

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E
DE MATERIAIS**

Trabalho de Formatura

1999

**COMPORTAMENTO A QUENTE DE PELOTAS AUTO-
REDUTORAS DE POEIRA DE SINTERIZAÇÃO E DE MINÉRIO DE
FERRO COM VARIAÇÕES DO TEOR DE AGLOMETANTE.**

ORIENTADOR: PROF. DR. CYRO TAKANO

ALUNO: EDUARDO TAKASHI ATSUMI

RESUMO:

Entre os processos emergentes de produção de gusa, destacam-se, internacionalmente, os de auto-redução, em particular, o processo TECNORED de desenvolvimento nacional. A viabilidade do processo depende principalmente do comportamento a quente das pelotas auto-redutoras.

Este trabalho contém aspectos característicos de pelotas auto-redutoras, como pelletização, crepitação, inchamento e resistência mecânica à compressão, assim como a formação de uma atmosfera redutora no interior da pelota.

Foram realizadas experiências termogravimétricas, para verificar a fração reagida, dentro de um ciclo térmico preestabelecido, utilizando pelotas auto-redutoras a base de poeira de exaustão de sinterização e a base de minério de ferro MBR, com diferentes teores de carvão mineral antracitoso e aglomerantes. Os aglomerantes utilizados foram cimento PORTLAND ARI (Alta Resistência Inicial) misturados, ou não, com escória de alto-forno moído.

Os resultados com pelotas auto-redutoras a base de poeira de exaustão de sinterização, apresentaram bons resultados quanto à redutibilidade, não ocorreu crepitação nas condições ensaiadas (pelotas foram previamente

secas), inchamento desprezível e boa resistência à compressão a quente (após o ciclo térmico). No entanto, provavelmente, a boa resistência à compressão a quente, deve-se ao longo período de cura das pelotas. Portanto, esse item, foi praticamente desconsiderado nas análises.

Os resultados com pelotas auto-redutoras a base de minério de ferro MBR, apresentaram bons resultados, quanto a redutibilidade, com um grau de reação semelhante aos com poeira de sinterização. O efeito das temperaturas finais (950 °C e 1137 °C), no grau de redução, é bastante sensível para o minério de ferro MBR, chegando-se praticamente ao mesmo grau de redução, mas com um tempo maior para uma temperatura menor. Nos resultados do inchamento, observou-se o fenômeno do inchamento catastrófico, ou seja, um inchamento da ordem de 200%, fazendo com que a resistência mecânica à compressão caísse muito. Nenhuma pelota dessa série apresentou crepitação.

Observou-se, também, que nos resultados dos ensaios termogravimétrico com uma taxa de aquecimento de 60 °C/min, até as temperaturas de ensaio de 1137 °C e 950 °C, as pelotas de poeira de sinterização tinham uma velocidade de reação mais rápido que as pelotas de minério MBR. O mesmo não acontecia, isto é, os dois materiais não apresentavam diferenças no ensaio termogravimétrico chegando direto na temperatura de ensaio de 1137 °C. À temperatura de 950 °C (diretamente), a

diferença na velocidade de reação é significativa. Nas pelotas de poeira de sinterização, a temperatura pouco interferiu na velocidade de reação.

ÍNDICE:

Resumo	1
Índice	3
Índice de Figuras	5
Índice de Tabelas	7
Objetivo	9
1. Introdução	10
2. Pelotas Auto-Redutoras	14
2.1. Características de Pelotas Auto-Redutoras	17
3. Comportamento a Quente de Pelotas Auto-Redutoras	20
3.1. Resistência a Quente	20
3.2. Crepitação	21
3.3. Inchamento	21
4. Materiais e Métodos	23
4.1. Características dos Materiais Utilizados nas Pelotas	23
4.1.1. Resíduos (poeira) de Sinterização	23
4.1.2. Minério de Ferro MBR	24
4.1.3. Aglomerantes	24

4.1.4. Carvão Mineral Antracitoso	25
4.1.5. Composição das Pelotas Utilizadas	26
4.1.6. Análise Química das Matérias Primas	27
4.2. Procedimentos Experimentais	28
4.2.1. Equipamentos Utilizados	28
4.2.2. Ensaios a Quente	31
5. Resultados e Discussão Utilizando Pelotas de Poeira de Sinterização	32
5.1. Ensaios de Resistência à Compressão, Crepitação e Inchamento	32
5.2. Comportamento Quanto a Redução	39
5.3. Ensaio Termogravimétrico Chegando Direto à Temperatura	42
6. Resultados e Discussão Utilizando Pelotas de Minério MBR	46
6.1. Ensaios de Resistência à Compressão, Crepitação e Inchamento	46
6.2. Comportamento Quanto a Redução	50
6.3. Ensaio Termogravimétrico Chegando Direto à Temperatura	54
7. Conclusões	58
8. Bibliografia	60

ÍNDICE DAS FIGURAS:

FIG. 1: Disco de pelletização empregado na fabricação das pelotas auto-redutoras ⁽³⁾	14
FIG. 2: Mecanismo de formação das pelotas ⁽⁴⁾	15
FIG. 3: Mecanismo de formação de pelotas irregulares ⁽⁴⁾	16
FIG. 4: Mecanismo de formação de pelotas ⁽³⁾	17
FIG. 5: Redução de óxidos de Fe no interior das pelotas ⁽⁵⁾	18
FIG. 6.: Principais elementos construtivos e funcionais do forno FAR ⁽⁷⁾	19
FIG. 7: Aparelho utilizado na secagem das pelotas.	28
FIG. 8: Aparelho utilizado na determinação da resistência à compressão. ..	29
FIG. 9: Esquema do forno de resistência utilizado nos ensaios de redução, crepitação, inchamento e termogravimétricos.	30
Fig. 10: Gráfico comparativo de resistência à compressão.	37
Fig. 11: Ensaio termogravimétrico com pelotas de poeira de sinterização com temperaturas de ensaio diferentes e taxa de aquecimento de 60 °C/min.	41
Fig. 12: Ensaio termogravimétrico chegando direto na temperatura, utilizando a pelota P4.	44
Fig. 13: Comparação entre um ensaio termogravimétrico chegando direto na temperatura e um ensaio com taxa de aquecimento (60 °C/min) da pelota P4 (Temperatura de ensaio = 1137 °C).	45
Fig. 14: Ensaio de resistência à compressão com pelotas de minério MBR.	48
Fig. 15: Ensaio termogravimétrico com pelotas de minério MBR com uma taxa de aquecimento de 60 °C/min..	52
Fig. 16: Comparação dos ensaios termogravimétrico com taxa de aquecimento de 60 °C/min de pelotas com poeira de sinterização e minério	

MBR. Foram escolhidas as pelotas P2 e P7, pois esses possuem a mesma quantidade de aglomerantes.	53
Fig. 17: Ensaio termogravimétrico chegando direto à temperatura de redução.	56
Fig. 18: Comparação dos ensaios termogravimétrico chegando direto na temperatura de pelotas com poeira de sinterização e minério MBR. Foram escolhidas as pelotas P4 e P7, pois esses possuem a mesma quantidade de aglomerantes.	57

ÍNDICE DAS TABELAS:

TABELA 1: Composição da pelota auto-redutora a base de poeira de sinterização.	26
TABELA 2.: Composição da pelota auto-redutora a base de minério MBR. ...	26
Tabela 3.: Composição química das matérias primas (% - base seca).	27
TABELA 5.1.a. Dados da pelota P1 de resistência à compressão a frio e a quente, crepitação/inchamento.	32
TABELA 5.1.b. Dados da pelota P2 de resistência à compressão a frio e a quente, crepitação/inchamento.	33
TABELA 5.1.c. Dados da pelota P3 de resistência à compressão a frio e a quente, crepitação/inchamento.	34
TABELA 5.1.d. Dados da pelota P4 de resistência à compressão a frio e a quente, crepitação/inchamento.	35
TABELA 5.2.a. Dados dos ensaios termogravimétrico / inchamento / crepitação.	39
TABELA 5.2.b. Fração de redução do ensaio termogravimétrico.	40
TABELA 5.3.a. Dados do ensaio termogravimétrico chegando direto à temperatura.	42
TABELA 5.3.b. Fração de redução do ensaio termogravimétrico chegando direto à temperatura de redução.	43
TABELA 6.1.a. Dados da pelota P5 de resistência à compressão a frio e a quente, crepitação/inchamento.	46
TABELA 6.1.b. Dados da pelota P6 de resistência à compressão a frio e a quente, crepitação/inchamento.	47
TABELA 6.1.c. Dados da pelota P7 de resistência à compressão a frio e a quente, crepitação/inchamento.	47

TABELA 6.2.a. Dados dos ensaios termogravimétrico /inchamento /crepitação.	50
TABELA 6.2.b. Fração de reação do ensaio termogravimétrico.	51
TABELA 6.3.a. Dados do ensaio termogravimétrico chegando direto à temperatura.	54
TABELA 6.3.b. Fração de reação do ensaio termogravimétrico chegando direto à temperatura de redução.	55

OBJETIVO:

Este trabalho visa executar ensaios de comportamento a quente (crepitação, inchamento, resistência a quente e grau de reação) de pelotas auto-redutoras de minério hematítico de ferro e pelotas auto-redutoras de resíduos de sinterização, contendo carvão mineral antracitoso e aglomeradas com cimento Portland de alta resistência inicial (cimento ARI) e/ou escória de alto-forno (EAF), quando as mesmas forem submetidas a um determinado ciclo térmico (tempo x temperatura).

1. INTRODUÇÃO:

Vários problemas e pressões como redução de custos de investimentos, diminuição da agressão ambiental, redução das escalas de produção e flexibilidade operacional tem feito com que haja um surto de processos alternativos para a produção de ferro primário no mundo.

Do carvão mineral utilizado na indústria siderúrgica, a maior parte é de carvão coqueificável. Essa dependência é problemática, pois durante a coqueificação, são gerados poluentes químicos que são notavelmente prejudiciais ao meio ambiente. Dessa forma, estão sendo desenvolvidos, vários processos em diferentes lugares no mundo, cada um de acordo com suas fontes naturais disponíveis, com o objetivo de reduzir a utilização de coque, seja utilizando gás natural, mistura carvão/O₂ ou somente carvão.

Os processos alternativos aos alto-fornos são classificados:

- processos de redução direta que se baseiam na redução do minério por redutor sólido ou gasoso, sem a fusão do produto, obtendo-se o chamado ferro-esponja (DRI – “Direct Reduced Iron” ou HBI – “Hot Briquetted Iron”);
- processos alternativos de fusão-redução com o uso de carvão/O₂ como os processos COREX e DIOS; e
- processo de redução direta tendo carboneto de ferro como produto.

O estudo sobre o aproveitamento de finos de minério vêm sendo feito há um bom tempo, já que constituía em problemas ambientais e em desperdício de matéria-prima, pois situam-se numa faixa granulométrica que não existe uma aplicação direta nos processos convencionais de redução.

Uma das vias de utilização de carbono sólido como redutor, em processos de redução direta, que tem merecido os esforços de pesquisa em vários países, é a que utiliza pelotas auto-redutoras, constituídas de minério de ferro e carvão (vegetal ou fóssil), podendo conter aglomerantes e/ou fluxantes. O uso de pelotas auto-redutoras como forma de carga para redução tem alguns atrativos que indicam um alto potencial de utilização desta técnica, podendo-se citar:

- 1) Possibilidade de utilizar várias fontes de ferro, como finos de minério, resíduos de aciaria, resíduos piritosos ustulados, poeira de sinterização, etc.;
- 2) Possibilidade de utilização de diversas formas de carbono como redutor: carvão vegetal, carvão fóssil coqueificável ou não, carvão de biomassa, coque, etc.;
- 3) Possibilidade de aproveitamento de material fino gerado no manuseio do minério e do carvão;
- 4) Devido a fina granulometria, contato íntimo entre as partículas e geração do gás redutor internamente à mistura, pode-se prever o

consumo de redutor inferior e velocidade do processo maior em relação aos processos convencionais;

- 5) Flexibilidade em relação ao equipamento de redução e/ou fusão das pelotas, que podem ser tratadas antes ou depois da redução em equipamentos como fornos de cuba, fornos rotativos, fornos elétricos a arco, retortas, esteira rotativa, etc.

As pelotas auto-redutoras de cura a frio, podem conter, como redutores, os finos de carvão mineral, vegetal ou coque e aglomerantes inorgânicos como cimento e/ou escória de alto-forno.

Uma pelota auto-redutora quando aquecida até temperaturas de redução dos óxidos presentes, passa por uma série de transformações e de perdas de componentes eliminados na forma de produtos gasosos, podendo provocar alterações físicas e físico-químicas na pelota (estruturais e microestruturais) com diferentes velocidades e graus de intensidade, que resultam do aquecimento e de interações que se estabelecem entre os componentes da pelota em contato íntimo, podendo-se destacar:

- eliminação de umidade absorvida;
- eliminação de material volátil;
- eliminação de água de composição;
- formação de novas fases no sistema ligante;
- formação de novas fases no processo de redução.

Uma das consequências da formação de fases gasosas no interior da pelota é a possibilidade desta vir a crepitar⁽¹⁾, que é indesejável neste processo, pela degradação da pelota em partículas pequenas, como resultado do aumento excessivo da pressão interna.

A necessidade de conhecer o comportamento mecânico a frio, está fundamentalmente relacionada com a degradação durante o manuseio da pelota ou empilhamento no estoque, a secagem e durante a redução/fusão. As propriedades a quente, referem-se à integridade física e comportamento físico-químico da pelota e podem ser medidas pela crepitação, inchamento, resistência à compressão e grau de redução, quando submetida a um ciclo térmico. Tais propriedades e comportamento físico-químicas dependem das matérias-primas utilizadas na composição da pelota, das variáveis do processo de fabricação e das interações que se estabelecem entre seus constituintes durante o processo de redução⁽²⁾.

2. PELOTAS AUTO-REDUTORAS:

Pelotização é a aglomeração de materiais finos abaixo de 100# (0,149 mm) em esferas de 8 ~ 18 mm.

Uma pelota auto-redutora, é o aglomerado de material a ser reduzido (finos de minério de ferro ou de óxidos de ferro de outras origens), aglomerante e redutor (finos de carvão mineral, finos de carvão vegetal, biomassa ou finos de coque). Essa mistura é aglomerada em discos de pelotização tradicionais (figura 1) e as pelotas são curadas ao ar livre durante um período de cerca de 28 dias ou por processos especiais de cura acelerada em vapor d'água à temperatura da ordem de 80 °C.

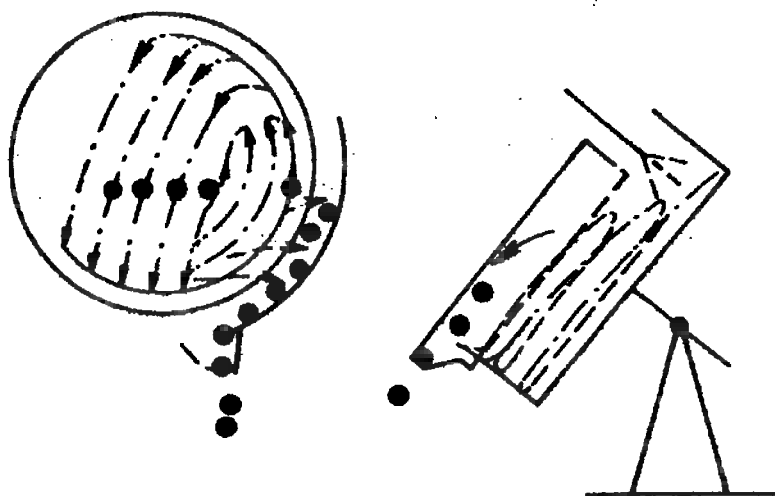


Fig. 1: Disco de pelotização empregado na fabricação das pelotas auto-redutoras⁽³⁾.

Quando os finos dos materiais são misturados, forma-se uma fina camada sobre a superfície de cada grão e pontes são formadas nos pontos de contato com outros grãos. As partículas são roladas e forças de ligação são gradualmente desenvolvidas nas esferas, como mostra a figura 2.

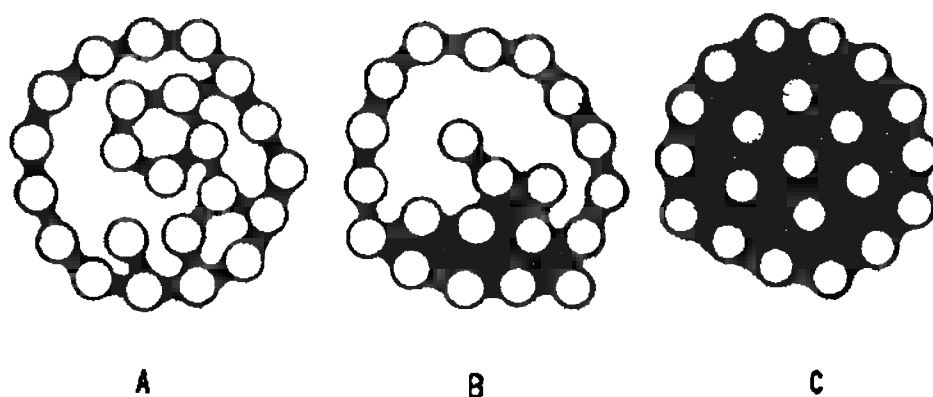


Fig. 2: Mecanismo de formação das pelotas⁽⁴⁾.

A figura 2-A mostra uma ligação inicial com pontes de água, sem resistência suficiente. Quando é adicionado mais líquido, o filme líquido sobre a partícula começa a coalescer, mas acaba fechando e formando bolsões de ar como mostra a figura 2-B. A coesão entre as partículas é afetada pela tensão superficial da movimentação das pontes entre cada partícula. As esferas crescem com a adesão de mais partículas nos núcleos formados. Forças mecânicas como as outras esferas e a parede do disco de pelletização, expulsam o ar preso no interior das esferas e formam o estágio

capilar mostrado na figura 2-C. Nesse estágio, o líquido preenche os espaços livres entre as partículas.

Aglomerados irregulares de partículas e partículas compactas soltas podem se juntar às esferas, produzindo uma esfera irregular como pode ser visto na figura 3.

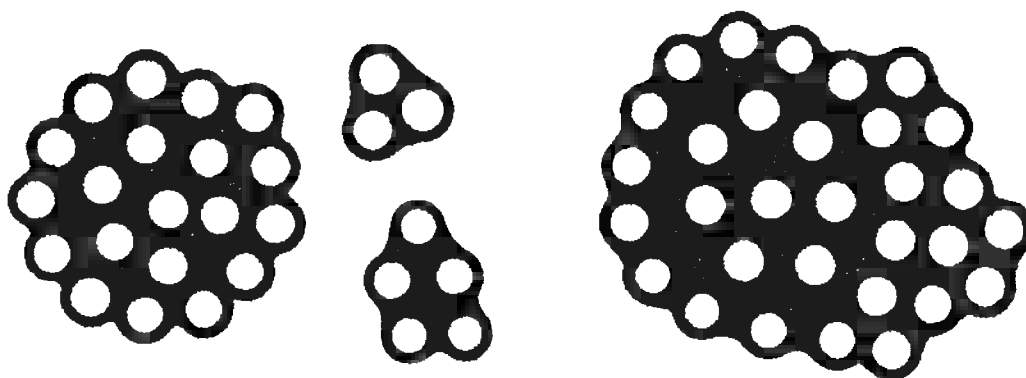


Fig. 3: Mecanismo de formação de pelotas irregulares⁽⁴⁾.

Os mecanismos de nucleação de pelotas podem ser, também, como mostrado na figura 4, onde existe um núcleo encharcado e novas partículas vão se aderindo à esse núcleo.

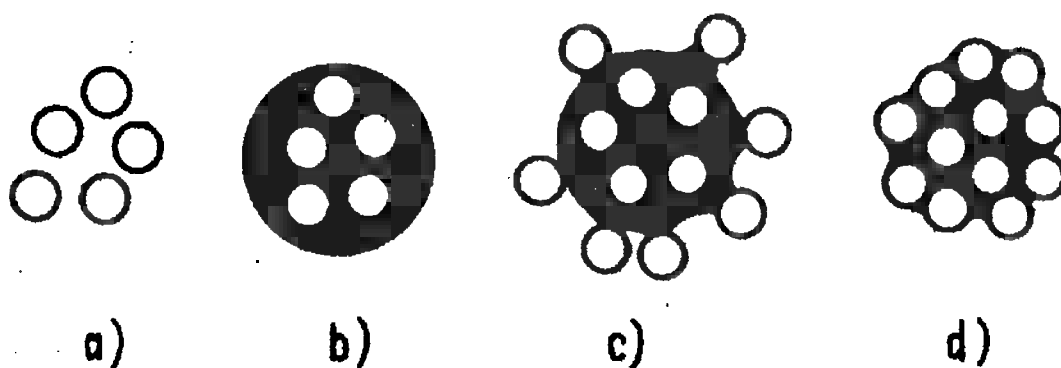


Fig. 4: Mecanismo de formação de pelotas⁽³⁾.

2.1. CARACTERÍSTICAS DE PELOTAS AUTO-REDUTORAS:

As características importantes e inerentes ao processo, são a intimidade entre óxidos e redutores e a formação de uma atmosfera redutora no interior das pelotas (figura 5), que resultam em elevadas velocidades de redução dos óxidos de ferro, independentemente da natureza da atmosfera presente no interior do forno.

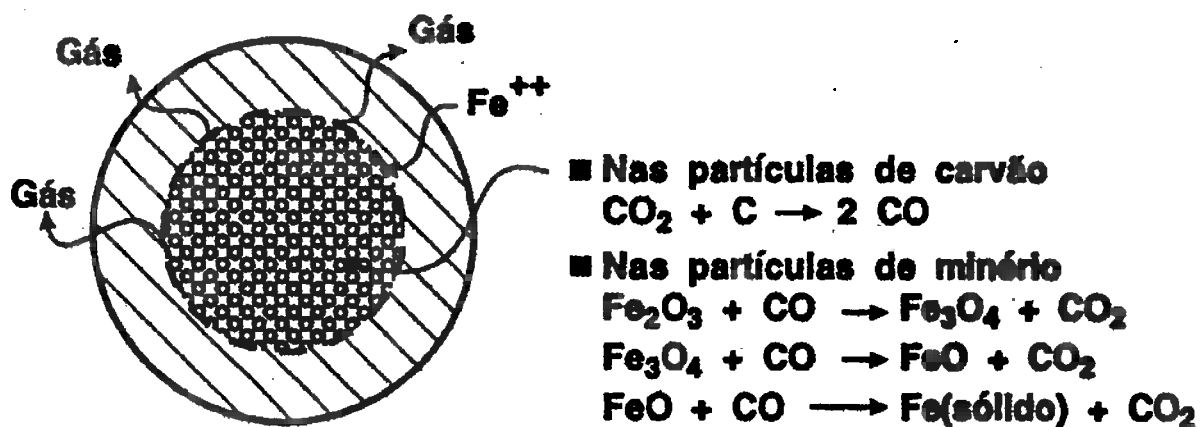


Fig. 5: Redução de óxidos de Fe no interior das pelotas⁽⁵⁾.

Estas pelotas podem ser reduzidas e fundidas em fornos como o FAR (forno de auto-redução) empregadas no processo TECNORED⁽⁶⁾ e é mostrado o seu esquema na figura 6. O esquema dispõe de dutos laterais para a alimentação de combustíveis sólidos e uma cuba central, por onde são carregadas as pelotas e onde passa todo o fluxo gasoso em contra corrente.

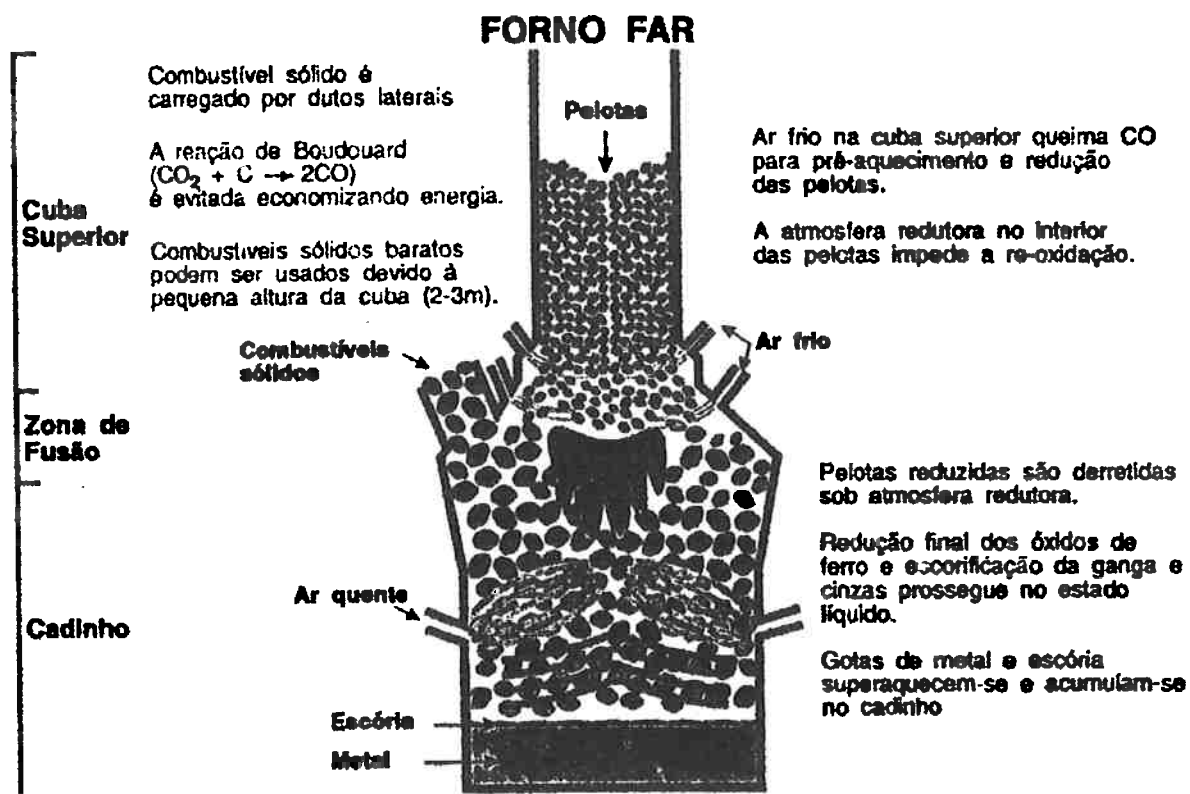


Fig. 6.: Principais elementos construtivos e funcionais do forno FAR⁽⁷⁾.

3. COMPORTAMENTO A QUENTE DE PELOTAS AUTO-REDUTORAS:

3.1. RESISTÊNCIA A QUENTE:

A necessidade de resistência mecânica a quente é influenciada pela altura da coluna de carga, pois as pelotas devem resistir o máximo possível, até a redução e fusão do ferro reduzido para permitir um melhor escoamento dos gases, ou seja, as pelotas devem resistir mecanicamente à degradação por compressão e abrasão durante o processo de redução.

Durante o processo de aquecimento, a hidratação do cimento, ocorrida durante o período de cura da pelota, sofre calcinação, ou seja, a decomposição dos hidratos dos aglomerantes. Isto explica a queda na resistência à compressão, contudo, após uma certa temperatura, que pode variar, mas está em torno de 1000°C, inicia-se o processo de sinterização do Fe reduzido e sua resistência à compressão volta a crescer.

3.2. CREPITAÇÃO:

Uma pelota auto redutora, a temperaturas elevadas, sofre uma série de transformações e passa a perder componentes na forma de produtos gasosos.

Esses produtos gasosos, principalmente umidade, quando atingem pressão interna superior ao limite de resistência da pelota, pode fazer com que ocorra o fenômeno da crepitação⁽¹⁾. Como esse fenômeno depende da pressão interna dos gases, ele está relacionado com o grau de formação de fases gasosas e à facilidade com que conseguem sair das pelotas. O volume de gás formado, está relacionado com a velocidade de aquecimento da pelota⁽⁸⁾, de forma que, quanto mais rápido a taxa de aquecimento, mais rápido será a formação desses gases.

Dependendo das condições de evolução desses gases, as pelotas podem sofrer uma desintegração em pequenas partículas mesmo antes da reação de redução.

3.3. INCHAMENTO⁽⁹⁾:

Em temperaturas acima de 570 °C, a redução de Fe_2O_3 ocorre em três etapas:

- $\text{Fe}_2\text{O}_3 \Rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$: nesta etapa, o Fe_2O_3 α está numa estrutura cristalina romboédrica e ocorre uma mudança drástica na estrutura cristalina, onde

os íons de oxigênio, O^{2-} , do Fe_2O_3 , que estão com um arranjo hexagonal, passam a ter um arranjo CFC no Fe_3O_4 com um aumento do volume aparente em torno de 25%⁽⁹⁾.

- $Fe_3O_4 \Rightarrow "FeO"$: nesta etapa não ocorre uma mudança drástica no reticulado cristalino, em relação aos íons de oxigênio, mas ocorre uma difusão de íons de ferro no preenchimento das lacunas do reticulado, acarretando num aumento do volume aparente em torno de 7 ~ 13%⁽⁹⁾.
- $"FeO" \Rightarrow Fe$: nesta etapa, quando da nucleação e crescimento da fase metálica sobre um substrato de $"FeO"$, ocorre um aumento da porosidade nos estágios iniciais e/ou intermediários e uma contração do volume aparente devido ao fenômeno de sinterização da fase metálica nos estágios finais de redução, acarretando numa transformação global, $Fe_2O_3 \Rightarrow "FeO"$, um aumento do volume aparente em torno de 25 ~ 27%⁽⁹⁾.

A prática mostra que pelotas com inchamento igual ou superior a 30%, tendem a se desagregarem durante o processamento e devem ser descartadas das operações industriais.

O inchamento catastrófico é um fenômeno deletério, interativo, que ocorre no interior da pelota e pode acarretar num aumento de volume às vezes superior a 200% em relação ao seu volume original. Muitos autores concordam que o fenômeno de inchamento catastrófico está associado a geração de filamentos acirculares de ferro na etapa $"FeO" \Rightarrow Fe$ ⁽¹⁰⁾.

4. MATERIAIS E MÉTODOS:

4.1. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS NAS PELOTAS:

Os materiais utilizados na confecção das pelotas, em geral, são finos obtidos na preparação dos processos de redução, onde a granulometria é inferior a 200 “mesh”. Para a elaboração das pelotas, as matérias-primas, foram secas em mufla a $\sim 95^{\circ}\text{C}$, o carvão foi moído e aglomeradas com cimento PORTLAND ARI (Alta Resistência Inicial) e/ou escória de alto-forno, peneirado (peneira Tyler 65# ou USS 70#)⁽⁴⁾, em discos de pelotização e curadas à temperatura ambiente.

4.1.1. RESÍDUOS (POEIRA) DE SINTERIZAÇÃO:

Usinas de sinterização, geram grandes quantidades de poeira no sistema de limpeza de gases efluentes e normalmente a mesma é reciclada no processo de sinterização. Esta reciclagem afeta negativamente nas condições ótimas do processo devido a sua granulometria bastante fina. Por outro lado, esta característica permite que seja utilizada como matéria prima de pelotas

auto-redutoras. A tabela 1 mostra a composição das pelotas e a tabela 3 a composição química da poeira.

4.1.2. MINÉRIO DE FERRO MBR:

O minério de ferro MBR são os finos de minério hematítico, da Minerações Brasileiras Reunidas, gerados nos processos de mineração Classificados. A tabela 2 mostra a composição das pelotas e a tabela 3 a composição química do minério.

4.1.3. AGLOMERANTES:

Podem ser inorgânicos de composição variada e classificados usualmente em hidráulicos e não-hidráulicos^(11,12). Para pelotas auto-redutoras, é mais importante o tipo hidráulico, pois reagem em presença de água, formando produtos de hidratação estáveis. O cimento PORTLAND ARI, é mais fino e contém teores de silicato tricálcico maiores que o cimento PORTLAND comum. Foi utilizada ainda, teores da ordem de 3% de escória de alto-forno (EAF) como aglomerante/fluxante. As tabelas 1 e 2 mostram o seu teor em cada pelota e a tabela 3 a composição química do cimento ARI e da EAF.

4.1.4. CARVÃO MINERAL ANTRACITOSO:

É considerado um material praticamente inerte em relação aos aglomerantes e aos mecanismos de cura. Os agentes redutores atuam principalmente acima de 800°C na redução de óxidos de ferro, contribuindo para formação de fases gasosas, uma vez que sua composição possui teor superior a 50% de carbono fixo e restante de materiais voláteis. As tabelas 1 e 2 mostram o seu teor em cada pelota e a tabela 3 a composição química do carvão.

4.1.5. COMPOSIÇÃO DAS PELOTAS UTILIZADAS:

TABELA 1: Composição da pelota auto-redutora a base de poeira de sinterização.

Pelota	Pó de Sinteriz. (%)	Carvão Mineral (%)	Cimento ARI (%)	EAF (%)
P1	75.40	18.60	2.50	3.5
P2	74.60	18.40	4.00	3.0
P3	74.58	19.49	5.93	-
P4	73.70	19.30	4.00	3.0

TABELA 2.: Composição da pelota auto-redutora a base de minério MBR

Pelota	Minério MBR (%)	Carvão Mineral (%)	Cimento ARI (%)	EAF (%)
P5	68.55	21.45	10.00	-
P6	71.22	22.28	6.50	-
P7	70.83	22.77	4.00	3.00

4.1.6. ANÁLISE QUÍMICA DAS MATÉRIAS PRIMAS:

TABELA 3.: Composição química das matérias primas (% - base seca)

Componentes	Poeira de sinterização	Minério MBR	Escória de Alto-Forno	Carvão Mineral Antracitoso	Cimento Portland ARI
Fe ₂ O ₃	72,14*	97,29			2,78
SiO ₂	6,28	0,82	34,08	6,67	19,05
FeO		-	1,89	1,94	-
P		0,042	-	-	-
S	-	-	-	0,22	-
CaO	12,94	-	41,50	1,35	64,3
Al ₂ O ₃	1,47	0,35	10,50	4,10	4,92
MgO	5,46	-	6,50	0,20	0,55
MnO	0,81	0,47	2,00	0,08	-
C _{fixo}	0,80	-	-	70,51	-
H ₂ O		-	-	-	-
CO				1,40	
CH ₄				4,20	
N ₂				1,40	
H ₂				6,93	
SO ₂					2,63
K ₂ O					0,73
Na ₂ O					0,04
CaO (livre)					1,01
Outros		1,03	3,53	-	3,99

* Fe total convertido. Análise por R-X mostrou presença de magnésio-ferrita.

4.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS:

Todas pelotas ensaiadas foram previamente submetidas a uma secagem a 150 °C por 2 horas, ou seja, até atingirem a menor porcentagem de água.

4.2.1. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS:

- **Secagem:** aparelho de determinação de umidade OHAUSS;

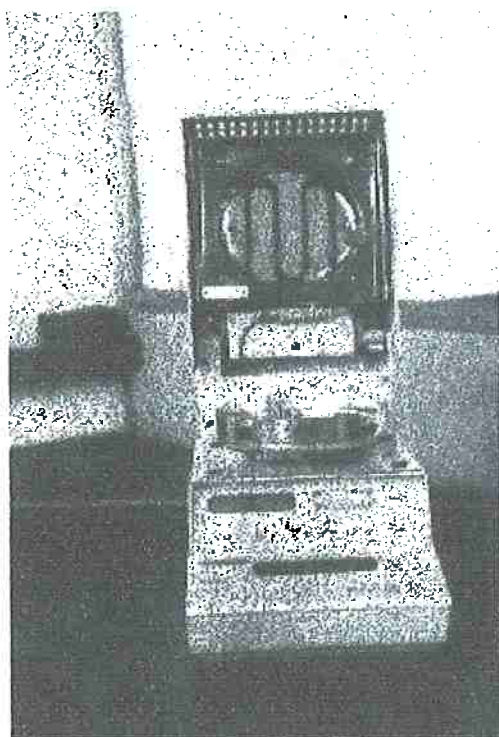


Fig. 7: Aparelho utilizado na secagem das pelotas.

- **Determinação de resistência à compressão:**

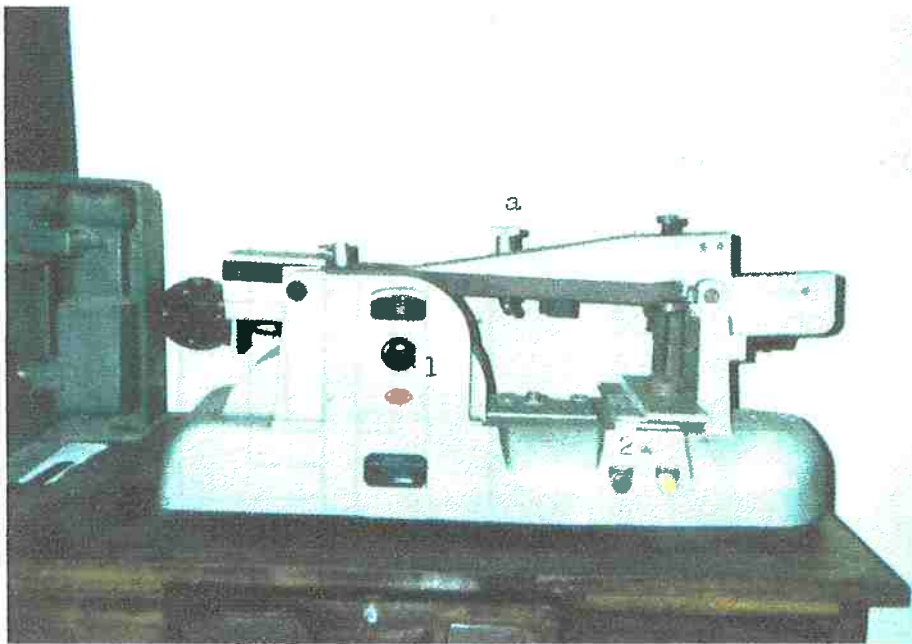


Fig. 8: Aparelho utilizado na determinação da resistência à compressão.

- **Forno de redução e ensaio termogravimétrico:**

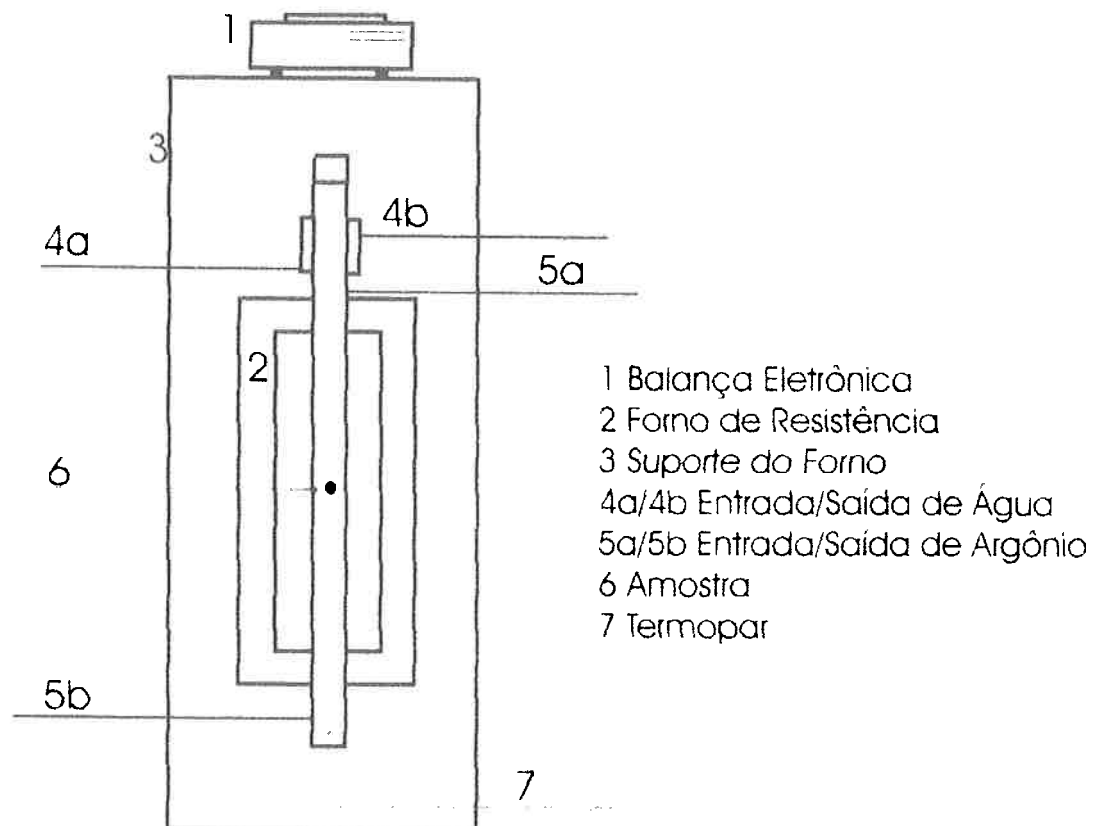


Fig. 9: Esquema do forno de resistência utilizado nos ensaios de redução, crepitação, inchamento e termogravimétricos.

4.2.2. ENSAIOS A QUENTE:

- Teste de inchamento/crepitação e resistência:

Aquecimento da pelota a 520°C por 5 minutos e posterior aquecimento de 60°C/min até temperaturas de 850°C, 900°C, 950°C e 1000°C. Logo ao atingir as temperaturas, as pelotas eram resfriados e retirados.

- Ensaios Termogravimétricos:

→ aquecimento da pelota a 520°C por 5 minutos e posterior aquecimento de 60°C/min até temperaturas de 950°C e 1137°C ou 1150°C. Ao atingir estas temperaturas, as pelotas eram mantidas por tempo suficiente até a estabilização da massa.

→ chegando-se direto à temperatura de 950°C e 1137°C ou 1150°C e mantidas por tempo suficiente até a estabilização da massa.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO UTILIZANDO PELOTAS DE POEIRA DE SINTERIZAÇÃO:

5.1. Ensaios de resistência à compressão, de crepitação e inchamento.

Pelota P1:

TABELA 5.1.a. Dados da pelota P1 de resistência à compressão a frio e a quente, crepitação/inchamento.

Temp. (°C)	ambiente	ambiente	850°C	900°C	950°C	1000°C
múmida (g)	9.61	10.41	10.40	9.63	10.28	9.82
mseca (g)	9.39	10.15	10.17	9.42	10.06	9.61
% H ₂ O	2.29	2.50	2.21	2.18	2.14	2.14
ϕ_i (mm)	21.0	21.5	21.1	20.7	21.3	21.0
ϕ_f (mm)	-	-	21.3	20.7	21.3	21.2
m _r (g)	-	-	9.20	8.35	8.77	8.19
ΔP (%)	-	-	9.54	11.36	12.82	14.78
Res. (PSI)	396	378	95	58	68	41
N (N/pelota)	398	419	97	63	70	42
incham. (%)	-	-	2.9	0.0	0.0	3.6
crepitação	-	-	não	não	não	não

Pelota P2:

TABELA 5.1.b. Dados da pelota P2 de resistência à compressão a frio e a quente, crepitação/inchamento.

Temp. (°C)	ambiente	ambiente	850°C	900°C	950°C	1000°C
múmida (g)	5.86	6.21	6.65	6.79	6.31	5.88
mseca (g)	5.73	6.07	6.50	6.64	6.17	5.75
% H ₂ O	2.22	2.25	2.26	2.21	2.22	2.21
ϕ_i (mm)	17.0	17.1	17.6	17.9	17.5	17.2
ϕ_f (mm)	-	-	17.9	18.0	17.7	17.2
m _f (g)	-	-	6.05	5.93	5.28	4.92
ΔP (%)	-	-	6.92	10.69	14.42	14.43
Res. (PSI)	575	594	183	142	78	134
N (N/pelota)	923	943	265	203	116	210
incham. (%)	-	-	5.20	1.69	3.47	0.00
crepitação	-	-	não	não	não	não

Pelota P3:

TABELA 5.1.c. Dados da pelota P3 de resistência à compressão a frio/ quente, crepitação/inchamento.

Temp. (°C)	ambiente	Ambiente	850°C	900°C	950°C	1000°C
múmida (g)	6.40	6.54	6.41	7.14	6.71	6.61
mseca (g)	6.21	6.37	6.24	6.96	6.50	6.37
% H ₂ O	2.97	2.60	2.65	2.52	3.13	3.63
ϕ_i (mm)	17.8	18.0	17.8	18.5	17.8	18.2
ϕ_f (mm)	-	-	17.8	18.7	18.4	18.6
m _f (g)	-	-	5.32	5.96	5.38	5.01
ΔP (%)	-	-	14.74	14.37	17.23	21.35
Res. (PSI)	554	414	46	54	54	40
N (N/pelota)	816	593	67	72	74	54
incham. (%)	-	-	0.00	3.28	10.46	6.74
crepitação	-	-	não	não	não	não

Pelota P4:

TABELA 5.1.d. Dados da pelota P4 de resistência à compressão a frio e a quente, crepitação/inchamento.

Temp. (°C)	ambiente	Ambiente	850°C	900°C	950°C	1000°C
Múmida (g)	6.23	6.04	6.55	6.69	6.20	6.19
mseca (g)	6.06	5.88	6.39	6.52	6.01	5.99
% H ₂ O	2.73	2.65	2.44	2.54	3.06	3.23
ϕ_i (mm)	18.0	17.8	18.2	18.3	17.8	17.8
ϕ_f (mm)	-	-	18.3	18.7	18.1	18.2
m _r (g)	-	-	5.58	5.48	4.94	4.68
ΔP (%)	-	-	12.68	15.95	17.80	21.87
Res. (PSI)	305	310	33	30	36	30
N (N/pelota)	437	454	46	40	51	42
incham. (%)	-	-	1.66	6.70	5.14	6.89
crepitação	-	-	não	não	não	não

onde:

Temp = temperatura que a pelota atingiu ou foi reduzida (°C)

múmida = massa úmida (g)

mseca = massa seca (g)

%H₂O = porcentagem de umidade (%) ϕ_i = diâmetro inicial (mm)

ϕ_f = diâmetro final (mm)

m_f = massa após o ensaio térmico (g)

ΔP = porcentagem de redução de massa (%)

Res = resistência à compressão (PSI)

N = resistência à compressão (N/pelota normalizada para 18mm)

incham. = inchamento da pelota (%)

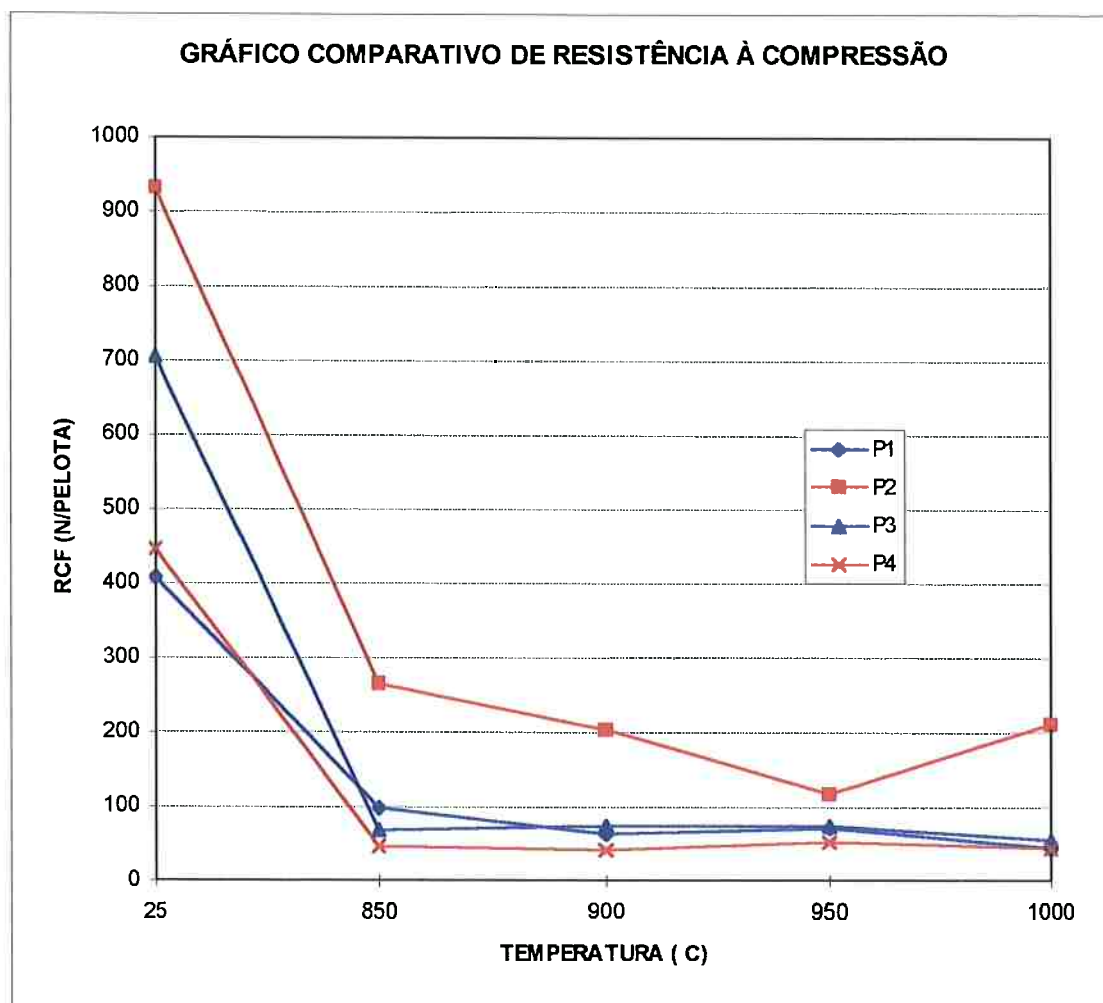


Fig. 10: Gráfico comparativo de resistência à compressão.

Nota-se uma queda brusca de resistência, quando submetidas aos ensaios citados às temperaturas de 850 °C e acima, independente da resistência a frio, com exceção daquela com resistência a frio de 923 N/pelota (pelota P2). Esta pelota P2 apresentou uma resistência mínima a 950 °C, porém sensivelmente superior às demais pelotas P1, P3 e P4. Este comportamento sugere que a resistência após o aquecimento depende da resistência a frio, porém, desde que esta resistência seja acima da ordem de 700 N/pelota.

Aparentemente, os resultados da pelota P4 (%EAF + %Cimento = 7%) está fora do esperado, pois, esperava-se um comportamento semelhante à pelota P2 (%EAF + %Cimento = 7%) em termos de resistência à compressão devido à composição. No entanto, essa diferença deve-se ao tempo de cura, que foi diferente nos dois casos. A pelota P2 teve 580 dias de cura, enquanto que a pelota P4 teve 146 dias de cura.

Nas condições ensaiadas, não ocorreu crepitação. Provavelmente isso se deve ao fato das pelotas terem sido secas antes do ensaio.

O inchamento foi desprezível para todas as composições e temperaturas, ou seja, estão abaixo de 11% de inchamento volumétrico.

5.2. Comportamento Quanto a Redução:

TABELA 5.2.a. Dados dos ensaios termogravimétrico/inchamento/crepitação.

LOTE	P2 (979°C)	P2 (1137°C)	P3 (950°C)	P3 (1137°C)	P4 (1137°C)
m _{úmida} (g)	6.41	6.38	6.22	6.36	5.94
m _{seca} (g)	6.27	6.24	6.03	6.17	5.78
% H ₂ O	2.22	2.22	3.05	3.00	2.72
φ _i (mm)	17.8	17.4	17.4	17.7	17.7
φ _f (mm)	18.3	18.2	17.7	18.3	18.1
mf (g)	4.15	4.16	3.95	4.09	3.87
ΔP (%)	33.79	33.32	34.49	33.70	33.03
incham. (%)	8.67	14.44	5.26	10.52	6.93
crepitação	não	não	não	não	não

Fração Reagida = $\frac{mp}{mmp}$, onde:

mp = massa perdida em relação à massa da pelota seca (%);

mmp = maior massa perdida (%).

TABELA 5.2.b. Fração reagida do ensaio termogravimétrico.

Tempo (min)	P2 (979°C)	P2 (1137°C)	P3 (950°C)	P3 (1137°C)	P4 (1137°C)
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0,000
5	0.178	0.160	0.097	0.122	0,128
7	0.247	0.233	0.223	0.211	0,215
9	0.336	0.367	0.371	0.341	0,336
11	0.456	0.564	0.558	0.535	0,549
13	0.617	0.713	0.726	0.787	0,717
15	0.801	0.867	0.841	0.923	0,920
16	0.862	0.926	0.880	0.963	0,936
18	0.935	0.958	0.935	0.972	0,955
20	0.966	0.977	0.966	0.977	0,965
22	0.978	0.968	0.978	0.984	0,978
24	0.983	0.977	0.981	0.986	0,979
26	0.992	0.978	0.988	0.989	0,980
28	0.988	0.986	0.991	0.991	0,994
30	0.996	0.998	0.994	0.994	0,995
32	0.999	1.000	0.995	0.997	0,997
34	1.000		0.997	0.996	0,999
36			0.998	0.996	0,999
38			0.999	0.998	1,000
40			1.000	1.000	

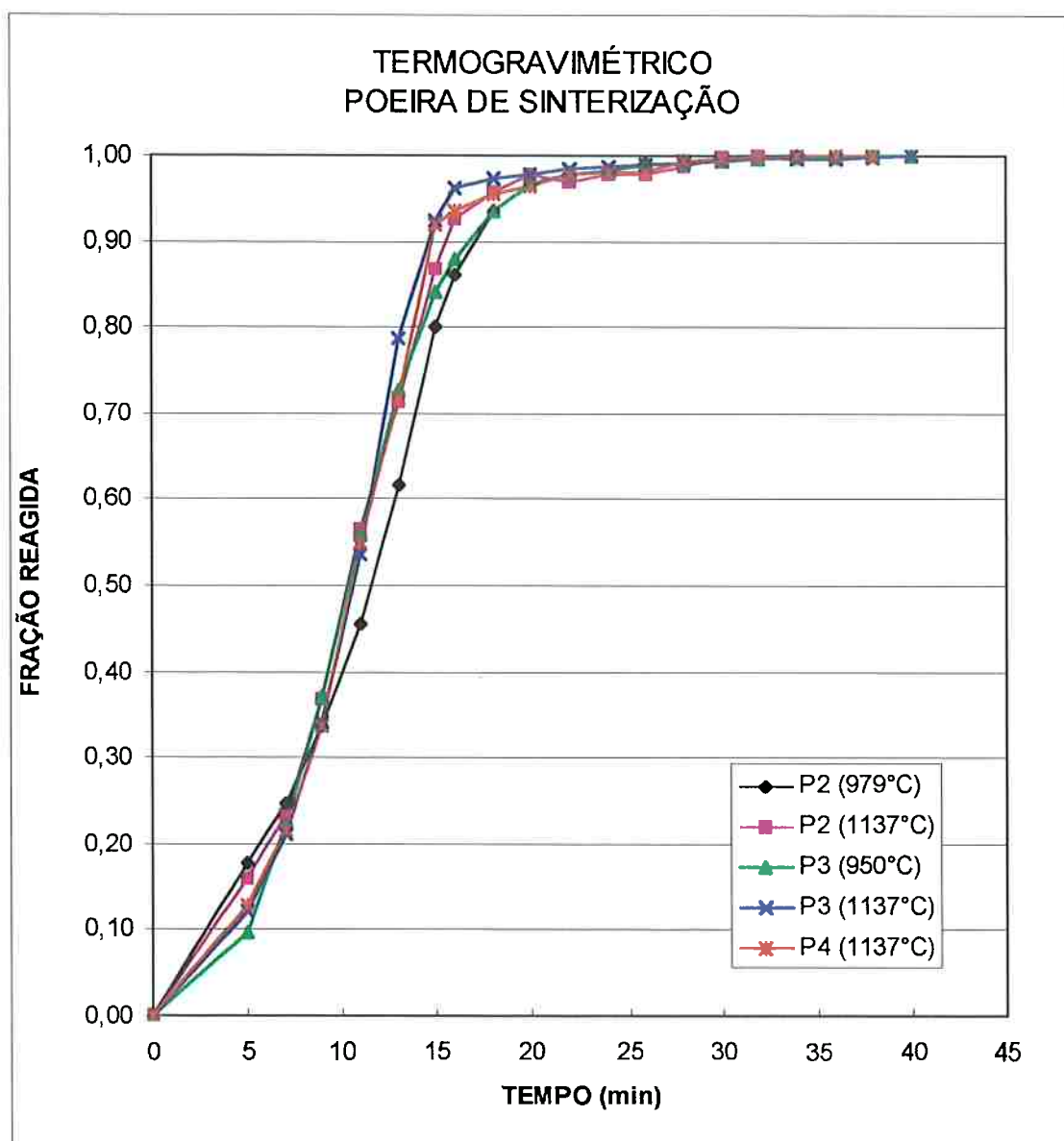


Fig. 11: Ensaio termogravimétrico com pelotas de poeira de sinterização com temperaturas de ensaio diferentes e taxa de aquecimento de 60 °C/min.

Neste gráfico (Fig. 11), a diferença no tempo de uma dada fração reagida, em diferentes temperaturas, por exemplo 95%, foi de apenas 6 minutos. Para as condições ensaiadas, a 1137 °C esse tempo é cerca de 15 min., enquanto que a 950 °C, esse tempo é cerca de 21 min.

Nestes ensaios, também, não foram observados os fenômenos de crepitação e nem um inchamento anormal.

5.3. Ensaio Termogravimétrico Chegando Direto à Temperatura:

TABELA 5.3.a. Dados do ensaio termogravimétrico chegando direto à temperatura.

LOTE	P4 (950°C)	P4 (1137°C)
m _{úmida} (g)	5.67	5.36
m _{seca} (g)	5.52	5.21
% H ₂ O	2.72	2.72
φ _i (mm)	17.5	17.2
φ _f (mm)	18.1	17.2
m _f (g)	3.74	3.44
ΔP (%)	32.25	33.92
incham. (%)	10.64	0.00
crepitação	não	não

Fração de Reagida:

TABELA 5.3.b. Fração reagida do ensaio termogravimétrico chegando direto à temperatura de redução.

Tempo	P4 (950°C)	P4 (1137°C)
0	0.000	0.000
1	0.260	0.237
2	0.301	0.448
3	0.390	0.619
4	0.473	0.751
5	0.544	0.840
6	0.636	0.899
7	0.695	0.939
8	0.744	0.957
9	0.789	0.956
10	0.827	0.958
11	0.852	0.965
12	0.872	0.968
13	0.898	0.980
14	0.925	0.978
15	0.928	0.980
16	0.934	0.985
17	0.937	0.987
18	0.939	0.992
19	0.943	0.993
20	0.945	0.996
21	0.947	0.997
22	0.950	0.997
23	0.951	0.998
24	0.951	0.999
25	0.954	0.999
26	0.955	0.997
27	0.953	0.997
28	0.954	0.998
29	0.956	1.000
30	0.957	0.999

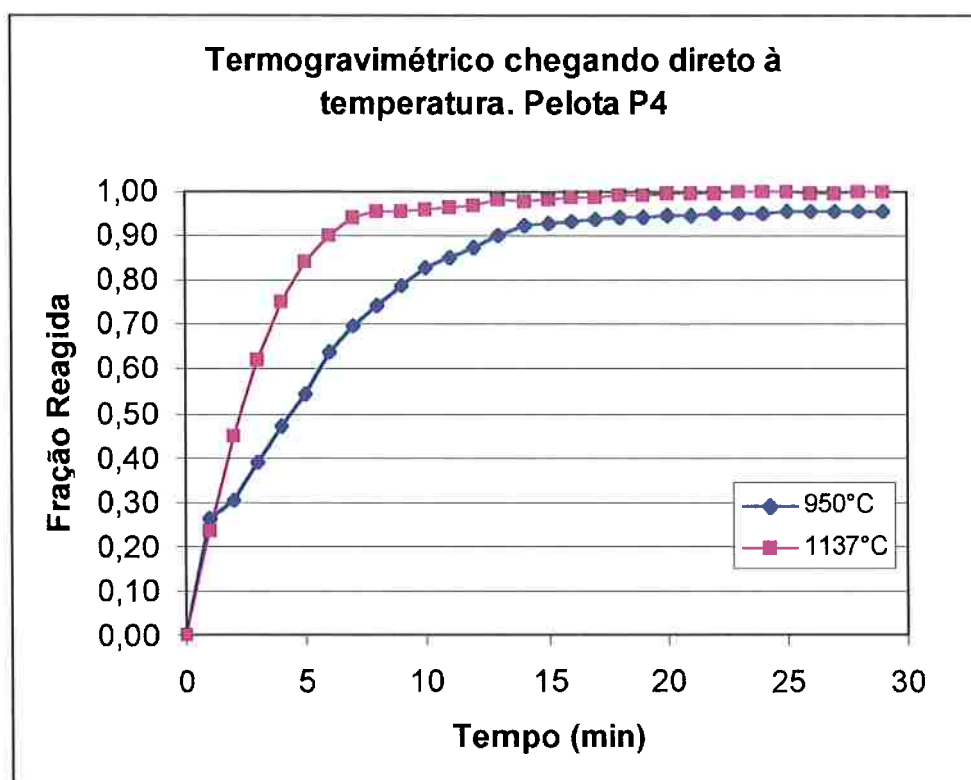


Fig. 12: Ensaio termogravimétrico chegando direto na temperatura, utilizando a pelota P4.

Neste gráfico, podemos notar que a fração reagida é maior, quanto maior a temperatura e o tempo também é menor.

Verifica-se que a velocidade de reação aumentou substancialmente (Fig. 13), a 1137 °C, para pelotas submetidas diretamente às temperaturas, em comparação com as pelotas submetidas ao aquecimento de 60 °C/min. Nota-se, no entanto, que o efeito da temperatura (950 °C e 1137 °C) foi maior em pelotas submetidas diretamente às temperaturas.

Não ocorreu crepitação, nem inchamento anormal.

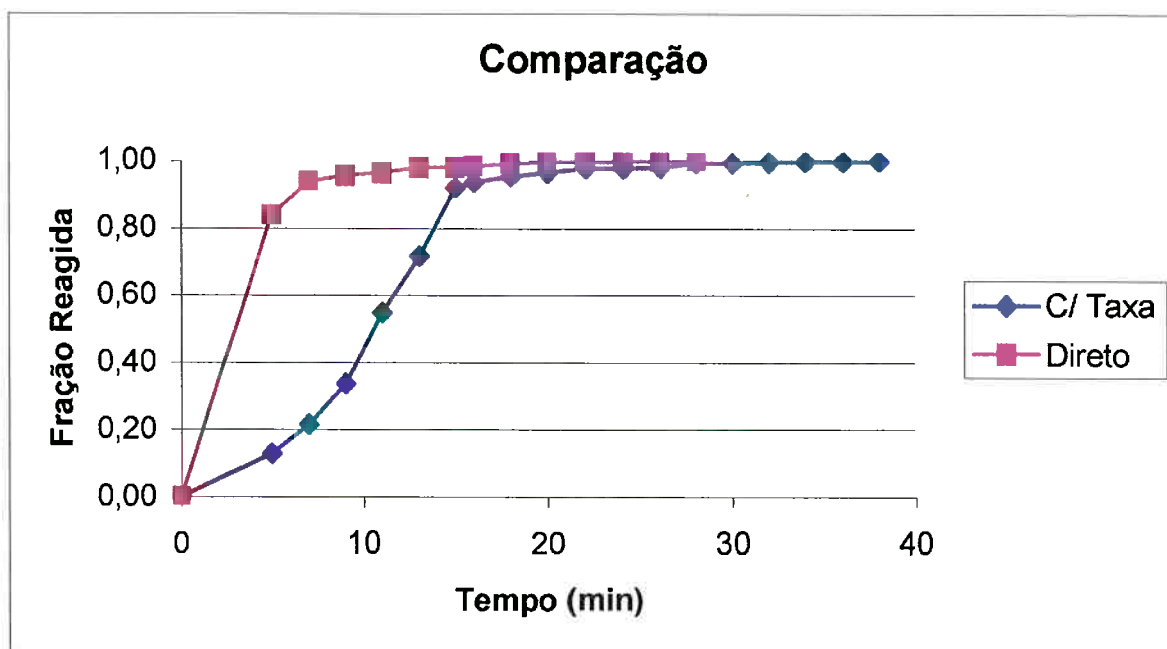


Fig. 13: Comparação entre um ensaio termogravimétrico chegando direto na temperatura e um ensaio com taxa de aquecimento ($60\text{ }^{\circ}\text{C/min}$) da pelota P4 (Temperatura de ensaio = $1137\text{ }^{\circ}\text{C}$).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO UTILIZANDO PELOTAS DE MINÉRIO MBR:

6.1. Ensaio de resistência à compressão, de crepitação e inchamento.

Pelota P5:

TABELA 6.1.a. Dados da pelota P5 de resistência à compressão a frio e a quente, crepitação/inchamento.

Temp. (°C)	ambiente	ambiente	850°C	900°C	950°C	1000°C
m _{úmida} (g)	5.54	6.44	6.63	5.76	6.72	7.69
m _{seca} (g)	5.27	6.12	6.30	5.46	6.40	7.31
% H ₂ O	4.87	4.97	4.98	5.21	4.76	4.94
ϕ_i (mm)	15.6	17.4	17.4	17.2	17.5	18.3
ϕ_f (mm)	-	-	18.0	17.4	18.5	20.5
m _f (g)	-	-	5.48	4.60	5.19	5.75
ΔP (%)	-	-	13.02	15.75	18.91	21.34
Res. (PSI)	476	563	95	73	72	53
N (N/pelota)	908	863	136	112	98	59
incham. (%)	-	-	10.71	3.53	18.14	40.58
crepitação	-	-	não	não	não	não

Pelota P6:

TABELA 6.1.b. Dados da pelota P6 de resistência à compressão a frio e a quente, crepitação/inchamento.

Temp. (°C)	ambiente	ambiente	850°C	900°C	950°C	1000°C
m _{úmida} (g)	4.74	5.03	5.82	6.42	6.11	5.71
m _{seca} (g)	4.60	4.88	5.64	6.23	5.92	5.54
% H ₂ O	2.95	2.98	3.09	2.96	3.11	2.98
ϕ_i (mm)	16.0	16.2	17.1	17.3	17.3	16.9
ϕ_f (mm)	-	-	17.3	18.3	18.0	18.6
m _f (g)	-	-	5.00	5.42	4.85	4.36
ΔP (%)	-	-	11.35	13.00	18.07	21.30
Res. (PSI)	186	198	24	19	11	7
N (N/pelota)	337	350	37	26	16	9
incham. (%)	-	-	3.55	18.36	12.64	33.31
crepitação	-	-	não	não	não	não

Pelota P7:

TABELA 6.1.c. Dados da pelota P7 de resistência à compressão a frio e a quente, crepitação/inchamento.

Temp. (°C)	ambiente	ambiente	850°C	900°C	950°C	1000°C
m _{úmida} (g)	4.27	4.66	4.92	5.25	5.23	5.14
m _{seca} (g)	4.17	4.55	4.81	5.12	5.10	5.02
% H ₂ O	2.34	2.36	2.24	2.48	2.49	2.33
ϕ_i (mm)	15.4	15.9	16.1	16.5	17.0	16.5
ϕ_f (mm)	-	-	16.3	16.5	17.0	16.8
m _f (g)	-	-	4.53	4.77	4.63	4.49
ΔP (%)	-	-	5.82	6.84	9.22	10.56
Res. (PSI)	69	100	22	45	12	17
N (N/pelota)	135	184	38	77	19	28
incham. (%)	-	-	3.77	0.00	0.00	5.55
crepitação	-	-	não	não	não	não

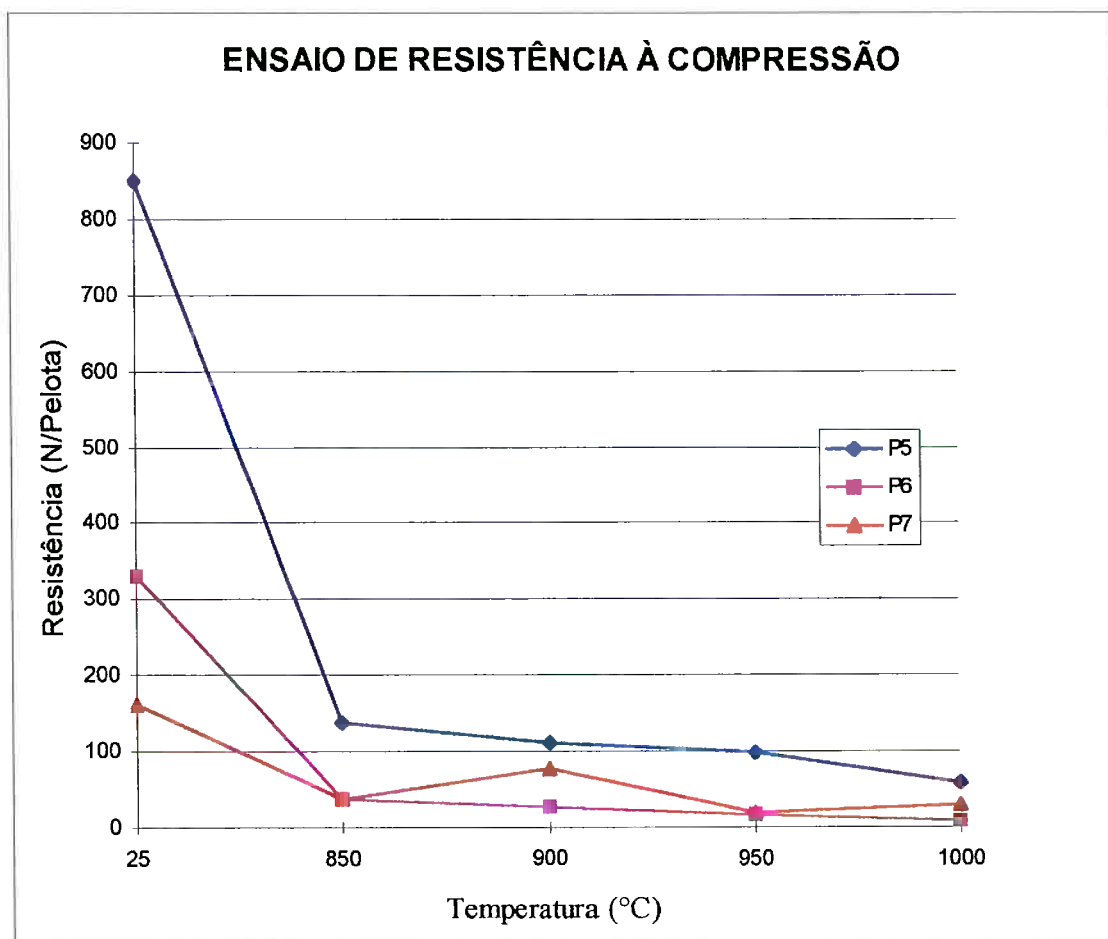


Fig. 14: Ensaio de resistência à compressão com pelotas de minério MBR.

Como pode-se notar nesse gráfico (Fig. 14), o aumento de aglomerante tem um efeito grande na resistência à compressão após o ensaio a quente das pelotas. Este efeito é muito mais preponderante na resistência após a cura. Neste caso, também essa grande diferença na resistência pode ter sido provocada pelo tempo de cura:

- P5 – 837 dias;
- P6 – 807 dias;
- P7 – 605 dias.

Os resultados da figura 14, vem a comprovar o comportamento de resistência após o aquecimento obtido na série anterior com poeira de sinterização. Isto é, uma diminuição brusca da resistência quando as pelotas são aquecidas a temperaturas acima de 850 °C, porém quando a resistência a frio é maior que da ordem de 700 N/pelota, a resistência após o aquecimento é sensivelmente maior que aquelas obtidas com pelotas cujas resistência a frio é inferior a 500 N/pelota.

Não ocorreu crepitação, também, provavelmente devido aos procedimentos experimentais utilizados, ou seja, a secagem das pelotas antes do ensaio.

Não ocorreu um inchamento anormal na maioria das pelotas, exceto nas pelotas P5 e P6 a 1000°C de 40,58% e 33,31% respectivamente. Isto pode ter sido provocado devido a uma formação maior de filamentos acirculares de ferro na etapa " $\text{FeO} \Rightarrow \text{Fe}$ ", ou seja, um início de um inchamento catastrófico, o que poderia explicar também a queda na resistência à compressão, devido ao aumento da porosidade. Convém esclarecer que para esta série, as pelotas eram retiradas logo ao atingir as respectivas temperaturas, portanto, não houve tempo suficiente para ocorrer totalmente as reações de redução, principalmente às temperaturas inferiores a 1000 °C.

6.2. Comportamento Quanto a Redução:

TABELA 6.2.a. Dados dos ensaios termogravimétrico/inchamento/crepitação.

	P5		P6		P7	
	(950°C)	(1137°C)	(950°C)	(1137°C)	(950°C)	(1137°C)
múmida (g)	4.66	5.74	3.54	4.75	4.53	4.66
mseca (g)	4.44	5.44	3.42	4.65	4.41	4.54
% H ₂ O	4.72	5.23	3.39	2.11	2.65	2.58
mfinal (g)	2.86	3.37	2.17	2.81	2.88	2.8
ΔP (%)	35.59	38.05	36.55	39.57	34.69	38.33
φ _i (mm)	15.4	16.5	14.3	15.9	15.8	15.8
φ _f (mm)	23.0	18.0	22.1	18.0	21.6	17.6
%incham	233.1	29.8	269.1	45.1	155.5	38.2
Res (psi)	12	36	2	10	5	12
N(N/pelota)	17	52	2	14	5	18

Fração Reagida:

TABELA 6.2.b. Fração de redução do ensaio termogravimétrico.

	P5 (950°C)	P5(1137°C)	P6 (950°C)	P6 (1137°C)	P7 (950°C)	P7 (1137°C)
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.114	0.102	0.103	0.119	0.130	0.099
7	0.155	0.153	0.156	0.168	0.188	0.136
9	0.253	0.248	0.242	0.216	0.262	0.224
11	0.371	0.362	0.353	0.305	0.356	0.318
13	0.541	0.507	0.512	0.478	0.496	0.448
15	0.686	0.761	0.643	0.723	0.624	0.677
16	0.741	0.854	0.671	0.828	0.681	0.795
18	0.820	0.957	0.775	0.948	0.762	0.940
20	0.887	0.981	0.878	0.983	0.851	0.991
22	0.924	0.991	0.943	0.994	0.915	0.994
24	0.956	0.991	0.955	0.997	0.954	0.997
26	0.971	0.997	0.979	1.000	0.988	0.999
28	0.987	0.998	0.977	0.996	0.997	0.999
30	0.998	1.000	0.983	1.000	0.998	1.000
32	0.999		0.985		1.000	
34	0.999		0.986			
36	1.000		0.992			
38			0.998			
40			1.000			

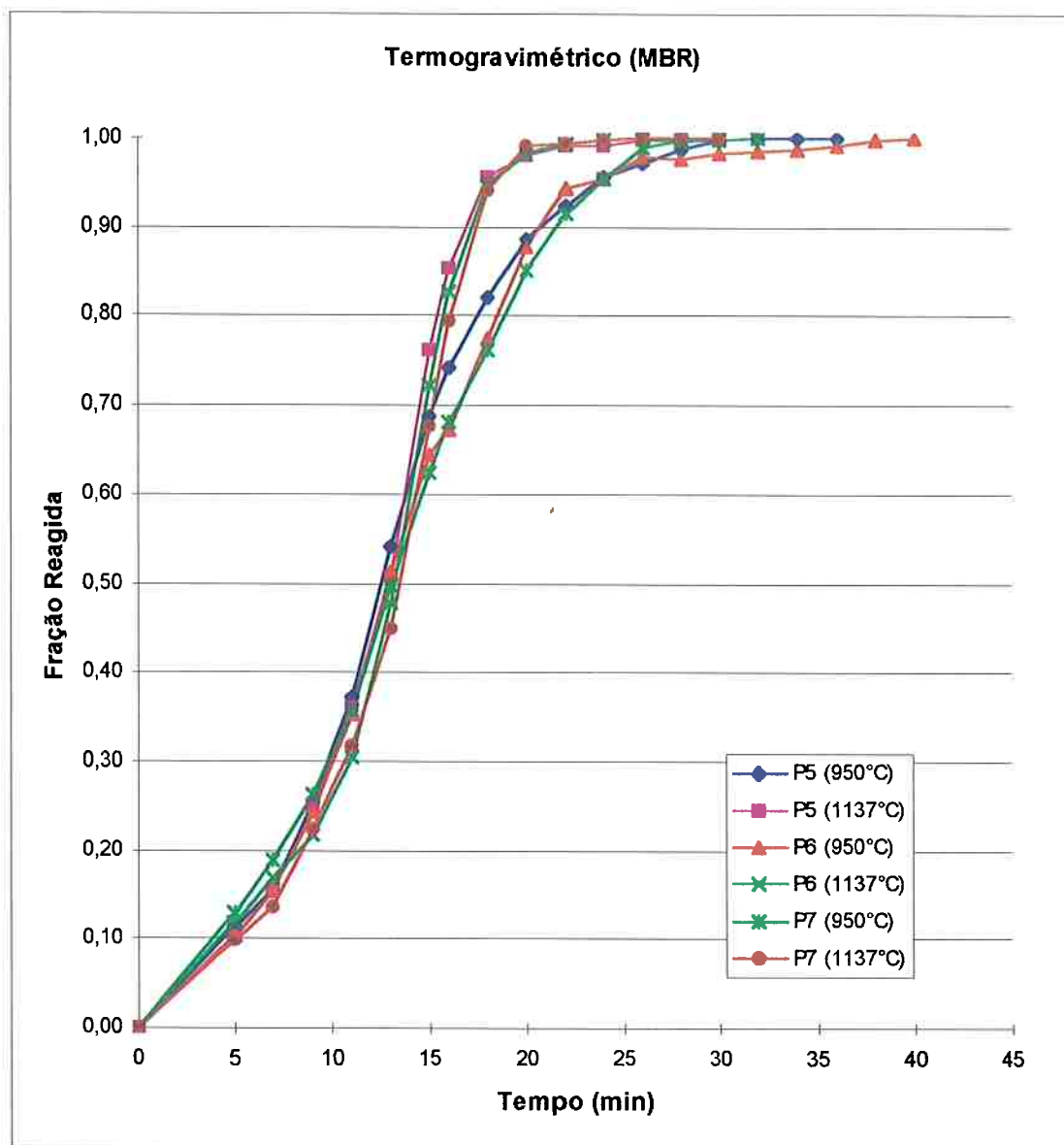


Fig. 15: Ensaio termogravimétrico com pelotas de minério MBR com uma taxa de aquecimento de 60 °C/min..

Comparando-se os resultados, pode-se observar que:

- Com composições diferentes de aglomerantes, tem-se os mesmos resultados para uma determinada temperatura.
- Para uma fração reagida de até 60% a reação independe da temperatura.

A partir daí, existe uma diferença razoável.

- Para uma reação de 98%, a 1137 °C leva-se em torno de 20 min., enquanto a 950 °C, esse tempo sobe para 30 min.

Não ocorreu crepitação.

Ocorreu um inchamento grande nessas pelotas, principalmente a 950 °C, onde observou-se o fenômeno do inchamento catastrófico. Observar que, para esta série, as pelotas eram mantidas às temperaturas até a estabilização da massa.

Podemos comparar ainda, esses resultados com os resultados com pelotas a base de poeira de sinterização como mostrado na figura 16:

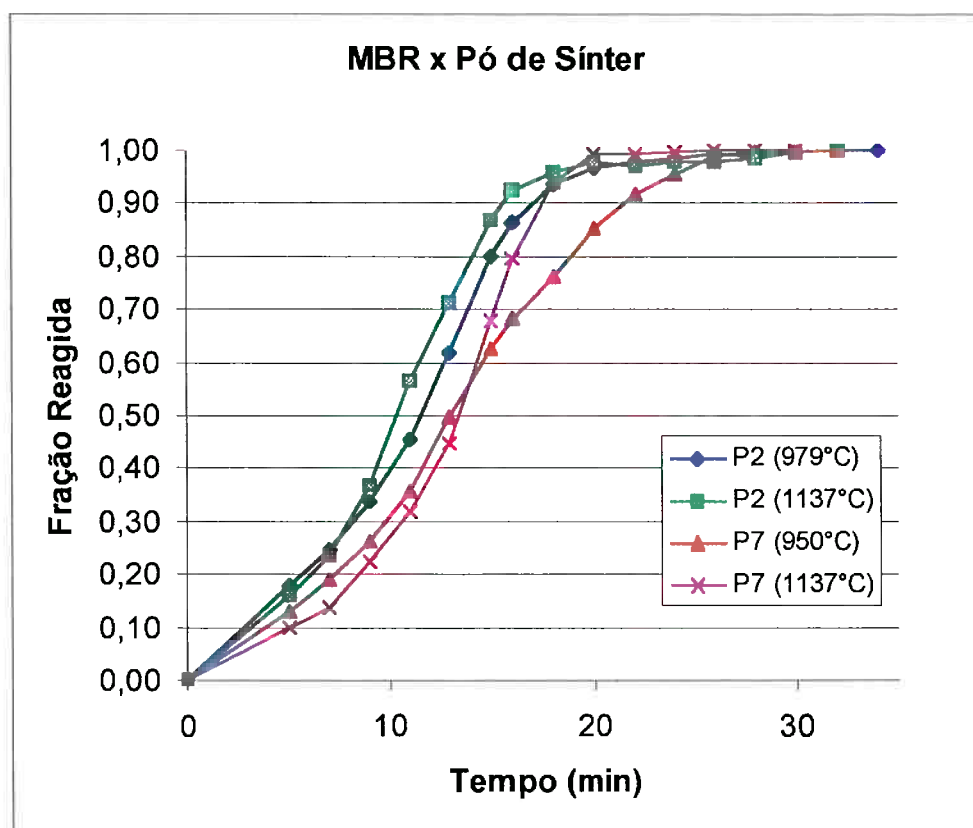


Fig. 16: Comparação dos ensaios termogravimétrico com taxa de aquecimento de 60 °C/min de pelotas com poeira de sinterização e minério MBR. Foram escolhidas as pelotas P2 e P7, pois esses possuem a mesma quantidade de aglomerantes.

A velocidade de reação das pelotas com poeira de sinterização é maior que com minério MBR, mesmo com uma temperatura inferior, para fração reagida de até 95%. Pode-se afirmar que a redutibilidade das poeiras de sinterização é maior do que as de minério de ferro MBR, para a taxa de aquecimento de 60 °C/min.

6.3. Ensaio Termogravimétrico Chegando Direto à Temperatura:

TABELA 6.3.a. Dados do ensaio termogravimétrico chegando direto à temperatura.

	P5		P6		P7	
	(950°C)	(1137°C)	(950°C)	(1137°C)	(950°C)	(1137°C)
m _{úmida} (g)	5.15	6.35	4.41	5.04	3.88	4.25
m _{seca} (g)	4.91	6.05	4.29	4.88	3.79	4.12
% H ₂ O	4.66	4.72	2.72	3.17	2.32	3.06
m _{final} (g)	3.50	3.70	3.04	2.96	2.54	2.52
ΔP (%)	28.72	38.84	29.14	39.34	32.98	38.83
φ _i (mm)	16.1	17.3	15.4	16.3	14.8	14.9
φ _f (mm)	18.9	19.7	18.5	17.4	16.3	16.2
%incham	61.77	47.66	73.36	21.64	33.59	28.52
Res (psi)	8	12	8	16	3	23
N(N/pelota)	10	14	11	25	5	41

Fração Reagida (Ensaio em atmosfera de Nitrogênio):

TABELA 6.3.b. Fração de redução do ensaio termogravimétrico chegando direto à temperatura de redução.

	P5		P6		P7	
	(950°C)	(1137°C)	(950°C)	(1137°C)	(950°C)	(1137°C)
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,146	0,217	0,109	0,265	0,127	0,229
2	0,297	0,409	0,246	0,478	0,245	0,381
3	0,379	0,536	0,376	0,634	0,412	0,567
4	0,435	0,646	0,478	0,726	0,495	0,723
5	0,537	0,733	0,555	0,836	0,568	0,817
6	0,631	0,800	0,671	0,892	0,681	0,902
7	0,689	0,906	0,735	0,929	0,741	0,954
8	0,741	0,936	0,775	0,999	0,762	0,984
9	0,787	0,975	0,833	1,000	0,805	0,990
10	0,820	0,999	0,878		0,851	0,993
11	0,847	0,999	0,896		0,898	0,998
12	0,887	0,999	0,943		0,915	0,998
13	0,902	1,000	0,949		0,933	0,999
14	0,924	1,000	0,955		0,954	0,999
15	0,937	1,000	0,969		0,967	1,000
16	0,956		0,979		0,988	
17	0,963		0,981		0,994	
18	0,971		0,985		0,997	
19	0,978		0,987		0,997	
20	0,987		0,988		0,998	
21	0,993					
22	0,994					

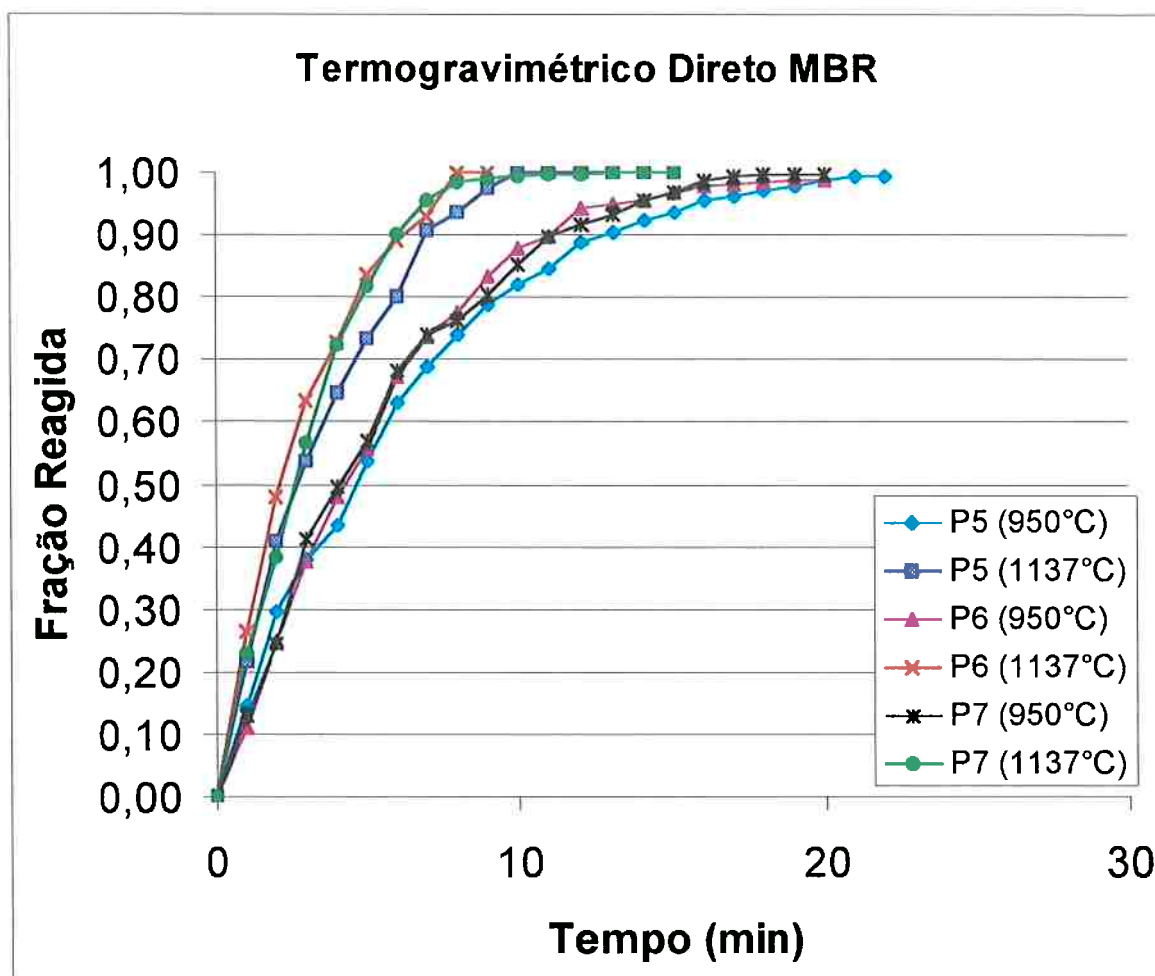


Fig. 17: Ensaio termogravimétrico chegando direto à temperatura de redução.

Neste gráfico Fig. 17, pode-se notar um forte efeito da temperatura sobre a fração reagida. Ou seja, a etapa controladora do processo é a transferência de calor para o interior da pelota, segundo Mourão⁽²⁾ e Nascimento⁽¹³⁾.

Novamente, não ocorreu crepitação.

Quanto ao inchamento, não chegou a ser um inchamento catastrófico, mas foi muito além do esperado.

O inchamento foi anormal para as pelotas P5 e P6 a 950 °C. O aquecimento direto a temperatura de 1137 °C, praticamente eliminou o inchamento anormal para pelotas P6 e P7, A pelota P7 foi a que mostrou melhor comportamento nesta série. Há indicação de que o inchamento diminui com a diminuição do teor de cimento e com a substituição de cimento por escória de alto-forno.

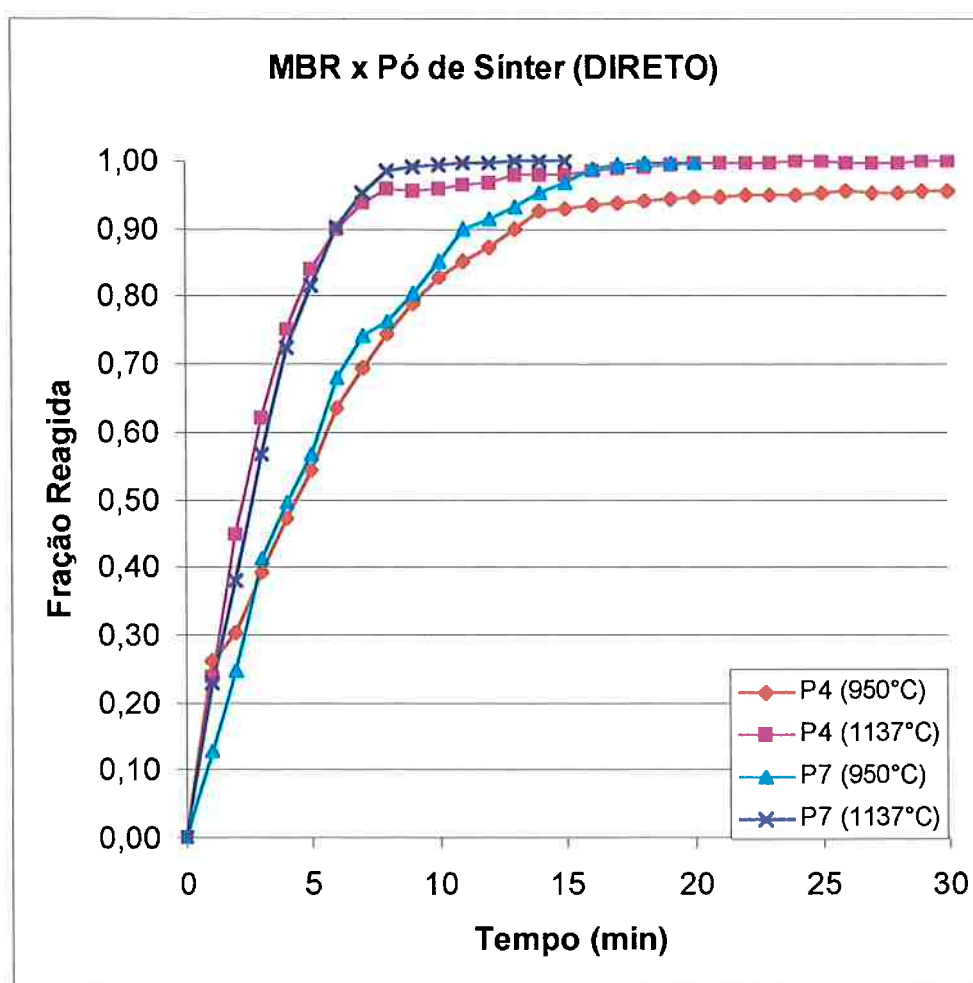


Fig. 18: Comparação dos ensaios termogravimétrico chegando direto na temperatura de pelotas com poeira de sinterização e minério MBR. Foram escolhidas as pelotas P4 e P7, pois esses possuem a mesma quantidade de aglomerantes.

Nesse gráfico, não pode-se notar a mesma diferença que na figura 16, na temperatura de 1137 °C. Nessa temperatura, até a fração reagida de 95% a diferença é muito pequena.

Já na temperatura de 950 °C, essa diferença é grande, indicando que o efeito da temperatura é mais importante nas pelotas com minério MBR do que com poeira de sinterização.

7. CONCLUSÕES:

a) Resistência:

O ensaio de resistência à compressão mostra que a resistência obtida após a redução, é extremamente baixa em relação ao que se obteve antes da redução, provando que a água de cristalização é a principal responsável pela resistência mecânica da pelota, como era de esperar. Mostrou também que para pelotas curadas com resistência a frio acima de aproximadamente 850 N/pelota, a resistência após a redução é maior do que as pelotas com resistência a frio menor que 700 N/pelota.

A resistência após o tratamento de ciclo térmico foi maior para pelotas de poeira de sinterização em relação às de minério de ferro. Este resultado

foi decorrente do inchamento anormal ocorrido com minério de ferro e não com a poeira de sinterização.

b) Reação:

A partir dos dados experimentais, tanto das pelotas auto-redutoras constituídas de resíduos de sinterização quanto das constituídas de minério MBR, pode-se concluir que os teores e tipos de aglomerantes nas faixas ensaiadas, pouco influíram no grau de reação para as temperaturas de 950 °C e 1137 °C.

O grau final de reação não altera, a 1137 °C, com a intensidade de aquecimento, embora com menor intensidade, necessite de maior tempo.

O efeito das temperaturas finais (950 °C e 1137 °C), no grau de redução, é bastante sensível para o minério de ferro MBR mas apresenta pouca diferença nas pelotas com poeira de sinterização, mostrando que esta poeira apresenta alta redutibilidade comparada com o minério MBR, para aquecimento de 60 °C. Porém, para aquecimento em maior intensidade (direto às temperaturas) a pelota de poeira de sinterização apresentou diferenças significativas na velocidade de reação quando submetidas às temperaturas de 950 °C e 1137 °C. Com aquecimento direto a 1137 °C,

praticamente não apresentou diferença nas velocidades de reação entre minério MBR e poeira de sinterização.

c) Inchamento:

Poeira de sinterização, praticamente, não apresentaram inchamento para os ciclos térmicos ensaiados, o mesmo não ocorrendo com as de minério MBR, pois, principalmente a 950°C, o inchamento foi catastrófico⁽⁸⁾. O inchamento foi minimizado com a redução do tamanho das pelotas.

d) Crepitação:

Quanto à crepitação, verificou-se que não houve em todas as pelotas, a ocorrência desse fenômeno.

8. BIBLIOGRAFIAS:

- (1) MARCHEZE, E. S.: “Resistência Mecânica a Frio e Crepitação em Pelotas Auto-Redutoras”. São Paulo, 1994, 100p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

- (2) MOURÃO, M. B.: “Análise do Processo de Redução de Minério de Ferro por Carbono na Forma de Pelotas Auto-Redutoras”. São Paulo, 1988, 191p. Dissertação de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- (3) SRB, J.; RŮŽIČKOVÁ, Z.: “Pelletization of Fines”. Elsevier, Amsterdam, 1988, p. 22.
- (4) SRB, J.; RŮŽIČKOVÁ, Z.: “Pelletization of Fines”. Elsevier, Amsterdam, 1988, p. 14 ~ 15.
- (5) CONSTRUCCI, M. A.; et al.: “Produção de Fe Gusa pelo Processo TECNORED”. Metalurgia e Materiais, Vol. 49, Nº 417, Maio/1993 p. 361.
- (6) CONSTRUCCI, M. A.; et al.: “The production of High Carbon Ferro-Chromium by the TECNORED Process”. Preceeding of XVth CMMI Congress, Johanesburg, SAIMM, 22, 1994, p. 217 ~ 220.
- (7) CONSTRUCCI, M. A.; et al.: “Produção de Fe Gusa pelo Processo TECNORED”. Metalurgia e Materiais, Vol. 49, Nº 417, Maio/1993 p. 361.
- (8) MANTOVANI, M. C.: “Comportamento a Frio e a Quente de Pelotas Auto-Redutoras de Resíduo de Aciaria Elétrica”. São Paulo, 1996, p. 40. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

- (9) NASCIMENTO JR., R. C.: “Uma Análise Microestrutural sobre Pelotas Auto-Redutoras”. São Paulo, 1994, 334p. Dissertação de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- (10) NASCIMENTO JR., R. C.: “O Inchamento de Pelotas Auto-Redutoras na Reciclagem de Resíduos Siderúrgicos”. Seminário de Reciclagem de Resíduos, Vitória, Maio/1997.
- (11) COSTA, P. H. C.: “Mecanismo de Cura de Pelotas Auto-Redutoras”. Documento Interno da TECNORED, 1986, p. 1 ~ 47.
- (12) NICHOLLS, R. "Inorganic Cements In Composite Construction Material Handbook". Prentice Hall, In c, New Jersey, USA, 1974, p. 125~180.
- (13) NASCIMENTO JR., R. C.: “Uma Análise Microestrutural Sobre Pelotas Auto-Redutoras”. São Paulo, 1994. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.