

GUILHERME HUASKAR WITTÉE CARDOSO

**Infiltração de pelota de minério de ferro com material
reductor**

SÃO PAULO
2013

GUILHERME HUASKAR WITTÉE CARDOSO

**Infiltração de pelota de minério de ferro com material
redutor**

Trabalho de Formatura apresentado
à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo.

Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais

Orientador: Marcelo Breda Mourão

SÃO PAULO

2013

Eu dedico esse trabalho ao meu Orientador Professor Dr. M. B. Mourão, e
ao seu aluno de mestrado Alberto E.A. Nogueira que ajudou me nos
experimentos.
Também dedico esse trabalho a meu pai Mario H.V. Cardoso e a minha Mãe
Rosângela S.W. Cardoso e a meu irmão Mario V. W. Cardoso

Resumo

Geralmente pelotas e outros agregados auto redutores não podem ser endurecidos por sinterização, pois a sinterização resultaria na perda do material redutor. Este trabalho objetivou tornar pelotas de minério de ferro de alta porosidade em pelotas auto redutoras através da infiltração de hidrocarbonetos pesados como o alcatrão. Os resultados mostraram que para obter pelotas de alta porosidade com serragem, é necessário que o tamanho das mesmas seja de até 10 mm para evitar o esboroamento. Os resultados dos ensaios de auto redução demonstraram ser possível a auto redução por infiltração, porém não houve redução a ferro metálico devido ao teor de carbono fixo do alcatrão de hulha, o redutor utilizado experimentalmente, ser mais baixo que o estimado no início dos experimentos.

Abstract

Usually pellets and other self reducers aggregates can't be hardened by sintering because this process result in loss of reductant. This work aimed to make self-reducin iron ore pellets from high porosity iron ore pellets through infiltration of heavy hydrocarbons such as tar. The results showed that to obtain pellets of high porosity from sawdust, it is necessary that their size is up to 10mm to prevent raveling. The results of the reducing tests that can be demonstrated self reduction by infiltration, however there was no reduction to metallic iron, due to the carbon fixed content in coal tar be lower than estimated at the beginning of the experiments

Sumario

Introdução.....	1
Revisão Bibliográfica	2
Vantagens e desvantagens da auto redução.....	2
Processo tecnored.....	2
Processo Fastmet	3
Processo a carvão em forno rotativo	4
Pelotas de minério de ferro.....	5
Cinética a pelletização	5
Uso de aglomerantes hidratados	6
Obtenção de pelotas com alta porosidade.....	7
Redução da pelota	8
Materiais e métodos	11
Materiais.....	11
Métodos.....	12
Resultados experimentais.....	16
Primeiro lote de pelotas.....	16
Segundo lote de pelotas.....	17
Terceiro lote de pelotas.....	19
Quarto lote de pelotas.....	21
Determinação do carbono fixo do alcatrão de hulha.....	21
Conclusões.....	28
Bibliografia.....	29

1. Introdução

Nesse trabalho, objetiva-se a infiltração de pelotas de minério de ferro convencionais com material redutor, com a finalidade de torna-las auto redutoras. No entanto essas pelotas ditas convencionais serão produzidas de forma a ter sua porosidade aumentada para que elas possam conter todo o material necessário para redução.

O carvão mineral coqueificável é um insumo mineral o qual não é encontrado no Brasil, apenas ocorrências minerais que não tem qualidade metalúrgica. A obtenção de agregados auto redutores possui grande importância para a redução da dependência de carvão metalúrgico

No Departamento de Engenharia Metalúrgica da USP, estuda-se a obtenção de agregados auto redutores de minério de ferro, aglomerando o minério e o material carbônico sólido em pó a frio, que consiste em briquetes e pelotas auto redutoras.

Os briquetes são aglomerados sob pressão, o minério de ferro junto com o carvão mineral ou vegetal são pressionados de forma a obter resistência mecânica. Pelotas auto redutoras também são aglomerados de minério de ferro e carvão, mas essas adquirem resistência mecânica através de aglomerantes hidráulicos como o cimento

Pelotas auto redutoras geralmente apresentam baixa resistência mecânica pelo fato de não poder sinterizar o minério de ferro junto com o material redutor, pois isso consome o material redutor, e pelo fato de sua resistência mecânica depender de aglomerantes hidráulicos, essas pelotas perdem sua resistência em altas temperaturas, não atingindo portanto a resistência de 2500N necessários para que as mesmas possam ser utilizadas em alto fornos

2. Revisão bibliográfica

2.1 Vantagens e desvantagens da auto-redução

Atualmente a indústria siderúrgica utiliza o material redutor separadamente do minério de ferro. O material redutor mais utilizado atualmente na indústria siderúrgica é o carvão mineral coqueificável, pois o coque possui boa resistência mecânica em altas temperaturas. Carvão coqueificável não é encontrado no Brasil, sendo o preço desse susceptível as variações do mercado.

O carvão vegetal apresenta maior reatividade que o coque, assim como pode ser produzido com recursos nacionais, mas não apresenta boa resistência mecânica, assim como o carbono fixo é mais baixo que o do coque. Esse material é utilizado em fornos de cuba menores que os alto fornos, que admitem materiais de baixa resistência mecânica.

Varias linhas de pesquisa buscam obter um agregado com carvão vegetal com maior resistência especialmente onde o material reduzido e o material redutor fiquem juntos. Esses agregados facilitam a redução pela possibilidade da reação sólido-sólido, por ter maior área de contato entre os reagentes. Esses agregados podem ser briquetes ou pelotas auto redutores.

São também propostos ou mesmo empregados outros processos de redução de minério de ferro alternativos ao alto forno, e alguns deles são descritos a seguir.

2.2 Processo Tecnored

É um processo de redução de minério de ferro em cuba. Assim como os alto fornos, produz ferro gusa, porém com uma cuba bem menor que a dos alto fornos. Por se um equipamento menor, apresenta uma maior flexibilidade de operação e um menor investimento inicial para a operação que os fornos tradicionais.

Por possuir uma coluna de minérios bem menor que no tradicional processo das usinas integradas não é necessário que o minério ou material redutor apresente uma resistência mecânica tão elevada quanto a dos que são utilizados nos alto fornos, de modo que aceita uma gama maior de materiais redutores, minérios, e agregados auto redutores .

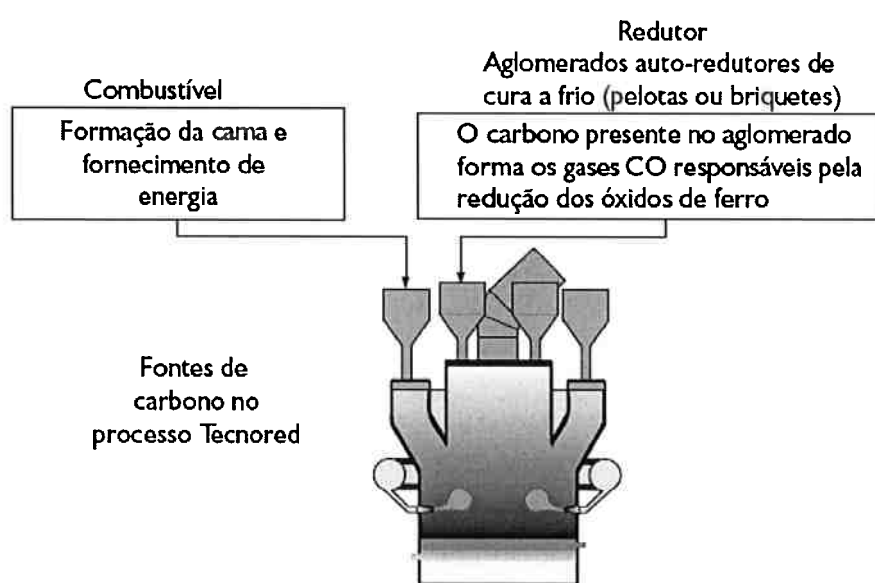


Fig2.1 Crôqui do Reator Tecnored ,[8]Flexibilidade de matérias Primas no Processo Tecnored pg 25.

2.3 Processo Fastmet

Trata-se de outro processo de redução direta, no qual pelotas ou briquetes auto redutores são depositados em um forno de soleira rotativa .As pelotas são empilhadas em camadas de 2 a 3 pelotas, de forma que não há solicitação mecânica das pelotas .

O forno é aquecido por carvão pulverizado ou gás natural a temperaturas entre 1250 e 1350°C. O tempo de residência da pelota é de 9 a 12 minutos .

Após a redução essas pelotas são briquetadas para que se torne matéria prima para produção de aço em forno de arco elétrico.

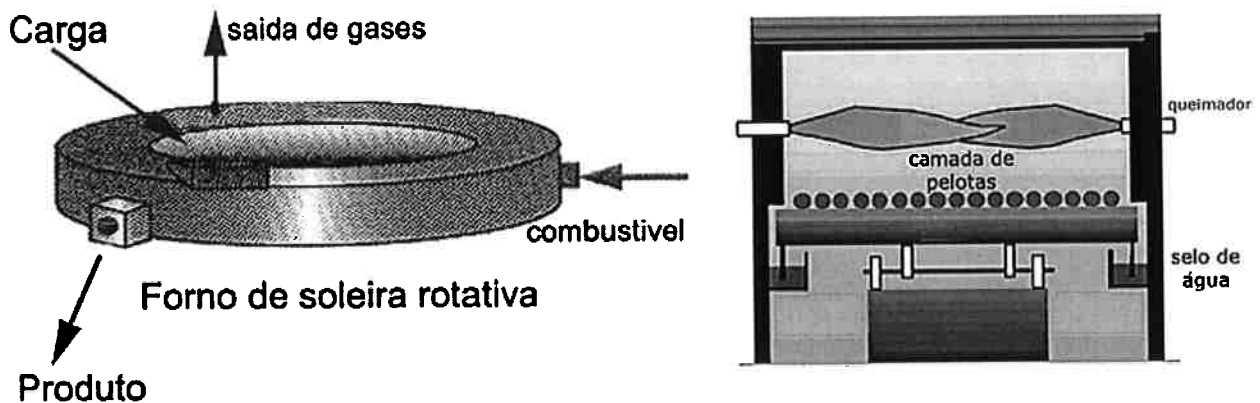


Fig2.2 Crôqui do Reator Fastmet [4] ,Notas da aula 08 de PMT 2409 de 2011 Slides 42 e 43.

2.4 Processo a carvão em forno rotativo.

Consiste em um processo no qual o minério de ferro e o carvão são reduzidos em um forno rotativo semelhante aos usados na produção de cimento. Um maçarico, no final do forno, fornece calor para as reações de formação do CO e da redução do minério de ferro.

Nesse processo o minério de ferro é reduzido em estado sólido, sem que ocorra a fusão. Assim como em outros processos de redução direta, os materiais processados nesse forno necessitam de uma resistência mecânica bem menor que nos altos fornos, permitindo maior flexibilidade quanto aos tipos de carga de minério de ferro e de material redutor. A principal desvantagem desse processo é quanto à formação de um anel de minério e escória no final do forno impedindo a movimentação da carga.

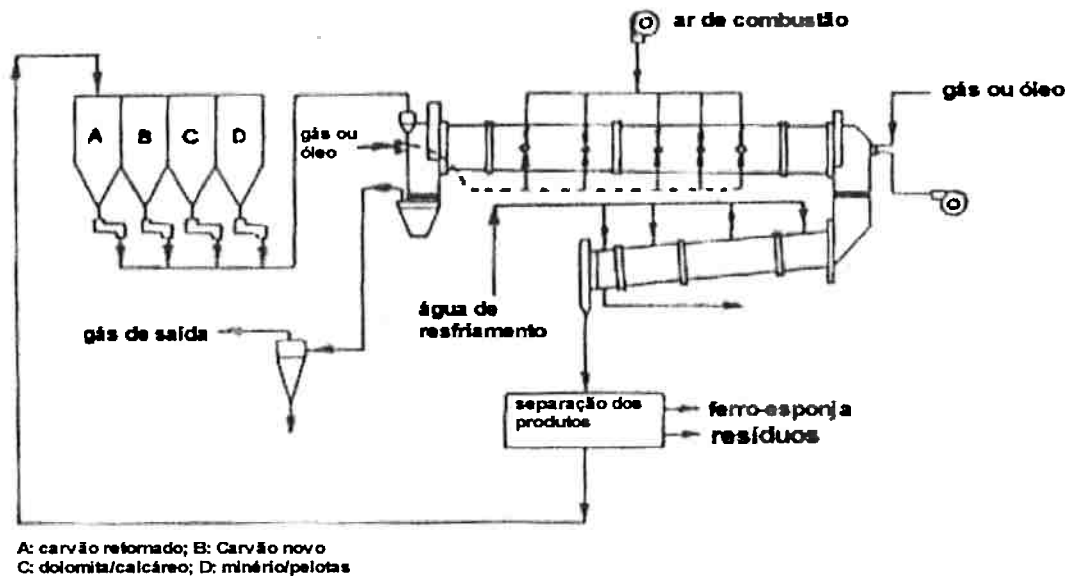


Fig2.3 Crôqui processo por forno rotativo a carvão [4], Notas da aula 08 de PMT 2409 de 2011 Slide 11.

2.5 Pelotas de minério de ferro.

O processo de pelletização foi desenvolvido por causa da menor disponibilidade de minérios granulados (31mm a 6,3mm) e a disponibilidade de finos que eram considerados rejeito da mineração. Esse processo de aglomeração de finos visa a utilização de material fino com granulometria menor que 0,15 mm que não pode ser utilizado diretamente no alto forno.

2.6 Cinética da pelletização.

Esse processo visa aglomerar minério de ferro através do rolamento do material em tambores ou discos rotativos. Água pulverizada é dispersada como gotículas de água no material seco.

A força de tensão superficial solido-liquido confere a pelota resistência a verde. Argilominerais como bentonita aumentam a tensão superficial e a resistência a verde da pelota

A formação da pelota começa com a nucleação, a gotícula de água aglutina as partículas em suspensão prendendo-as por forças capilares. Durante o crescimento esses núcleos começam a aderir o material pelletizável como também os núcleos começam a coalescer uns com os outros . Pelotas que atingiram o tamanho necessário são retiradas para que não cresçam sobre as menores ou consumam o material .

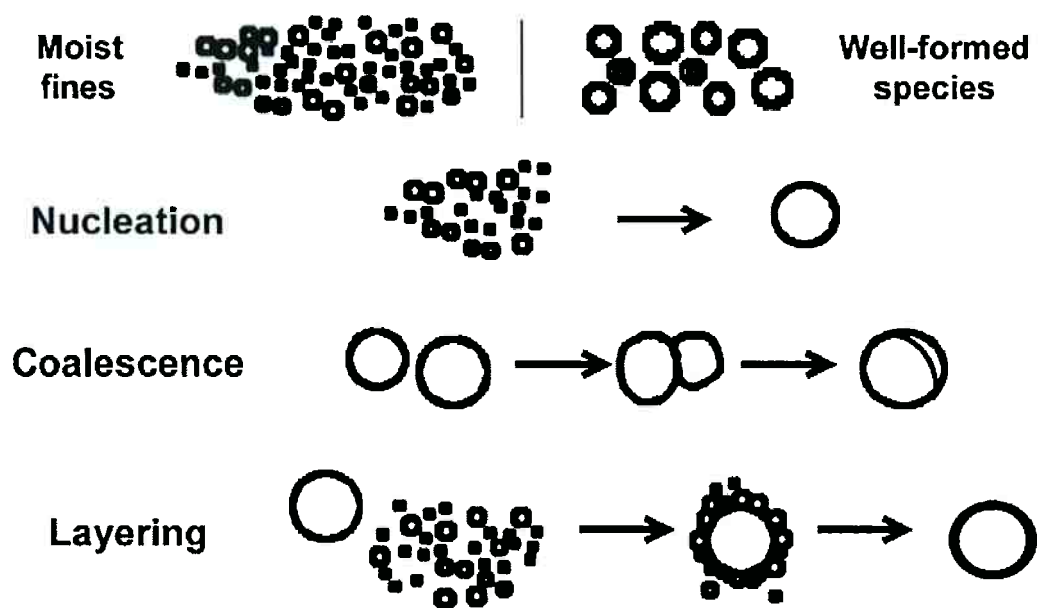


Fig2.4 Processo de Pelotização [9], *Investigation of the layering mechanism of agglomerate growth during drum pelletization.*

2.7 Uso de aglomerantes hidratados

Processos de sinterização se aplicados a pelotas auto redutoras, consumiriam o material redutor presente na pelota. Por isso Pelotas auto redutoras são endurecidas por processos de cura a frio ,que utiliza aglomerantes hidráulicos como o cimento. Porém as pelotas com cimento não apresentam boa resistência mecânica em altas temperaturas.

2.8 Obtenção de pelotas com alta porosidade

Para obtenção de pelotas de alta porosidade, é proposto adicionar serragem na mistura do *pellet feed* que irá se volatilizar durante o aquecimento.

A granulometria da serragem utilizada é menor que 0,149mm ou menor que 0,255mm. Na tabela abaixo vemos sequencia de fases da decomposição da madeira

FASE	TEMPERATURA (°C)	FENÔMENOS E PRODUTOS
I	até 200	- poucas reações importantes - perda de unidade - fase endotérmica
II	200 até 270-280	- aumento de reação e na eliminação de gases - a madeira passa para a cor marrom arroxeada - fase endotérmica
III	280 até 250 – 380	- importante fase de reações e grande eliminação de gases - composição de gases: centena de componentes químicos orgânicos (alguns recuperáveis) Ex: Ácido Acético, Metanol, Acetona, Fenóis, Aldeídos, Hidrocarbonetos, Alcatrões, etc. - o resíduo final dessa fase já é o carvão vegetal, mas que ainda apresenta compostos volatizáveis em sua estrutura - fase exotérmica
IV	380-500	- redução da saída de gases - o carvão vegetal passa a sofrer uma purificação na sua composição química com a eliminação do restante dos gases voláteis contendo H e O. O carvão torna-se mais rico em carbono em sua estrutura (carbono não volátilizável ou carbono fixo) - fase exotérmica
V	Acima de 500	- degradação do carvão - término da carbonização e início da gaseificação do carvão - fase exotérmica

Tab 2.1 faixas de temperatura durante a obtenção do carvão vegetal [5], Carvão e combustíveis.pdf notas de aula de PMT2403. 2012

Para calcular a porosidade primeiramente calcula-se a densidade aparente dos componentes sólidos da pelota, como o minério de ferro e a serragem, simplesmente colocando os materiais em uma proveta medido a massa e o volume e dividindo massa pesada pelo volume .

Como a porosidade normal de uma pelota é cerca de 30% e se deseja um porosidade maior , a porosidade é calculada pela formula abaixo :

$$P = \left(\frac{m_{pf}}{\rho_{pf}} \cdot 0,3 + \frac{m_{ser}}{\rho_{ser}} \cdot 1,0 \right) \div \left(\frac{m_{pf}}{\rho_{pf}} + \frac{m_{ser}}{\rho_{ser}} \right)$$

onde ρ_{pf} e ρ_{ser} são as densidades aparentes do minério e da serragem respectivamente e m_{pf} e m_{ser} são as massas de minério e serragem respectivamente

Na tabela 2.2 calcula-se a quantidade de carbono necessária de material redutor baseada nas quantidades estequiométricas e na fração de carbono fixo do alcatrão de hulha, que foi estimada em 80% .

Calculo da porosidade necessaria			
$Fe_2O_3 + 3 C + 3/2 O_2 \rightarrow Fe + 3 CO_2$			
160	36	112	132
(g) Fe_2O_3	(g) C	G (Fe)	
por volume (ua)			
32	50		
porosidade necessaria em fração de volume			
0,61			

Tab 2.2 Calculo da porosidade necessária para acumular todo o material infiltrado

2.10 Redução da pelota

Estudos com a redução de minério de ferro por agregados auto redutores foi trilhado por vários autores. Desde Baldwin em 1955 passando por Rao(1971) ,Fruehan (1977), Seaton et al (1983) até Mourão e Capocci (1996) sustentam que a redução ocorra pelos intermediários gasosos como CO/CO₂.

Experimentos realizados por esses autores mediram a fração de minério de ferro reduzida sob varias temperaturas .

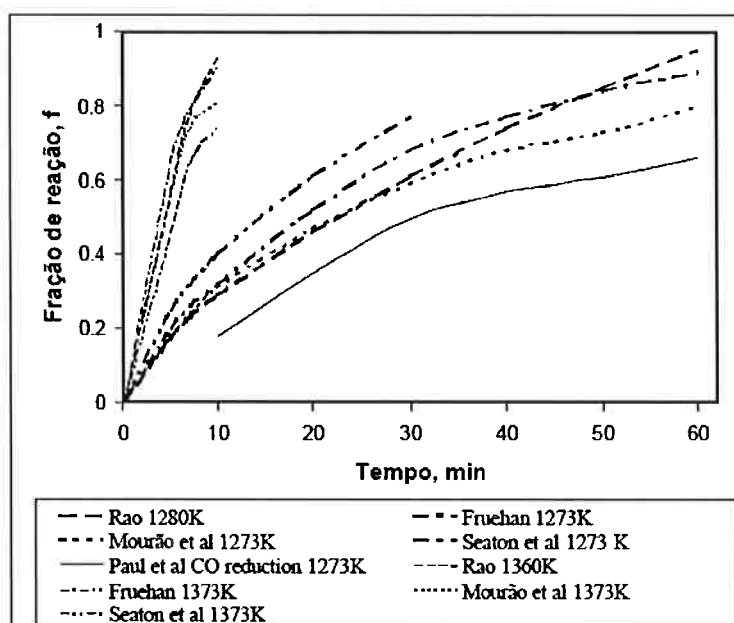


Fig 2.5 fração de minério de ferro reduzida em função do tempo em experimentos realizados por vários autores, [6] Projeto de pesquisa do Professor M. B. Mourão.

Aproximações feitas por Mourão em seu projeto de pesquisa [6] que calcula a fração reagida em função da energia de ativação. A energia de ativação calculada através da equação de Arrhenius a partir das curvas obtidas pelos experimentos dos autores estudados. A função que aproxima a fração reagida foi a seguinte :

$$f = 1 - \exp[-3.53 \times 10^8 \times t \times \exp(-29338.4/T)].$$

E a partir dessa equação pode se levantar as curvas calculadas da fração reduzida em função do tempo e da temperatura. Também pode se observar que a auto redução é favorecida se a temperatura for maior que 1373K ou 1100°C

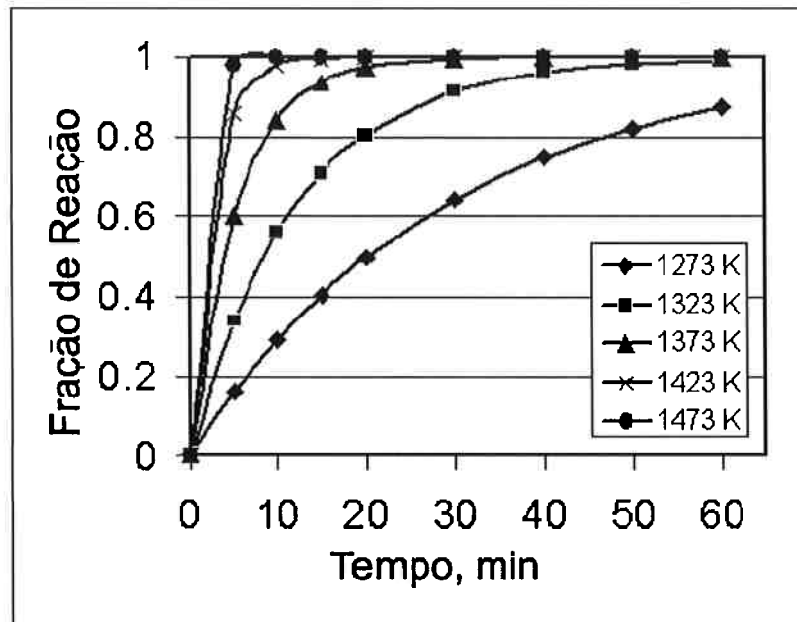
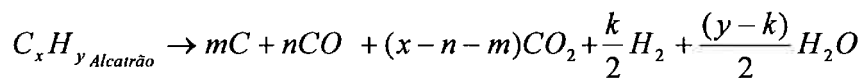
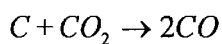
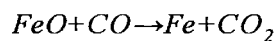
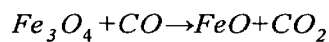
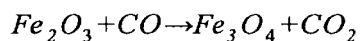


Fig 2.6 fração de minério de ferro reduzida em função do tempo calculada [6], Projeto de pesquisa do Professor M. B. Mourão.

Durante a redução da pelota, primeiramente o hidrocarboneto de cadeia longa tipo alcatrão tem que se decompor conforme a reação abaixo .



Durante a redução carbotérmica do minério de ferro as etapas são as seguintes :



Na reação de redução, a massa do minério é reduzida, mas se a redução não for completa pode não ser verificável a redução do minério de ferro. Wiskers de ferro metálico são possíveis de serem observados via microscopia eletrônica.

3. Materiais e métodos

3.1 Materiais

3.1.1 Pellet Feed

O minério de ferro utilizado foi um *pellet feed* fornecido pela Vale S.A.. A Tabela 3.1 apresenta a composição química do minério, fornecida pela mineradora.

Pellet Feed Vale: composição (%)	
Fe(t)	67,7
SiO ₂	0,67
AL ₂ O ₃	0,61
Cão	0,03
MgO	0,06
P	0,03
Mn	0,29
TiO ₂	0,04
perda por fogo	1,44

Tab 3.1 Composição do pellet feed usado nos experimentos , Vale S.A.

O Pellet feed usado tem granulometria menor que 0,147 mm de diâmetro

3.1.2 Serragem

A serragem utilizada na fabricação das pelotas, com o intuito de fornecer pelotas de alta porosidade, foi obtida como resíduo de serragem de madeira, com granulometria abaixo de 0,149mm no primeiro lote de pelotas e 0,255mm. No restante a densidade aparente da serragem e do minério foi obtida pela medida do volume em um tubo de ensaio e pesados na balança de precisão

calculo da densidade aparente 0,145mm		
	serragem	pellet feed
vol (mL)	40	39
Massa (g)	9,5	96,4
.d ap (g/cm ³)	0,238	2,47

Tab 3.2 Calculo da densidade aparente do pellet feed e da serragem de 0,145mm

3.1.3 Aglomerante

Utilizou se bentonita como aglomerante das pelotas,

3.1.4 Redutor

O alcatrão utilizado nos experimentos de infiltração é alcatrão mineral, da marca Vedacit. Seu principal componente é alcatrão de hulha

3.2 Métodos

3.2.1 Fabricação das pelotas

3.2.1.1 Secagem

Coloca se o pellet feed na estufa a cerca se 120 C por um dia para retirar a umidade do minério

3.2.1.2 Pelotização manual

No processo manual , toma se o minério e os outros componentes do material que se deseja trabalhar adiciona-se água até que a mistura fique com aspecto pastoso e em sequência molda-se no formato de pequenas esferas. Os

lotes 1,2 e 3 foram feitos pela pelotização manual , e cada lote tem sua composição específica.



Fig 3.1 Obtenção de pelotas de minério de ferro

3.2.1.4 Pelotização com o uso de Pelotizadora

Nesse processo de pelotização , coloca-se o material na cuba giratória e asperge-se a água para que as gotículas de água unam as partículas do material a ser pelotizado e comece a nucleação das pelotas e o respectivo crescimento. Para que se obtenha pelotas do tamanho desejado, seleciona-se através de peneiras. O tamanho característico do material considerado pelota é de aproximadamente 7 a 18 mm e de micro pelotas é de 4,5 a 7 mm .

3.2.2 Sinterização

No processo de queima ou sinterização da pelota, aquece-se a pelota no forno elétrico, que pode ser de câmara convencional como os da marca Brasimet disponíveis no laboratório do térreo, ou o Forno de poço do laboratório de moagem de alta energia.

3.2.3 Infiltração

Colocam-se as pelotas porosas em recipientes contendo piche de origem vegetal ou mineral ou alcatrão, e depois essas pelotas são submetidas ao vácuo por 15 minutos . Após esse procedimento retira-se as pelotas e coloca-se na estufa por 2 horas a 110 °C

3.2.4 Ensaios e caracterização

3.2.4.1 Embutimento

Depois de sinterizada a pelota e colocada em uma pastilha de material polimérico transparente e depois é cortada para se analisar no microscópio

3.2.4.2 Lixamento e polimento

Depois que a amostra foi embutida ela é lixada com lixa 300# , 600# e 1200# . Depois do lixamento as amostras são lavadas com água e álcool etílico , a após e realizado o polimento propriamente dito em politrizes com pasta de diamante de 6 , 3 e 1µm

3.2.4.3 Ensaio de redução

Colocam-se as pelotas a serem reduzidas em dois cadinhos contrapostos de forma que tenham poucas aberturas onde o oxigênio possa entrar e reoxidar a pelota , sendo cada um desses cadinhos tem cerca de 2 cm de diâmetro: depois aquece-se a pelota a cerca de 900 C no forno de poço do LMCC.



Fig 3.2 Forno de Poço do Laboratório Auto Redução e Fusão Redução

3.2.4.4 Teste de resistência mecânica

O teste de resistência da pelota consiste em um teste de compressão para medir a resistência a compressão da pelota.

3.2.4.5 Análise de área de superfície:

Consiste em fazer uma micrografia de uma secção da pelota e esquadrihar a micrografia, que pode ser de microscopia ótica ou eletrônica. Se o ponto cai no material, ele é contado como matriz, e se cai em espaço vazio é contabilizado como poro. A porosidade é calculada a partir da proporção de pontos que caem no poro e o número de pontos totais

3.2.4.6 Determinação do Carbono Fixo do Alcatrão de Hulha

Para determinar qual é o teor de carbono fixo do alcatrão de hulha, afere-se a massa do alcatrão antes e após o aquecimento.

O aquecimento foi efetuado em atmosfera de nitrogênio á taxa de aquecimento de 20°C por minuto , ate a liberação de fumos cessar ou a temperatura atingir 900°C

4 Resultados Experimentais

4.1 Produção do primeiro lote de pelotas.

Produziu-se manualmente as pelotas em quantidade e com as composições descritas na tabela 4.1 .Após a fabricação secou se as pelotas e queimou-as no forno Brasimet com a curva de temperatura descrita na figura 4.1 .

Composição massica e volumétrica do primeiro lote (granulometrias de 0,145mm)				
% m de serragem	massa de serragem	massa de pellet feed	massa Pellet e serragem	% v teórica de poros e de serragem*
0,0	0,0	50,0	50,0	30,0
1,1	0,6	49,5	50,0	37,4
2,0	1,0	49,0	50,0	42,4
4,0	2,0	48,6	50,6	51,1
6,0	3,0	47,6	50,6	57,8
9,1	4,6	45,6	50,2	65,7

Tab 4.1 composição de varias misturas de pelotas

Nem todas as pelotas após feitas resistiram ao manuseio após a secagem devido a baixa resistência a verde e apenas as pelotas da tabela 4.2 resistiram.

peso das pelotas do primeiro lote						
%m serragem	numero da pelota por composição e sua massa em (g)					
	1	2	3	4	5	6
0	7,52	6,25	5,94	3,78		
1,12	10,65					
3,99	7	8,38				
5,97	6,76	7,1	6,93	8,91	6,12	5,48
9,09	5,47	6,8	7,56	7	6,24	7,37

Tab 4.2 Pelotas que resistiram ao manuseio

Depois, essas pelotas foram queimadas com a curva de aquecimento da figura 4.1 e todas esboroaram como também ficaram quebradiças.

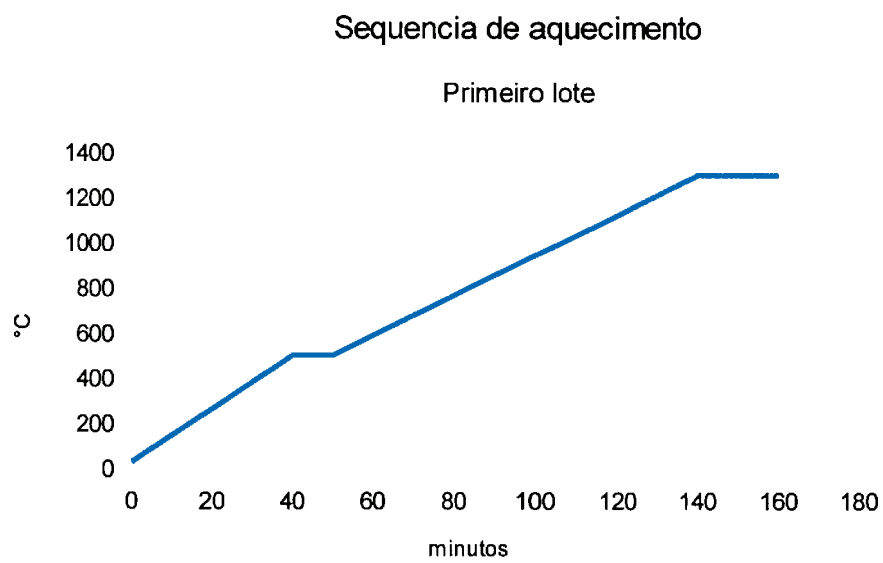


Fig 4.1 gráfico de aquecimento



Fig 4.2 Prancha de alumina com as pelotas após a queima do primeiro lote

4.2 Segundo Lote de pelotas

No segundo lote de pelotas foram produzidas quatro pelotas manualmente com 3% de goma arábica para conferir melhor resistência a verde. Duas dessas foram preparadas apenas com goma arábica e minério e ferro e outras duas com a adição de 10% de serragem com granulometria menor que 0,149mm

Objetivando entender um pouco mais o esboroamento das pelotas, realizou-se a queima do segundo lote em uma seqüência diferente como descrito no gráfico da figura 4.3.

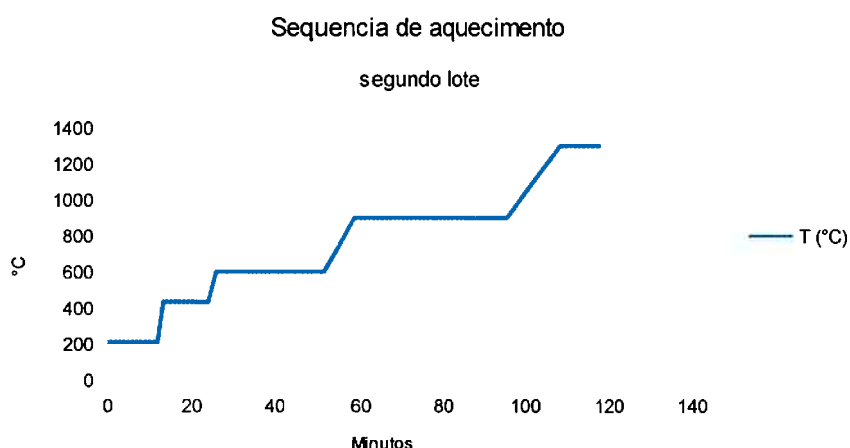


Fig 4.3 Curva de aquecimento do segundo lote de pelotas

Durante a queima, observou-se a liberação de fumos no platô à 600°C decorrentes da decomposição da serragem.

Após a queima a pelota com serragem esboroou, como no primeiro lote e a pelota sem serragem ficou aparentemente intacta, mas também não apresentou resistência após queimada .



Fig 4.4 Das pelotas do segundo lote que foram queimadas , a pelota com serragem se esboroou

4.3 Terceiro lote de pelotas

O terceiro lote de pelotas foi feito com 10% de serragem em sua composição e com 2,5% de bentonita. Com o fim de evitar o esboroamento, fabricou-se essas pelotas com tamanho reduzido, pois assim aumenta-se a superfície por volume, Com cerca de 10 mm.

Todas as pelotas do terceiro lote apresentaram resistência a verde que permite ser apalpadas com as mãos e não quebrar.

As pelotas foram queimadas no forno de poço e com a seqüência térmica descrita pela figura 4.5 abaixo:

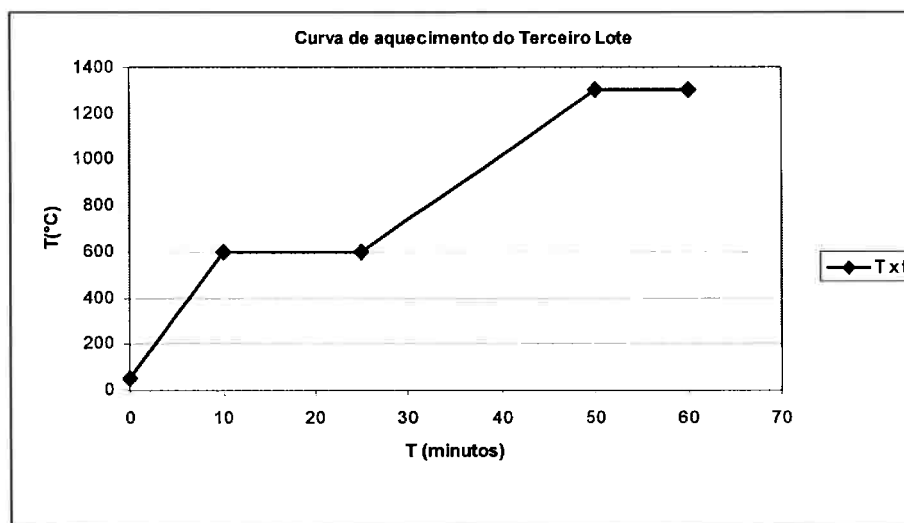


Fig 4.5 curva de aquecimento

Após a queima apresentou a resistência mecânica. Após queimadas não esboroaram e apresentaram resistência suficiente para serem apalpadas.

Duas pelotas não foram pesadas e foram embutidas em resina transparente para serem observadas ao microscópio ótico. Observou-se a porosidade de uma das pelotas embutidas através de análise de imagens da micrografia para medir a fração de vazios dessa pelota e conseqüentemente a porosidade.

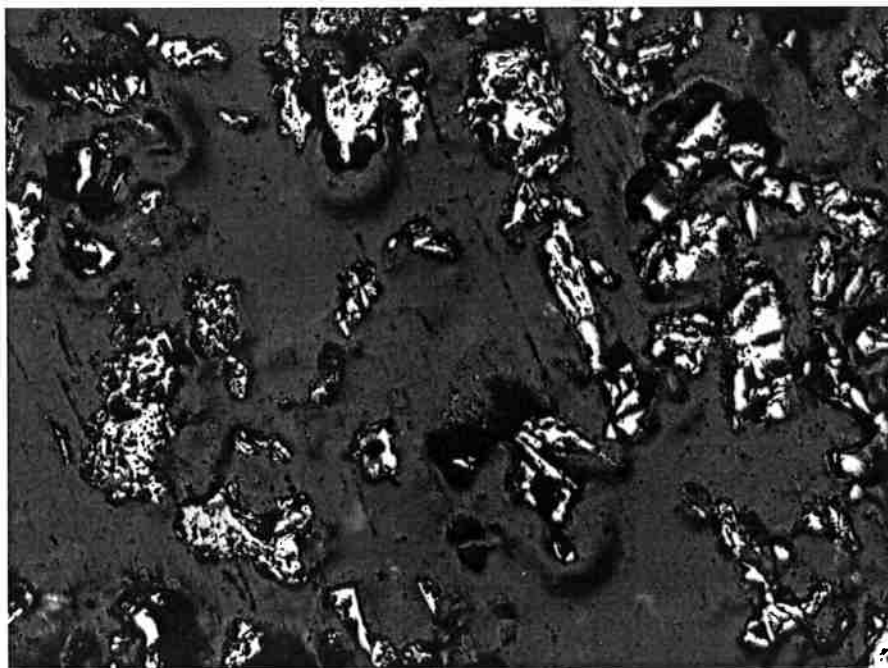


Fig 4.6 micrografia no centro da pelota . as manchas claras são os grãos de minério de ferro

Também através das micrografias pode se observar a estrutura e o arranjo dos grãos na pelota.

Outras duas pelotas foram infiltradas com alcatrão e mediu se a massa de piche solidaria a pelota. E não se fez nada com a última pelota.

Pelota	medidas do raio (mm)	Volume (mm ³)	Volume de poros estimado (60%)	peso seco(g)	peso infiltrado (g)
1	8,23	292	175	0,494	0,731
2	9,16	402	241	0,694	0
3	10,24	562	337	0,875	1,28

Pelota	peso seco(g)	Peso infiltrado (g)	peso piche	C fix	C necessario (%)
1	0,494	0,731	0,237	0,166	105
2	0,694	-	-	-	-
3	0,875	1,28	0,406	0,284	101

Tab 4.3 Medidas geométricas e de massa das pelotas secas e infiltradas .

Verifica se que a massa de piche obtida na infiltração é aproximadamente a esperada

4.5 Quarto lote de pelotas

Diferentemente dos outros, esse lote foi produzido via pelletizadora. O minério utilizado tem 0,149mm e a serragem utilizada tem granulometria menor 0,297mm. Os componentes desse lote de pelotas são os descritos na tabela abaixo :

Mistura do quarto lote	
Componente	massa (g)
bentonita	69,8
serragem	174
minério de ferro	1500

Tab 4.4 Mistura para preparação de pelotas .

Desse material foi produzido um grande numero de micro pelotas ($4,5\text{mm} < d < 7\text{mm}$) e um numero mais reduzido de pelotas ($7\text{mm} < d < 18\text{mm}$), devido a falta de prática no controle de formação dos núcleos de pelotas .

Esse experimento mostrou ser possível pelletizar serragem e minério de ferro juntos, visto que em recipientes era de difícil homogeneização.



Fig 4.7 Pelotas e micro pelotas.

Desse lote de pelotas algumas pelotas e micro pelotas após queimadas em forno foram infiltradas a vácuo.

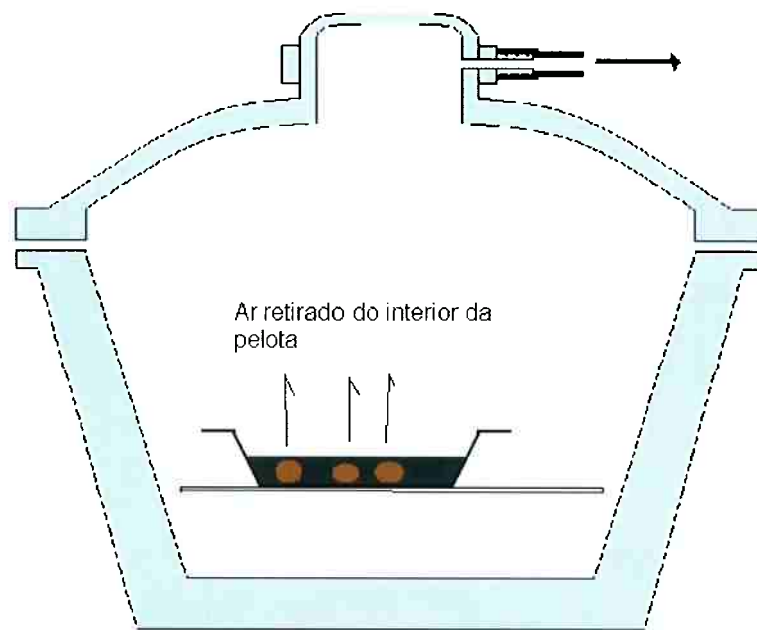


Fig 4.8 infiltração da pelota

Após a infiltração algumas foram submetidas a ensaios de redução com termogravimetria, e obteve se a seguinte curva da massa x temperatura e da massa x tempo.

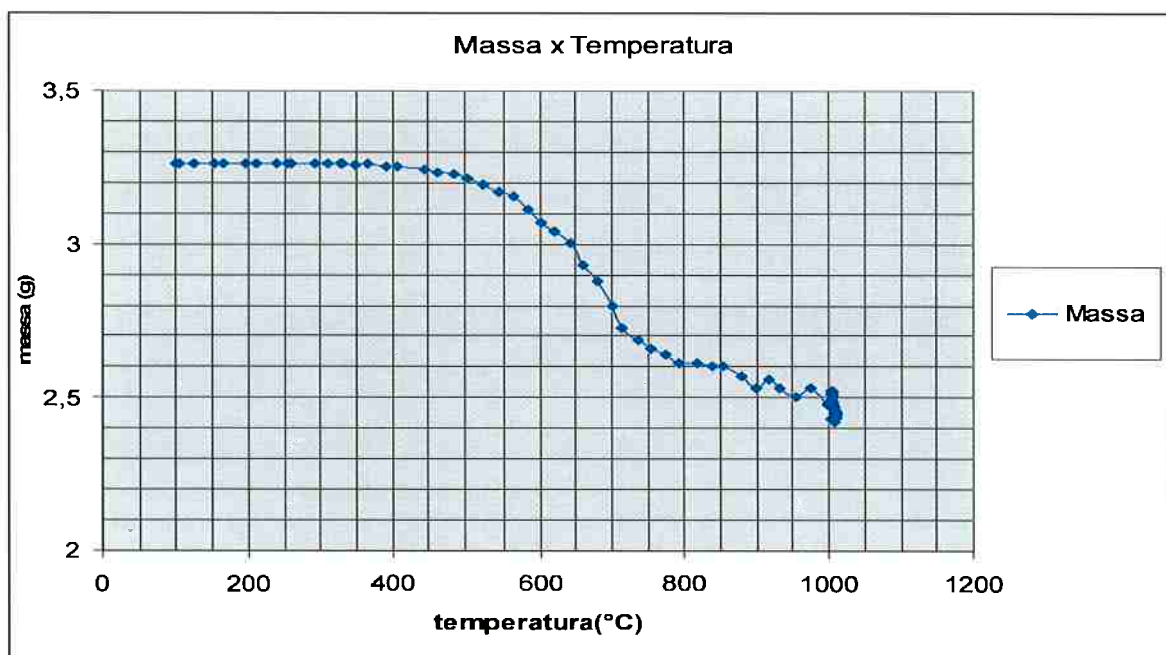


Fig 4.9 Curva massa x temperatura

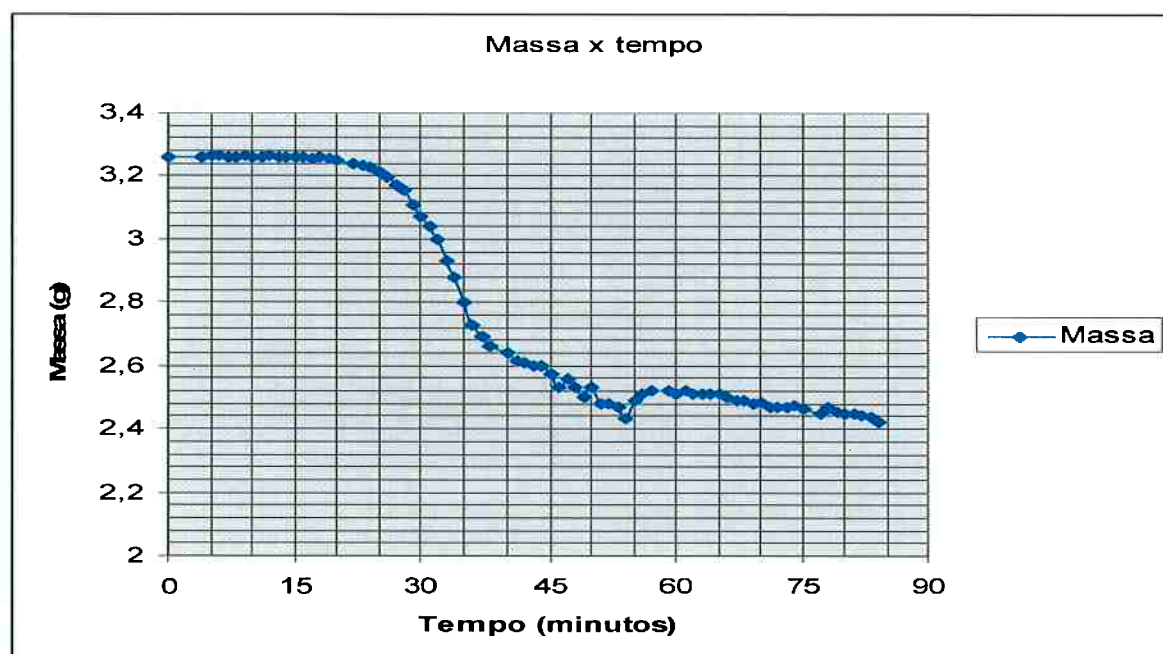


Fig 4.10 Perda de massa com o tempo , não se verificou a redução de massa em relação ao valor inicial

A redução de massa verificada foi de 25,5% , a quantidade de alcatrão em uma pelota auto redutora medida e na faixa de 30%, e assim não dá para afirmar que ocorreu auto redução. Outras pelotas do mesmo lote foram infiltradas e depois aquecidas, porem só mediu-se a massa inicial e final (vide tabela 4.5) e a curva de aquecimento (vide figura4.11).

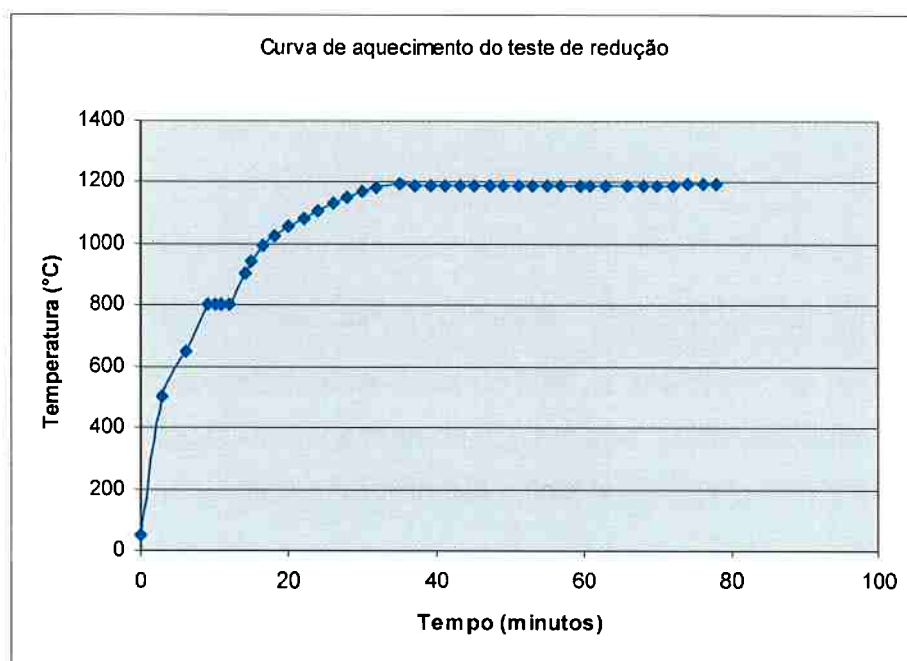


Fig 4.11 Curva de aquecimento do teste de redução

Massa do Segundo lote de pelotas infiltrado e reduzido		
anterior a infiltração	Depois de infiltrada	Depois da redução
2,96 g	4,47 g	2,70g

Tab 4.5 Massa inicial , infiltrada e reduzida das pelotas .

Pelo fato de que o aquecimento foi mais rápido e a temperaturas mais altas que na experiência de termogravimetria, uma parte maior do alcatrão foi carbonizado antes de ser completamente volatilizado.

Outras pelotas foram submetidas a ensaios de compressão simples, mediu-se a força de máxima resistência das pelotas como também o mesmo foi feito para as micro Pelotas

Curva Tensão x Deformação das Macro Pelotas

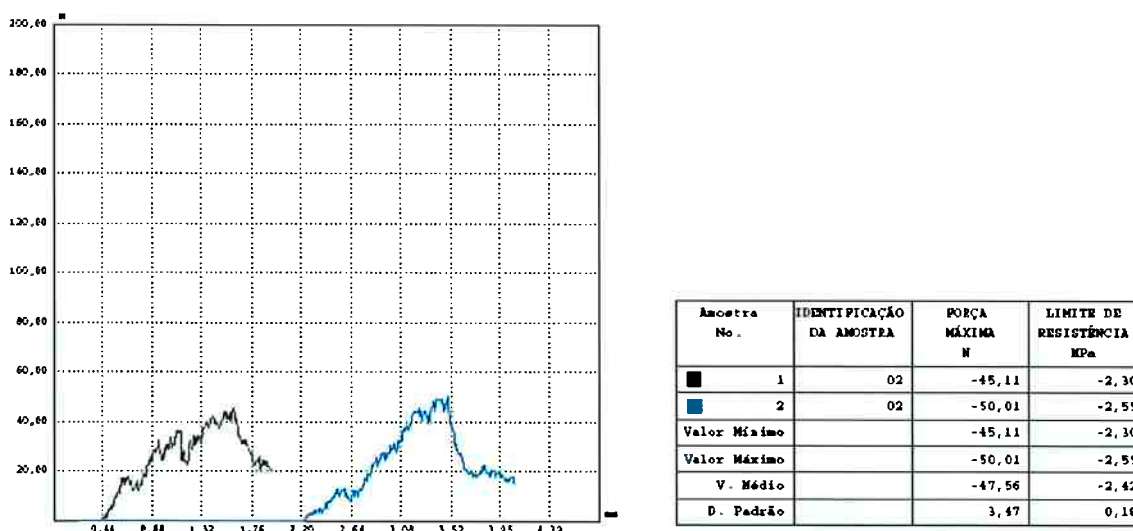


Fig 4.12 Curva de tensão x deformação de pelotas e a tabela com os valores maximo, mínimo, médio e o desvio padrão.

Os valores de resistência mecânica atingido pelas pelotas foram de cerca de 47N , bem abaixo de 2500N .

Quanto referente as Micro pelotas Os resultados não foram muito diferentes do obtido em macro pelotas e a resistência mecânica apresentou também valores baixos , porem com resistência um pouco mais elevada que o das macro pelotas, chegando a 79N

Curva Tensão x Deformação das micro Pelotas

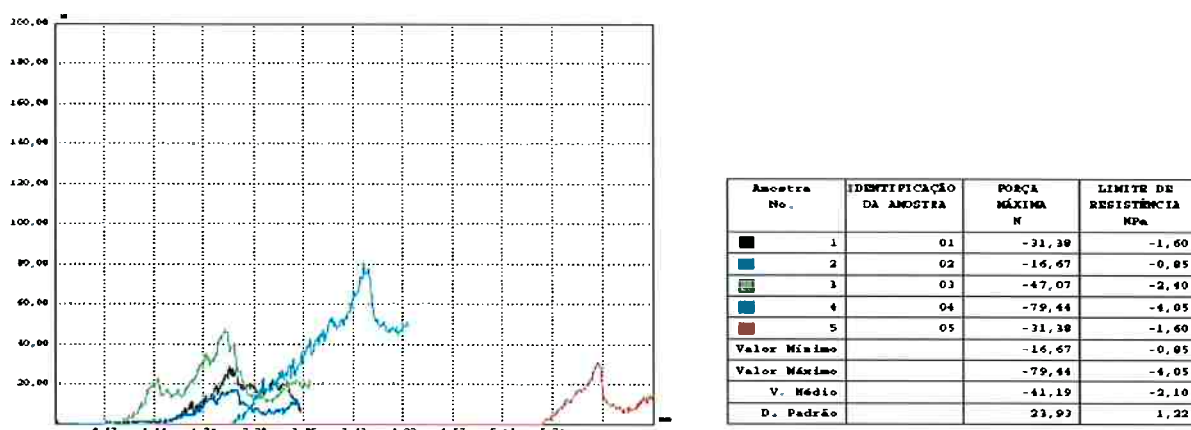


Fig 4.13 Curva de tensão x deformação de micro pelotas e a tabela com os valores maximo, mínimo, médio e o desvio padrão.

4.6 Determinação do Carbono Fixo do Alcatrão de Hulha .

A massa do alcatrão foi medida antes e depois do aquecimento. Quando a liberação de fumos cessou, fato ocorrido quando a temperatura do forno estava em 650°C, terminou-se o aquecimento.

A tabela 4.6 apresenta os valores do carbono fixo calculado a partir do quociente entre a massa final e a inicial .

Perda de massa de alcatrão	
Inicial	2,63
final	0,787
Carbono fixo Calculado *	0,299
*Considera-se desprezível a fração de cinzas	

Fig 4.6 determinação do carbono fixo do alcatrão de Hulha.

5 Conclusão

A partir dos experimentos dos dois primeiros lotes de pelotas porosas, pode-se verificar que para tamanhos maiores que 10mm as mesmas se esboroam, portanto para se fazer pelotas porosas deve-se trabalhar com tamanhos no limite inferior do tamanho do que é considerado pelota . Sugere-se que o esboroamento da pelota seja por causa da produção de gases no interior da pelota

Com os resultados da porosidade do terceiro lote de pelotas pode-se confirmar o que se esperava da porosidade. A fração de alcatrão infiltrado na pelota era maior quanto menor fosse a pelota , sugerindo que parte desse material redutor se depositasse na forma de uma película que cobre a pelota .

Devido a grande diferença de densidade entre o pó de minério de ferro e da serragem os mesmos tem dificuldade em se tornarem homogêneo, porem com o experimento de pelletização em pelletizadora provou-se que é possível pelletizar os dois componentes juntos

Os testes de resistência mecânica mostraram que a resistência das pelotas ficou bem abaixo do que se esperava , sugerindo que isso seja devido a falta de sinterização ou devido a maior porosidade

Os testes de redução apresentaram redução, porem abaixo do esperado pois estimou-se que o carbono fixo do alcatrão era de 80% que em testes de volatilização indicaram ser de 30%. Devido a esse fato, esse processo apresentou-se pouco pratico como processo industrial.

Para experimentos acadêmicos é sugerido que as pelotas de minério de ferro sejam infiltradas e reduzidas varias vezes para reduzir completamente as mesmas.

Pelo que se observou, essa técnica é mais adequada para a fabricação de micro pelotas, pois alem de ter maior superfície especifica por volume para a liberação dos gases provenientes da decomposição da serragem, pode armazenar o material redutor infiltrado ou na forma de capa.

6 Bibliografia

- [1] GOMES, Otávio da Fonseca Martins; VIEIRA, Sidnei Paciornik; WAGNER, Debora Turon ; ROUCO, Hirschel Valiente ; BEATRIZ, Maria ,Caracterização de pelotas de minério de ferro por microscopia digital e análise de imagens .2009. ABM , Disponível em < <http://www.abmbrasil.com.br/materias/download/1220303.pdf> > Acesso em 10 de Nov de 2013.
- [2] 29a Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química, 2006, Águas de Lindóia, Análise Térmica de Piches de Petróleo Precursores de Fibras de Carbono, Sociedade Brasileira de Química(SBQ).Disponível em < <http://sec.sbq.org.br/cd29ra/resumos/T0720-1.pdf> > Acesso em 10 Nov de 2013.
- [3] KAWANARY,Masato; MATSUMOTO,Atsushi ; ASHIDA,Ryuichi ; MIURA, Koiuchi,Enhancement of reduccion rate of iron Ore By Utilizing iron ore/carbon composite consisting of fine iron particles and higly thermoplastic carbon material .2011. ISIJ international Vol .51 , Disponível em < https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/51/8/51_8_1227/_pdf > , Acesso em 10 Nov 2013.
- [4] MOURÃO, Marcelo Breda,Notas da aula 08 de PMT 2409 ,2011.
- [5] CREMONESE, Denise ,Carvão e combustíveis.pdf ,Notas de aula de PMT2403, 2012.
- [6] MOURÃO,Marcelo Breda ,Projeto de Pesquisa : Obtenção de ferro primário através de tecnologias de auto redução. 2012.
- [7] MOURÃO, Marcelo Breda, Análise do processo de redução de minério de ferro por carbono na forma de pelotas auto-redutora.1988.
- [8] NOLDIN JÚNIOR, José Henrique ; MARCHEZE, José Carlos D'Abreu Edmar Saul ; COSTA, Pedro Henrique Carpinetti, Flexibilidade de matérias Primas no Processo Tecnored. ABM ,2007. Disponível em <<http://tecnologiammm.com.br/files/v3n3/v3n3a05.pdf> > Acesso em 10 Nov de 2013.
- [9] SASTRY, Kal V.S.; DONTULA, Prasannarao; HOSTEN, Cetin, Investigation of the layering mechanism of agglomerate growth during drum pelletization.2003 , Elsevier , disponível em < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591002002711> > Acesso em 10 Nov de 2013.