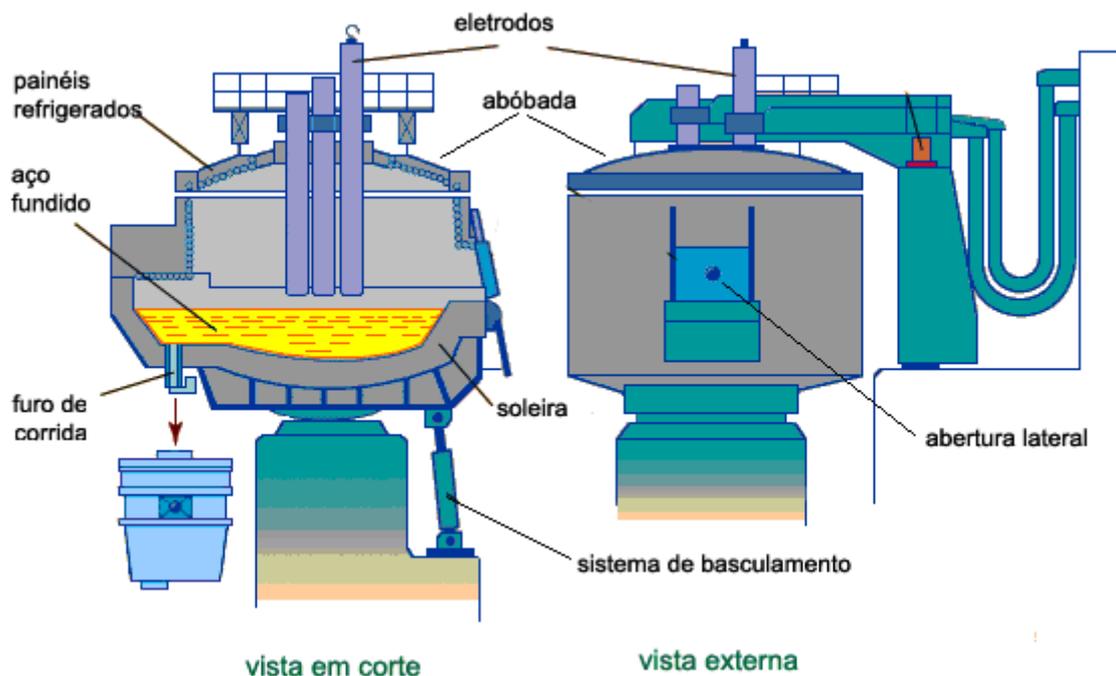


Figura 2. Forno Elétrico a Arco - Fonte: adaptado de Enciclopédia Britânica, 1999.

Antigamente, no forno elétrico efetuava-se a fusão da carga, descarburagem, desoxidação, dessulfuração e adição de ligas. Atualmente, para maior produtividade, a função principal do FEA é efetuar a fusão da carga, descarburar e desfosforar, se for necessário. As demais funções de refino e ajuste de ligas foram transferidas para o forno panela, que recebe a carga líquida do forno elétrico ^[1].

Um aperfeiçoamento adicional da operação dos fornos a arco elétrico é a execução do pré-aquecimento da carga (sucata ferrosa) pelos gases de exaustão, procedimento que está sendo adotado por várias aciarias elétricas em nível mundial e que propicia um aumento da eficiência energética do equipamento ^[7].

3.1.2. O Processo Siderúrgico Para a Produção do Aço

A metalurgia é um conjunto de tratamentos físicos e químicos a que os minerais são submetidos para a extração dos metais. A siderurgia é a denominação dada para a metalurgia do ferro e do aço, que gera os elementos usados na fabricação das peças estruturais. Ao utilizar o termo estrutura metálica, muitas vezes, o ferro e o aço são erroneamente citados como sendo um mesmo material. É importante a distinção de ambos, pois possuem características diferentes e são utilizados na produção de componentes estruturais com propriedades distintas.

Atualmente, as peças estruturais mais usadas na construção civil são produzidas em aço, com composições químicas variadas para cada especificação determinada. Os metais ferro e aço possuem em comum duas matérias-primas básicas: o minério de ferro e o carvão, que pode ser vegetal ou mineral. O minério de ferro é composto pelo elemento químico ferro (Fe), que é encontrado na natureza basicamente sob a forma de óxidos (Fe + O).

O principal objetivo na produção dos metais ferro e aço é remover o oxigênio da sua composição. O elemento químico ferro (Fe) é extraído do minério por meio de elevadas temperaturas, obtidas dentro de fornos especiais, que retiram o oxigênio na presença do carvão vegetal ou mineral, este último conhecido como coque. O coque, um material rico em carbono, é constituído pelo carvão mineral purificado através de altas temperaturas. O carvão vegetal foi primeiramente utilizado no Brasil devido à vasta oferta da nossa flora, mas, com o aumento da

devastação e com a falta de uma política de reflorestamento, seu uso foi limitado, acarretando o aumento do custo. Já o carvão mineral nacional é rico em enxofre, o que proporciona um material de má qualidade, necessitando de processos para a sua retirada, que também elevam o custo [8].

Atualmente, as empresas siderúrgicas buscam alternativas energéticas renováveis, como a biomassa plantada, com o objetivo de melhorar a qualidade de seus produtos, reduzir os custos e o impacto ambiental.

O processo siderúrgico para a fabricação do aço consiste no aproveitamento do ferro contido no minério, através da eliminação progressiva das impurezas deste último, e pode ser dividido em quatro etapas (Figura 03):

- ✓ **1º.** Preparo de matérias-primas (minério de ferro e carvão mineral): na sinterização, é produzido o sinter, que é o minério de ferro aglutinado, pois seus finos são indesejáveis para o processo de obtenção do ferro-gusa no alto-forno; na coqueria, é produzido o coque (carvão mineral sem impurezas);
- ✓ **2º.** Produção do ferro-gusa no alto forno: o princípio básico de operação de um alto-forno é a retirada do oxigênio do minério, que assim é reduzido a ferro (ferro-gusa);
- ✓ **3º.** Produção do aço: na aciaria, é feito o processo de refino do ferro-gusa, transformando-o em aço, e o ajuste da sua composição final, de acordo com o tipo de aço produzido;
- ✓ **4º.** Conformação mecânica (Lingotamento e Laminação): o aço em estado líquido é moldado e, em seguida, laminado, sendo conformado nos produtos desejados (chapas grossas, chapas finas, perfis, etc.).

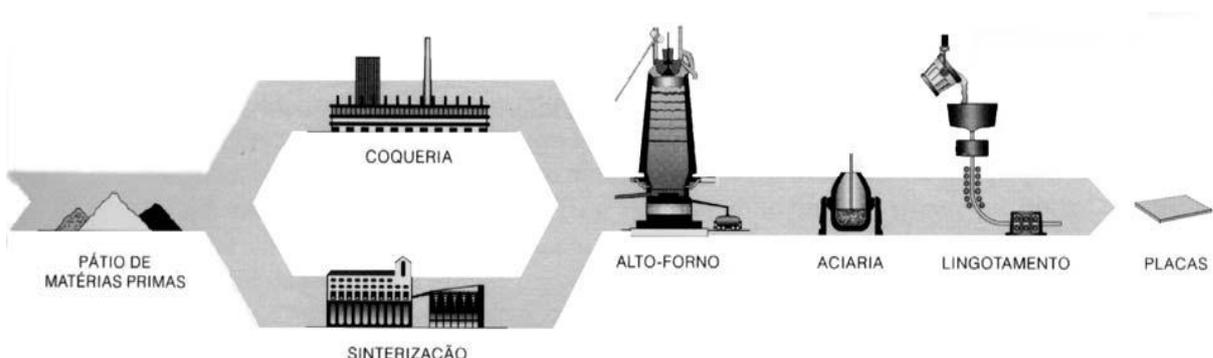


Figura 3. Processo Siderúrgico. Fonte: (Rizzo, 2005)

O processo de coqueificação consiste em submeter uma mistura de carvão a uma destilação (em ausência de ar). Essa destilação provoca a liberação do material volátil do carvão, fazendo surgir um resíduo sólido, poroso, infusível, rico em carbono que chamamos de coque. O carvão é carregado dentro dos fornos e entra em contato com as paredes aquecidas e o calor é transmitido, por condução, para o centro da carga, ou seja, de cada parede surgem duas superfícies planas isotérmicas, que caminham para o centro da carga. A velocidade de avanço das isotermais constitui o “*coking-rate*” e o processo de coqueificação será terminado com o encontro das duas frentes plásticas [1].

A sinterização consiste em misturar e homogeneizar finos de minérios de ferro (sinter-feed), finos de carvão ou coque, finos de fundentes (cal, etc.) e controlar a umidade inicial de mistura, seguida da combustão do carvão, de modo que a temperatura seja elevada até a faixa de 1250°C a 1350°C, condição suficiente para que a umidade evapore e as partículas da carga se unam por caldeamento, devido à ocorrência de uma fusão parcial do tipo redutor-oxidante, obtendo-se um material resistente e poroso, com alguns centímetros de diâmetro médio denominado sinter [2]. Na figura 4 apresenta-se um fluxograma esquemático de um processo de sinterização.

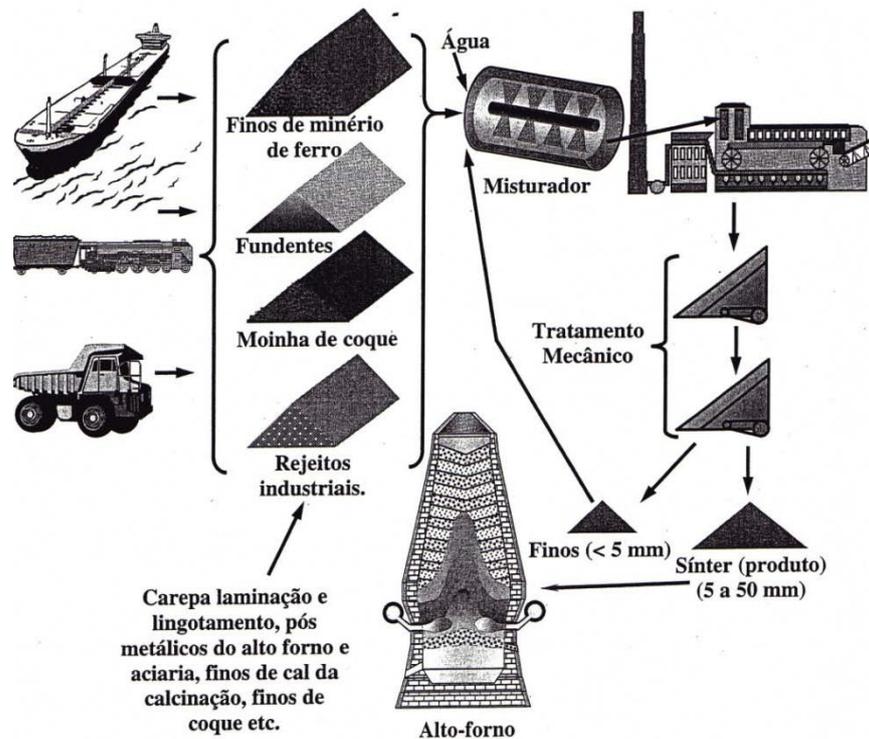


Figura 4. Fluxograma esquemático do processo de sinterização. Fonte: (Rizzo, 2005)

O ferro-gusa, portanto, é o produto da primeira fusão do minério de ferro com o carvão no alto-forno, sendo uma liga metálica com alto teor de carbono, cerca de 3,5 a 4,0%.

O ferro fundido possui o ferro-gusa como matéria-prima, adicionado de alguns elementos químicos para a obtenção de um teor de carbono na liga metálica da ordem de 2,5 a 3,0%, o que lhe confere propriedades diferentes da do aço.

O ferro fundido difere substancialmente do ferro forjado ou batido. Este último consiste em uma forma razoavelmente pura do metal com granulação lenhosa, que pode ser trabalhado de diversas maneiras: torcido, martelado, enrolado, cortado ou esticado, tanto a quente, quanto a frio. O tratamento na forja aumenta a elasticidade do material, enquanto que a fundição aumenta sua rigidez, diferenciando esses dois tipos de ferro. Como é facilmente moldável, o ferro fundido foi utilizado durante muitos anos na fabricação de elementos estruturais, principalmente colunas e arcos, e de decoração. Apesar de possuir uma boa resistência à compressão, resiste somente a leves tensões elásticas (tração), devido ao alto teor de carbono.

Já o aço, como apresentado, se origina da redução do ferro-gusa em conversores específicos na aciaria, com a diminuição de teores de alguns elementos químicos prejudiciais, como o enxofre, fósforo e silício, e a adição de outros elementos. O teor de carbono presente no aço é da ordem de 2%, sendo, na maioria dos casos, menor que 1%. Os aços utilizados na construção civil possuem um teor de carbono na ordem de 0,18 a 0,25%. Através da mudança da composição química do aço, podem-se obter variações nas características físicas dos produtos finais. A adição de elementos químicos é feita quando o material já está isento das impurezas do minério e em sua forma líquida.

As usinas siderúrgicas podem também utilizar a própria sucata do aço como matéria-prima em substituição ao minério de ferro, o que também diminui os custos da produção, sendo assim denominadas usinas siderúrgicas não-integradas.

O aço pode ser reciclado um número ilimitado de vezes sem a perda de sua qualidade e de suas propriedades. Atualmente a reciclagem do aço é uma realidade e processos produtivos que privilegiam essa fonte alternativa têm sido desenvolvidos e aperfeiçoados.

3.1.3. Pó de Aciaria Elétrica

O pó de aciaria elétrica (PAE) é um resíduo sólido muito fino gerado nos fornos elétricos e panela de produção de aço tendo a sucata como principal matéria-prima para a produção do aço, e apresenta-se geralmente na cor marrom escura e é inodoro. A classificação segundo norma NBR 10004 para o mesmo é classe I – Perigoso, porque apresenta metais pesados (chumbo e cádmio) em sua constituição, que lixiviam em água excedendo os limites máximos estabelecidos por esta norma. Os elementos ferro e zinco são os constituintes majoritários presentes no PAE. O conhecimento da forma como estes elementos estão combinados é de suma importância antes do estudo de novas tecnologias para processamento do resíduo.

3.1.4. Geração do PAE

O PAE é o resíduo sólido gerado na coleta do material particulado em unidades de despoeiramento. Estima-se que cerca de 10 a 20 kg de PAE são gerados por tonelada de aço produzido. O PAE é gerado por uma série de fenômenos: volatilização dos metais; vaporização do ferro abaixo do arco, expansão de bolhas de monóxido de carbono que conseqüentemente ejetam pequenas bolhas de metais e arraste de partículas sólidas. Quando a sucata galvanizada é alimentada no FEA, na fusão da carga ocorre evaporação do zinco, já que este volatiliza a 907°C sob pressão atmosférica. Na presença de oxigênio, o zinco metálico gasoso oxida rapidamente e transforma-se em ZnO (zincita). Testes realizados em termobalança indicaram que praticamente todo o zinco presente na sucata vaporiza em um curto período de tempo em temperatura maior do que 850°C.

O óxido de zinco é arrastado mecanicamente para fora do forno juntamente com outros compostos provenientes de reações complexas como a $ZnFe_2O_4$. Uma pequena fração do zinco passa para o aço (2%) e para a escória (0,1%). Isto significa que no FEA, o zinco é separado do banho de aço com uma boa eficiência. O problema é que o zinco não sai do forno sozinho. Outros elementos volatilizam e são coletados no sistema de despoeiramento dando origem ao PAE.

A quantidade de zinco no PAE, bem como a quantidade de PAE podem ser reduzidas por meio de um pré-tratamento na sucata antes da mesma ser adicionada no FEA. Cerca de 99% do zinco presente pode ser removido por meio de uma dezincificação térmica.

O aço pode ser obtido a partir de várias rotas de processo. As duas mais utilizadas são o alto-forno associado a um conversor a oxigênio e o forno elétrico a arco ^[1].

Independente do tipo de forno e do processo utilizado, a fabricação de aço é sempre acompanhada pela emissão de uma grande quantidade de pó, o qual é carregado do forno pelos gases de exaustão, principalmente em processos que utilizam sucatas de aço como matéria-prima. Vários pesquisadores têm relatado os índices da quantidade de pó de aciaria gerado durante a produção de aço. Tais valores mostram que entre 15-20 kg de pó por tonelada de aço produzido são gerados em uma siderúrgica

No processo de fabricação de aço via forno elétrico a arco, a sucata de aço é fundida via ação do arco voltaico, energia proveniente de queimadores e reações químicas, principalmente as resultantes da injeção de oxigênio. Vários materiais são adicionados ao processo, onde se destaca a cal, o grafite, entre outros. A emissão de pós durante o processamento de aço em forno elétrico pode ser exemplificada através da observação da Figura 5. O qual apresenta o vazamento de uma corrida, ou seja, a transferência de aço líquido do forno à panela.

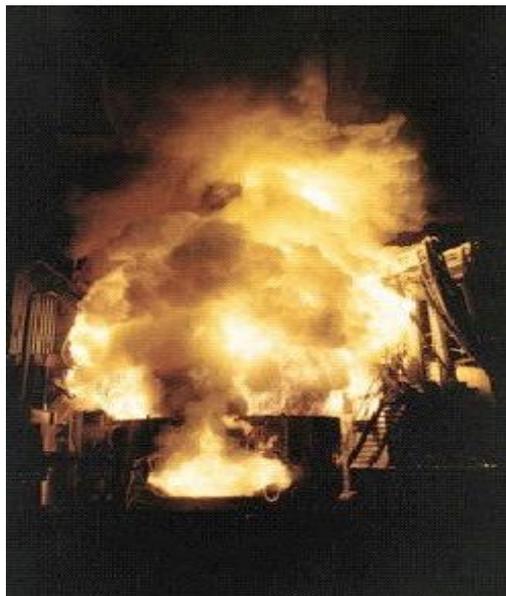


Figura 5. Emissão de fumos durante o vazamento de aço em forno elétrico.

Fonte: NEWSTEEL, Recycling EAF Dust into DRI, Shingles and Rubber. Site consultado em 10/05/2011. www.newsteel.com/news/NW971201.htm

Este pó é formado pela volatilização de metais da carga, tais como zinco, cádmio e chumbo, que devido às temperaturas de trabalho (1600°C ou mais) nos fornos elétricos passam para o estado gasoso, são oxidados pelo excesso de oxigênio e, posteriormente, resfriados pelo ar do sistema de resfriamento, condensando. As partículas condensadas e outros materiais particulados são então coletados em sistemas de filtros. Alguns elementos são encontrados na forma de óxidos duplos do tipo espinélios, de fórmula geral MFe_2O_4 , onde M é um cátion divalente.

Óxidos de cálcio e silício também são encontrados provenientes de fundentes, refratários ou da oxidação das matérias-primas metálicas. A composição química do pó de aciaria depende das matérias-primas empregadas, do tipo de processamento e da qualidade de aço produzido. As emissões de pó em forno elétrico estão associadas a todas as fases de operação do forno. A pluma de gases que sai do forno, quando a sucata está sendo carregada, é de grande intensidade (vide Figura 5), devido à ignição de materiais combustíveis agregados à sucata metálica, gerada quando em contato com o aço já fundido na base do forno. Como seria antieconômico dimensionar um exaustor para aspirar o pico de emissão de gases, porém ambientalmente correto, normalmente a coifa é projetada sobre o forno, com volume suficiente para comportar os gases até que o sistema possa extraí-los. Como medidas para prevenção e/ou minimização da poluição, o sistema de uma siderúrgica pode ser composto por unidades de despoeiramento, tais como precipitadores eletrostáticos, lavagem de gases e câmaras de filtração, que são utilizados para a limpeza dos gases antes de serem liberados para a atmosfera.

3.1.5. A Geração e a Reciclagem de Resíduos nos Processos Siderúrgicos

Nas usinas, além da escória, são gerados também diversos outros resíduos, tais como finos de minério e de carvão, além de pós, lamas e carepas, os quais contêm teores variáveis de ferro metálico. Em 2007, o setor siderúrgico brasileiro gerou cerca de 21 milhões de toneladas de resíduos e co-produtos, o que representa 613 kg/t de aço produzido (IBS, 2008).

Considerando o volume gerado e a necessidade de destinar adequadamente os resíduos, o desenvolvimento de alternativas viáveis de

reciclagem no próprio processo siderúrgico destes materiais se torna atrativa tanto do ponto de vista econômico como ambiental. Apesar desta conscientização ambiental e do valor do conteúdo metálico presente nos resíduos, o reaproveitamento na siderurgia muitas vezes depende de transporte e processamento em lugares distantes do ponto de geração, o que encarece e desestimula este procedimento, sendo preferido em muitos casos o descarte em aterros de resíduos ou co-processamento.

Como forma de contornar as dificuldades logísticas e os custos mais elevados do processamento dos resíduos fora das instalações das usinas, tem sido estudada a reciclagem destes no próprio processo produtivo. A viabilização técnica e econômica da reintrodução dos resíduos no processo, utilizando-se dos equipamentos já existentes nas usinas, evita a inversão de capital em procedimentos ou tecnologias específicas para este fim. A análise desta possibilidade torna-se relevante para usinas que trabalham em escalas menores ou não dispõem de instalações próximas que possam efetuar a reciclagem a custos compatíveis ou concorrentes as alternativas de destinação. Nesta direção, vários estudos têm sido feitos, tanto em nível nacional como internacional, comentando-se a seguir a reciclagem destes resíduos nas usinas integradas e semi-integradas.

3.1.6. A Reciclagem de Resíduos nas Usinas Integradas

Nas usinas integradas os resíduos gerados encontram maiores opções para retorno ao processo produtivo. Nestas instalações são empregados dois equipamentos com possibilidade de uso na reciclagem de resíduos contendo ferro, quais sejam o alto-forno e os convertedores à oxigênio. O alto-forno é o equipamento redutor presente na maioria das usinas integradas e a prática atual de várias companhias siderúrgicas é executar o retorno de alguns tipos de resíduos ao processo via pelotas briquetes e ou sinter^[10,11].

Outra alternativa proposta é a confecção de bloquetes sextavados, mediante aglomeração a frio de resíduos minero-metalúrgicos juntamente com redutores carbonosos, denominados “interblocks”, os quais podem ser utilizados na carga no alto-forno^[12].

Nesta direção, verificaram o consumo energético e de insumos de alternativas tecnológicas de recuperação de resíduos, tais como Fastmet, Redsmelt ou oxy-cup, nos quais pelotas ou briquetes compostos de pó de aciaria e lodos ferrosos juntamente com finos de coque são metalizados em fornos rotativos ou de soleira fixa ou rotativa, com posterior fusão. Comparando o consumo destas tecnologias com a alternativa de fusão dos briquetes em altos-fornos, consideraram que a reciclagem de resíduos siderúrgicos através da redução e fusão dos briquetes de resíduos e finos de coque em altos fornos traz maiores vantagens econômicas e ambientais ^[13].

Estudos recentes desenvolveram uma rota tecnológica para o reaproveitamento de resíduos gerados na Companhia Siderúrgica Nacional, (CSN) constituídos de pós e lamas, provenientes do alto-forno e aciaria, além das carepas provenientes da laminação e lingotamento contínuo. O projeto baseou-se na confecção de pelotas autorredutoras com redutor sólido, aproveitando o carbono contido em alguns dos resíduos gerados naquela usina ^[7].

3.1.7. A Reciclagem de Resíduos nas Usinas Semi-Integradas

Situação diversa é o caso das usinas semi-integradas, que geram em sua operação carepas e outros resíduos contendo quantidade significativa de ferro metálico ou oxidado. Nestas empresas, a possibilidade de reintrodução deste material no seu processo produtivo é limitada tendo em vista a inexistência na maioria destas usinas de instalações próprias para redução de óxidos de ferro funcionando conjuntamente. Como já foi visto, o equipamento mais utilizado nas usinas semi-integradas é o forno elétrico a arco, cuja função primordial é fundir a carga metálica. Ainda que haja a possibilidade de serem estabelecidas neste equipamento as condições termodinâmicas necessárias à redução de óxidos de ferro, os aperfeiçoamentos que o FEA sofreu nos últimos anos visando o aumento de produtividade e a diminuição do consumo de energia elétrica, tiveram como contrapartida estabelecer limites na composição das cargas, sob pena de perderem-se as vantagens até agora obtidas. A consequência é que nas situações onde é utilizado o forno elétrico a arco para a reciclagem de resíduos contendo ferro, tem sido requerido que os mesmos estejam com alto teor de ferro metálico, à

semelhança do ferro esponja, e caso tenham um percentual elevado de fração fina, tecnicamente é aconselhável uma briquetagem prévia para evitar perdas por oxidação, ou mesmo passarem por uma etapa de pré-redução em outro equipamento, antes de integrarem a carga do FEA ^[13,14].

Apesar das limitações, algumas propostas de utilização do forno a arco elétrico para a reciclagem de resíduos siderúrgicos têm sido feitas. Estudos relatam o desenvolvimento de uma tecnologia para reciclagem no EAF de resíduos compostos de carepas oleosas, as quais sofrem uma preparação prévia, onde é adicionado cal e pó de carvão, sendo a mistura posteriormente submetida a um tratamento térmico. O material resultante é estocado e posteriormente injetado na escória do banho metálico através de lanças refrigeradas à água posicionada no perímetro do forno, substituindo a injeção de carbono para a formação da escória espumante. No processo, o carbono presente na mistura reage com a wustita (FeO) do resíduo, reduzindo-a para ferro e gerando CO, que tem efeito positivo na formação da escória espumante ^[15].

Estudos com micropelotas com a maioria dos tamanhos entre 1,0 e 3,0mm, compostas de resíduos ferrosos de baixa granulometria, acumulados em depósitos e provenientes da indústria siderúrgica mineira já mostram resultados significativos. Nestas micropelotas foram empregados também resíduos da mineração do carvão, juntamente com cal e bentonita como agentes de aglomeração. Baseados em experimentos, os autores recomendam a utilização destas micropelotas como agentes formadores de escória espumante em fornos elétricos a arco. A avaliação do emprego de briquetes de resíduos siderúrgicos na carga de fornos a arco elétrico. Inicialmente, defendem a reciclagem dos resíduos gerados pelas plantas metalúrgicas nos próprios locais de geração. As principais razões apresentadas pelos pesquisadores são a compatibilidade entre os resíduos gerados e a carga usada no processo, as regulamentações governamentais pertinentes ao assunto e as dificuldades de transporte dos resíduos às grandes distâncias. Consideram ainda que tendo em vista as peculiaridades do ciclo da produção metalúrgica, somente a briquetagem dos resíduos, juntamente com um agente redutor carbonoso e ligantes tem a possibilidade de viabilizar economicamente a reintrodução dos resíduos no processo industrial.

A justificativa para o uso de briquetes metalúrgicos seria a possibilidade de ajuste tanto da granulometria como da composição do briquete em função dos

requerimentos de cada processo produtivo onde fosse empregado. Esta peculiaridade é relevante para a metalurgia do aço, em especial no emprego de briquetes como componente da carga de fornos elétricos a arco. Os autores colocam também que o carbono é o redutor mais adequado para o uso nos briquetes, uma vez que há formação de gás CO, que auxilia na eliminação de inclusões e é por si só um agente redutor. Ainda, a oxidação de quantidades adicionais de carbono existente nos briquetes incrementa a capacidade de aquecimento do forno, melhorando o desempenho do processo, desde que este calor adicional seja eficientemente utilizado.

Algumas condições são consideradas importantes para o êxito na confecção e uso dos briquetes de resíduos ferrosos em plantas siderúrgicas:

- ✓ Localização das instalações de briquetagem tão próximas quanto possível dos locais de geração dos resíduos e de utilização dos briquetes;
- ✓ Desenvolvimento de uma composição adequada para o briquete autorredutor e utilização de métodos e equipamentos eficientes de briquetagem.

3.2. AUTORREDUÇÃO

Vários autores têm-se dedicado nos últimos anos à pesquisa da autorredução e aos fenômenos a ela associados. O estudo destes trabalhos, muitos deles citados em estudos recentes, permite estabelecer que o conceito de autorredução se aplica ao processamento metalúrgico de óxidos metálicos onde um agente de redução sólido, geralmente material com teores razoáveis de carbono fixo, está intimamente misturado com os óxidos metálicos a serem reduzidos ^[8].

Estas substâncias formam um conjunto coeso, que ao ser submetido a um gradiente térmico conveniente numa atmosfera controlada, conduz à redução do metal. Além dos óxidos metálicos e do agente redutor, a esta mistura também podem ser adicionadas outras substâncias, tais como escorificantes. Em vista disso, pode-se considerar aglomerados auto-redutores como um caso particular de aglomerados auto-reagentes. A idéia de se juntar num mesmo conjunto substâncias

que em determinadas circunstâncias reajam entre si não é nova. Basta consultar a literatura e trabalhos para verificar tal aplicação.

Apesar da autorredução estar geralmente associada a um aglomerado que necessita de aporte de energia para que as reações de redução ocorram, em metalurgia também pode-se ter autorredução exotérmica, como por exemplo a aluminotermia. Na Figura 6 visualiza-se uma representação esquemática e simplificada de um aglomerado autorredutor.

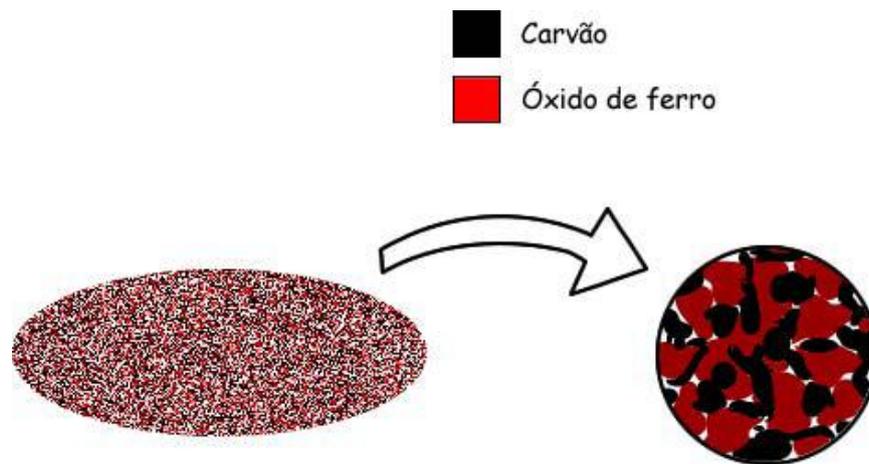


Figura 6. Representação pictórica de um aglomerado autorredutor.
Fonte: D'ABREU *et al.*, 2008

Para manter a coesão da mistura muitas vezes adiciona-se um agente ligante e o conjunto é submetido a um processamento prévio, visando à formação de aglomerados autorredutores, na forma de pelotas ou briquetes. Estes aglomerados, após queima, cura e/ou secagem, são encaminhados a um processo pirometalúrgico que visa submetê-los às condições termodinâmicas favoráveis ao processo de redução.

Esta técnica permite o aproveitamento de resíduos metalúrgicos que em geral encontra-se em baixa granulometria, além de flexibilizar a produção de ferro e aço a partir das matérias-primas convencionais. Sob o ponto de vista energético, o percentual de voláteis do agente redutor e o monóxido de carbono porventura não utilizado nas reações de redução, podem ficar disponíveis para queima, auxiliando na demanda de energia do processo [8].

O estado de fina divisão do agente redutor empregado favorece a utilização de fontes alternativas de carbono, tais como aproveitamento de subprodutos ou resíduos, bem como carbono proveniente de biomassa. Estas fontes

alternativas, algumas ainda em fase de pesquisa, poderão implicar na redução dos custos totais de fabricação dos aglomerados autorredutores.

Pelo exposto, verificam-se algumas diferenças entre os processos tradicionais e a utilização de aglomerados autorredutores, quais sejam:

- ✓ Flexibilização no uso de matérias-primas;
- ✓ Aproveitamento das frações de baixa granulometria tanto de óxidos de ferro como de redutores;
- ✓ Os óxidos de ferro e o redutor encontram-se próximos, num mesmo agregado compacto, com grande área superficial disponível para as reações necessárias à redução.
- ✓ Os gases redutores são gerados no interior do agregado, praticamente não existindo a etapa de difusão destes gases do ambiente externo para o interior, como nos processos tradicionais. Além disso, esta geração de gases implica numa pressão parcial de monóxido de carbono mais elevada pela inexistência de gases inertes como o nitrogênio
- ✓ Pelas suas características, os aglomerados autorredutores tem a possibilidade de desenvolver uma cinética mais rápida, comparando aos processos tradicionais.

3.2.1. Fundamentos da Redução Carbotérmica dos Óxidos de Ferro

Em siderurgia, usualmente o conceito de redução está vinculado à remoção do oxigênio dos óxidos de ferro, ocorrendo à diminuição do grau de oxidação inicial. Caso haja remoção de todo o oxigênio dos óxidos, diz-se que o metal está completamente reduzido. Neste sentido, o grau de redução de um material se refere ao percentual de oxigênio removido em relação ao oxigênio inicial [14].

O conceito de redução de um metal pode ter, entretanto, uma acepção mais geral que é a transferência de elétrons dos agentes redutores para os agentes oxidantes. Quando um agente redutor, agindo nesta condição, atua doando elétrons para uma segunda espécie, ele reduz esta última e ele próprio é oxidado [17].

De forma geral, os compostos metálicos presentes nos processos metalúrgicos tem números de oxidação positivos, por exemplo, Fe^{+3} , na hematita, Cu^{+2} , nos sais cúpricos, Cr^{+6} , no trióxido de cromo, etc. Assim, a redução dos metais ocorre quando seu número de oxidação é rebaixado mediante o recebimento de elétrons do agente de redução, sendo expressa quando da obtenção do metal conforme a equação (1):



Este conceito não envolve somente a redução dos metais contidos em seus óxidos, mas também o metal contido em diversos outros compostos metálicos, como sais ou complexos, presentes em processos hidrometalúrgicos, particularmente quando da obtenção eletroquímica de metais. O carbono é o elemento redutor utilizado em grande parte das operações pirometalúrgicas de obtenção de metais a partir de seus óxidos, em especial na siderurgia. Está presente em materiais relativamente baratos e disponíveis na natureza, tais como carvão mineral e seu produto de processamento o coque, carvão vegetal, petróleo, gás natural e biomassa, citando os mais importantes. A utilização do carbono baseia-se nas propriedades que possui este elemento e o monóxido de carbono que se forma nos processos siderúrgicos, em combinarem-se com o oxigênio presente nos óxidos, liberando o ferro metálico.

3.2.2. Cinética da Redução dos Óxidos de Ferro

A redução dos óxidos de ferro, através de intermediários gasosos, ocorre em três etapas correspondentes à crescente dificuldade termodinâmica, ou seja, redução da hematita para magnetita, redução da magnetita para wustita e finalmente a redução da wustita para ferro metálico ^[9].

Para o caso de uma partícula densa, a redução progride da superfície da partícula em direção ao centro, numa frente de reação, caracterizando o modelo topoquímico de redução, como visualizado na Figura 7.

- ✓ Hematita: De coloração vermelho-escura a negra e densidade $5,24 \text{ g/cm}^3$, é insolúvel em água, porém solúvel em ácido. Tem ponto de fusão e começa a se decompor a 1565°C e pode ser produzida sinteticamente através do aquecimento de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ a 200°C . Pode ainda apresentar estrutura hexagonal compacta ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) ou cúbica ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$). É largamente usada como pigmento vermelho para tintas, borrachas, cerâmicas e papéis, além de ser empregada na confecção de fitas de gravação magnética, como as fitas cassete ^[18].
- ✓ Magnetita: de coloração negra, forma cristais cúbicos, e seu o ponto de fusão é 1595°C . Insolúvel em água e álcool, porém solúvel em ácidos, pode ser preparada sinteticamente aquecendo-se o Fe_2O_3 acima de 1400°C . Contém tanto Fe^{2+} quanto Fe^{3+} : todos os íons bivalentes estão em sítios octaédricos, e os íons trivalentes estão igualmente divididos entre sítios octaédricos e tetraédricos. Trata-se de um material fortemente ferromagnético com densidade $5,2 \text{ g/cm}^3$ ^[18].
- ✓ Wustita: de coloração negra e formada por cristais cúbicos que possui densidade de $5,7 \text{ g/cm}^3$, com ponto de fusão de 1369°C . É insolúvel em água, álcool ou meio alcalino, porém reage com ácidos. Ocorre na natureza como mineral, porém pode ser preparada sinteticamente a partir da decomposição térmica do oxalato de ferro II em vácuo. Como a sua composição verdadeira varia de $\text{Fe}_{0,90}\text{O}$ a $\text{Fe}_{0,96}\text{O}$, com uma pequena presença de Fe^{3+} , esse tipo de óxido apresenta propriedades semicondutoras ^[18].

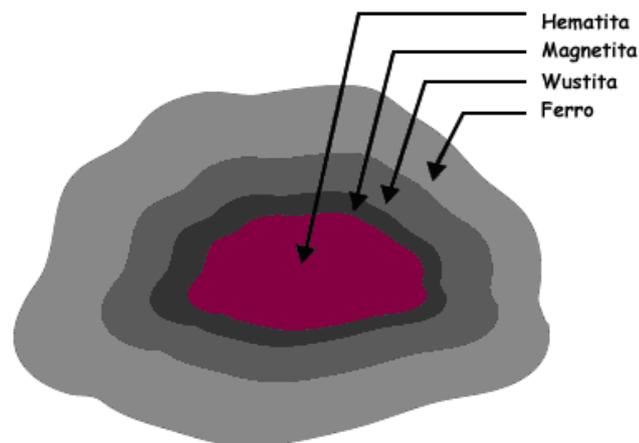


Figura 7. Representação em corte da seqüência de redução em uma partícula densa de hematita, de acordo com o modelo topoquímico. Fonte: adaptado de Ross *et al.* (1980).

Para partículas e aglomerados porosos, a redução ocorre sem a presença de interfaces nítidas, ocorrendo à gradual transformação dos óxidos em ferro

metálico, de forma disseminada por todo o aglomerado poroso. Para que isto ocorra é necessário que o gás CO mantenha contato com as superfícies dos óxidos, o que implica na penetração e difusão do monóxido de carbono no interior do aglomerado, ocorrendo à reação do redutor com o óxido e a posterior dessorção dos produtos gasosos. Entretanto, mesmo no caso de aglomerados porosos de óxidos de ferro, os grãos individuais seguem o modelo topoquímico de redução. Uma série de fatores pode influenciar a cinética das reações de redução dos óxidos de ferro, tal como a temperatura de processo. É bem conhecido que a taxa de redução aumenta com a temperatura. Quando a redução dos óxidos de ferro acontece abaixo do ponto de fusão, como ocorre nos processos de redução direta, as taxas de reação são mais baixas em comparação com processos onde ocorre a fusão do metal, como no alto-forno.

Por exemplo, no caso de redução no estado sólido, para que a reação ocorra é necessário que o gás redutor alcance a interface dos óxidos e os produtos da reação possam sair. Os movimentos dos reagentes e produtos na interface são afetados por vários fatores, tais como granulometria, área de contato, absorção e difusão dos gases. Propriedades específicas dos óxidos como densidade, estrutura cristalina e porosidade, interferem na medida de sua influência na quantidade de superfície reativa dos óxidos de ferro exposta aos gases redutores. De forma geral, a etapa mais lenta do processo é a que determina a taxa geral da reação e é referida como a etapa controladora. Os aglomerados autorredutores, como visto anteriormente, devido à sua característica de incorporarem num mesmo conjunto tanto os óxidos de ferro a serem reduzidos como o agente redutor, em íntima mistura, apresentam peculiaridades cinéticas próprias, que são estudadas a seguir.

3.2.3. Variáveis Cinéticas no Processo da Autorredução

Os aglomerados autorredutores, dependendo do estado físico dos seus constituintes e de sua composição, podem exibir velocidades de reação superiores às que ocorrem nos processos tradicionais, desde que sejam submetidos às condições termodinâmicas adequadas. Esta característica pode favorecer a utilização destes aglomerados em processos onde sejam requeridas altas taxas de metalização num curto espaço de tempo ^[14].

Em conseqüência, infere-se que os aglomerados autorredutores podem ter potencial de aplicação tanto em processos emergentes de redução de óxidos de ferro como também ter seu uso viabilizado como parte da carga em fornos de fundição do tipo revérbero, indução, cuba, rotativo e cubilô ou ainda na produção de fundidos e aço em forno a arco elétrico.

Vários estudos acerca dos mecanismos e cinética das reações de autorredução têm sido efetivados nas últimas décadas. Pode-se dizer que é consenso entre os pesquisadores que a reação entre misturas balanceadas de óxidos de ferro com carbono, em ambiente e temperaturas adequadas, é uma reação sólido-sólido que ocorre via intermediários gasosos ^[19].

De forma geral, pode-se visualizar esquematicamente na Figura 8 as etapas em que se processam os fenômenos de autorredução e que se encontram adiante descritas, seguindo a numeração indicada na figura:

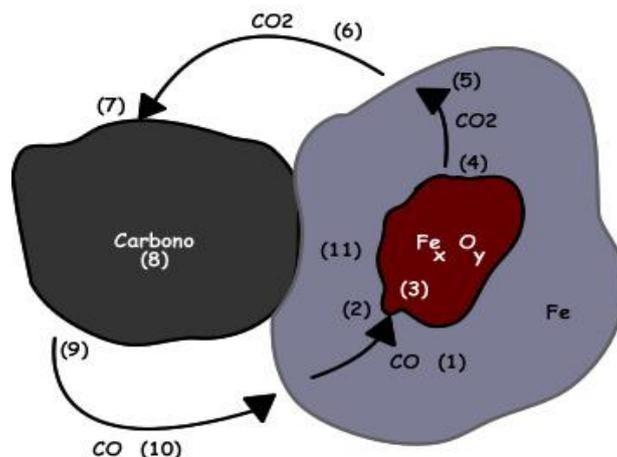


Figura 8. Etapas da autorredução Fonte: adaptado D'Abreu *et al.* (2008)

- (1) - Difusão de CO através dos poros da camada de ferro metálico.
- (2) - Adsorção de CO pelo óxido Fe_xO_y .
- (3) - Reação de redução dos óxidos Fe_xO_y .
- (4) - Dessorção de CO_2 da superfície do óxido.
- (5) - Difusão do CO_2 através da camada porosa de Fe metálico.
- (6) - Transporte do CO_2 nos poros da mistura.
- (7) - Adsorção de CO_2 pelo carbono.
- (8) - Reação de Boudouard.
- (9) - Dessorção de CO da superfície do carbono.
- (10) - Transporte de CO nos poros da mistura.
- (11) - Redução direta sólido-sólido.

3.3. BRIQUETAGEM

Briquetagem é um processo no qual pequenas partículas de material sólido são prensadas para formar blocos de forma definida e de maior tamanho. Por meio desse processo subprodutos de beneficiamento de resíduos sólidos e finos de carvão convertem-se em um material de maior valor comercial [19].

O termo aglomeração é empregado para designar algumas operações aplicadas a materiais de granulometria fina para transformá-los em corpos ou fragmentos coesos, por meio da ligação rígida das partículas entre si, através de mecanismos físicos e/ou químicos, conferindo-lhes tamanho e forma adequados à sua utilização. As tecnologias de aglomeração surgiram da necessidade de aproveitamento das frações mais finas do processamento de minérios, carvões ou ainda resíduos em geral. Os três principais processos de aglomeração de finos usados na indústria mineiro-metalúrgica são a pelotização, a sinterização e a briquetagem, cujos produtos respectivos são a pelota, o sínter e o briquete.

A briquetagem consiste na aplicação de pressão na mistura de finos de resíduos com objetivo de obter um corpo compacto de forma pré-definida. Neste processo são utilizados moldes ou matrizes de tamanho e forma convenientes e pode ser executado com auxílio ou não de aglutinantes, dependendo da matéria-prima empregada e das propriedades requeridas ao elemento constituído, denominado briquete.

Os aglutinantes são utilizados quando o material a ser aglomerado não possui resistência à compressão e ao impacto após a compactação. Em resíduos siderúrgicos normalmente é empregado um aglomerante composto de cal e melado de cana. Outros aglomerantes utilizados são o silicato de sódio ou ainda resíduos da indústria alimentícia ou papelreira, como o lignosulfonato ou soluções de dextrina. Os briquetes produzidos com aglutinantes são normalmente produzidos em baixas pressões, de maneira a evitar uma nova fragmentação das partículas. Para a produção de briquetes sem aglutinantes, necessita-se que as partículas estejam situadas o mais próximo possível uma das outras, compensando a ausência de uma substância aglutinante. Muitos materiais orgânicos e inorgânicos podem ser briquetados sem a utilização de aglutinantes.

Previamente à briquetagem, a operação de mistura dos materiais integrantes do briquete juntamente com o aglutinante deve ser cuidadosamente

executada de maneira que se obtenha uma uniformidade de composição e que a distribuição do aglutinante ocorra de forma homogênea em toda a superfície do material a ser briquetado. Estas precauções são necessárias à manutenção da qualidade do briquete e da resistência mecânica requerida aos processos onde será aplicado. Este fator se torna ainda mais relevante para o caso de briquetes autorredutores.

Em alguns casos, como em resíduos siderúrgicos contendo alto teor de ferro metálico ou onde o material a ser aglomerado apresenta resistência mecânica elevada, é possível utilizar-se a técnica de briquetagem a quente. O aquecimento das partículas pode atingir a temperatura de 1000°C, o que torna possível, por exemplo, a briquetagem de minério de ferro e pós gerados em altos-fornos. A temperatura superior limite de aquecimento é aquela capaz de fundir as partículas.

Algumas aplicações da briquetagem a quente são a reciclagem de resíduos metálicos produzidos em operações mecânicas, do tipo usinagem. Neste caso os resíduos são aquecidos previamente à cerca de 700 °C antes de serem briquetados num equipamento do tipo rolo a uma pressão de cerca de 3000kg/cm². Outra aplicação de interesse comercial é a produção do HBI, que é a fabricação á quente de briquetes de ferro esponja. Neste caso, aproveita-se o calor contido no ferro esponja na saída dos reatores de produção, previamente ajustado em cerca de 700 °C e efetua-se a briquetagem á quente do material. Esta operação de briquetagem tem a função de obter um material mais compacto e aglomerar os finos produzidos, reduzindo a reoxidação do material através da diminuição da superfície exposta à atmosfera.

3.3.1. Processo de Briquetagem

O processo de briquetagem pode ser executado em prensas de rolos, onde o material é alimentado continuamente entre dois rolos paralelos. Outras formas de briquetagem são a extrusão contínua em máquinas do tipo maromba ou ainda em prensas hidráulicas, onde os moldes são preenchidos intermitentemente.

A briquetagem através de prensas de rolos é o processo mais utilizado. Nesta técnica, a compressão do material se dá no espaço existente entre dois rolos, que montados um diante do outro, giram com velocidade de rotação igual e em

sentidos contrários. A pressão exercida sobre a mistura cresce de forma progressiva ao longo do percurso do material, atingindo o valor máximo no ponto de menor distância entre os rolos, caindo rapidamente após a liberação do aglomerado.

A forma das cavidades dos cilindros de compactação e por conseqüência do briquete, é função da briquetabilidade do material, ou seja, sua suscetibilidade à compactação. Outro fator importante na determinação da forma é a finalidade da utilização do briquete. A pressão exercida no material e da distância entre os rolos tem uma margem de ajuste mediante regulagem da distância entre os rolos e da taxa de alimentação do equipamento. Esta regulagem também é feita para compensar o desgaste contínuo dos rolos ao longo do tempo.

Depois de fabricados, os briquetes devem possuir as qualidades necessárias à sua aplicação, tais como: resistência à compressão, ao impacto, à abrasão e à penetração de água.

Essas características permitirão aos briquetes serem manuseados, estocados e resistirem a choques ou gradientes térmicos, mantendo sua integridade. Dentre os ensaios a serem realizados pode-se medir a resistência à compressão, à quedas e a gradientes de temperatura sem colapso, ou seja, temperatura de choque ou percentual de briquetes crepitados em determinada faixa de temperatura. Estes são fatores importantes a serem medidos em briquetes que terão por finalidade a inclusão na carga de fornos de fundição.

Nas figuras 9 (a/b) visualiza-se o esquema de funcionamento da briquetagem através de rolos e da forma das cavidades presentes nos rolos em um equipamento aberto.

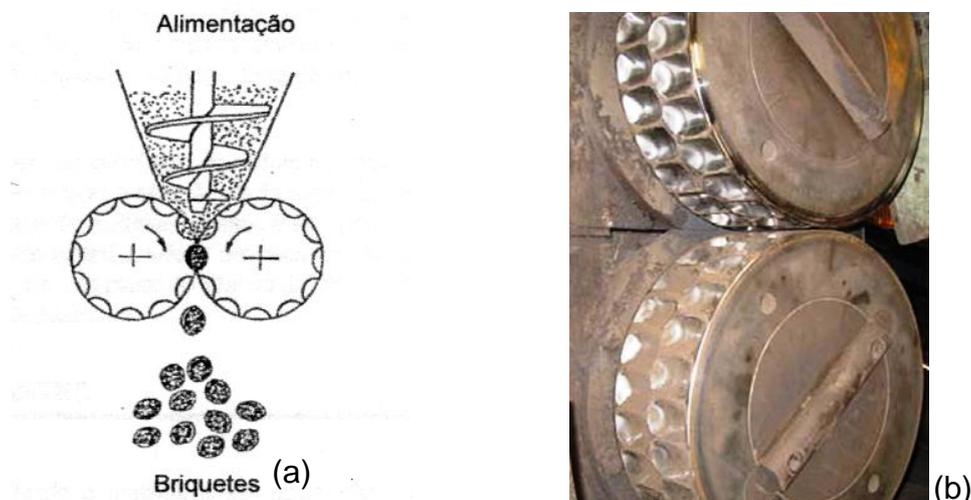


Figura 9 (a). Briquetagem através de rolos. Fonte: Carvalho e Brink (2004)
9 (b) Cavidade dos rolos de briquetagem. Fonte: Renova São Paulo

3.3.2. Briquetagem Com ligante

Os aglutinantes são utilizados quando o material a ser aglomerado não possui resistência à compressão e ao impacto, após a compactação. Além de permitirem uma maior adesão das partículas finas, os aglutinantes podem aumentar ou diminuir as propriedades coqueificantes do material a ser briquetado. Os aglutinantes podem ser divididos de acordo com sua função na mistura. Podem ser do tipo: matriz, filme ou aglutinantes químicos de acordo com a tabela a seguir:

Tabela 3: Exemplos de tipos diferentes de aglutinantes.

TIPO MATRIZ	TIPO FILME	AGLUTINANTES QUÍMICOS
Alcatrão	Água	Ca(OH) ₂ + molasses
Asfalto de petróleo	Silicato de sódio	Silicato de sódio + CO ₂
Cimento Portland	Lignosulfonatos	Epóxis

Os aglutinantes do tipo matriz provocam um embutimento das partículas dentro de uma fase substancialmente contínua, sendo as propriedades dos briquetes determinadas pelas características do aglutinante.

Os aglutinantes, do tipo filme, apresentam função parecida com as colas adesivas e dependem, principalmente, da evaporação da água ou de algum solvente para desenvolver uma maior resistência mecânica.

Os aglutinantes químicos podem ser utilizados tanto como matriz, como filme. Um bom exemplo são os aglutinantes químicos utilizados em areias de fundição. Alguns autores costumam utilizar outra forma de classificação, dividindo os aglutinantes em líquidos, sólidos, solúveis e insolúveis em água. A tabela 4 apresenta alguns exemplos de aglutinantes utilizados na briquetagem de partículas finas.

Tabela 4. Alguns aglutinantes utilizados na briquetagem de partículas finas.

Material	Aglutinante
Minério de ferro	Cal e melação
Cromita	Cal e melação
Fluorita	Cal, melação ou silicato de sódio
Bauxita	Cimento Portland
Carvão	Melação
Cobre	Lignosulfonatos
Magnesita	Lignosulfonatos
Areia de quartzo	Água e NaOH
Barita	Melação e black-ash

3.3.3. Briquetagem Sem ligante

Os briquetes produzidos com aglutinantes são normalmente comprimidos em baixas pressões, de modo a evitar uma nova fragmentação das partículas. Quando é necessário produzir briquetes sem aglutinantes, o sucesso da operação depende de como ocorreu a cominuição ou a deformação plástica das partículas. Tal dependência deve-se à necessidade das partículas estarem situadas o mais próximo possível uma das outras, compensando assim a ausência de uma substância aglutinante. Muitos materiais orgânicos e inorgânicos podem ser briquetados sem a utilização de aglutinantes. As forças, que mantêm esses cristais unidos, não são necessariamente fortes, nem específicas, devendo apenas fazer com que os cristais individuais estejam suficientemente próximos uns dos outros. As variáveis mais importantes na produção de briquetes sem aglutinantes são: umidade do material; capacidade de compressão das partículas; porosidade do briquete; tratamento térmico posterior à briquetagem.

Neste estudo abordaremos a briquetagem com aglutinantes do tipo matriz utilizando como aglutinante cimento portland.

3.3.4. Exemplos de briquetes

A seguir serão apresentados alguns tipos de briquetes de diferentes formas e composições.



Figura 10. Briquetes de carepa fabricados.

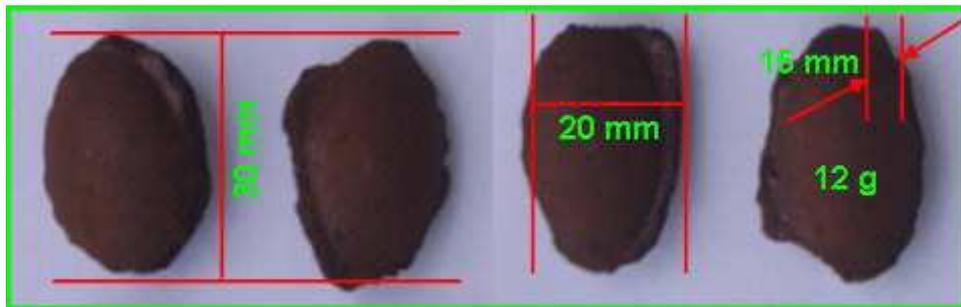


Figura 11. Briquetes utilizando Pó de despoeiramento.

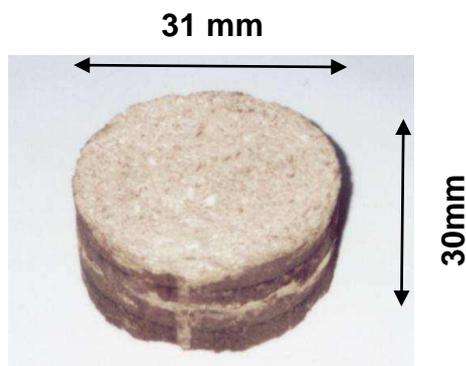


Figura 12. Briquete de prensa de pistão

4. MATERIAIS

A seguir, serão apresentados dentro deste item, os dados referentes às matérias-primas.

4.1. PÓ DE ACIARIA

O pó foi coletado de uma usina integrada proveniente de processos siderúrgicos do município de Marabá. A captação do pó de aciaria foi feita através de tubulações instalada, (unidades de despoejamento) na planta da aciaria que de maneira estratégica direciona os pós por meios de dutos até os containers onde foi depositado.

4.2. ASPECTO FÍSICO DO PÓ DE ACIARIA

Na figura 13 visualiza-se o aspecto físico do pó conforme foi coletado apresentando partículas inferiores a 100 μm .



Figura 13. Pó de aciaria

4.3. FINOS DE CARVÃO VEGETAL

O carvão vegetal utilizado neste estudo foi o mesmo da siderúrgica integrada. O carvão foi moído, em moinho de bolas, para se obter uma granulometria adequada ao processo de briquetagem (90% dos finos com

granulometria inferior a 100 mm). A análise imediata do carvão vegetal (fornecida pela empresa (SINOBRAS) é a seguinte: C fixo = 85%; cinzas = 13%; voláteis 2%.

4.4. CARACTERIZAÇÃO DOS FINOS DE CARVÃO VEGETAL

O aspecto dos finos de carvão coletados e após a cominuição pode ser observado na Figura 14, visualizando-se à esquerda os finos de carvão como coletados e à direita, após a cominuição.

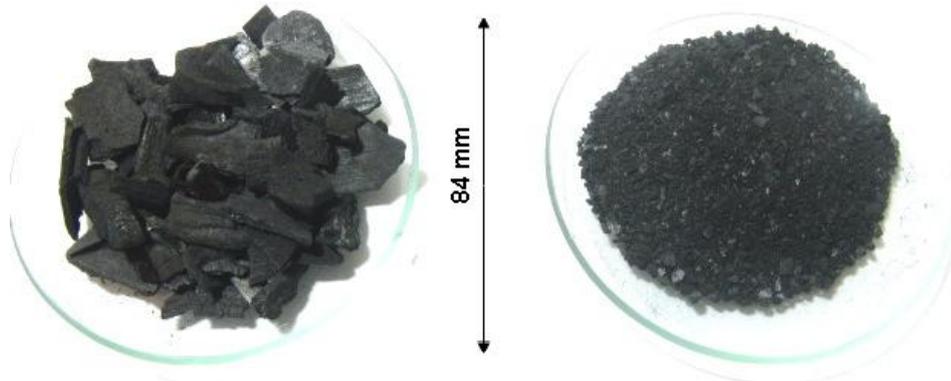


Figura 14. Finos de carvão vegetal coletados (à esquerda) e após cominuição

4.5. CIMENTO

Foi utilizado cimento Portland tipo ARI (alta resistência inicial). Tal matéria-prima possui, sem qualquer processamento, uma granulometria apta a briquetagem (100% dos finos com granulometria inferior a 100 mm). Conferindo a resistência apropriada para elaboração do briquete.

5. METODOLOGIA

5.1. ANÁLISES QUÍMICAS – ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

O espectrômetro de fluorescência de Raios-X é um instrumento que determina quantitativamente os elementos contidos em uma determinada amostra, através da aplicação de raios-x na superfície da amostra e posterior análise dos fluorescentes.

A determinação da composição química da(s) amostra(s) requerida(s) foi(ram) realizada(s) por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X, utilizando espectrômetro WDS seqüencial, modelo Axios Minerals da marca PANalytical, com tubo de raios-X cerâmico, anodo de ródio (Rh) e máximo nível de potência 2,4 KW.

5.2. ANÁLISES MINERALÓGICAS - DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

A técnica de difração de raios-x foi utilizada para a determinação das fases cristalinas onde estão presentes os elementos químicos. Quando o feixe de raios-X difrata em um cristal desconhecido, a medida do ângulo de difração do raio emergente pode elucidar a distância dos átomos no cristal e, conseqüentemente, a estrutura cristalina. Através do uso de um dispositivo capaz de detectar os raios difratados, pode-se traçar o desenho da rede cristalina, a forma da estrutura gerada pelo espalhamento que refletiu e difratou os raios-X, gerando o difratograma.

As análises foram realizadas em difratômetro de raios-x modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60), da PANalytical, com goniômetro PW3050/60 (Theta/Theta) e com tubo de raios-x cerâmico de anodo de Cu ($K\alpha_1$ 1,5406 Å), modelo PW3373/00, foco fino longo, 2200W, 60kv. O detector utilizado é do tipo RTMS, X'Celerator.

5.3. ANALISE MORFOLÓGICA (MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada para análise da morfologia e estrutura das partículas de pó de aciaria, em estudo, em um aparelho HITACHI TM-300 (Tabletap Microscope), no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise, da Universidade Federal do Pará Campus II Marabá.

5.4. ANÁLISE QUÍMICA VIA EDS

Tem como objetivo mapear, além da análise química semi-quantitativa e pontual dos elementos de interesse presentes nos briquetes. Mapeou se principalmente a presença de zinco, ferro e oxigênio, elementos de interesse no estudo para justificar a presença ou não destes elementos em função da temperatura de queima.

5.5. ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL E TERMOGRAVIMÉTRICA (DTG/TG)

A termogravimetria é uma técnica utilizada para medir as variações de massa de uma amostra durante o aquecimento ou resfriamento ou quando mantida a uma temperatura específica. Os principais itens incluídos nessa técnica incluem: evaporação, sublimação, decomposição, oxidação, redução, adsorção e dessorção de gás.

5.6. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR ESPALHAMENTO DE LASER VIA SECA

A granulometria dos materiais é um parâmetro fundamental para o desenvolvimento de matérias primas e a correta aplicação da metodologia de processamento, tornando esta análise indispensável para a caracterização de materiais. Essa característica é também um indicativo de qualidade de processo do material fornecido.

Através desta análise, determinamos a distribuição granulométrica de matérias primas, seu tamanho médio e desvios, que podem influenciar no ritmo de

produção de um alto-forno, forno elétrico de redução ou na capacidade de um sistema de carregamento de qualquer processo siderúrgico.

O equipamento utilizado para as análises de distribuição de tamanho de partículas foi da marca Beckman Coulter, modelo LS13320, com o módulo ULM (Universal Liquid Module). Para as análises via seca foi utilizado o módulo tornado DPS (Dry Powder System) que permite análises na faixa de 0,4 a 2000 μm . Na Figura 15, tem-se uma vista frontal do equipamento.



Figura 15. Equipamento Beckman Coulter LS13320 com o módulo Tornado DPS.

5.7. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Ensaio utilizado para determinar a resistência do briquete aos esforços compressivos, durante a sua estocagem. No ensaio, o briquete é submetido à pressão contínua e progressiva até que o mesmo frature. A resistência à compressão é um parâmetro bastante significativo na avaliação da resistência do briquete ao manuseio, empilhamento, condições de trabalho, entre outros. Uma resistência de $3,57 \text{ kg/cm}^2$ é considerada como um alvo a ser alcançado durante a produção dos briquetes [20].

5.8. RESISTÊNCIA À AÇÃO DA ÁGUA

Consiste na avaliação do ganho de massa obtido pelo briquete, após a imersão em um recipiente com água. É comum determinar a variação do peso, ao longo do tempo. Essa informação é muito importante para os casos em que os briquetes são estocados em ambientes externos.

5.9. RESISTÊNCIA À ABRASÃO

Consiste na avaliação da degradação física sofrida por um briquete durante o seu transporte. Alguns pesquisadores avaliam a resistência à abrasão, quantificando a perda de peso de um briquete, devido à geração de partículas com tamanho inferior a 3,3 mm, após 15 min de peneiramento em peneirador vibratório do tipo Ro-Tap (Figura 13).

Os parâmetros de avaliação são semelhantes ao ensaio de resistência ao impacto, sendo que o briquete é considerado de excelente qualidade, quando menos de 5% das partículas do seu peso inicial apresentam tamanho inferior à malha teste após o ensaio. Outros ensaios, baseados nas normas do antigo Bureau of Mines (Estados Unidos), utilizam uma peneira de abertura de 4,7 mm e um tempo de peneiramento de 10 min, com peneirador vibratório, também, do tipo *ro-tap*. Os critérios de avaliação são semelhantes ao descrito anteriormente. Quando a perda em peso na malha teste é superior a 15%, o briquete é considerado de péssima qualidade ^[20].



Figura 13: Peneirador vibratório, do tipo ro-tap, utilizado nos ensaios de resistência à abrasão.

Castelões e Campos^[21] utilizaram outra forma de avaliar a resistência à abrasão de briquetes de barita, procurando trabalhar em condições próximas àquelas utilizadas nos fornos rotativos das indústrias. Os pesquisadores colocaram os briquetes em um tambor rotativo, com velocidade de 30 rpm, durante um período de 2 h, onde a peneira, com abertura de 4,8 mm, é usada para avaliar a perda em peso.

5.10. DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE REAL

Trata-se de um dos parâmetros mais importantes para avaliar a qualidade do briquete. Pode ser determinado pelo quociente entre o peso do briquete e o volume, obtido a partir de suas dimensões. Outra forma de determinação do volume, consiste no método clássico de medir o volume deslocado pelo briquete, quando o mesmo é imerso em um líquido.

5.11. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS BRIQUETES^[22]

- ✓ Densidade aparente (D_{ap}) [%]: é o quociente do peso seco do material pelo volume aparente. Dado por:

$$D_{ap} = \frac{P_s}{P_u - p_i} l(x100) \quad (1)$$

P_s = peso do corpo de prova seco
 P_u = peso do corpo de prova úmido
 P_i = peso do corpo de prova imerso
 L = densidade do líquido usado

- ✓ Absorção de água (AA) [%]: exprime a relação entre a massa de líquido absorvida pelo corpo-de-prova saturado de líquido e o peso do corpo de prova seco:

$$AA = \frac{P_u - P_s}{P_s} (x100) \quad (2)$$

P_s = peso do corpo de prova seco
 P_u = peso do corpo de prova úmido

- ✓ Porosidade aparente (PA): é a relação entre o volume de poros abertos do corpo-de-prova e o volume aparente do mesmo:

$$PA = \frac{P_u - P_s}{P_u - P_i} (x100) \quad (3)$$

Ps = peso do corpo de prova seco
 Pu = peso do corpo de prova úmido
 Pi = peso do corpo de prova imerso

- ✓ Retração linear de secagem e de queima (ΔL) [%]: é a relação entre o comprimento inicial do corpo-de-prova verde e o comprimento após a queima:

$$\% \Delta L_s = \frac{L_o - L_i}{L_o} x 100$$

Lo = comprimento do corpo quando sai do molde
 Li = comprimento, após queima

- ✓ Módulo de ruptura à compressão (σ_u): é a máxima tensão que o material pode suportar; essa máxima tensão pré determinada dividindo-se a carga máxima pela área inicial do corpo-de-prova.

$$\sigma_u = \frac{P}{S_0} = \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot D_0^2}$$

5.12. CONFORMAÇÃO DOS BRIQUETES

Utilizando uma matriz cilíndrica de aço com diâmetro igual a 30 mm os briquetes foram confeccionados numa prensa hidráulica manual MARCON. Com dimensões, aproximadamente de 30-31 mm de diâmetro e altura entre 9-10 mm. A pressão aplicada de 3 tf/cm² o equivalente á 29,41 MPa.

5.13. METODOLOGIA PARA A CONFECÇÃO DOS BRIQUETES AUTORREDUTORES

Para a confecção dos briquetes autorredutores foi necessário um estudo preliminar de modo a estabelecer os principais critérios a serem adotados. Em função da prática corrente, custo industrial e dado da literatura optou-se pela utilização do cimento Portland tipo ARI (alta resistência inicial) como agente de união das partículas do briquete. A proporção do ligante foi estabelecida a partir das proporções usuais, sendo adaptadas em função de pré-testes durante a confecção

dos briquetes. A Figura 14 apresenta o fluxograma da metodologia experimental adotada para a confecção dos briquetes autorredutores.

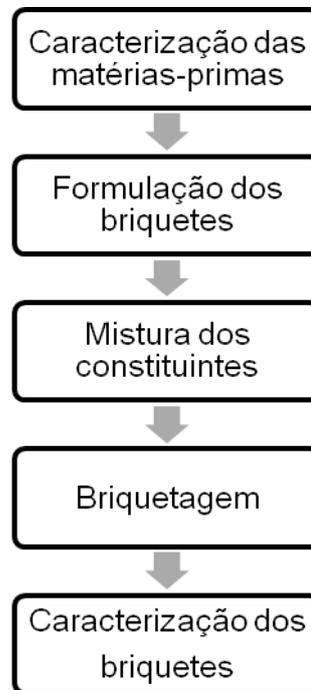


Figura 14. Fluxograma da metodologia de confecção dos briquetes.

O objetivo central foi desenvolver o briquete com a maior concentração possível do pó de aciaria para o melhor aproveitamento do ferro contido no mesmo. Várias formulações foram testadas até encontrar a concentração apropriada para o desenvolvimento do briquete em estudo. A formulação ideal encontrada foi à seguinte:

Tabela 5: Composição das misturas ensaiadas (% em massa)

Pó de aciaria	Carvão (Vegetal)	Cimento
80%	10%	10%

*Os briquetes possuem 07 g em massa

5.14. REDUÇÃO DOS BRIQUETES SIDERÚRGICOS

A redução dos briquetes foi realizado sob um resfriamento lento, no estado sólido. Utilizou-se um forno tipo mufla de resistência elétrica admitindo os seguintes ciclos de queima C1 e C2 conforme as tabelas 6 e 7 . Os briquetes foram

confeccionados e prensados com auxílio de uma matriz diametral e com uma prensa hidráulica no laboratório de materiais cerâmicos

Tabela 6: Ciclo térmico 1

Temp. (° C)	700	800	900	1000
Tempo (min)	30	30	30	30

Obs.: O procedimento experimental consistia em levar os briquetes da temperatura ambiente até 700, 800, 900 e 1000 °C, permanecendo por 30 minutos em cada temperatura.

Tabela 7: Ciclo térmico 2

Temp. (° C)	700	800	900	1000
Tempo (min)	60	60	60	60

Obs.: O procedimento experimental consistia em levar os briquetes da temperatura ambiente até 700, 800, 900 e 1000 °C, permanecendo por 60 minutos em cada temperatura .

5.14.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS BRIQUETES DO ESTUDO

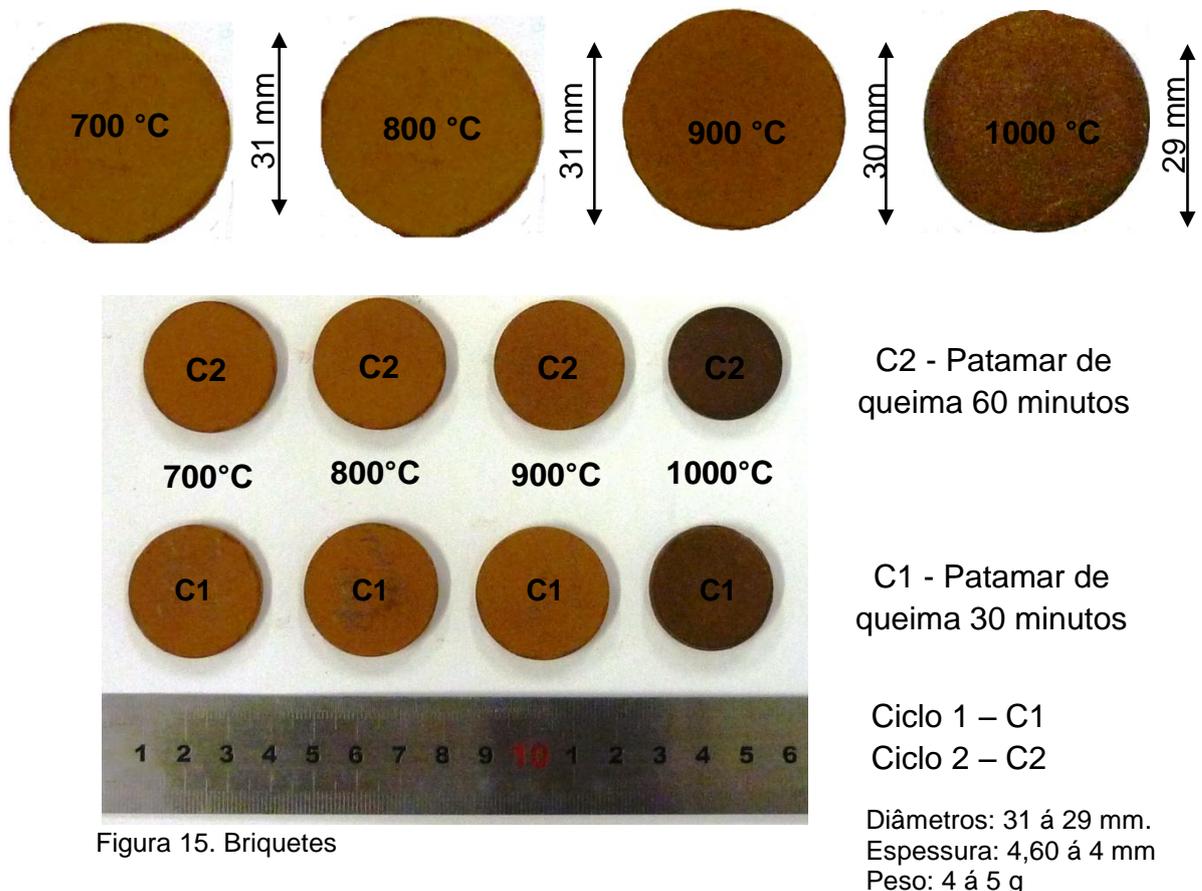


Figura 15. Briquetes

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados a seguir os resultados referentes aos ensaios de caracterização do pó de aciaria e dos finos de carvão vegetal, principais matérias-primas do briquete.

6.1. ANÁLISE QUÍMICA

A Tabela 8 apresenta a análise química elementar do resíduo através da técnica de fluorescência de raios-X. Os resultados da composição química mostram o principal constituinte do pó de aciaria em estudo é o ferro (Fe), com o percentual de 45,78% o qual é o elemento de principal interesse nesse estudo.

Tabela 8: Composição química elementar do pó de aciaria estudado

Elemento	% em massa
SiO ₂	5,06
Al ₂ O ₃	1,44
Fe₂O₃	45,78
TiO ₂	0,11
MnO	1,44
MgO	3,16
CaO	7,02
K ₂ O	2,19
Na ₂ O	10,84
P ₂ O ₅	0,26
PbO	0,87
ZnO	9,09
Cl	0,95

6.2. ANÁLISE MINERALÓGICA

A Figura 16. Mostra os resultados da análise mineralógica realizada na amostra do pó de aciaria.

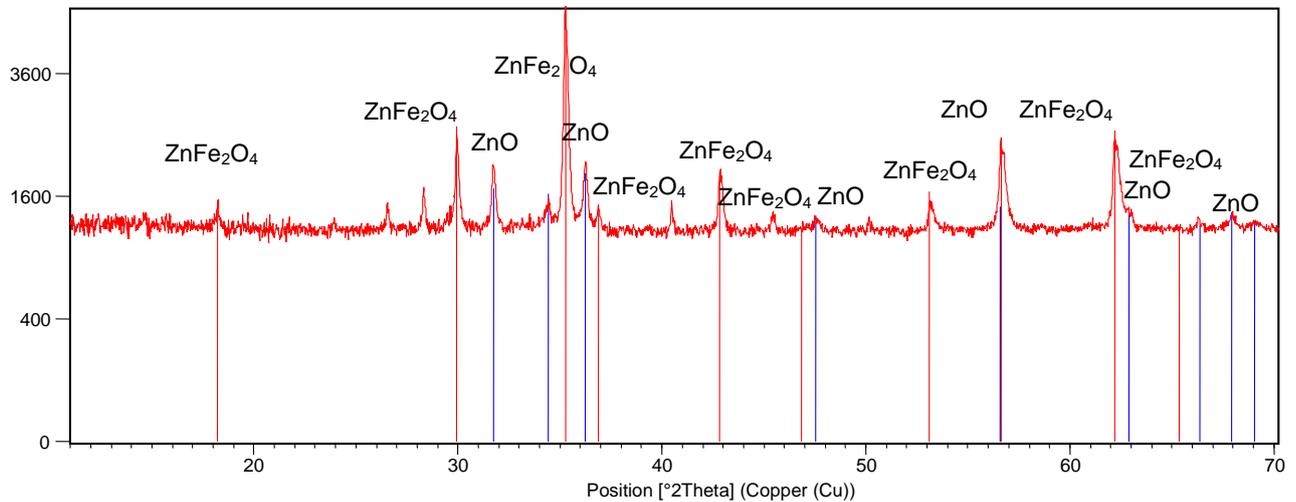


Figura 16. Difratoagrama de raios X o pó de aciaria elétrica – PAE.

Entre os minerais encontrados na análise mineralógica do resíduo, alguns pertencem ao grupo dos espinélios, tais como a franklinita ($ZnFe_2O_4$), representada pelos traços vermelhos. E adicionalmente, a segunda fase mais abundante foi o de ZnO (Zincita) correspondente aos traços azuis. Esta fase de Zn , a princípio, faz sentido com a presença de um espinélio de ($ZnFe_2O_4$). A franklinita e a Zincita são os minerais em maior abundância no pó de aciaria estudado.

6.3. ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL E TERMOGRAVIMÉTRICA (DTA/TG)

A Figura 17 apresenta os resultados das análises térmicas em atmosfera oxidante para a amostra de pó de aciaria elétrica.

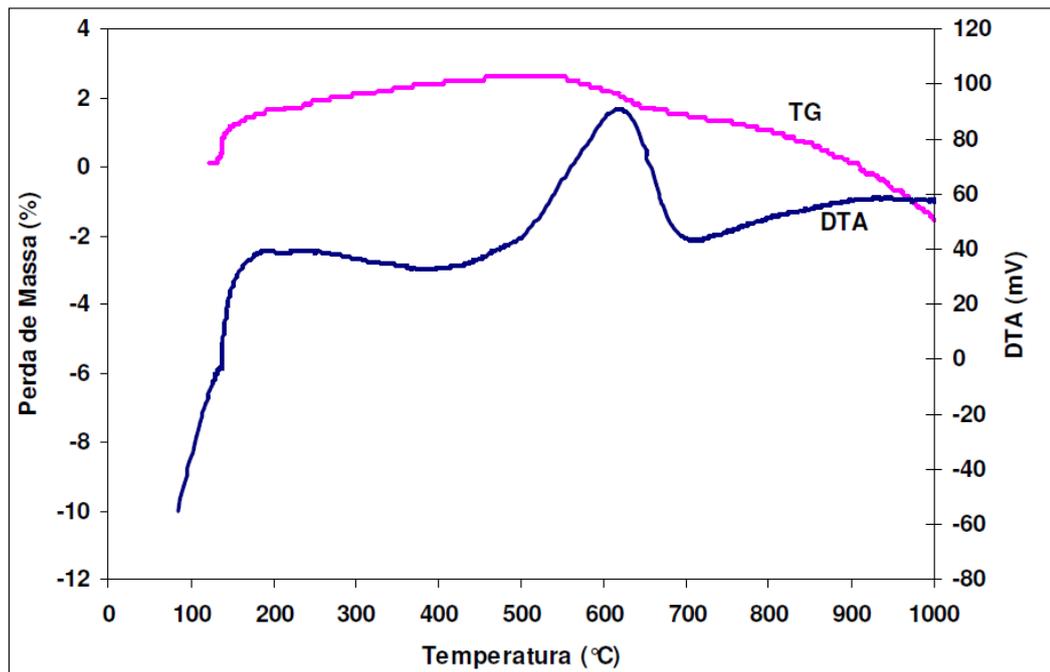


Figura 17. Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) do pó de aciaria em atmosfera oxidante.

Observa-se, pela Figura 17, que entre 150°C e 200°C ocorreu uma perda de massa, devida provavelmente à evolução da água da amostra.

Entre 400 °C e 700 °C, ocorreram novas perdas de massa, devidas, provavelmente, à oxidação do ferro.

Acima de 700 °C, observou-se mais um leve estágio de perda de massa, que pode ser devido à decomposição de pequenas quantidades de carbonatos presentes no resíduo ou à volatilização do material condensado da amostra.

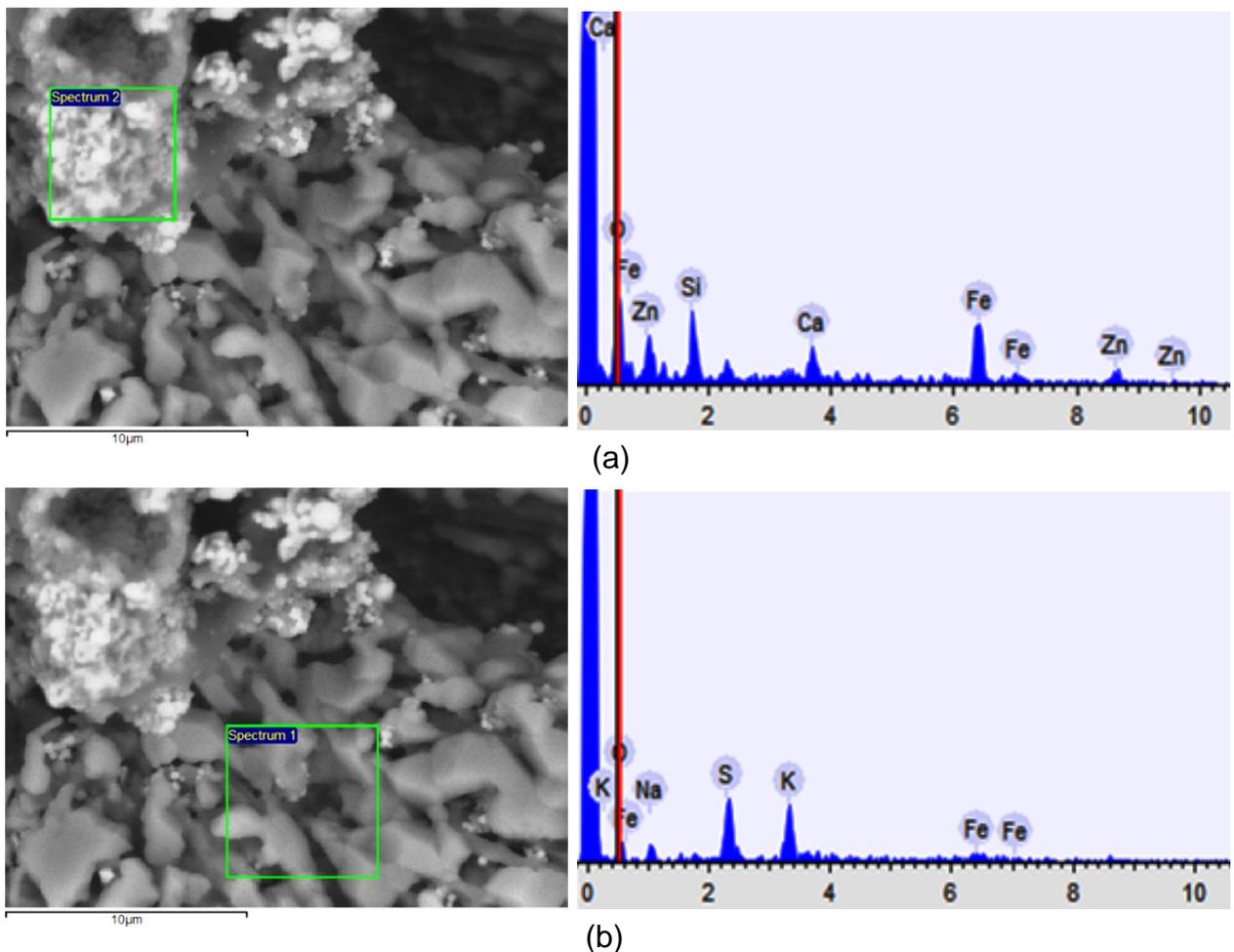
Conforme foi constatado na análise mineralógica do resíduo, o zinco está presente, na grande maioria, sob a forma de franklinita. Não foi constatada na análise térmica a volatilização de Zn, que ocorre a partir de 900°C, e nem a sublimação de óxido de zinco, pois esta inicia em torno de 1800 °C.

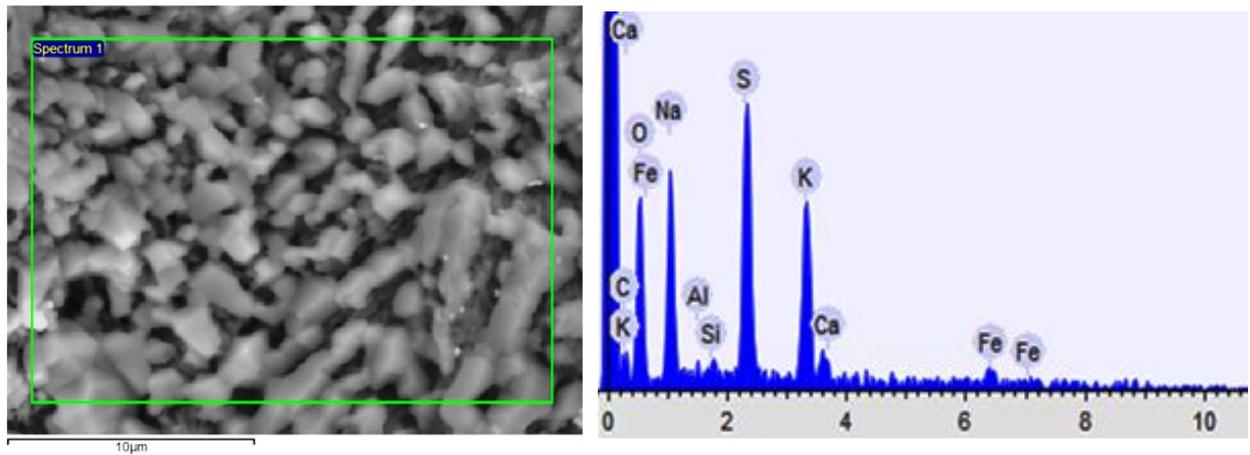
Pode-se também observar pela Figura 17 que a amostra de pó de aciaria apresentou uma significativa perda de massa total, em torno de 50% até 1000 °C.

6.4. ANÁLISE MORFOLÓGICA POR (MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA MEV E EDS)

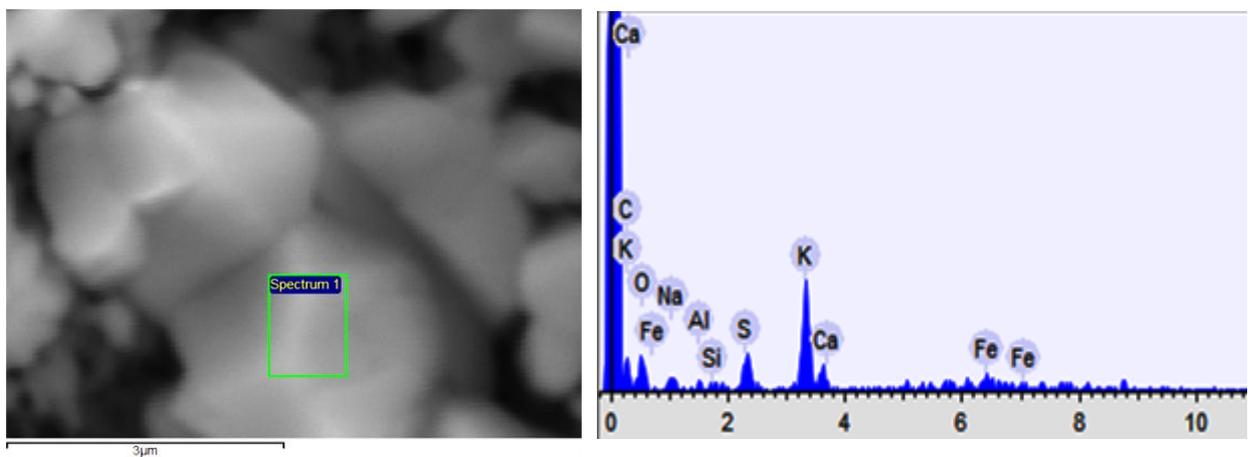
Devido à natureza do pó, que apresentava uma composição química variada e complexa, análises por MEV e EDS foram realizadas para as diferentes

partículas contidas no resíduo. De acordo com as Figuras 18 (a/b/c/d), respectivamente nota-se que a morfologia predominante das partículas de pó de aciaria elétrica é esferoidal irregular, morfologia esta condizente com o principal mecanismo de formação deste material particulado, que ocorre pela ejeção de partículas tanto da escória como do metal líquido. Análises semi - quantitativas da Figura 18(a/b/c/d) e pontuais destas partículas de pó de aciaria por EDS foram realizadas em várias microrregiões. Estes espectros mostram a presença de potássio, oxigênio, sódio, silício, zinco, alumínio, carbono, enxofre, cálcio, zinco e ferro. Os elementos identificados por EDS confirmam de forma qualitativa a composição química do resíduo, apresentada na Tabela 8, e a composição mineralógica, mostrada na Figura 18.





(c)



(d)

Figura 15 (a/b/c/d). Imagem de partículas de pó de aciaria obtidas em MEV.

Uma morfologia aglomerada do briquete pode ser observada na Figura 19, com a presença de pequenas partículas recobrendo umas sobre as outras.

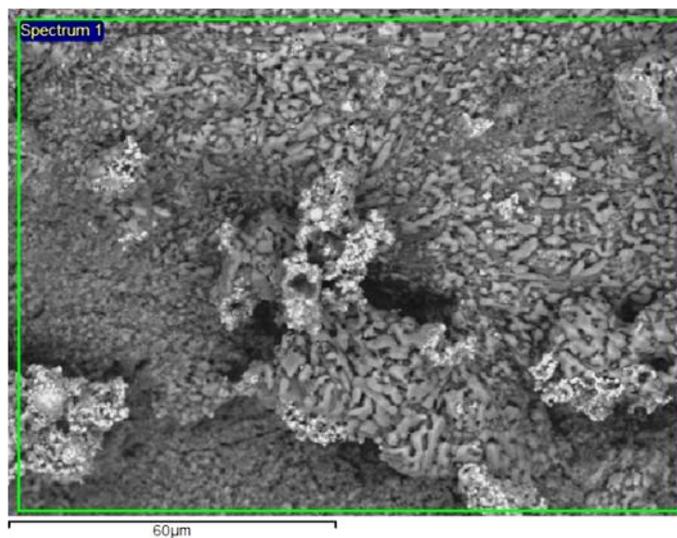


Figura 16. MEV de pó de aciaria

6.5. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Os resultados da distribuição de tamanho de partículas em relação ao diâmetro das mesmas, para pó de aciaria, estão apresentados na Figura 20.

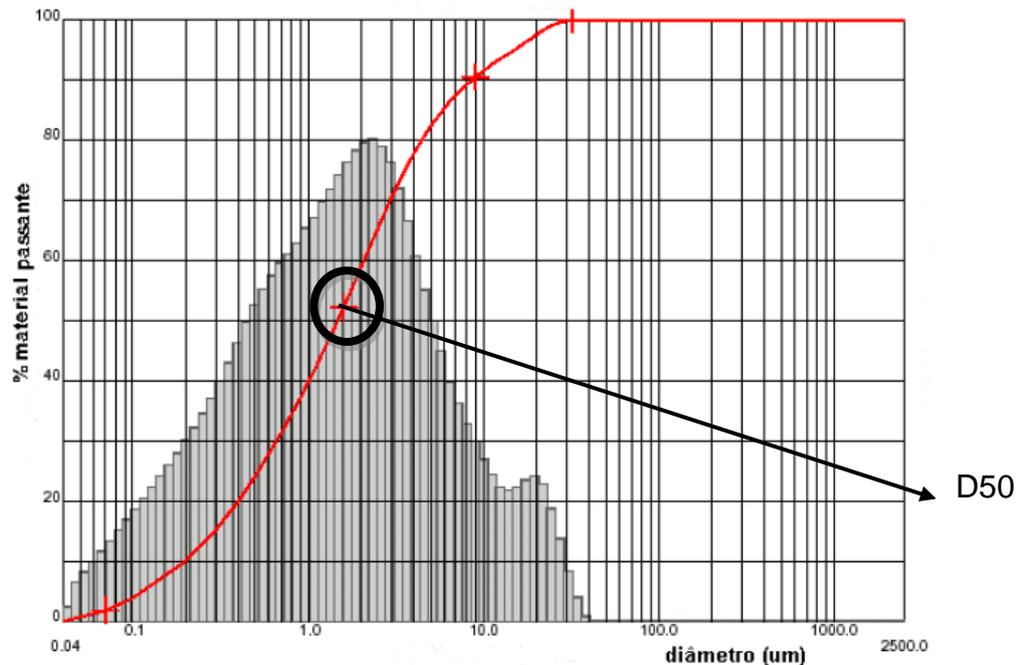


Figura 20. Distribuição granulométrica de pó de aciaria.

Esta distribuição granulométrica mostra que o resíduo é muito fino, com D50 igual a 1,99 μm e Dmédio de 3,25 μm . Mesmo assim, devido ao estado aglomerado das partículas mais finas de pó de aciaria, o tamanho médio das mesmas pode ser ainda menor do que os valores apresentados nesta análise.

Esta baixa granulometria do resíduo favorece sua utilização como matéria-prima secundária na fabricação de briquete, pois tem como vantagem a eliminação da etapa de moagem e ganhos em energia elétrica.

Os resultados da análise granulométrica dos finos de carvão vegetal coletados e após cominuição podem ser observados nas Tabelas 09 e 10, respectivamente.

Tabela 9. (a) Análise granulométrica dos finos de carvão vegetal. (b) Análise granulométrica dos finos de carvão vegetal cominuidos.

Escala Tyler	Abertura (mm)	Finos de Carvão (%) passante	Escala Tyler	Abertura (mm)	Finos de Carvão (%) passante
270	0,053	0,5	270	0,053	4,94
200	0,074	1,02	200	0,074	7,69
100	0,149	2,02	150	0,105	15,15
60	0,25	4,92	100	0,149	19,87
48	0,297	7,32	65	0,21	28,57
35	0,42	9,32	48	0,297	39,47
20	0,84	11,92	35	0,42	55,89
9	2	18,15	28	0,59	70,76
4	4,75	44,91	20	0,84	86,22
1/4	6,35	59,03	14	1,41	97,94
5/8	15	100	12	1,68	100

(a)

(b)

Após o ensaio, verificou-se na análise dos dados constantes das Tabelas 09 e 10 o ajuste granulométrico promovido pela cominuição. O material cominuído teve sensível melhora do estado físico em função da finalidade de sua utilização, ocorrendo maior concentração do carvão cominuído nas faixas granulométricas menores (menor que 0,297mm) em comparação com os finos de carvão antes do beneficiamento.

Encontram-se na Figura 21 as curvas de distribuição granulométrica dos finos de carvão vegetal coletados e do material após sua cominuição em moinho de bolas. Pode-se observar o ponto D50 destas amostras, indicando para os finos de carvão que metade das partículas tem granulometria menor que 5,4 mm e a outra metade possui tamanhos entre 5,40 e 15 mm. Pode-se verificar também que os finos de carvão vegetal possuem um baixo percentual em granulometrias abaixo de 0,1 mm, indicando a necessidade de cominuição.

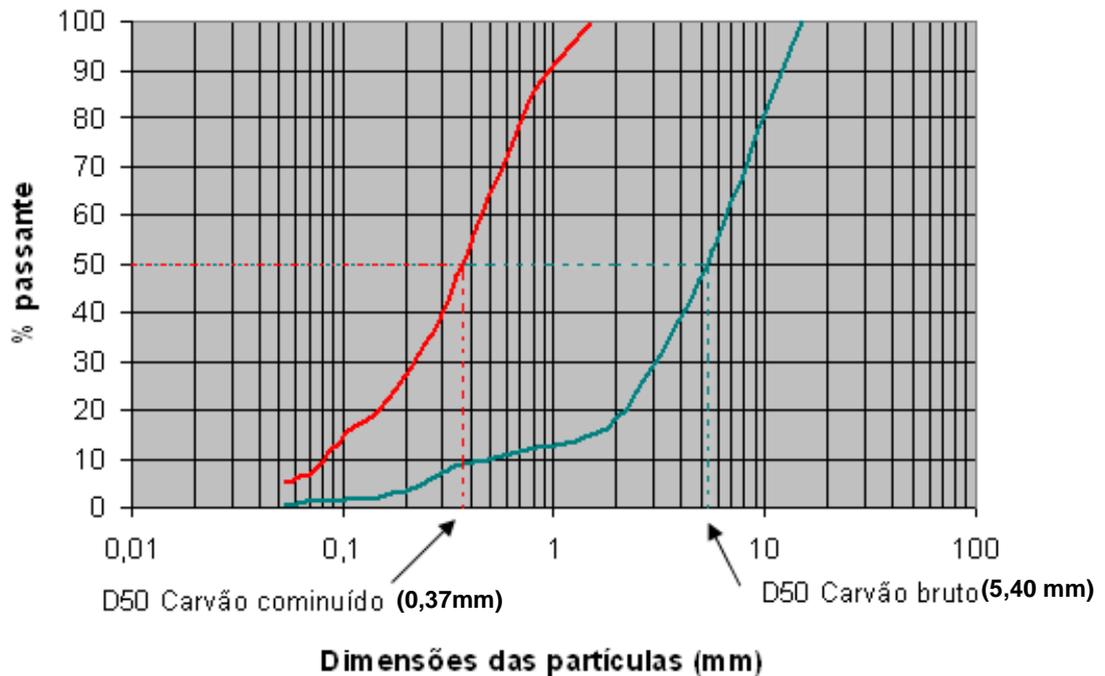


Figura 21. Curvas granulométricas dos finos de carvão vegetal, antes e após cominuição

Observa-se que os finos de carvão cominuídos a metade da amostra tem tamanhos menores que 0,37 mm. Também verifica-se que cerca de 90% da amostra possui tamanhos menores que 1,0 mm. A aplicação deste resíduo como agente de redução carbotérmica em briquetes autorredutores deverá ter sua cinética favorecida mediante esta operação prévia de ajuste de granulometria.

6.6. CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA SINTERIZADOS

Os resultados obtidos nos ensaios para caracterização das propriedades tecnológicas dos briquetes sinterizados nas temperaturas de 700°C, 800°C, 900°C e 1000°C, com ciclos distintos de queima C1 com 30 minutos, C2 com 60 minutos. São apresentados e discutidos neste item.

6.6.1. ABSORÇÃO DE ÁGUA E POROSIDADE APARENTE

As Figuras 22(a/b) apresentam os resultados obtidos, respectivamente, para absorção de água e porosidade aparente, das amostras ensaiadas ciclo de queima 1 e ciclo de queima 2 em função da temperatura de queima.

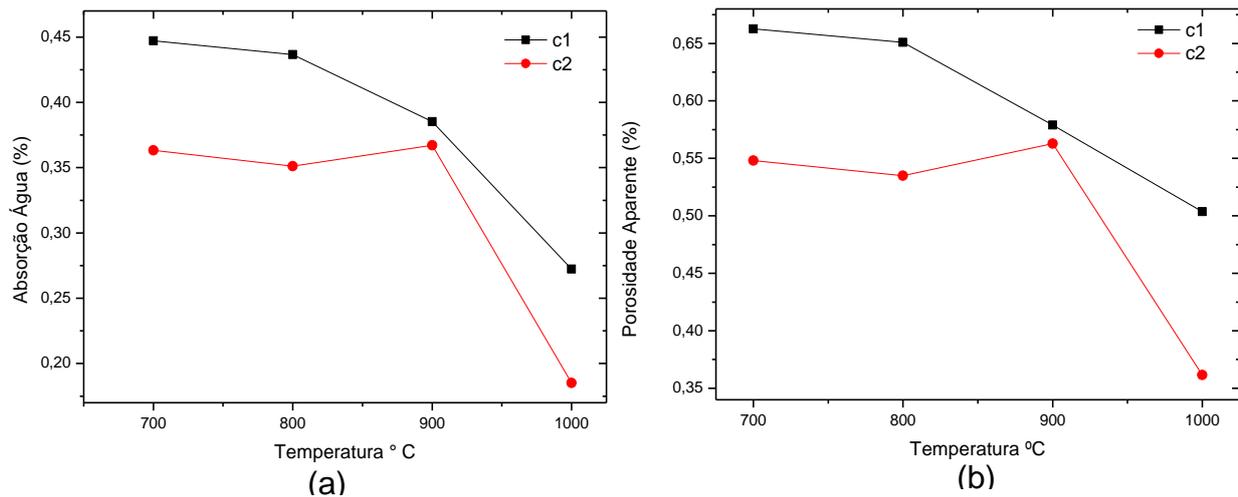


Figura 22(a/b). (a) Absorção de Água, (b) Porosidade Aparente

Através da Figura 26(a/b) observa-se uma diminuição da absorção de água com o aumento da temperatura de queima com destaque para o decréscimo da absorção de água é mais acentuado na temperatura de 1000°C. A porosidade aparente variou semelhante à absorção de água.

Os resultados mostraram uma relação direta da diminuição da porosidade e absorção de água para temperaturas crescentes de queima do material, este comportamento é devido ao aumento da temperatura, o qual permite maiores transformações físico-químicas, influenciando no comportamento do material quanto a estas propriedades, como também na sua densificação, como resultado de uma melhor sinterização/vitrificação.

6.6.2. Resultados das Propriedades Tecnológicas

Os resultados médios obtidos para a densidade aparente, retração linear e módulo de ruptura a flexão dos corpos-de-prova sinterizados nos dois ciclos de temperatura C1 e C2 podem ser observado nas Figura 23(a/b) e 24 respectivamente

Netas é possível verificar o aumento da densidade aparente e retração linear para ambos os ciclos estudados. Este comportamento foi verificado em ambos os ciclos de queima c1 e c2, como era de se esperar.

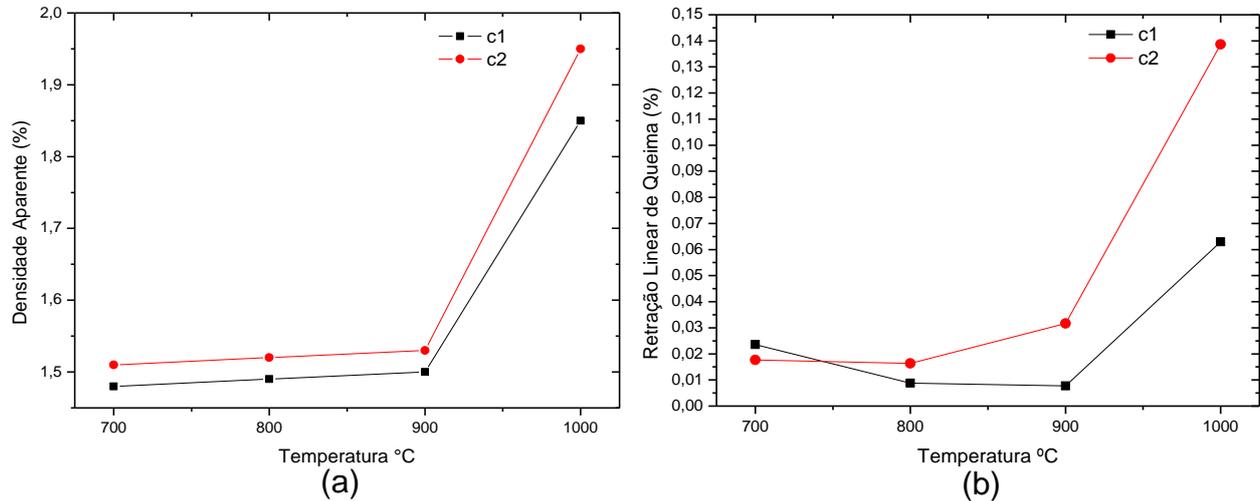


Figura 23(a/b). Densidade Aparente, Retração Linear de Queima

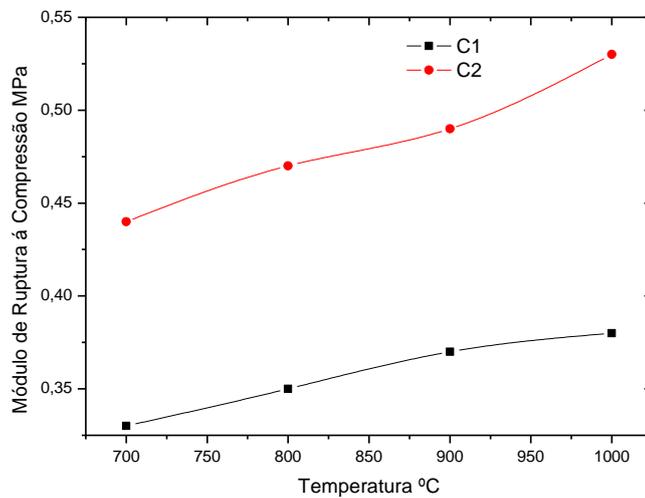


Figura 24. Módulo de ruptura a flexão em função da temperatura

Pela análise da Figura 23(a/b) constata-se que tanto a densidade aparente como a retração linear aumentam conforme a temperatura em que o material é queimado.

Os resultados de densidade aparente e retração linear estão associados à densificação das amostras com a sinterização crescente, em função da queima. As

curvas da Figura 24 mostraram que o C2 foi que apresentou maior módulo de ruptura a flexão Isso se deve ao processo de densificação do briquete.

6.6.3. Curvas de Gresificação

A Figura 25(C1/C2) apresenta as curvas de gresificação dos briquetes estudados. A curva de gresificação é a representação gráfica simultânea das variações da absorção de água (AA) e retração linear (RL) da peça com a temperatura de queima. Assim, tendo-se claramente estabelecido a faixa de AA desejada e a variação de tamanho admissível no produto final, pode-se usar a curva de gresificação para identificar a temperatura na qual essas características são alcançadas. Além disso, a curva de gresificação nos permite avaliar a tolerância da massa a variações de temperatura e condições de processamento, e, portanto pode ser de grande utilidade como um instrumento de controle de qualidade. Nesse sentido, a curva de gresificação também pode ser utilizada como uma ferramenta para monitorar possíveis variações da composição da massa provocadas por variações das características entre diferentes lotes de uma mesma matéria-prima e/ou por desvios na dosagem, para que se possa tomar as ações corretivas necessárias. [26-27]

De modo geral a faixa de temperatura adequada de acordo com o experimento está na faixa de 950 °C, de acordo com o ciclo de queima 2 do estudo que apresentou uma densificação e concentração significativa do ferro.

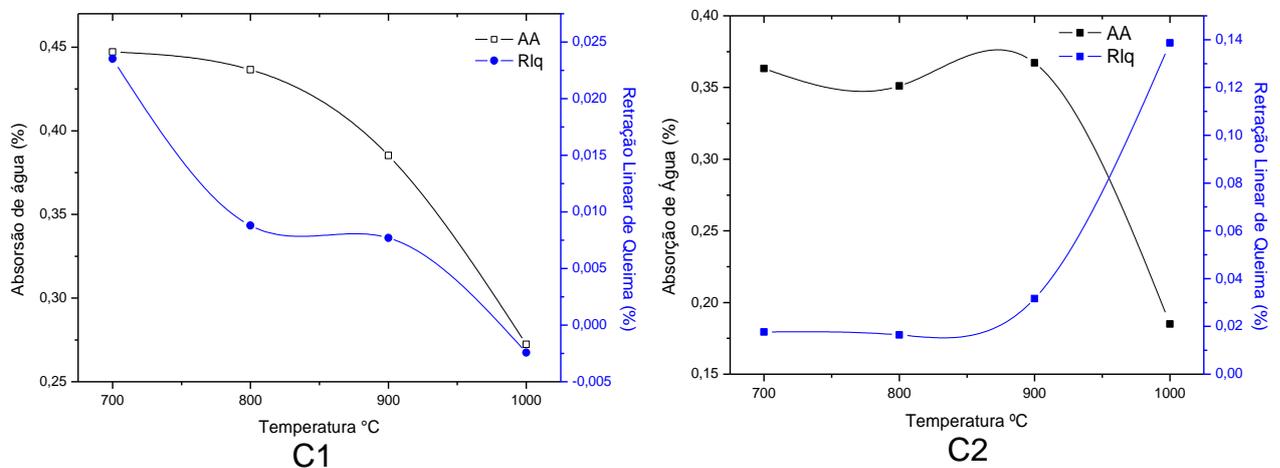


Figura 25 (C1/C2). Curvas de gresificação das amostras

6.6.4. Densidade Real e Teste de Abrasão dos Briquetes

Para a determinação da densidade real do briquete foi utilizada a metodologia da proveta onde calcula-se a densidade a partir da relação entre massa do briquete e o volume deslocado. O teste de abrasão avalia a resistência à abrasão, quantificando a perda de peso de um briquete, devido à geração de partículas com tamanho inferior a 3,3 mm, após 15 min de peneiramento em peneirador vibratório [25]. Para a realização do teste de abrasão foram testados 500 g de briquetes. Nas tabelas a seguir os resultados da média da densidade real e abrasão dos briquetes:

Tabela 11. Média densidade real do briquete

Média densidade real do briquete ciclo 1	Média densidade real do briquete ciclo 2
$d_{\text{méd}} = 0,98 \text{ g/ml}$	$d_{\text{méd}} = 2,04 \text{ g/ml}$

Foram utilizados 30 corpos de prova para determinação da média da densidade real dos briquetes. O ciclo 2 foi quem apresentou maior densidade, o que caracteriza a maior caracterização do ferro contido no mesmo.

Tabela 10. Abrasão dos briquetes

Abrasão ciclo 1		Abrasão ciclo 2	
Massa inicial	Massa final	Massa inicial	Massa final
500 g	496,2 g	500 g	498,1 g

Após o teste de abrasão de acordo com a tabela 12 constatou-se que o ciclo 2 obteve um resultado significativo com perda inferior a 5 % que de acordo com Carvalho [25], apresentou uma boa qualidade, certificando assim o desenvolvimento do briquete em estudo.

7. CONCLUSÕES

Com base nos resultados experimentais obtidos na presente pesquisa e nas discussões realizadas ao longo do corpo do trabalho, pode-se concluir que:

1. Os estudos de análises químicas por fluorescência de raios-X comprovaram que é possível aproveitar certa de 40 % do ferro contido no pó de aciaria em forma de briquetes, em vez de descartá-lo.
2. O pó de aciaria apresenta uma granulometria adequada para aglomeração sem necessidade de beneficiamento prévio resultando ganho de energia na cadeia produtiva.
3. É uma possibilidade de desenvolvimento sustentável:

O reaproveitamento na cadeia produtiva minimizando os possíveis danos ambientais.

Os briquetes autorredutores desenvolvidos com pó de aciaria e finos de carvão vegetal apresentaram boa resposta qualitativa significativa, não se verificando a ocorrência significativa de crepitação e inchamento catastrófico.

Os finos de carvão vegetal oferecem propriedades químicas e físicas adequadas para sua utilização como agente de redução na confecção de briquetes autorredutores de óxidos de ferro, uma vez convenientemente preparados.

A temperatura ideal de acordo com o estudo para a produção de briquetes autorredutores é de 950 °C.

REFERÊNCIAS

- [1] ARAÚJO, L.A. **Manual de Siderurgia**, vol 1 – produção. Editora Arte & Ciência, São Paulo, 1997, 470 pg.
- [2] CAMPOS, V.F., **Fundamentos da Redução Direta de Minério de Ferro** – Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalúrgica/UFMG, 1978, 63 p.
- [3] JUNIOR, J.H.N., D'ABREU, J.C. – TecnoRed Trios Convertendo custos em lucro, in: **XXXV Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas**, set. 2005, Florianópolis, SC, Brasil.
- [4] VIEIRA, A.T.O., NASCIMENTO, F.A.S., ECHTERNACHT, J.H., OLIVEIRA, J.R., BENTES, M.A.G., FUSCO, P.R., REIS, W.L.C., - Reciclagem Industrial de Resíduos Siderúrgicos através do Processamento de Pelotas Auto-redutoras., in: **XXXVII Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas**, set 2007, Salvador- BA.
- [5] ANDRADE, M.L.; CUNHA, L.M.; GANDRA, G. A Ascensão das Mini-mills no Cenário Siderúrgico Mundial – BNDES Setorial, Rio de Janeiro, nº 12 pg 51-76, set 2000.
- [6] RIZZO, E.M.S. **Introdução aos Processos Siderúrgicos**, ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2005, 150 p.
- [7] ZANONI, C – Análise Energética em um forno elétrico a arco – Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004, 161 pgs
- [8] FERREIRA, Oscar L. **O uso adequado do aço e sua contribuição na racionalização da construção**. Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado. UFRJ - FAU, 1998.

[8] D'ABREU, J.C.; MOURÃO, M. B.; COSTA, P. H. C.; JÚNIOR, J. H. N.; MARCHEZE, E. **Curso de Auto-redução Carbo-metalotérmica – 7º Simpósio Brasil-Japão**, 2008.

[9] JÚNIOR, J. H. N. **Contribuição ao estudo da cinética de redução de briquetes autoredutores**. 2002.143 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

[10] BATISTA, E. A gestão de Resíduos e co-produtos na Arcelos Mittal Tubarão, 2008, in: **2º Wokshop de Sustentabilidade do Setor Siderúrgico Brasileiro**, disponível: http://www.abmbrasil.com.br/cim/download/20080327_2workshopagregado_EltonBatista.pdf.

[11] TARCIZO, A. Gestão de Resíduos portadores de Ferro e Carbono, 2008, in: **2º Wokshop de Sustentabilidade do Setor Siderúrgico Brasileiro**, disponível em: http://www.abmbrasil.com.br/cim/download/20080327_2workshopagregado_AndreTarcizo.pdf.

[12] PAIXÃO, J.M., Aglomeração à frio de resíduos minero-metalúrgicos, 2008, in: **2º Wokshop de Sustentabilidade do Setor Siderúrgico Brasileiro**, disponível em : http://www.abmbrasil.com.br/cim/download/20080327_2workshopagregado_JoséMárioPaixão.pdf.

[13] KURUNOV, I. F., TITOV, V. N., BOL'SHAKOVA O. G., - Analysis of the Efficiency of Alternative Methods for recycling Iron-bearing Metallic Wastes., in **Metallurgist**, nº 11, p 39- 42, 2006.

[14] BERUTTI, F.A. **Briquetagem de Finos de Ferro-Esponja Para Utilização em Aciaria Elétrica**, Dissertação de Mestrado, PPGEMM - UFRGS, 1989.

[15] DANILOV, E.V. Economical Method of Recycling Metallurgical and Mill Scale by the Sitfer Technology in an Arc Steelmaking Furnace, in **Metallurgist**, vol. 47, nos. 5, pg. 49-50, may 2003, New York.

- [16] HEPUT, T.; SOCALICI, A.; ARDELEAN, E.; ARDELEAN M. Environment Ecological Process in Hunedoara Area Through Reinsertion in Economic Circuit of Scrap and Pulverous Waste. In: Journal of Engineering Annals of Faculty of Engineering Hunedoara, Romania, volume 7, fascículo 3, pp299. 2009.
- [17] GODINSKII, N. A.; KUSHNAREV, N. N.; YAKHSHUK, D. S.; KOTENEV V.I.; BARSUKOVA, E.Y. Use of Iron-Carbon-Bearing Briquets in Eletric Steelmaking, in: **Metallurgist**, vol 47, no. 1 pp 43-45, jan, 2003.
- [18] KIRK, R. E.; OTHMER, D. F. *Encyclopedia of chemical technology*. 3th Ed. New York: Willey-Interscience, 1978. v. 13, p. 775-776.
- [19] ANTUNES, R.C. Briquetagem de carvão. In: PENEDO, W.R. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. V1. P197-206.
- [20] CASTELÕES, R.C.M. – Estudos de briquetagem em escala piloto de finos produzidos na Cia. Metalúrgica Barbará – CETEM, Relatório Técnico, RT20/95, set., 1995.
- [21] CASTELÕES, R.C.M; CAMPOS, A.R. – Briquetagem de finos de barita da Bahia - CETEM, CT 02/75, nov., 1994
- [22] Norma ABNT. **Materiais refratários densos conformados**: determinação da densidade de massa aparente, porosidade aparente, absorção e densidade aparente da parte sólida. NBR 6220. Rio de Janeiro, 1997. 2 p.
- [23] Hagni, A. M.; Hagni, R. D.; Demars, C.: Mineralogical Characteristics of Electric Arc Furnace Dusts. JOM, April, p. 28-30, 1991.
- [24] Vargas, A. S.; Masuero, A. B.; Vilela, A. C.F.: Estudo Microestrutural e Determinação do Calor de Hidratação em Pastas de Cimento Portland com Pó de Aciaria Elétrica. Ambiente Construído, v. 4, n. 2, pp. 7-18, Abril/Junho, 2004.
- [25] DE CARVALHO, E. A., BRINCK, V. Briquetagem: **Comunicação Técnica elaborada para a 4ª Edição do Livro de Tratamento de Minérios Pág. 613 a 636**. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2004-190-00.pdf>>. Acesso em 20 de maio de 2011.

[26] MELCHIADES, F. G.; QUINTEIRO, E. BOSCHI, O. A. A curva de gresificação: parte I. **Cerâmica Industrial**. v. 1, n. 04/05, p. 30-31. 1996.

[27] MELCHIADES, F. G.; QUINTEIRO, E.; BOSCHI, O. A. A curva de gresificação: parte II. **Cerâmica Industrial**. v. 2, n. 01/02, p. 23-26. 1997.

[28] Instituto Brasileiro de Siderurgia – IBS. Acesso em 03/06/2011, em: www.ibs.org.br.