

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DOS
MATERIAIS - PPGEMM

BRIQUETAGEM DE FINOS DE FERRO-ESPONJA PARA UTILIZAÇÃO
EM ACIARIA ELÉTRICA

por

Felipe Amorim Berutti

Engenheiro Químico

Trabalho realizado no Departamento de Engenharia Metalúrgica da
Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Gradua
ção em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais - PPGEMM.

PORTO ALEGRE

1989

BRIQUETAGEM DE FINOS DE FERRO-ESPONJA PARA UTILIZAÇÃO EM
ACIARIA ELÉTRICA

D I S S E R T A Ç Ã O

Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica e dos Materiais - PPGEMM, como parte dos
requisitos para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa

por

Felipe Amorim Berutti

Engenheiro Químico

1989

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Área de Concentração: Metalurgia Extrativa e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Antônio C. F. Vilela
Eng. Metalúrgico, Dr. Ing.
PPGEMM/UFRGS

Banca Examinadora:

Arno Müller
Eng. Metalúrgico, Dr.
PPGEMM/UFRGS

Carlos Perez Bergmann
Eng. Metalúrgico, Dr. Ing.
UFRGS

Paulo Leal
Eng. Metalúrgico
Aços Finos Piratini S.A.

Antônio C. F. Vilela
Eng. Metalúrgico, Dr. Ing.
PPGEMM/UFRGS

Coordenador do PPGEMM

Adão Mautone
Doutor, PPGEMM/UFRGS

A G R A D E C I M E N T O S

Ao Prof. Dr.-Ing. Antônio C. F. Vilela pela orientação e estímulo.

Ao Prof. Dr.-Ing. Hartwig Rupp pela orientação inicial.

A Aços Finos Piratini S. A. pelo apoio técnico e material concedido, assim como pela permissão para divulgação dos dados experimentais relativos ao Convênio UFRGS/FUNDATEC/AÇOS FINOS PIRATINI.

Ao CNPq e à Capes pelo auxílio financeiro.

Aos colegas, professores e funcionários do PPGEMM pela colaboração e amizade.

R E S U M O

Os finos de ferro-esponja gerados pelos processos de redução direta de minérios de ferro, apesar da alta metalização, não são satisfatoriamente utilizados na aciaria elétrica.

Neste trabalho é analisada a briquetagem a frio de finos de ferro-esponja, cedidos pela Aços Finos Piratini S. A., como meio de se obter uma matéria-prima complementar para fabricação de aço em forno elétrico a arco.

Foram realizados testes iniciais de briquetagem, utilizando-se uma prensa hidráulica e matrizes de contenção, onde foram determinados parâmetros preliminares para a briquetagem dos finos com o uso de alcatrão e de melaço como agentes ligantes.

Utilizando-se uma máquina briquetadora contínua, foram obtidos briquetes de finos de ferro-esponja ligados com melaço e cal. Estes briquetes foram, primeiramente, caracterizados por intermédio de testes de tamboreamento, compressão, medidas de densidade e composição química. Posteriormente, eles foram fundidos em um forno de indução de laboratório para comparação do consumo de energia na fabricação de aço com pelotas de ferro-esponja e sucata.

A B S T R A C T

Sponge iron fines generated by iron ore direct reduction processes, in spite of their high metallic grade, do not have satisfactory use in electric arc furnaces.

This work analyses the cold briquetting of sponge iron fines, provided by Aços Finos Piratini S. A., as a way to get a complementary raw material to steelmaking.

Preliminary briquetting tests were carried out, with an hydraulic press and steel matrixes, using molasses and tar as binder agents. Some briquetting parameters were determined.

Sponge iron fines briquettes were obtained using a continuous roll press and molasses and lime as binder agent. These briquettes, at first, were characterized by: tumbler tests, compression tests, density measurements and chemical analysis. Hence, they were melted in a laboratory kiln, in order to compare the energy consumption in steelmaking with pellets and scrap.

I N D I C E

1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 - Aspectos gerais da geração e utilização de finos de ferro-esponja	3
2.2 - O processo de briquetagem	6
2.2.1 - <i>Briquetagem industrial</i>	10
2.2.2 - <i>Briquetagem de ferro-esponja</i>	13
2.3 - Caracterização dos briquetes	16
2.4 - Utilização de ferro-esponja em fornos elétricos a arco	19
2.4.1 - <i>Pelotas de ferro-esponja</i>	19
2.4.2 - <i>Briquetes de ferro-esponja</i>	23
3 - BRIQUETAGEM EM LABORATÓRIO (PRÉ-TESTES)	25
3.1 - Equipamentos	25
3.2 - Matérias-Primas	26
3.3 - Procedimento experimental	27
3.4 - Resultados obtidos e discussão	29
3.4.1 - <i>Briquetes obtidos com a matriz I</i>	29
3.4.2 - <i>Briquetes obtidos com a matriz II</i>	30
3.5 - Conclusões	31

4 - BRIQUETAGEM CONTÍNUA	33
4.1 - Equipamentos	33
4.2 - Matérias-primas	35
4.3 - Procedimento experimental	36
4.4 - Resultados obtidos e discussão	38
4.4.1 - <i>Composição química</i>	38
4.4.2 - <i>Tamboreamento</i>	40
4.4.3 - <i>Resistência à ruptura</i>	41
4.4.4 - <i>Densidade</i>	42
4.5 - Conclusões	42
5 - FUSÃO EM FORNO DE INDUÇÃO	44
5.1 - Equipamentos	44
5.2 - Matérias-primas	45
5.3 - Procedimento experimental	46
5.4 - Resultados obtidos e discussão	48
5.4.1 - <i>Consumo de energia</i>	48
5.4.2 - <i>Composição do aço</i>	50
5.4.3 - <i>Rendimento metálico</i>	55
5.5 - Conclusões	56
6 - CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES	57
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
8 - FIGURAS	63

9 - ANEXOS	75
9.1 - Processo SL/RN	75
9.2 - Processo Hy1	77
9.3 - Históricos de fusão	80

ÍNDICE DAS TABELAS

Tab. I	- Processos comerciais de redução direta.	3
Tab. II	- Especificações do ferro-esponja destinado à aciaria elétrica.	20
Tab. III	- Dados comparativos de consumo de tempo e energia, obtidos para o mesmo aço, com aproximadamente 100 corridas para cada composição de carga (26).	23
Tab. IV	- Análise química típica dos finos de ferro-esponja (AFP).	26
Tab. V	- Análise química típica do melaço (fonte CIENTEC).	27
Tab. VI	- Características dos testes de tamboreamento.	34
Tab. VII	- Composição química e metalização dos finos de ferro-esponja utilizados nas seções 4 e 5.	35
Tab. VIII	- Especificações do cal utilizado.	36
Tab. IX	- Composição química e metalização dos briquetes produzidos.	38
Tab. X	- Resultados dos testes de ruptura.	41
Tab. XI	- Densidades ópticas.	42
Tab. XII	- Especificações do aço 1025 usado como sucata.	45
Tab. XIII	- Composição química e metalização dos briquetes e do ferro-esponja utilizados nos testes.	46
Tab. XIV	- Dados gerais das fusões.	49
Tab. XV	- Consumos de energia para fusão de sucata na primeira carga, conforme condição do forno.	50
Tab. XVI	- Consumos de energia para fusão da segunda carga.	52
Tab. XVII	- Teores de carbono e enxofre dos aços obtidos.	53
Tab. XVIII	- Rendimentos metálicos conforme matéria-prima.	55

INDICE DAS FIGURAS

Fig. 1	- Desenho esquemático do sistema de briquetagem em laboratório.	63
Fig. 2	- Curvas de compactação: calcário, salgema e argila.	64
Fig. 3	- Curva de compactação do ferro-esponja.	64
Fig. 4	- Desenho esquemático do sistema de briquetagem contínua com prensa de rolos.	65
Fig. 5	- Fluxograma da briquetagem industrial de finos de ferro-esponja.	65
Fig. 6	- Variação do consumo de energia em função da metalização do ferro-esponja da carga.	66
Fig. 7	- Variação do consumo de energia em função da porcentagem de ferro-esponja na carga.	66
Fig. 8	- Matrizes utilizadas na briquetagem laboratorial.	67
Fig. 9	- Fotografia do tambor utilizado nos testes laboratoriais.	67
Fig. 10	- Distribuição granulométrica dos finos de ferro-esponja.	68
Fig. 11	- Variação do índice de tamboreamento em função do teor de alcatrão.	69
Fig. 12	- Variação do índice de tamboreamento em função da pressão de compactação utilizada.	69
Fig. 13	- Variação do teor de enxofre em função da quantidade de ligante adicionada.	70
Fig. 14	- Variação do teor de carbono em função da quantidade de ligante adicionada.	70
Fig. 15	- Variação do índice de tamboreamento em função da porcentagem de ligantes para várias pressões de compactação.	71
Fig. 16	- Variação da densidade em função da pressão de compactação para várias porcentagens de ligante.	71

Fig. 17	- Fotografia da máquina briquetadora contínua.	72
Fig. 18	- Fotografia do forno de indução empregado.	72
Fig. 19	- Fotografia das matérias-primas empregadas.	73
Fig. 20	- Fotografia da operação de vazamento.	73
Fig. 21	- Variação do consumo de energia em função do tempo.	74
Fig. A1	- Processo SL/RN para minérios de ferro.	76
Fig. A2	- Fluxograma simplificado do processo HyL	79
Fig. A3	- Histórico da fusão 1.	80
Fig. A4	- Histórico da fusão 3.	81
Fig. A5	- Histórico da fusão 4.	82
Fig. A6	- Histórico da fusão 5.	83
Fig. A7	- Histórico da fusão 6.	84
Fig. A8	- Histórico da fusão 7.	85
Fig. A9	- Histórico da fusão 8.	86
Fig. A10	- Histórico da fusão 9.	87
Fig. A11	- Histórico da fusão 10.	88
Fig. A12	- Histórico da fusão 11.	89
Fig. A13	- Histórico da fusão 12.	90
Fig. A14	- Histórico da fusão 13.	91
Fig. A15	- Histórico da fusão 14.	92
Fig. A16	- Histórico da fusão 15.	93
Fig. A17	- Histórico da fusão 16.	94
Fig. A18	- Histórico da fusão 17.	95
Fig. A19	- Histórico da fusão 18.	96
Fig. A20	- Histórico da fusão 19.	97
Fig. A21	- Histórico da fusão 20.	98

Fig. A22 - Histórico da fusão 21.	99
Fig. A23 - Histórico da fusão 22.	100
Fig. A24 - Histórico da fusão 23.	101
Fig. A25 - Histórico da fusão 24.	102
Fig. A26 - Histórico da fusão 25.	103
Fig. A27 - Histórico da fusão 26.	104
Fig. A28 - Histórico da fusão 27.	105

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O ferro-esponja ou DRI -Direct Reduced Iron- é o produto final dos processos de redução direta de minérios de ferro. Os processos de redução direta existentes funcionam sob princípios técnicos variados, com redutores gasosos ou sólidos, utilizando fornos de cuba, fornos rotativos ou reatores de leito fluidizado, descarregando o ferro-esponja a temperaturas entre 700 e 800 °C ou, quando integrados a um sistema de resfriamento, a temperaturas abaixo de 100 °C. Estas diferenças fazem com que, de processo para processo, o ferro-esponja não seja um produto único, tendo variações principalmente nas seguintes propriedades: tamanho, forma, temperatura, grau de metalização, teor de carbono livre, estrutura e componentes minerais da ganga (1).

Com relação à forma final do ferro-esponja, convém salientar sua dependência direta da forma do minério utilizado, já que nos processos de redução direta - contrariamente ao processo convencional de redução, via alto-forno - não há fusão do produto, havendo portanto uma conservação da forma original. Este fato é também responsável pela alta porosidade do ferro-esponja, causada pela saída do oxigênio da estrutura do minério, ou seja, pela própria redução do minério.

Contudo, todos os processos de redução direta têm em comum o fato de serem acompanhados por uma indesejável geração de

finos, partículas de ferro-esponja com diâmetros menores que 3 mm. Esta geração de finos, causada pelas solicitações físicas e químicas sofridas pelo material durante o processo de redução direta, pode chegar até a 15% da produção total de ferro-esponja, dependendo de fatores como processo e minério utilizados (2).

Os finos de ferro-esponja, apesar da alta metalização, são inadequados para utilização direta em aciaria elétrica, pois além das perdas ocasionadas pelo difícil manuseio, apresentam ainda maior facilidade de reoxidação, devido a sua alta superfície específica.

O presente estudo tem como objetivo principal a análise técnica do processo de briquetagem a frio de finos de ferro-esponja, como meio de se obter uma matéria-prima, similar ao ferro-esponja em pelotas, para fabricação de aço em forno elétrico a arco.

Para tanto, os seguintes objetivos foram fixados no âmbito deste trabalho:

- estabelecimento em laboratório de parâmetros preliminares de briquetagem;
- obtenção de briquetes em prensa contínua;
- caracterização dos briquetes obtidos;
- fusão dos briquetes em forno elétrico.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Aspectos gerais da geração e utilização de finos de ferro-esponja

Sendo os processos de redução direta os responsáveis pela geração dos finos de ferro-esponja, torna-se interessante, inicialmente, ter-se uma visão geral dos referidos processos. A tabela I mostra os principais processos comerciais de redução direta em atividade atualmente, classificados conforme o redutor utilizado e o tipo de forno (3).

Tab. I - Processos comerciais de redução direta.

Redutor	Tipo de Forno	Processos
Gasoso	Cuba	Midrex Midrex-HIB Hyl-III NSC Plasmarec
	Retorta	Hyl
	Leito fluidizado	Fior
Sólido	Rotativo	SL/RN Combismelt Krupp-Codir ACCAR DRC TDR
	Cuba	Kinglor-Metor

No Brasil, existem duas usinas integradas, produzindo aço, via redução direta: na Bahia, a Usina Siderúrgica da Bahia S.A. - USIBA, pelo processo HYL; e no Rio Grande do Sul, a Aços Finos Piratini S.A. - AFP, que utiliza o processo SL/RN. Uma breve descrição desses processos é apresentada nos anexos.

Tomando-se como exemplo a Aços Finos Piratini, tem-se que a produção total de ferro-esponja da usina é da ordem de 135-140 toneladas por dia, das quais aproximadamente 10% é encontrada na forma de finos. Isto sem considerar as perdas de material devido ao arraste pelos gases que saem do forno. Nessa empresa, os finos são transportados da unidade de redução direta, em caminhões, até a aciaria. Num possível transporte através de correia transportadora, a perda de material seria quase total. O transporte via caminhão envolve mão-de-obra e problemas de poluição. O passo seguinte é o carregamento dos finos no cestão, por meio de eletro-imã. O cestão é levado da balança ao forno onde é aberto. Todas estas etapas envolvem perdas, seja pela difícil vedação do cestão, seja pelas correntes ascendentes de ar quente durante o carregamento do forno. Além disso, os finos tendem a aglomerar-se no fundo do forno e quando reagem, o fazem violentamente, causando problemas de segurança e impedindo a utilização de mais de 5 t por corrida. Todos estes problemas fazem dos finos um material indesejável na aciaria. Porém, para aços de alto enxofre, a utilização de 1 t de finos por corrida é norma da usina, a fim de minimizar o acúmulo de material fino. Para aços especiais o material não é utilizado (4).

Apesar de existirem métodos de aglomeração largamente utilizados em siderurgia, como é o caso da pelotização e da sinterização, as características específicas dos finos de ferro-esponja tornam estes métodos inadequados. Isto se deve a reoxidação do ferro metálico que ocorreria nas altas temperaturas e atmosferas oxidantes inerentes a estes processos (5, 6).

A reoxidação e as propriedades pirofóbicas do ferro-esponja, agravadas nos finos pela sua maior reatividade, consequência da alta superfície específica, são as principais causas de restrições a processos alternativos de aglomeração de finos, pois a aglomeração deve ser conduzida a baixas temperaturas e sem a presença de água, deve também possibilitar o menor tempo possível de estocagem dos finos (7, 8).

A natureza instável do ferro-esponja é manifestada de várias maneiras. O material é capaz de reoxidar pelo simples contato com o ar, mesmo a temperatura ambiente. As altas temperaturas aceleram as reações de reoxidação, e como estas reações são predominantemente exotérmicas, existirá uma massa crítica que não deve ser excedida em pilhas de estocagem. Esta massa deve ser tal que possibilite a dissipação do calor gerado numa taxa suficientemente alta a ponto de prevenir que a temperatura na qual se dá a combustão espontânea não seja atingida. Esta condição está diretamente relacionada com o fluxo de ar, tempo e temperatura de redução, método de resfriamento e manuseio do material na redução. Também a exposição à água pode causar rápida reoxidação com conseqüente aumento de temperatura e libera-

ção de hidrogênio (9). Estes fatores não são críticos para as pelotas de ferro-esponja produzidas pelo processo SL/RN, tornando-se importantes, porém, para os finos gerados por este processo.

Considerando-se estes aspectos, muitas tentativas para solucionar o problema dos finos foram propostas, menciona-se aqui, algumas delas: utilização dos finos embalados em sacolas plásticas ou em velhos tonéis diretamente no forno elétrico; passivação da pilha de finos com aerosóis plásticos ou outros produtos e introdução dos finos diretamente no aço líquido através de um sistema de injeção com lança pneumática (2, 9, 10).

Scheu (2) reconhece vantagens no sistema de injeção com lança, nos casos em que os finos de ferro-esponja podem ser utilizados na própria planta em que são gerados, mas considera a instalação de uma planta de briquetagem como a única alternativa economicamente viável, quando se considera o fator transporte e a utilização por mais de um usuário.

2.2 - O processo de briquetagem

A briquetagem é uma operação unitária da engenharia de processos mecânicos onde através de uma compactação de material fino disperso, pela aplicação de forças mecânicas externas, obtém-se peças uniformes individuais. Estas peças individuais são denominadas briquetes.

As forças mecânicas externas podem ser obtidas com o auxílio de qualquer equipamento, sejam prensas hidráulicas, prensas de rolos contínuas, extrusoras, etc. Pode-se briquetar ape-

nas o material fino ou adicionar agentes externos que melhorem as condições de briquetagem, propriedades químicas ou outra característica qualquer (7, 11, 12, 13, 14).

A compactação de material em matrizes de contenção com utilização de prensas hidráulicas, conforme esquema da figura 1, é um sistema adequado para estudos de parâmetros individuais da briquetagem, pois possibilita um maior controle do processo. Consiste em colocar no interior de uma matriz (molde), o material a ser briquetado, aciona-se então a prensa até uma força de compactação previamente determinada. A força atuará por um intervalo de tempo constante quando será retirada para proceder-se a extração do corpo de prova formado.

O processo de briquetagem, ao contrário do que se poderia esperar, é muito complexo e influenciado por diversos fatores. Apenas uma pequena parte destes fatores podem ser medidos e descritos por valores numéricos prontamente reproduzíveis. A maior parte, porém, só pode ser descrita de modo impreciso, por ser impossível medi-los ou por serem desconhecidos dados característicos da medição. No primeiro grupo estão: umidade, peso específico e a granel, tamanho e composição granular do material de partida e densidade aparente do produto briquetado. Propriedades como estrutura granular, dureza, plasticidade, elasticidade, atrito interno, entre outras, fazem parte do segundo grupo, devido principalmente às variações que ocorrem nestas propriedades, pelo aumento da pressão, durante o processo de briquetagem.

A energia necessária para a compactação é uma função da pressão de prensagem, do curso de compressão e do tempo de compactação. Para pressões suficientemente altas o tempo de compactação passa a ter influência desprezível. Em função disso, pode-se obter curvas de compactação como as da figura 2 (12).

Rieschel (12) determinou, com o auxílio de um computador e impressora gráfica adaptados a uma prensa hidráulica, a seguinte função, a partir de 29 curvas de compressão de 20 materiais diferentes. Foi observado que os 20 materiais seguem a função com grande precisão, e presume-se que o processo de compressão siga uma lei descrita pela função:

$$P = B \cdot \left(e^{(1 - Y_{vo}/Y_v)/C.M} - 1 \right)$$

- B : fator de material, kgf/cm²
- C : fatores de material
- P : pressão de prensagem, kgf/cm²
- M = 0,4343
- Y_{vo} : fator de compressão inicial
- Y_v : fator de compressão com pressão P
- Y = densidade aparente/peso específico sem poros

Rieschel (1, 12, 15) dividiu as curvas obtidas em quatro seções representativas das principais fases do processo de briquetagem:

- FASE 1, sem pressão (sem energia mensurável), caracterizada pela seção da curva que coincide com a abscissa;
- FASE 2, de 0 a 30 graus de inclinação tangencial em relação à abscissa. Fase em que há o preenchimento dos vazios do material solto e a simultânea fragmentação de grãos grosseiros, com a deformação predominantemente plástica;
- FASE 3, de 30 a 75 graus de inclinação tangencial. Fase durante a qual a deformação plástica é paulatinamente sobreposta pela deformação elástica, mediante o crescente enchimento dos vazios.
- FASE 4, a partir de 75 graus de inclinação. Fase em que grandes aumentos de pressão geram pequenos aumentos do fator de compressão. A deformação elástica é predominante, e normalmente, ao se retirar a pressão, ocorrem rupturas parciais ou totais dos briquetes.

Na figura 2, são apresentadas curvas de compressão de calcário, salgema e argila, para fins comparativos. Estes materiais foram escolhidos por terem processos de briquetagem bastante diferentes. O calcário praticamente não pode ser briquetado sem ligante e a argila é um material extremamente fácil de briquetar, estando o salgema em posição intermediária.

A primeira grande diferença visível é o início de elevação da pressão, enquanto o salgema começa com 68% a argila pode

ser comprimida sem pressão até 86%. Tanto calcário como argila chegam rapidamente à faixa de deformação elástica, caracterizando uma rápida transição plástica-elástica, enquanto que o salgem apresenta uma elevação mais uniforme, indicando que o preenchimento de vazios se dá simultaneamente com a fragmentação dos grãos.

A curva de compressão do ferro-esponja, figura 3, apresenta-se muito favorável. Trata-se de ferro quase puro, extraordinariamente poroso. Devido a esta grande porosidade, 65 a 70%, o ferro-esponja exibe uma deformabilidade plástica que conduz a uma redução volumétrica dos grãos individuais. São obtidos briquetes bastante resistentes embora com porosidade final de 30 a 40%. Extraordinariamente alto é o dispêndio de trabalho específico por unidade de volume, representado pela área abaixo da curva (12).

2.2.1 - *Briquetagem industrial*

Industrialmente, o equipamento mais utilizado é a prensa de rolos contínua, que é constituída de dois rolos de prensagem que giram em sentidos opostos com a mesma velocidade. O material fino é carregado pela parte superior, no ponto em que os rolos se encontram, onde sofre a compactação entre os moldes simétricos que produzem o briquete. Esta operação está esquematizada na figura 4.

O processo de briquetagem em prensa de rolos é de análise ainda mais complexa que em prensas hidráulicas, devido ao

grande número de variáveis que afetam a operação de prensagem. Estas variáveis foram divididas por Johanson (16) em três grandes grupos:

- propriedades inerentes do material;
- dimensões físicas e parâmetros de projeto;
- processo e condições de operação da prensa.

A seguir são apresentadas brevemente algumas das mais importantes.

. Diâmetro dos rolos

Quanto maior o diâmetro dos rolos, maior será a pressão de compactação obtida, para as mesmas condições de prensagem. O tamanho do briquete deve ser compatível com o diâmetro dos rolos, briquetes maiores necessitam rolos maiores.

. Largura dos rolos

A largura dos rolos é diretamente proporcional à produção desejada, a força e o torque requeridos aumentam na mesma proporção, sendo portanto, os fatores que limitam a largura de uma prensa.

. Abertura entre rolos

A tendência é levar a abertura entre rolos ao mínimo, de maneira que o material compactado solte-se facilmente em briquetes individuais. Porém, uma maior aproximação dos rolos aumenta o desgaste da ferramenta e uma distância ótima, deve ser encontrada.

. Cavidades

As cavidades da superfície dos rolos devem ser projetadas para soltarem o briquete sem quebrá-lo. Para materiais que tenham tendência a aderir ao rolo, as cavidades devem ser de pequena profundidade.

. Força e torque

Os requisitos de força e torque podem ser calculados pelas seguintes equações:

$$\text{Força} = P.b.D.F/2 \qquad \text{Torque} = P.b.D^2.T/4$$

P: pressão mínima para formação de bons produtos

b: largura do rolo

D: diâmetro do rolo

F: fator de força (adimensional)

T: fator de torque (adimensional)

Em geral, F e T podem ser expressos como uma função do fator de compressibilidade do material e da razão d/D , apenas, onde: d é o diâmetro médio do briquete.

. Sistema de alimentação

O sistema de alimentação por gravidade consiste numa calha levemente divergente acima dos rolos, com um mecanismo de controle de alimentação ajustável. A simplicidade e o baixo consumo com energia, manutenção e desgaste, além da capacidade de alimentação uniforme, mesmo para rolos bastante largos, tornam este sistema bastante adequado. Contudo, em alguns casos, como por exemplo, sólidos muito aerados ou que requerem alta pressão

de alimentação, um sistema de alimentação forçada torna-se necessário. O sistema de alimentação forçada mais versátil é o parafuso alimentador. Pelo controle da velocidade angular do parafuso a quantidade e a pressão de alimentação podem ser variadas continuamente (16).

2.2.2 - Briquetagem de ferro-esponja

Para o ferro-esponja, de um modo geral, a briquetagem a frio sem ligantes só é possível quando as seguintes condições são obtidas: baixo teor de carbono livre, grau de metalização alto, alta ductilidade e deformabilidade e distribuição granulométrica favorável (12, 17).

Rieschel (12) briquetou ferro-esponja sem ligante utilizando forças de prensagem consideradas altas. Estes briquetes, com volume de 10 a 20 cm³, não resistiram a um posterior tamboreamento. A utilização de ligantes reduziu a demanda de força de prensagem em torno de 50 %.

O teor de carbono livre deve ser considerado em relação à adição ou não de ligantes, pois um teor de mais de 1% impossibilita a briquetagem sem ligantes.

Quanto à temperatura do ferro-esponja descarregado pelos diferentes processos de redução, surge a opção pela briquetagem a quente ou a frio. Quando o material é descarregado a quente, em temperaturas de 700 a 800 °C, a briquetagem evita a reoxidação imediata do material. Quando o material é descarregado a frio, apenas a fração mais fina deve ser briquetada (1).

A briquetagem de finos de ferro-esponja apresenta, segundo Steinhöfel (17), as seguintes vantagens principais:

- passivação como resultado da redução do volume de poros;
- melhoramento da transportabilidade;
- utilização para múltiplos propósitos (forno elétrico a arco ou a oxigênio);
- melhoramento das condições ambientais.

Com vistas à utilização industrial, a seleção do ligante apropriado deve considerar os seguintes critérios: disponibilidade em escala industrial; baixo custo; influência positiva na qualidade do briquete e menor desgaste da ferramenta de prensagem. Os ligantes que encontram utilização preferencial são os seguintes (10, 17, 18, 19, 20, 21):

- melaço e cal;
- silicato de sódio e cal;
- licor sulfito;
- ácido sulfúrico residual;
- piche, betume.

Mizui (10) realizou testes com prensa hidráulica e prensa industrial, briquetando finos de ferro-esponja com vários ligantes em várias proporções. Os ligantes utilizados foram: melaço e cal, silicato de sódio, piche e alcatrão. Os ligantes que obtiveram os melhores resultados, em relação à qualidade dos briquetes obtidos com a prensa hidráulica, foram, na

ordem: o silicato de sódio e o sistema melação/cal. Na prensa industrial, porém, os briquetes obtidos com silicato como ligante, apresentaram tendência a desintegrarem-se, tendência que não foi detectada nos briquetes obtidos com o sistema melação/cal.

Piche e betume apresentam a desvantagem de necessitar um aquecimento do ferro-esponja a temperaturas de 150 a 200 °C, os briquetes portanto devem ser resfriados a temperatura ambiente onde terão a resistência mecânica final. A utilização de licor sulfito e ácido sulfúrico apresenta como desvantagem a inclusão de impurezas no briquete, sob forma de enxofre (17).

A utilização de briquetagem a frio de finos de ferro-esponja, tem aplicação industrial recente. Faccione e outros (20), situam as primeiras tentativas neste sentido, a fim de estabelecer critérios de projeto e práticas operacionais, no ano de 1969, nos Estados Unidos. Indicam ainda que a primeira operação industrial se deu em 1974 no Canadá.

A partir daí, muitas indústrias passaram a utilizar a briquetagem a frio como solução para o problema dos finos. As soluções encontradas variam de caso para caso, dependendo dos processos e da disponibilidade de matéria-prima.

Com pequenas variações, o fluxograma apresentado na figura 5 pode representar as plantas de briquetagem em escala industrial (10, 21).

2.3 - Caracterização dos briquetes

A fim de caracterizar a qualidade de materiais aglomerados, é conhecida uma série de métodos de ensaio que fornecem medidas de resistência do material aglomerado. O principal objetivo destes ensaios é obter uma previsão do comportamento do material, quando da sua utilização prática.

Estes ensaios sofrem múltiplas variações e modificações visando torná-los mais significativos em relação à utilização prática. Fornecem valores auxiliares, que devem ser usados com reservas na avaliação da utilidade de um determinado material para uma determinada aplicação. Isto porque, são conhecidos poucos métodos de ensaio, geralmente não normalizados e aplicados de forma diversa, prejudicando as suas reprodutibilidades. Os métodos conhecidos não reproduzem de modo suficiente as solicitações encontradas na prática (14, 15, 23).

. Resistência à compressão

É um ensaio que procura analisar o comportamento dos briquetes quando submetidos a esforços mecânicos de compressão. Consiste em medir a pressão necessária para romper um corpo de prova entre duas placas paralelas. Os briquetes devem possuir duas superfícies planas paralelas, briquetes cilíndricos, por exemplo. O índice de resistência à compressão pode ser calculado pela expressão:

$$I_{rc} = \frac{F}{A} = \frac{\text{carga máxima de ruptura, kgf}}{\text{área da seção transversal do briquete, cm}^2}$$

Influem neste ensaio: altura, volume e massa do briquete, bem como as dimensões do briquetes em relação à superfície do êmbolo de ensaio e a sua velocidade de avanço.

. *Resistência à ruptura*

Para briquetes que não possuem superfícies planas paralelas, e para evitar a usinagem que pode tornar-se complexa, a resistência à ruptura pode ser determinada pela compressão entre dois êmbolos, e tomando-se como índice de resistência à ruptura a carga, em kgf, na qual ocorre a ruptura. Uma ruptura bem definida só vai ocorrer em briquetes frágeis, para alguns briquetes ligados com agentes externos não é possível medir uma carga de ruptura com boa precisão. A aplicação da carga é extremamente importante neste ensaio, a fim de se obter valores reprodutíveis e comparáveis (15).

. *Resistência ao tamboreamento*

Para simular as condições de transporte e manuseio, os testes de tamboreamento representam, melhor que os de compressão, o comportamento mecânico dos briquetes.

O ensaio consiste em colocar-se uma amostra de briquetes em um tambor, e após um certo número de rotações, peneirar-se todo o material. A construção e o acionamento do equipamento tem forte influência nos resultados, e os diferentes diâmetros de tambores não podem ser corrigidos por fatores de conversão.

O ensaio de tamboreamento mais conhecido é o chamado MI CUM, normalizado para coque de alto-forno, do qual se obteve o

1/2 MICUM (tambor com metade da largura) descrito por Björkwall e Thaning (22), que é normalizado (ISO) para minérios de ferro, pois tem a vantagem de exigir menor quantidade de carga.

Um tambor com diâmetro de 1 m e 0,5 m de largura, com duas pás de 50 mm de altura, colocadas no seu interior, é carregado com 15 kg de material aglomerado, previamente seco. O tambor é então acionado, e após 200 voltas, a uma velocidade de 25 rpm, o material é peneirado. Utiliza-se peneiras de 6,3 e 0,5 mm. O resultado é dado como:

T : índice de tamboreamento - porcentagem de massa que permaneceu maior que 6,3 mm;

A : índice de abrasão - porcentagem de massa que diminuiu a diâmetros menores que 0,5 mm.

Devem ser realizados testes duplos, e as diferenças entre eles devem ser menores que: $TT = - 0,03 T + 3,8$ e

$$AA = 0,03 A + 0,8.$$

. Resistência a quedas

Para simular as forças de impacto a que se sujeitam os materiais após sucessivas transferências desenvolveu-se o ensaio de quedas. Consiste em deixar cair uma amostra de material de uma altura definida sobre uma superfície metálica. A fração de massa que se mantém maior que um determinado diâmetro será o índice de quedas.

2.4 - Utilização de ferro-esponja em fornos elétricos a arco

2.4.1 - Pelotas de ferro-esponja

A metalurgia do ferro-esponja, isto é, a fabricação de aço via redução direta de minério de ferro e posterior fusão do ferro-esponja em conjunto com sucata em fornos elétricos a arco, é uma rota flexível e lucrativa, especialmente quando se considera o custo de capital requerido para altos-fornos, aciaria a oxigênio, unidades de sinter e de coque. Além disso, o processo via redução direta possibilita o uso de carvões e minérios que não poderiam ser utilizados no processo convencional (24).

O forno elétrico a arco é o instrumento mais versátil da produção de aço, e um dos mais eficientes, pois permite produzir praticamente todos os tipos de aço. É flexível quanto à carga e consegue baixos teores de fósforo e enxofre com alta eficiência energética (25).

A introdução de pelotas de ferro-esponja como carga do forno elétrico, em conjunto com a sucata, foi objeto de extenso estudo (24, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37).

Em comparação com a sucata, são esperadas algumas propriedades favoráveis ao ferro-esponja (32):

- forma regular, permite o carregamento contínuo no forno;

- composição uniforme, permite uma previsão da composição do banho;
- ausência de elementos contaminantes, favorecendo seu uso na produção de aços especiais;
- baixo enxofre, permite redução do tempo de refino e diminui custos de dessulfuração;
- baixo fósforo.

A tabela II mostra as especificações desejadas para o ferro-esponja destinado à aciaria elétrica (9).

Tab. II - Especificações para o ferro-esponja destinado à aciaria elétrica (9).

teor Fe	> 90%
metalização	> 90%
O ₂ como FeO, máx	2 %
Enxofre , máx	0.01 %
Fósforo, máx	0.045%
Cobre, máx	0.02 %
Carbono	0.5 - 2.5%
Ganga total	4 %

O ferro-esponja pode ser carregado no forno elétrico de maneira contínua ou descontínua. O carregamento contínuo apresenta a grande vantagem de diminuir o número de cestas necessárias e, portanto, o tempo de carregamento, o que aumenta a produtividade. O método de carregamento contínuo com superposição dos períodos de fusão e refino é provavelmente o mais econômico para processamento de ferro-esponja no forno elétrico. Este método só é possível quando a composição do ferro-esponja é constante e conhecida, e o ganho de tempo é aproxima

madamente igual ao tempo de refino dos processos com 100% de sucata. As pelotas podem ser carregadas continuamente pela abóboda ou pelas paredes do forno. A fusão das pelotas deve ser individual, sem aglomerações, a fim de operar-se sem alteração de temperatura.

O consumo de energia pode ser dividido em 3 parcelas:

- energia necessária para aquecimento e fusão da carga;
- energia para reações químicas;
- energia para compensar perdas térmicas.

Quanto maior o grau de redução do ferro-esponja, menor a quantidade de oxigênio contida e portanto menor o consumo de energia para reduzir os óxidos de ferro (38).

A figura 6 mostra a influência da metalização do ferro-esponja sobre o consumo de energia para a fusão da carga (32).

Com a introdução de ferro-esponja na carga de um forno elétrico espera-se os seguintes efeitos positivos: redução do tempo total entre vazamentos (tap-to-tap time) e conseqüentemente uma menor perda de energia por radiação; uma maior produtividade, pelo menor número de carregamentos, permitindo uma operação constante do transformador. Estes efeitos serão acompanhados pelos seguintes efeitos negativos esperados: consumo adicional de energia para reduzir o óxido de ferro residual do ferro-esponja e para fundir o excedente de escória (24).

O processo de fundir uma ou mais cargas de sucata e então adicionar ferro-esponja continuamente permite a determinação de parâmetros de processo importantes para as condições existentes. Um destes parâmetros é a taxa de alimentação do ferro-esponja, que é regulada pela medida da temperatura do banho, de maneira tal que esta permaneça constante. Uma baixa taxa de alimentação produzirá um aumento da temperatura do banho, o que pode ser negativo do ponto de vista do consumo de refratários. Já, uma taxa de alimentação alta produzirá uma queda da temperatura do banho e a formação de um *iceberg* de ferro-esponja, além de um comportamento irregular do arco (29).

A taxa de alimentação varia de acordo com a operação de cada forno, porém pode-se citar uma faixa média de 28 a 32 kg/MW.min para temperaturas em torno de 1570 °C com consumo de energia da ordem de 520 a 595 kWh/t DRI (26, 29, 31, 32).

A influência da adição de ferro-esponja sobre o consumo específico de energia de um forno elétrico é apresentada na figura 7, que mostra o comportamento normalmente encontrado para as diferentes proporções de carregamento (24, 26, 32).

Leal e outros (26) concluem que a introdução de ferro-esponja na carga do forno elétrico tem balanço econômico positivo. O consumo adicional de energia decorrente do uso de ferro-esponja é compensado, não só pela economia no tempo total de operação, conforme mostra a tabela III, como também pelas reduções de 50% do consumo de oxigênio e de 6% do consumo de eletrodos, resultando um ganho significativo de energia.

Tab. III - Dados comparativos de consumo de tempo e energia, obtidos para o mesmo aço, com aproximadamente 100 corridas para cada composição de carga (26).

Ferro-esponja %	Tempo min			Consumo de Energia kWh/t		
	tap-tap	fusão	refino	total	fusão	refino
0	185	95	68	497	398	99
35	173	120	39	570	495	75
45	166	114	36	578	505	73

Além disso, o ferro-esponja é um material de composição química conhecida e praticamente constante, livre das flutuações de teores de contaminantes comuns nas sucatas. Isto faz com que o uso do ferro-esponja permita obter valores residuais de fósforo, enxofre, níquel, cobre e cromo que dificilmente se obteriam com uma carga composta exclusivamente de sucata.

Finalmente, para produtores de aços especiais, o uso de ferro-esponja possibilita um mínimo de operação metalúrgica e, conseqüentemente, um mínimo de riscos de reprovação de qualidade (26).

2.4.2 - Briquetes de ferro-esponja

Com relação aos briquetes produzidos com adição de ligantes aos finos de ferro-esponja, são esperadas diferenças de comportamento em relação às pelotas de ferro-esponja. Se o ligante contiver elementos característicos de ganga ácida, o volume de escória vai aumentar e também o tempo total de operação.

Alguns ligantes ainda podem aumentar os teores de enxofre e fósforo ou outro elemento que afetará negativamente a qualidade do aço ou o tempo de refino. Outros ainda poderão gerar fumaça excessiva durante a fusão. Estas considerações não eliminam o valor dos briquetes, mas devem ser considerados cuidadosamente no momento da sua utilização (9).

A densidade dos briquetes é um fator importante. Não deve ser excessiva, pois durante o carregamento contínuo podem penetrar muito no banho, resultando em um tempo de espera muito grande, para que o briquete reflutue para a interface da escória, onde se dá o refino. Este fenômeno começa a ocorrer com densidades acima de $5,5 \text{ g/cm}^3$. Porém, a densidade dos briquetes deve estar acima da densidade da escória fundida ($2,7 \text{ g/cm}^3$), para evitar o problema chamado iceberg, que ocorre quando o ferro-esponja menos denso não pode fugir da camada de escória, ao ser carregado no forno (9, 10).

3 - BRIQUETAGEM EM LABORATÓRIO (PRÉ-TESTES)

Foram realizados, inicialmente, testes de briquetagem em laboratório a fim de se estabelecer alguns parâmetros genéricos necessários ao desenvolvimento do trabalho, tais como:

- força de compactação;
- densidade;
- teores de carbono e enxofre dos aglomerados;
- resistência mecânica.

3.1 - Equipamentos

Os briquetes foram compactados utilizando-se uma prensa hidráulica, com capacidade de até 70 toneladas. Foram utilizadas duas matrizes para contenção do material. A primeira com capacidade de moldar apenas um briquete por vez (MATRIZ I), utilizada nos testes iniciais, e a segunda com capacidade para 5 briquetes simultaneamente (MATRIZ II). Ambas as matrizes estão esquematizadas na figura 8.

Para testar a resistência dos briquetes utilizou-se um tambor rotativo, com diâmetro interno de 130 mm, espessura de parede de 5 mm. Durante o teste o tambor gira a uma velocidade de 30 rpm. Internamente há duas aletas salientes de 20 mm, em posições diametralmente opostas, soldadas na parede e que funcionam como pás. O tambor é acionado por um motor de corrente contínua e um sistema de redução possibilita dar um torque

adequado a uma velocidade definida (figura 9).

3.2 - Matérias-Primas

. *Finos de ferro-esponja*

Os finos de ferro-esponja utilizados foram obtidos junto a Aços Finos Piratini S.A. e tem sua análise química mostrada na tabela IV. Foram considerados finos de ferro-esponja, para estes testes, o material com diâmetro menor que 1 mm.

Tab. IV - Análise química típica de finos de ferro-esponja (AFP).

Finos de ferro-esponja		%
Ferro total	(Fe t)	90,0
Ferro metálico	(Fe m)	80,0
Teor de carbono		0,3
Teor de enxofre		0,03

A figura 10 mostra a distribuição granulométrica dos finos de ferro-esponja utilizados.

. *Agentes ligantes*

Dentro da grande faixa de possíveis ligantes, foram escolhidos para os testes preliminares, o melaço e o alcatrão. Estes ligantes tem a vantagem de aumentar o teor de carbono dos aglomerados, o que equivale na prática a uma metalização mais alta dos briquetes com eles produzidos.

O melaço utilizado foi obtido junto a Açucar Gaúcho S.A. e tem sua análise química mostrada na tabela V.

Tab. V - Análise química típica do melão (fonte CIENTEC).

Melão	%
Carboidratos	60,8
Proteínas	4,4
Lipídeos	0,6
Umidade	26,1
Cálcio	2,4
Fósforo	0,3
Outros	5,4

O alcatrão utilizado foi cedido pela Companhia Riograndense de Nitrogenados - CRN e apresenta as seguintes características principais (14):

- densidade (20 - 40 °C)	1,086
- poder calorífico superior (b.s.)	8965 cal/g
- poder calorífico inferior (b.s.)	8579 cal/g
- poder de fluidez	19 °C
- pH	5,7
- viscosidade Saybolt (furol a 65 °C)	568,40
- teor de enxofre	0,38%.

3.3 - Procedimento experimental

Os finos de ferro-esponja foram misturados aos ligantes obtendo-se um peso total de 25 g de mistura. A porcentagem de ligantes variou de 1 a 9% em relação à massa total. O material foi então colocado no interior da matriz e os punções comprimidos até a força desejada. Ao atingir-se a força de compactação prevista esta era retirada imediatamente, para então efetuar-se

a extração do corpo de prova.

Foram obtidos os briquetes cilíndricos com diâmetro de base de 21,10 mm e altura variável entre 15 e 20 mm, em função da pressão de compactação aplicada (de 500 a 3500 kgf/cm²).

Os briquetes obtidos foram submetidos a testes de tamboreamento, depois de medida a sua densidade, e então, nos casos em que houve variação da quantidade de ligante, tiveram carbono e enxofre analisados.

No teste de tamboreamento, um ou mais briquetes foram colocados no interior do tambor e postos a girar. Com este movimento as aletas existentes no interior carregavam os briquetes até uma certa altura, deixando-os então cair. Após um tempo pré-determinado, recolheu-se o material e pesou-se o retido em peneira Tyler 7 (2,83 mm). A razão entre esta massa e a massa inicial foi denominada Índice de Tamboreamento (IT). Este índice passou a caracterizar a resistência à abrasão do aglomerado.

Para os briquetes cilíndricos obtidos, o cálculo da densidade foi obtido pela medida, com paquímetro, da altura do corpo de prova que ao multiplicar-se pela superfície da base, constante e conhecida, resulta no volume. O briquete foi então pesado e a densidade aparente obtida pela relação massa/volume.

As análises químicas foram realizadas no analisador de carbono e enxofre do Laboratório de Análises Metalúrgicas do Departamento de Metalurgia da UFRGS.

3.4 - Resultados obtidos e discussão

Os resultados obtidos tanto com a matriz I como com a matriz II são apresentados e discutidos a seguir sob os seguintes aspectos: influência do teor de ligante, influência da pressão de compactação, análise química e densidade.

3.4.1 - Briquetes obtidos com a matriz I

. Tamboreamento - influência do teor de ligante

A figura 11 mostra a curva obtida para o índice de tamboreamento em relação à porcentagem de alcatrão utilizado na fabricação dos briquetes.

Observa-se que a resistência à abrasão aumenta continuamente com o aumento da quantidade de alcatrão adicionado, até um limite, onde forma-se um patamar (teores acima de 5%).

A formação do patamar se deve ao fato de que a partir de um certo limite, o excesso de ligante é expulso para a superfície do briquete durante a prensagem.

. Tamboreamento - influência da pressão de compactação

A figura 12 mostra a variação do índice de tamboreamento com a pressão de compactação, para briquetes produzidos com 5% de alcatrão.

Observa-se que a pressão de compactação tem grande influência sobre a resistência à abrasão até um determinado limi-

te, quando então passa a exercer pequena influência. Isto, além de outros motivos, deve-se ao fato de que com estas pressões de compactação já se atinge os limites do teste de tamboreamento proposto (valores próximos a 100%).

. Análise química

A composição química dos briquetes obtidos foi analisada apenas em função dos teores de carbono e enxofre, por serem estes os elementos mais importantes com vistas a sua utilização posterior.

A figura 13 mostra a variação dos teores de enxofre em relação à adição de ligantes. Observa-se que alcatrão e melaço incorporam seu enxofre ao briquete de forma semelhante.

A figura 14 mostra a variação do teor de carbono em relação à adição de ligantes. Aqui o melhor resultado foi com o alcatrão que praticamente aumenta o teor de carbono em pontos percentuais equivalentes aos da sua adição.

3.4.2 - Briquetes obtidos com a matriz II

A figura 15 mostra a influência do teor de ligante na resistência ao tamboreamento, para as várias pressões de compactação utilizadas. Observa-se um aumento do índice de tamboreamento com o aumento da porcentagem de ligante, tanto para o melaço quanto para o alcatrão. A influência da pressão de compactação é pequena, pois diferentes compactações levam a pontos em uma mesma faixa, havendo entrecruzamento.

A figura 16 mostra a variação da densidade com o aumento da pressão de compactação para várias porcentagens de ligantes. Observa-se um aumento da densidade com o aumento da pressão de compactação para ambos os ligantes. A influência da porcentagem de ligante é pequena, porém nota-se um pequeno aumento da densidade com o aumento do teor de ligante. Apenas no caso do alcatrão, há inversão dos dois últimos pontos da curva de 7% de ligante com os dois últimos da de 5% e com o último da curva de 3%, provavelmente pela migração de ligante para a superfície nestas condições, quais sejam, 7% de alcatrão e faixa de maior pressão.

Pode-se observar, para os ligantes utilizados, que a pressão de compactação afeta sensivelmente a densidade dos briquetes obtidos, enquanto que praticamente não afeta a sua resistência à abrasão. Todavia, observa-se o contrário para a porcentagem de ligante, pois este fator afeta sensivelmente a resistência à abrasão, mas não tem grande influência na densidade obtida.

De um modo geral, os resultados aqui obtidos, com um procedimento mais sistemático e mais corpos de prova, repetem as tendências sugeridas pelos testes iniciais com a matriz I.

3.5 - Conclusões

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- os agentes ligantes (melaço e alcatrão) e as pressões de compactação utilizadas (500 a 3000 kgf/cm²) mostraram-se

adequados à fabricação de briquetes com boas características mecânicas;

- as densidades obtidas, na faixa de 3 a 4 g/cm³, são satisfatórias para utilização dos briquetes em aciaras elétricas;

- alcatrão e melão apresentaram desempenhos semelhantes no que se refere a densidades, índices de tamboreamento e pressões de compactação;

- mostrou-se necessário um conjunto de testes mais próximo, em relação ao uso industrial dos briquetes, a fim de melhor caracterizar as suas propriedades mecânicas.

4 - BRIQUETAGEM CONTÍNUA

A partir dos dados anteriormente obtidos, partiu-se para a elaboração de briquetes numa prensa de rolos contínua, visando-se estabelecer uma rotina de operação satisfatória da prensa e um ponto de referência para a fabricação de novos briquetes.

Portanto, objetivou-se também o desenvolvimento ou a adaptação de testes apropriados para avaliação das principais propriedades dos briquetes, com vistas a sua posterior utilização na aciaria elétrica. Nesta fase foram enfocadas as seguintes propriedades:

- composição química;
- resistência ao tamboreamento;
- resistência à ruptura;
- densidade.

4.1 - Equipamentos

Foi utilizada uma máquina briquetadora contínua fabricada pela Koppern & Co.K.G. (Alemanha), acionada por um motor elétrico de 9 kW de potência. Os rolos de prensagem tem diâmetro de 440 mm e largura de 90 mm e possuem 2 fileiras de concavidades, lado a lado. O conjunto briquetador mede 2 m de altura, 1,6 m de largura e 2 m de profundidade (fig. 17).

O equipamento de briquetagem apresenta a possibilidade de variação da quantidade da alimentação, por intermédio de re-

gulagem da abertura do funil de alimentação por gravidade. Outros fatores como distância entre rolos, velocidade de rotação, foram mantidos constantes.

Para a mistura das matérias-primas utilizou-se uma betoneira industrial com capacidade para 80 kg de material.

Para os testes de resistência à ruptura foi utilizada uma máquina universal de compressão, fabricada pela GF Limited (Suíça), que se destina a testes com aglomerados de areia.

O teste de tamboreamento utilizado foi adaptado do teste chamado 1/2 Micum, descrito por Björkwall e Thaning (16), que se destina a avaliação da resistência à abrasão e a quedas de aglomerados de minério de ferro (pelotas e sinteres).

A tabela VI mostra as características de ambos os testes.

Tab. VI - Características dos testes de tamboreamento.

1/2 Micum	Característica	Tambor adaptado
1000	Diâmetro (mm)	760
500	Largura (mm)	500
50	Altura pás (mm)	50
$15 \pm 0,15$	Carga (kg)	$8 \pm 0,1$
25 ± 1	Velocidade (rpm)	25 ± 1
200	Revoluções	200
60 min (105 °C)	Secagem	60 min (105 °C)
< 0,5 mm	Resist. Abrasão	< 3 mm
> 6,3 mm	Resist. Quedas	> 12 mm

Os valores dos diâmetros das peneiras utilizadas no teste adaptado foram escolhidos a fim de se manter a mesma classi-

ficação utilizada pela indústria, onde são considerados finos, partículas com diâmetros menores que 3 mm (resistência à abrasão). Enquanto que o material de granulometria entre 3 e 12 mm é separado do maior que 12 mm por ter um maior grau de metalização.

Foi mantido também o critério de realizar-se testes duplos, considerando-se válidos os resultados em que as diferenças encontradas, estejam dentro dos seguintes limites:

$$dT < - 0,03 T + 3,8 \quad \text{e} \quad dA < 0,03 A + 0,8,$$

onde T e A são os índices de quedas e de abrasão, respectivamente.

4.2 - Matérias-primas

. Finos de ferro-esponja

Os finos de ferro-esponja utilizados foram obtidos junto à Aços Finos Piratini S.A. e tem sua análise química mostrada na tabela VII.

Tab. VII - Composição química e metalização dos finos de ferro-esponja utilizados nas seções 4 e 5.

Finos	%
Ferro total (Fe _t)	90,04
Ferro metálico (Fe _m)	80,66
Metalização	89,58
Carbono	0,27
Enxofre	0,037
CaO	1,56
MgO	0,41
SiO ₂	3,60
Al ₂ O ₃	1,30

Nesta fase do trabalho foram considerados finos, as partículas menores que 3 mm, já que esta passou a ser a classificação utilizada pela Aços Finos Piratini S. A.

. *Melaço e cal*

O melaço utilizado foi obtido junto a Açucar Gaúcho S. A. e tem sua análise química mostrada na tabela V (seção 3). Foi utilizada cal comercial, com as seguintes especificações:

Tab. VIII - Especificações da cal utilizada.

Característica	%	
CaO	50	mín
SiO ₂	5	máx
MgO	1	máx
S	0,1	máx
Perda ao fogo	35 a 40	

4.3 - Procedimento experimental

Num primeiro estágio, foram feitas briquetagens com proporções variadas de matérias-primas e procurando-se otimizar os ajustes da briquetadora, a fim de se obter maior eficiência e briquetes mais resistentes.

A rotina a seguir foi a que apresentou o melhor resultado entre as testadas. Os briquetes assim produzidos são o objeto de estudo desta parte do trabalho.

A mistura a briquetar foi preparada colocando-se reci-

pientes com finos de ferro-esponja (24 ± 1 kg) e CaO ($1 \pm 0,1$ kg) na betoneira que foi então acionada. Com betoneira em funcionamento foi adicionado o melaço ($3 \pm 0,2$ g) sobre o material. Após 5 min a mistura foi descarregada e levada à máquina briquetadora, sendo então briquetada em bateladas de aproximadamente 8 kg. Produzidos os briquetes, o mesmo procedimento foi utilizado na preparação de nova mistura.

O teste de tamboreamento foi realizado em duas bateladas de 8 kg de material seco em estufa por 1 h. O material tamboreado foi então peneirado e as diferentes frações resultantes foram pesadas.

Devido à forma ovalada dos briquetes, foram feitos testes de ruptura, sobre os 3 planos transversais às 3 direções principais dos briquetes que em ordem crescente foram chamadas a, b, c.

Os briquetes, a ser medida a densidade, foram impermeabilizados com uma fina camada de verniz. Após 24 horas, já com o verniz seco, os briquetes foram pesados e mergulhados em uma proveta graduada de 250 ml, com água até a marca de 100 ml exatamente. Foram então colocados os briquetes (de 3 a 5) e o seu volume foi estimado pelo volume de água deslocada. Foram utilizados 20 briquetes.

Os briquetes produzidos tiveram sua composição química analisada no laboratório de análises químicas da Aços Finos Piratini S.A.

4.4 - Resultados obtidos e discussão

Foram obtidos 80 kg de briquetes na máquina briquetadora contínua.

4.4.1 - Composição química

A tabela IX mostra a composição química dos briquetes produzidos.

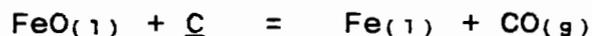
Tab. IX - Composição química e metalização dos briquetes produzidos.

Briquetes	%
Ferro total (Fe _t)	75,82
Ferro metálico (Fe _m)	65,53
Metalização	86,43
Carbono	2,99
Enxofre	0,240
CaO	4,48
MgO	0,40
Al ₂ O ₃	2,07
SiO ₂	6,33

Ao comparar-se a composição química dos briquetes com a composição dos finos com que foram produzidos, apresentada na tabela VII, observa-se a influência da adição de ligante:

- pela diminuição dos teores de ferro total e metálico;
- pela diminuição da metalização;
- pelo aumento dos teores de carbono e enxofre;
- pelo aumento do teor de ganga.

Em relação ao teor de carbono, é interessante a produção de briquetes auto-redutores, ou seja, briquetes em que a quantidade de carbono seja suficiente para a redução dos óxidos de ferro presentes. Considerando-se que apenas o FeO esteja presente e que a reação:



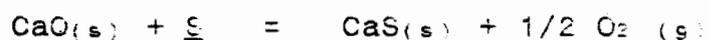
seja a única atuante na redução do óxido de ferro no forno elétrico, tem-se para cada 100 g de briquetes produzidos:

10,29 g de Fe não metálico

13,23 g de FeO

e, portanto, seriam necessários 2,2 g de carbono para satisfazer a estequiometria da reação. Em 100 g de briquetes tem-se 2,99 g de carbono e, portanto, o briquete produzido pode ser considerado auto-redutor.

No caso do teor de enxofre, espera-se que a cal seja adicionada em quantidade suficiente para retirá-lo do banho. Considerando-se que a reação



seja a única responsável pela dessulfuração no forno elétrico, tem-se para cada 100 g de briquetes:

0,24 g de enxofre

e, portanto, seriam necessários 0,42 g de CaO para satisfazer a estequiometria da reação. Em 100 g de briquetes tem-se 4,48 g de CaO e, portanto, uma quantidade mais que suficiente para a dessulfuração.

4.4.2 - Tamboreamento

Nos testes de tamboreamento realizados, os índices obtidos para os briquetes produzidos foram:

$T = 36,3 \% [>12 \text{ mm }]$ e $A = 59,9 \% [<3 \text{ mm }]$, onde T é o índice de quedas, resultado da média entre os dois valores obtidos ($T_1 = 36,7$ e $T_2 = 35,9$), e representa a fração que permaneceu maior que 12 mm após o teste, e A é o índice de abrasão médio ($A_1 = 60,3$ e $A_2 = 59,4$), que representa a fração de material que decrepitou a diâmetros menores que 3 mm.

O mesmo teste de tamboreamento foi realizado utilizando pelotas de ferro-esponja produzidas pela Aços Finos Piratini, pelotas com diâmetros médios maiores de 12 mm, e os índices obtidos foram:

$T = 88,1 \% [>12 \text{ mm }]$ e $A : \text{menor que } 1 \% [<3 \text{ mm }]$.

A comparação destes valores com os resultados encontrados no teste de tamboreamento com os briquetes não parecem satisfatórios. Porém, a alta resistência mecânica das pelotas provem do minério, necessária para o forno de redução. As solicitações a que serão submetidos os briquetes na aciaria elétrica não exigem dos briquetes uma resistência mecânica tão grande quanto a das pelotas.

O teste 1/2 Micum foi desenvolvido para avaliar a qualidade de minérios de ferro, assim como de pelotas e sinteres obtidos a partir destes minérios, a serem utilizados em alto-forno, onde as solicitações mecânicas são bastante severas e a

alta resistência mecânica das matérias-primas é uma imposição. Os valores ideais e mínimos dos índices de quedas e abrasão para os minérios, as pelotas e os sinteres foram encontrados empiricamente como resultado da prática operacional.

Com o desenvolvimento deste trabalho e de trabalhos futuros nesta área, junto a Aços Finos Piratini, espera-se encontrar os índices mínimos do teste de tamboreamento adaptado para que os briquetes sejam utilizados sem problemas na aciaria. Então, verificar-se-á se o teste de tamboreamento necessita novas modificações ou se os briquetes obtidos precisam de uma maior resistência mecânica.

4.4.3 - Resistência à ruptura

Os resultados obtidos no teste de ruptura adaptado são mostrados a seguir:

Tab. X - Resultados do teste de ruptura.

Direção	Número de briquetes	Resistência média kg/bric	Desvio padrão
a	8	65 ± 5	15
b	9	79 ± 6	20
c	9	86 ± 9	27

Observa-se que, provavelmente, devido a sua forma ovalada, os briquetes testados apresentaram a maior resistência quando comprimidos contra a sua maior dimensão.

4.4.4 - Densidade

O quadro a seguir mostra os resultados obtidos para as densidades dos briquetes.

Tab. XI - Densidades obtidas.

Corpos de prova	Massa (g)	Volume (ml)	Densidade (g/cm ³)
4	151	50	3,02
4	142	47	3,02
5	180	58	3,10
3	110	37	2,97
4	140	46	3,04
Desvio padrão			0,04
Média			3,04 ± 0,01

A densidade média obtida para os briquetes produzidos pela máquina briquetadora contínua foi de 3,04 g/cm³.

Este valor, no início da faixa obtida nos briquetes produzidos em laboratório, é porém, satisfatório para utilização dos briquetes na aciaria elétrica, pois é semelhante ao da densidade das pelotas de ferro-esponja (2,95 g/cm³).

4.5 - Conclusões

Os resultados obtidos com os testes adaptados de tamboreamento e de resistência à compressão são uma primeira avaliação, e não tem significado em valores absolutos quando compara-

dos com os testes originais, porém, são de grande utilidade para a avaliação dos briquetes que serão produzidos no futuro.

No entanto, pode-se concluir que:

- foram obtidos valores iniciais para os testes de resistência ao tamboreamento e à ruptura. Um valor único ou mesmo uma faixa de valores ótima de caracterização dos briquetes ainda não pode ser fixado, dada a natureza empírica dos testes;

- os briquetes obtidos apresentaram resistência mecânica menor que a das pelotas de ferro-esponja;

- o briquete produzido é auto-redutor, isto é, possui carbono em quantidade suficiente, 2,99%, para reduzir os óxidos de ferro presentes;

- o briquete produzido possui CaO em quantidade suficiente, 4,48%, para promover a dessulfuração de seu enxofre;

- a densidade dos briquetes obtidos, 3,04 g/cm³, é satisfatória para fusão em fornos elétricos.

5 - FUSÃO EM FORNO DE INDUÇÃO

Esta parte do trabalho, tem por objetivo, comparar o comportamento durante a fusão entre os briquetes obtidos e os materiais metálicos comumente utilizados pela Aços Finos Piratini, ou seja, o ferro-esponja em pelotas e a sucata. A fusão dos materiais será analisada sob três aspectos: energia gasta para fundir os diferentes materiais, avaliação dos teores de carbono e enxofre dos aços produzidos e rendimento obtido em função do material utilizado.

5.1 - Equipamentos

Forno de indução

O sistema de fusão por indução eletromagnética utilizado foi do tipo VIP, de alta frequência, com capacidade máxima de potência de 20 kW, fabricado pela INDUCTOTHERM S.A. O sistema é mostrado na figura 18, e tem as seguintes características técnicas:

Potência máxima de fusão	20	kW
Controle de potência (contínuo)	0 a 100	%
Frequência de operação	9600	Hz
Potência de ligação	24	kVA
Capacidade de carga máxima	20	kg
Tensão de alimentação	480	V
Frequência de alimentação	60	Hz
Água de refrigeração (3,5 kgf/cm ²)	16	l/min
Basculamento		manual
Espiras independentes (cadinhos)		duas

. *Cadinho*

O cadinho foi adaptado para a capacidade desejada de 5 kg e foi revestido com refratário. O refratário utilizado foi Basemix (nome comercial), que é um refratário de natureza básica, composto de cerca de 90% de óxido de magnésio.

5.2 - Matérias-primas

A figura 19 mostra os três materiais utilizados nas fusões.

. *Sucata*

Foram utilizadas como sucata, pastilhas cilíndricas de aço 1025, com aproximadamente 50 g de peso. A tabela XII mostra as especificações do aço utilizado.

Tab. XII - Especificações do aço 1025 usado como sucata.

C	0,22 - 0,28	P máx	0,04
Si	0,15 - 0,30	Cr máx	0,20
Mn	0,30 - 0,60	Ni máx	0,25
Al	0,20 - 0,35	Mo máx	0,06
S máx	0,05	Cu máx	0,35

. *Ferro-esponja*

Foram utilizadas pelotas de ferro-esponja cedidas pela Aços Finos Piratini S.A. O material é o mesmo utilizado na produção e a sua composição química está na tabela XIII.

Tab. XIII - Composição química e metalização dos briquetes e do ferro-esponja utilizados nos testes.

	Briquetes Produzidos	Ferro-esponja	
		Pelotas	Finos
Fe t	75,82	95,15	90,04
Fe m	65,53	91,11	80,66
Metalização	86,43	95,75	89,58
Carbono	2,99	0,03	0,27
Enxofre	0,240	0,011	0,037
CaO	4,48	0,95	1,56
MgO	0,40	0,35	0,41
Al ₂ O ₃	2,07	0,70	1,30
SiO ₂	6,33	2,30	3,60

. Briquetes

Os briquetes utilizados são corpos ovalados com uma massa média de 36 g e foram obtidos pela briquetagem da mistura dos finos de ferro-esponja com 14% de ligante composto proporcionalmente de 3 kg melaço para 1 kg de CaO e já descrita no item 3. A tabela XIII mostra as análises químicas dos briquetes utilizados nesta parte do trabalho.

5.3 - Procedimento experimental

Foram realizadas ao todo 27 fusões, sendo que, cada fusão pode ser dividida em duas etapas. A primeira sempre com sucata, a segunda com a adição de pelotas de ferro-esponja (10 fusões), briquetes (11 fusões) ou sucata novamente (6 fusões).

Os testes de fusão obedeceram a seguinte rotina, que

foi determinada em pré-testes:

- pesagem do material;
- acionamento do forno com sucata e CaO;
- determinação do tempo de fusão completa da carga de sucata;
- medição da temperatura - T1;
- início da adição do material da segunda carga (sucata, pelotas ou briquetes);
- determinação do tempo para a fusão completa da segunda carga;
- medição da temperatura - T2;
- retirada de escória e adição de alumínio;
- operação de vazamento;
- pesagem dos lingotes e análise química.

A medida das temperaturas foi feita com termopares tipo Platina-Platina Rhodio 10% (Tipo S), fabricados pela ECIL S.A. e as diferenças de potencial geradas foram medidas com milivôl-tímetro.

A adição de CaO visa assegurar o trabalho com uma escória básica, enquanto que o alumínio foi adicionado para desoxidar o aço. Não foram feitos acertos de composição química em termos de C, S, P, Si, Mn ou dos demais elementos residuais.

O material fundido foi vazado em dois tipos de coquilhas (Fig. 20), sendo um apropriado para corpos de prova de análises químicas (geralmente três corpos de prova), e outro maior

para o restante do material. As análises químicas do material foram realizadas na Aços Finos Piratini S.A.

5.4 - Resultados obtidos e discussão

Para cada uma das fusões foi elaborado um histórico de fusão. Todos os históricos encontram-se no item 9.3 dos anexos.

Na primeira parte do histórico estão relatadas a hora e o tempo de cada operação, a potência com que se operou e as mensagens relativas à operação, além dos dados de cada carga.

Cabe salientar que as alterações de potência foram ditadas pela operação do forno, não sendo possível reproduzir as mesmas variações de potência para todas as fusões.

Na segunda parte do histórico, encontram-se os gráficos da variação de potência e energia em relação ao tempo.

A partir dos históricos de todas as fusões foi elaborada a tabela XIV.

5.4.1 - Consumo de energia

A sucata foi o material utilizado como primeira carga em todas as fusões. Existe, a princípio, uma diferença significativa no consumo de energia da primeira carga. Esta diferença se deve ao fato de que em algumas fusões partiu-se com o cadinho frio, enquanto que em outras, a carga foi colocada no cadinho logo após o vazamento da carga anterior (forno quente) ou após um intervalo variável (forno pré-aquecido).

Tab. XIV - Dados gerais das fusões.

Fusão	En1	T1	m1	t1	En2	T2	m2	t2	Mtt	Ett
1.0	12.5	1531	2.5	70	2.7	1600	2.5	10	-	25.3
3.2	9.8	1531	2.5	53	4.6	1734	2.5	18	-	20.5
4.2	3.7	1531	2.5	14	4.5	-	2.5	18	-	12.0
5.2	9.2	-	2.5	51	8.2	1480	2.5	32	2770	29.4
6.1	4.8	-	2.5	19	5.6	1610	2.5	21	4217	17.9
7.2	8.5	-	2.5	41	6.8	1690	2.5	27	4162	18.5
8.1	4.3	1590	2.5	20	6.3	1656	2.5	25	4190	14.6
9.2	5.7	1515	2.5	28	7.1	1770	2.5	26	3987	18.1
10.1	8.6	1550	2.5	38	5.8	1674	1.5	23	3120	18.6
11.0	2.8	1623	2.0	10	3.7	1639	2.0	13	3952	10.2
12.1	9.5	-	2.0	38	9.3	1725	2.0	37	3222	23.2
13.0	4.5	1514	2.0	17	3.2	1572	2.0	12	3493	9.1
14.0	9.2	1555	2.5	49	5.3	1580	2.5	21	4587	17.9
15.1	10.7	1537	2.5	55	8.7	1606	2.5	30	4226	22.2
16.0	3.8	1547	2.5	15	5.3	1622	2.5	21	4942	10.9
17.1	8.2	1547	2.5	45	7.9	-	2.5	28	4020	19.0
18.2	7.4	1614	2.5	37	6.8	1734	2.5	27	4620	19.7
19.2	3.5	1556	2.5	14	6.3	1752	2.5	25	4457	12.8
20.0	7.7	1539	2.5	39	4.7	1648	2.5	18	4655	14.4
21.1	3.5	1648	2.5	14	5.1	1761	2.5	17	3235	12.1
22.2	2.8	1530	2.5	11	6.3	1770	2.5	21	4943	13.1
23.2	6.5	1530	2.5	31	4.5	1564	2.5	15	4095	14.6
24.1	3.8	1522	2.5	15	4.8	1734	2.5	16	4324	11.8
25.1	8.8	1547	2.5	42	6.9	1589	2.5	26	4033	18.1
26.1	5.0	1572	2.5	20	6.9	1597	2.5	23	4127	16.5
27.2	7.9	1530	2.5	36	7.8	1665	2.5	25	-	15.7

En1, En2: Energia gasta na fusão das cargas 1 e 2 (kWh)
T1, T2 : Temperaturas após cargas 1 e 2 (°C)
m1, m2 : Massas das cargas 1 e 2 (kg)
t1, t2 : Tempo gasto para fundir cargas 1 e 2 (min)
Ett : Energia total da fusão (kWh)
Mtt : Massa total dos lingotes obtidos (g)

Obs.1: O número depois do ponto na coluna fusão refere-se ao tipo de material da segunda carga:
0 - sucata;
1 - briquetes;
2 - pelotas.

Obs.2: A fusão 2 não é apresentada nesta parte pois os seus dados foram prejudicados por problemas com a operação do forno.

As outras diferenças, para a mesma condição de forno, devem ser atribuídas aos históricos de aquecimento e fusão de cada teste, por exemplo, a fusão 1, que apresenta um gasto de energia maior para a primeira carga e acaba compensando com uma menor demanda de energia para a fusão da segunda carga.

A tabela XV apresenta o valor médio do consumo de energia para fusões com históricos de aquecimento semelhantes. Observa-se que há pouca diferença entre o valor médio da energia gasta com o forno frio e com o forno pré-aquecido. Obtendo-se uma economia de energia em torno de 10%. Esta diferença aumenta em relação a forno quente, passando a ser de aproximadamente 60%.

Tab. XV - Consumos de energia para fusão de sucata na primeira carga, conforme condição do forno.

FORNO	FRIO			QUENTE			PRÉ-AQUECIDO		
	fs	t1	En1	fs	t1	En1	fs	t1	En1
	3	53	9,8	4	14	3,7	17	45	8,2
	5	51	9,2	6	19	4,8	18	37	7,4
	7	41	8,5	8	20	4,3	20	39	7,7
	14	49	9,2	16	15	3,8			
	15	55	10,7	19	14	3,5			
	25	42	8,8	21	14	3,5			
	27	36	7,9	24	15	3,8			
Média	46,7	9,2		15,9	3,9		40,3	7,8	
Desvio	7,1	0,9		2,5	0,5		4,2	0,4	

fs: número da fusão
t1: tempo para fusão completa (min)
En1: consumo de energia (kWh)

Consome-se 9,2 kWh (3,7 kWh/kg) até o final da fusão da primeira carga, partindo-se com o forno frio. Com o forno quente consome-se 3,9 kWh (1,6 kWh/kg) ou 42% do total e a diferença é de 5,3 kWh, valor que presumivelmente foi consumido para o aquecimento do forno. Para o forno pré-aquecido consome-se 85% da energia do forno frio. Em relação ao tempo médio gasto até a primeira fusão estas proporções praticamente se repetem: 34 e 86%, forno quente e pré-aquecido, respectivamente.

A energia necessária para fundir 1,0 kg de aço e elevar a temperatura do material de 25 para 1530 °C, calculada teoricamente, a partir dos Cp (calores específicos) tabelados para o aço (39), sem considerar-se o rendimento energético do sistema de fusão ou as perdas térmicas é de 0,344 kWh/kg. Valor próximo ao citado por Leal e outros (26) que é de 0,398 kWh/kg para fusão de sucata em forno elétrico a arco da Aços Finos Piratini, mostrando um rendimento de 86% para o fusão industrial referida. Tomando-se para comparação as fusões de sucata com o forno quente obtém-se um valor de 1,6 kWh/kg e um rendimento de 22% para o forno de laboratório usado neste trabalho.

Observa-se que o rendimento energético do sistema de fusão empregado é bastante baixo, quando comparado com os rendimentos obtidos na Aços Finos Piratini. Isto se deve, principalmente, às diferenças entre os sistemas de fusão a arco e por indução eletromagnética. Cabe salientar ainda que para fornos de indução, geralmente, o rendimento energético será maior quanto maior for a capacidade do forno.

A figura 21 mostra o consumo de energia em função do tempo para fusão da primeira carga. Nota-se uma grande dependência do tempo, a reta $E = 0,163 t + 1,411$ com coeficiente de correlação de 0,990 pode ser sugerida para descrever esta dependência. A energia necessária para fundir uma massa constante e elevar sua temperatura até um determinado ponto é uma constante em relação ao tempo (maior potência: menor tempo) e a variação apresentada mostra que a parcela perdas térmicas, função do tempo, é predominante para o consumo de energia nas condições empregadas.

A tabela XVI apresenta os consumos médios de energia na fusão da segunda carga, conforme o material utilizado, considerando-se o tempo e o consumo apenas a partir do início da adição de material.

Tab. XVI - Consumos de energia para fusão da segunda carga.

Material	SUCATA			PELOTAS			BRIQUETES		
	fs	t2	En2	fs	t2	En2	fs	t2	En2
	16	21	5,3	3	18	4,6	6	21	5,6
	20	18	4,7	7	27	6,8	8	25	6,3
				9	26	7,1	17	28	7,9
				18	27	6,8	21	17	5,1
				19	25	6,3	24	26	6,9
				22	21	6,3	26	23	6,9
				23	15	4,5			
				27	26	7,8			
Média		19,5	5,0		23,1	6,3		23,3	6,5
Desvio		2,1	0,4		4,6	1,2		3,9	1,0

fs: número da fusão
t2: tempo para fusão completa (min)
En2: consumo de energia (kWh)

Observa-se que a sucata consome menos energia para fusão, 5,0 kWh (2,0 kWh/kg), que briquetes e pelotas. Os resultados obtidos para pelotas e briquetes praticamente se equivalem pois estão dentro da mesma faixa de desvio padrão.

Em fornos industriais, um aumento da porcentagem de ferro-esponja na composição da carga é acompanhado de um aumento de consumo de energia. Este aumento de consumo é atribuído a menor metalização da carga e a maior formação de escória.

5.4.2 - Composição do aço

A tabela XVII apresenta os teores de carbono e enxofre dos aços obtidos.

Tab. XVII - Teores de carbono e enxofre dos aços obtidos.

Material	SUCATA			PELOTAS			BRIQUETES		
	fs	%C	%S	fs	%C	%S	fs	%C	%S
	11	0,160	0,029	3	0,015	0,022	2	0,010	0,100
	13	0,180	0,029	5	0,010	0,020	6	0,010	0,135
	16	0,170	0,026	7	0,015	0,025	8	0,014	0,215
	20	0,120	0,025	9	0,018	0,021	10	0,016	0,120
				18	0,010	0,025	12	0,013	0,170
				19	0,017	0,023	15	0,010	0,160
				22	0,010	0,027	17	0,010	0,175
							21	0,010	0,153
							25	0,010	0,153
							26	0,010	0,163
Média		0,158	0,027		0,013	0,023		0,011	0,154
Desvio		0,026	0,002		0,004	0,002		0,002	0,032

fs: número da fusão

Sob ponto de vista do teor de carbono nota-se que houve descarburaco em todas as fusões. Isto era esperado, pois as condies de fusão foram sempre oxidantes e não houve qualquer tipo de adio de carbono extra, além do carbono contido nas matérias-primas.

O aço produzido apenas com sucata teve a menor descarburaco média. Ferro-esponja e briquetes tiveram seus aços descarburados até níveis muito baixos. Estes resultados mostram que o efeito da adio de carbono nos briquetes através do ligante não foi suficiente para diminuir a descarburaco observada na fusão da sucata e que o efeito dos óxidos contidos nas gangas das pelotas e principalmente dos briquetes foi predominante.

O carbono em excesso dos briquetes foi oxidado antes do vazamento, liberando energia, o que pode explicar o resultado similar ao das pelotas no consumo de energia para produo de aço, apesar de um maior teor de ganga.

Os teores de enxofre dos aços produzidos com sucata e ferro-esponja, mantiveram-se razoáveis, não demonstrando qualquer diferença significativa, já que para a eliminao do enxofre seria necessário ter-se condies redutoras, além da escória básica existente.

Quanto ao aço produzido com briquetes, tem-se no item teor de enxofre, uma certa limitao para uso, devendo ser estudada a porcentagem de participao de briquetes na carga. O teor de enxofre desejado deve ser menor que 0,03% e o teor médio encontrado foi de 0,154%. Teor bastante alto, mesmo levan

do-se em conta que não houve preocupação com a retirada do elemento, que foi incorporado pelo melaço.

A título de exemplo, a partir dos dados da tabela XIII, tem-se que numa carga composta por pelotas e briquetes para forno elétrico, a porcentagem máxima de briquetes seria de 8% para manter-se o teor de enxofre abaixo de 0,03%, sem considerar-se uma dessulfuração.

5.4.3 - *Rendimento metálico*

A tabela XVIII mostra os rendimentos obtidos com cada tipo de material. O rendimento dos briquetes em relação às massas inicial e final foi o mais baixo, isto foi ocasionado principalmente pelo maior teor de ganga associado aos briquetes.

Tab. XVIII - Rendimentos metálicos conforme matéria-prima.

Material	SUCATA		PELOTAS			BRIQUETES		
	fs	Rend	fs	Rend	R Fet	fs	Rend	R Fet
	14	91,7	7	83,2	85,3	6	84,3	95,8
	20	93,1	18	92,4	94,7	8	83,8	95,2
			19	89,1	91,3	10	78,0	85,8
			23	81,9	83,9	12	80,6	91,6
						15	84,5	96,0
						17	80,4	91,4
						25	80,7	91,7
						26	82,5	93,8
Média		92,4		86,7	88,8		81,9	92,7
Desvio		1,0		5,0	5,1		2,3	3,4

fs: número da fusão
 Rend: rendimento (inicial/final) %
 R Fet: rendimento em ferro total %

Ao considerar-se, na comparação de rendimentos entre os briquetes e as pelotas de ferro-esponja, o teor de ferro total, R Fet, o rendimento dos briquetes atinge os mesmos índices dos outros materiais.

5.5 - Conclusões

Da análise dos resultados pode-se concluir que:

- o consumo de energia para fusão de briquetes de finos de ferro esponja (6,5 kWh) foi da mesma ordem de grandeza do necessário para fusão de pelotas de ferro-esponja (6,3 kWh);

- o rendimento metálico das fusões conduzidas com briquetes foi aproximadamente 5% menor que o das fusões conduzidas com pelotas, devido ao seu maior teor de ganga;

- as condições de fusão empregadas foram excessivamente descarburantes, e a comparação dos teores de carbono obtidos no aço ficam prejudicadas em relação a briquetes e pelotas;

- os teores de enxofre dos briquetes obtidos foram bastante altos (0,24%), limitando a participação destes na carga.

6 - CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- os pré-testes laboratoriais tiveram importância na medida que serviram de base para as etapas de briquetagem contínua;
- o processo de briquetagem a frio mostrou-se uma alternativa viável para a utilização de finos de ferro-esponja na aciaria elétrica;
- o sistema melaço/cal foi um ligante satisfatório para briquetagem contínua em prensa de rolos;
- foram obtidos valores iniciais para caracterização dos briquetes produzidos;
- os briquetes produzidos com finos de ferro-esponja tiveram consumo de energia para fusão da mesma ordem de grandeza do consumo de energia das pelotas de ferro-esponja - 6,3 e 6,5 kWh - respectivamente;
- houve oxidação intensa do carbono adicionado na forma de ligantes, não acontecendo a incorporação deste carbono pelo aço;
- os teores de enxofre dos aços produzidos com briquetes foram altos e o seu controle deve ser feito pela redução da participação dos briquetes na carga do forno elétrico;

- é sugerida a utilização de alcatrão, que teve desempenho semelhante ao do melaço nos testes iniciais, tendo porém um menor custo;

- sugere-se a obtenção de condições redutoras no processo de fusão, basicamente através do emprego de escória protetora;

- a produção de pelo menos uma tonelada de briquetes deve ser objetivada a fim de tornar significativa uma fusão de briquetes nos fornos elétricos a arco da Aços Finos Piratini.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

01. RIESCHEL, H. About the briquetting of sponge iron. In: BIENNIAL CONFERENCE OF THE IBA, 15, Montreal, Aug. 1977. Proceedings. Montreal, 1977. p. 63-80.
02. SCHEU, E. Cold briquetting of dri fines. In: SL/RN KILN OPERATORS CONFERENCE, 5, Vanderbijlpark, Apr.1985.s.n.t.
03. VILELA, A. C. F. & GUDENAU, H. W. Os processos de redução direta de minérios de ferro. Estágio atual - desenvolvimento e perspectivas. Aachen, 1985. s.n.t.
04. LEAL, P. Comunicação pessoal.
05. GOKSEL, M. A. Fundamentals of cold bond agglomeration processes. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AGGLOMERATION, 2, Atlanta, Mar. 1977. Proceedings. Atlanta, 1977. p. 877-900.
06. ENGELLEITNER, W. H. Selection of the proper agglomeration process. In: BIENNIAL CONFERENCE OF THE IBA, 17, Reno, Aug. 1981. Proceedings. Reno, 1981. p. 231-45.
07. PIETSCH, W. Die Kornvergrößerung in der Verfahrenstechnik und ihre Industrielle Anwendung am Beispiel der Direktreduktion von Eisenerzen - 2. Teil. Köppern-Aufbereitungstechnik. (5):248-57. 1982.
08. PIRKLBAUER, W. Verbesserung des Reoxidations - und Korrosionsverhaltens von Eisenschwamm durch Aufbringen von Kalkschalen. Stahl und Eisen, 102 (18):67-72. 1982.
09. GREENWALT, R. B. & STEPHENSON, J. G. The role of agglomeration in direct reduction processes. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AGGLOMERATION, 2, Atlanta, Mar. 1977. Proceedings. Atlanta, 1977. p. 765-83.
10. MIZUI, K. *et alii*. Briquetting of sponge iron - new briquetting processes and properties of the products. In:INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AGGLOMERATION, 2, Atlanta, Mar. 1977. Proceedings. Atlanta, 1977. p. 695-707.
11. PIETSCH, W. Die Kornvergrößerung in der Verfahrenstechnik und ihre Industrielle Anwendung am Beispiel der Direktreduktion von Eisenerzen - 1. Teil. Köppern-Aufbereitungstechnik. (4):193-200. 1982.
12. RIESCHEL, H. Über den Verdichtungsvorgang beim Brikettieren. Köppern-Aufbereitungstechnik. 12 (11):691-8. 1971.

13. VEECK, S. Briquetagem de finos de coque - estudo em laboratório. Porto Alegre, UFRGS, Progr. de pós-graduação em eng. metalúrgica e dos materiais, 1980. Diss. maestr. em engenharia metalúrgica.
14. DE LÉON, A. Estudos de pelotização e briquetagem de finos de carvão mineral. Porto Alegre, UFRGS, Progr. de pós-graduação em eng. metalúrgica e dos materiais, 1985. Diss. maestr. metalurgia extrativa.
15. RIESCHEL, H. Grundsatzliche Betrachtungen zum Begriff Brikkett - qualitat. Köppern-Aufbereitungs-Technik. 16 (12):647-51. 1975.
16. JOHANSON, J. R. Use of theory for design and selection of roll presses for agglomeration and compaction. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AGGLOMERATION, 2, Atlanta, Mar. 1977. Proceedings. Atlanta, 1977. p. 678-93.
17. STEINHÖFEL, H. Cold briquetting of sponge iron fines. In: SL/RN KILN OPERATORS CONFERENCE, 4, Porto Alegre, Mar. 1981. s.n.t.
18. HOLLEY, C. A. Binders and binder systems for agglomeration. In: BIENNIAL CONFERENCE OF THE IBA, 17, Reno, Aug. 1981. Proceedings. Reno, 1981. p. 173-84.
19. RIESCHEL, H. & ZECH, K. The reoxidation of sponge iron briquettes with various binders. In: BIENNIAL CONFERENCE OF THE IBA, 16, San Diego, Aug. 1979. Proceedings. San Diego, 1979. p. 43-53.
20. FACCONI, D. *et alii*. Direct reduction iron recovery at dalmine - siderca, using a briquetting circuit. In: BIENNIAL CONFERENCE OF THE IBA, 16, San Diego, Aug. 1979. Proceedings. San Diego, 1979. p. 350-70.
21. PIETSCH, W. Development, instalation, and operation of a briquetting system for direct reduced iron fines. In: BIENNIAL CONFERENCE OF THE IBA, 15, Montreal, Aug. 1977. Proceedings. Montreal, 1977. p. 83-96.
22. BJÖRKWALL, B. & THANNING, G. Test methods for agglomerated products - part I. Scandinavian Journal of Metallurgy. 1:57-8. 1972.
23. MOORE, J. E. & MARLIN, D. H. Hot briquetting of partially reduced iron oxide ores and dusts. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AGGLOMERATION, 1, Philadelphia, Apr. 1961. Proceedings. Philadelphia, 1961. p. 743-85.
24. EISERMANN, E. & POST, G. Sponge iron and how to employ it in the electric arc furnace according to the contimelt process. In: SIMPÓSIO DE ACIARIA DA ABM, 5, Piaçaguera, Nov. 1971. s.n.t.

25. COSTA E SILVA, A. L. & MEI, P. R. Tecnologia dos aços. São Paulo, Ed. Hamburg, 1981. 380 p.
26. LEAL, P. *et alli*. Utilização de ferro-esponja na aciaria da piratini. *Metalurgia: Revista da Associação Brasileira de Metais*. São Paulo, 38 (296):397-400. 1982.
27. HOFFMANN, A. & FERNANDES, R. P. Utilização do ferro-esponja da piratini em seus fornos elétricos. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DIRETA DO ILAFA, 2, Porto Alegre, Mai. 1975. s.n.t.
28. CACCIA, C. & GONÇALVES, L. F. T. A experiência inicial do grupo gerdau com emprego de ferro esponja em forno elétrico. In: SIMPÓSIO DE ELETROSIDERURGIA DA ABM, 3, Porto Alegre, Mai. 1975. s.n.t.
29. ELSNER, E. & KNAPP, H. Melting down of sponge iron in arc furnaces. In: JOURNEES INTERNATIONALES D'ETUDE SUR LES FOURS ELECTRIQUES A ARC. Liege, Nov. 1973. paper 5b.
30. SCHOENMAKER, O. D. & GULDENMUNDT, J. P. Einsatz von Purofer - Eisenschwamm in einem 35 - t - Elektroofen. *Stahl und Eisen*. 94 (16):711-28. 1974.
31. MASCHLANKA, W. *et alli*. Use of the midland-ross direct reduction in an electric steel mill of small to medium capacity exemplified by hamburger stahlwerke gmbh. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DIRECT REDUCTION IRON ORE, Bucharest, Sept. 1972. s.n.t.
32. VALLOMY, J. A. *et alli*. The use of direct reduced iron in electric arc furnaces. In: ILAFA DIRECT REDUCTION CONFERENCE. Buenos Aires, Jul. 1980. s.n.t.
33. SIBAKIN, J. G. *et alli*. Electric arc steelmaking with continuously charged reduced pellets. In: CONGRES INTERNATIONAL SUR LA PRODUCTION ET L'UTILIZATION DES MINERALS REDUITS. Evian, May 1967. s.n.t.
34. SIBAKIN, J. G. *et alli*. Utilization of sl / rn reduced pellets in electric arc furnaces. In: ELECTRIC FURNACE CONFERENCE, 25. Chicago, Dec. 1967. s.n.t.
35. ELSNER, E. *et alli*. Das Einschmelzen von Direktreduziertem Eisenerz in Lichtbogenöfen. *Stahl und Eisen*. 94 (26): 1322-30. 1974.
36. EISERMANN, E. *et alli*. Kontinuierliches Einschmelzen von Eisenschwamm im 10-t-Lichtbogenöfen. *Stahl und Eisen*. 93 (26):1251-5. 1973.
37. PANTKE, H. D. & QUEENS, C. Verarbeitung von Eisenschwamm im Induktionstiegelofen. *Stahl und Eisen*. 94 (23):1114-20. 1974.

38. SILVEIRA, R. C. *et alli*. Aciaria elétrica. In: CAMPOS, V. F. Tecnologia da fabricação de aço líquido. Belo Horizonte, ABM, 1980. v. 5.
39. PERRY, R. H. & CHILTON, C. H. Chemical engineers' handbook. 5. ed. Tokyo, McGraw Hill-Kogakusha, 1973.

8 - FIGURAS

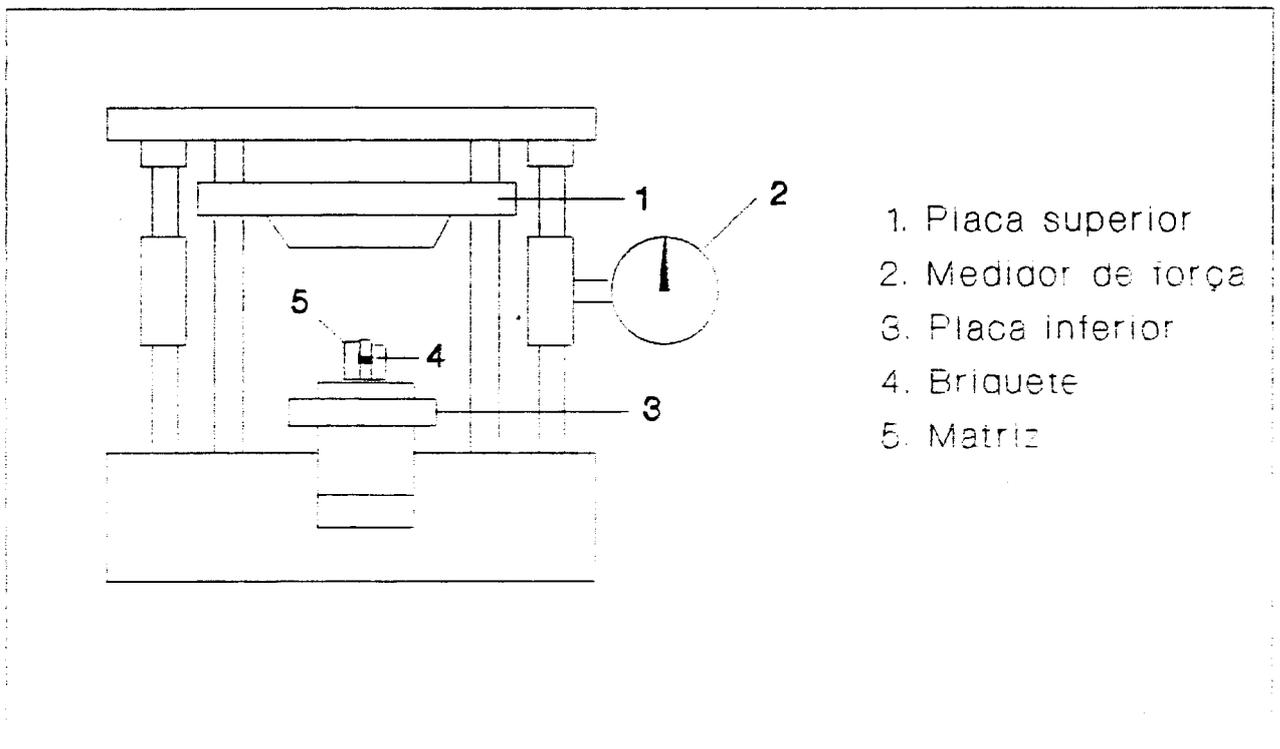


Fig. 1 - Desenho esquemático do sistema de briquetagem em laboratório

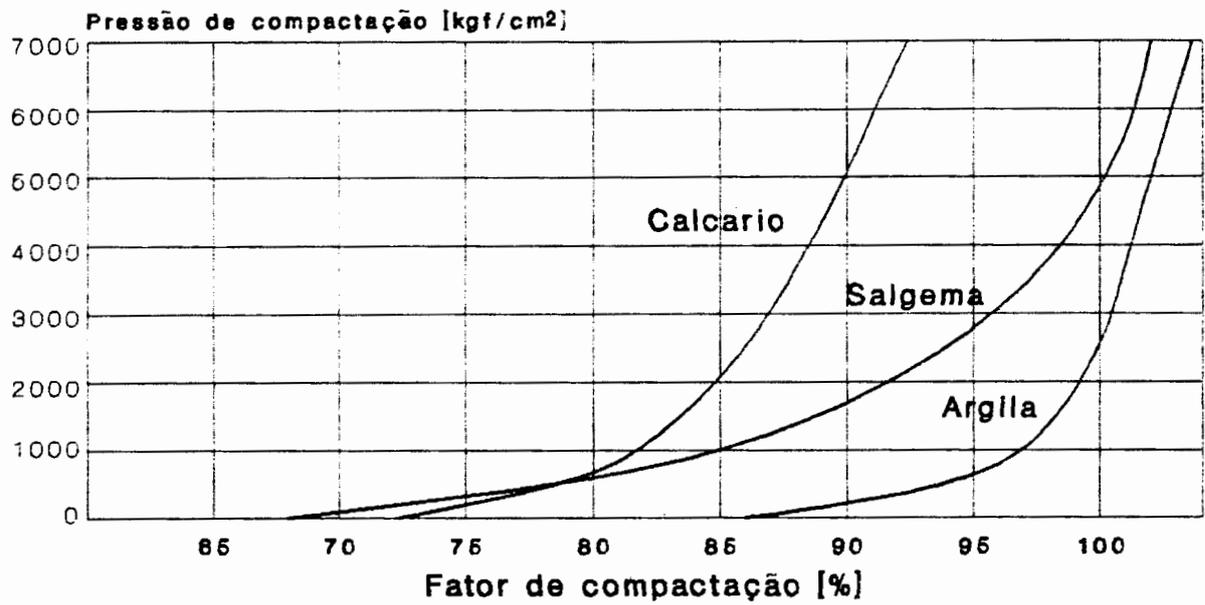


Fig. 2 - Curvas de compactação: calcário, salgema e argila (12)

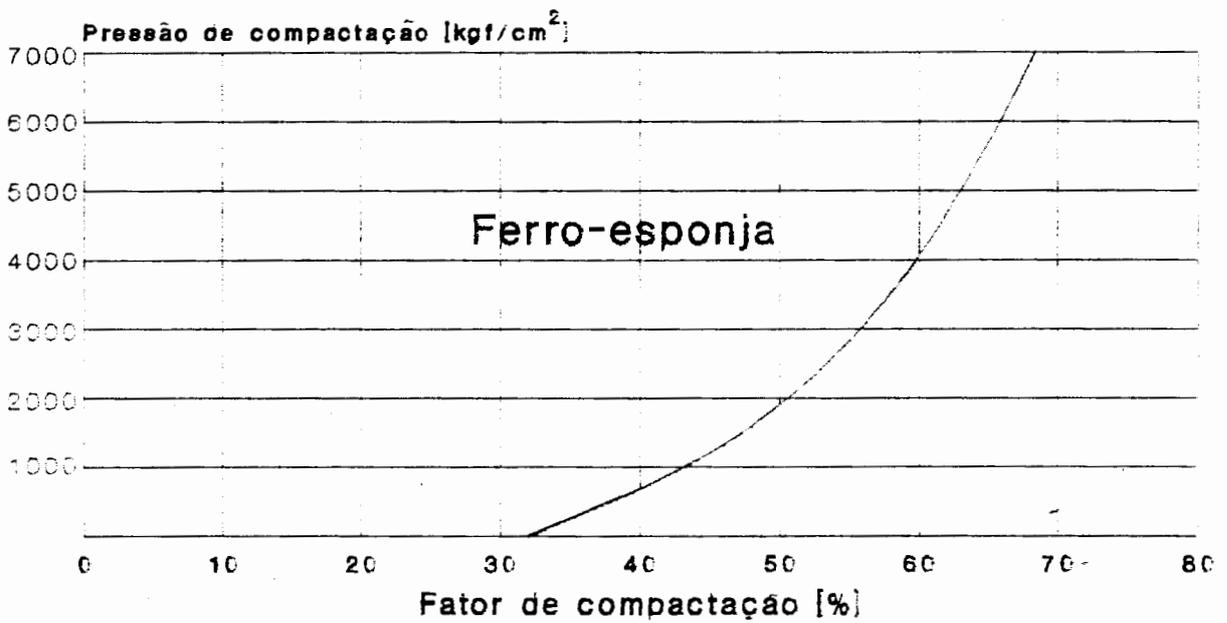


Fig. 3 - Curva de compactação do ferro-esponja (12).

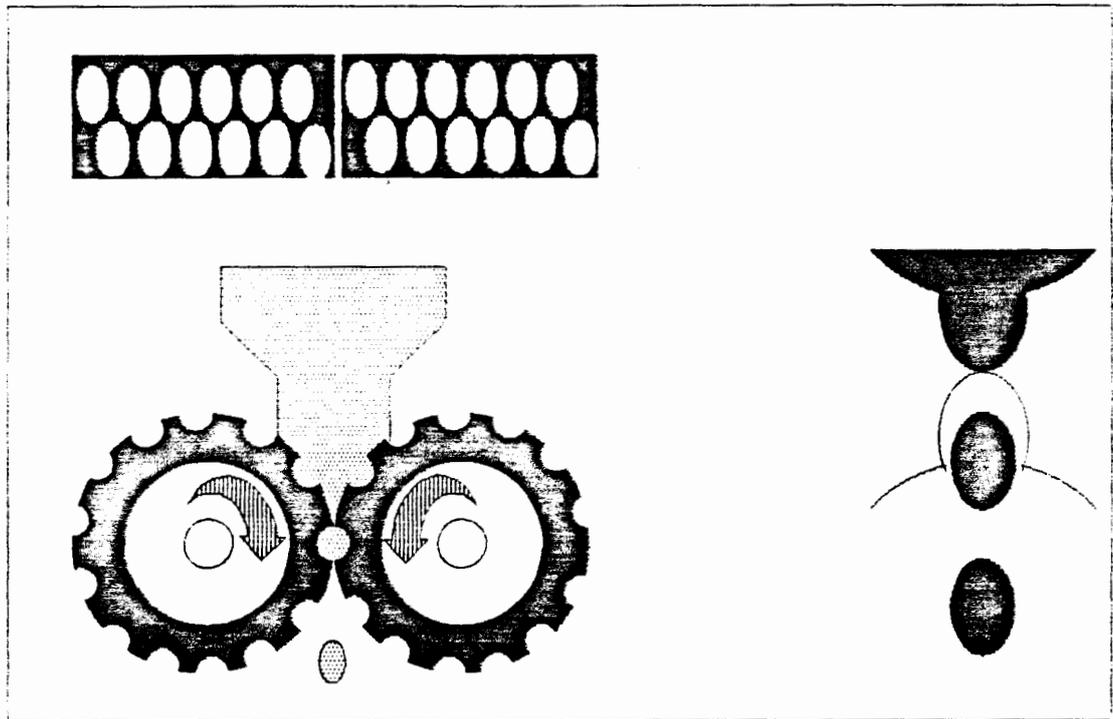


Fig. 4 - Desenho esquemático do sistema de briquetagem contínua.

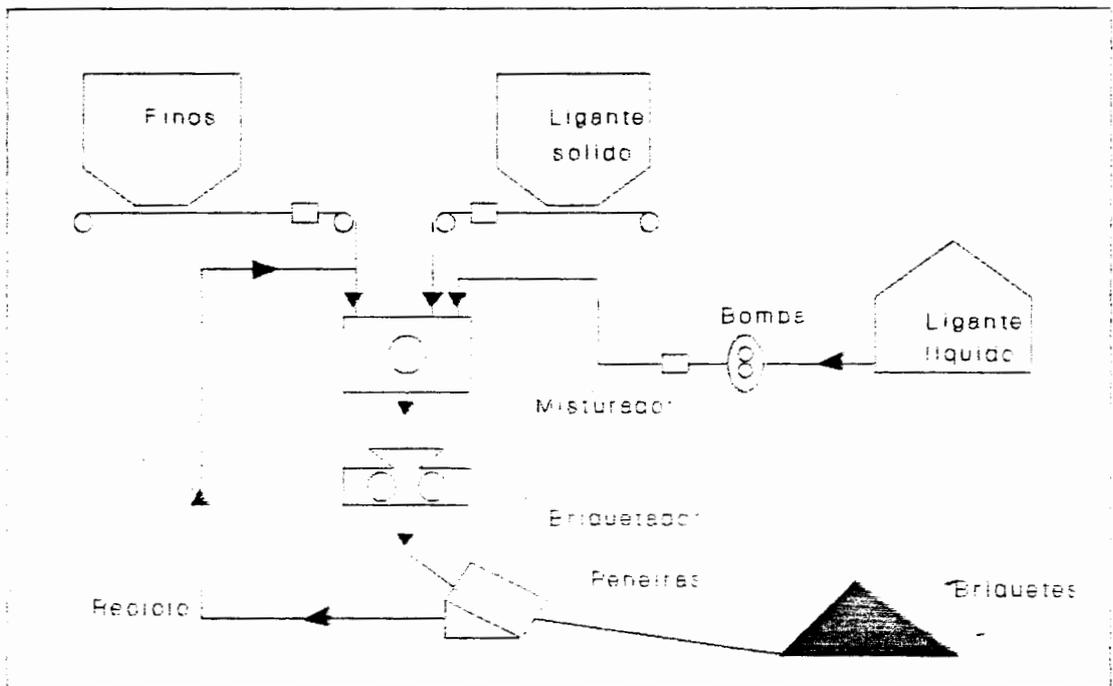


Fig. 5 - Fluxograma da briquetagem industrial de finos de ferro-esponja (1).

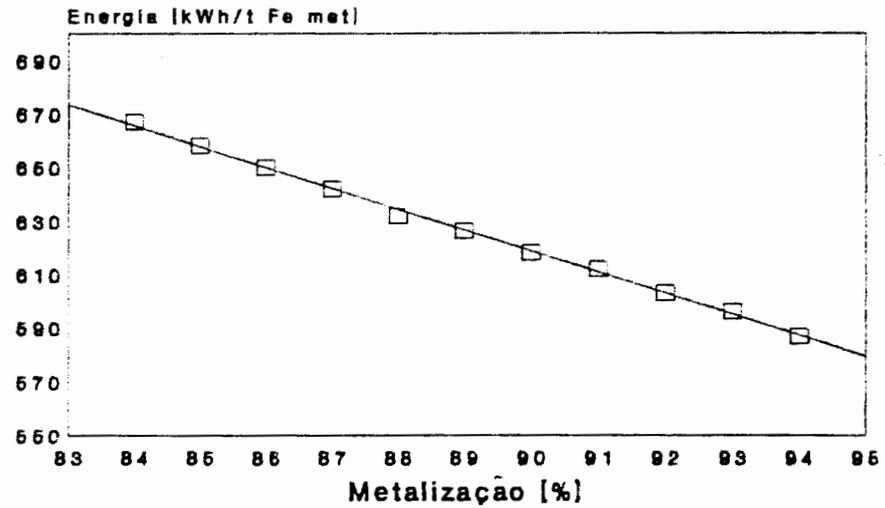


Fig. 6 - Variação do consumo de energia para produção de aço em função da metalização do ferro-esponja da carga (4).

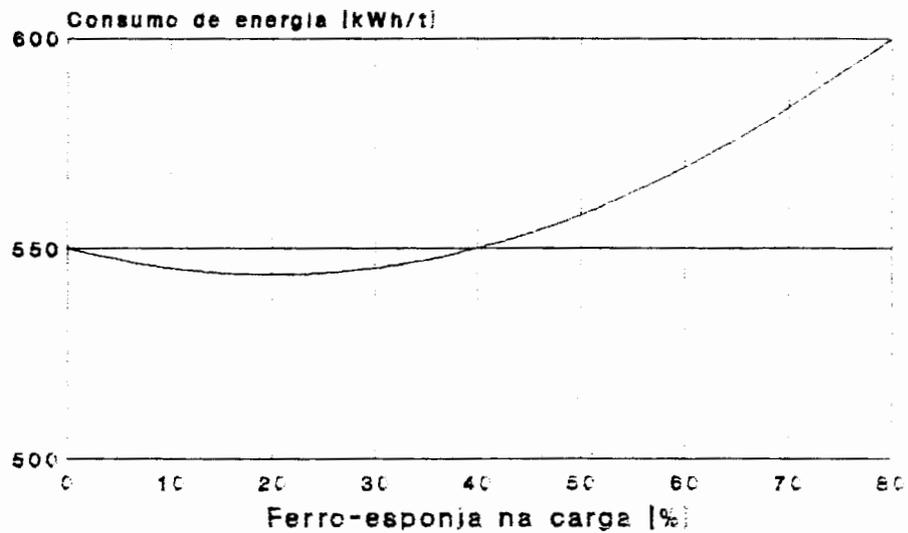


Fig. 7 - Variação do consumo de energia para produção de aço em função da porcentagem de ferro-esponja na carga (32).

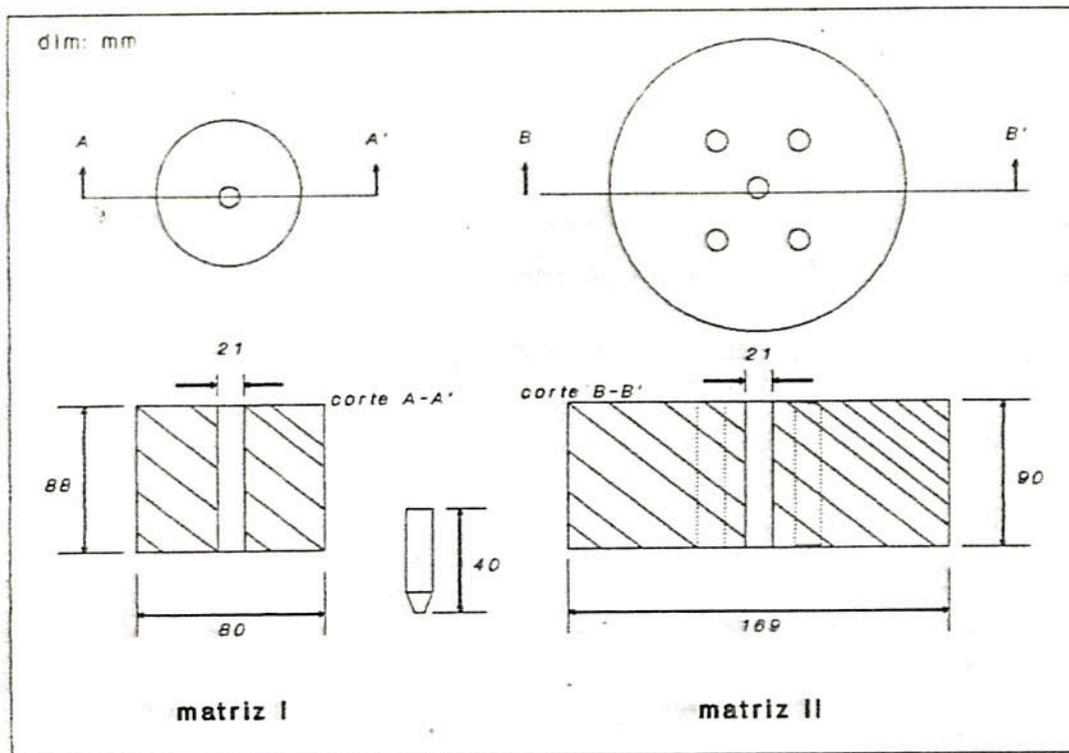


Fig. 8 - Matrizes utilizadas na briquetagem laboratorial.

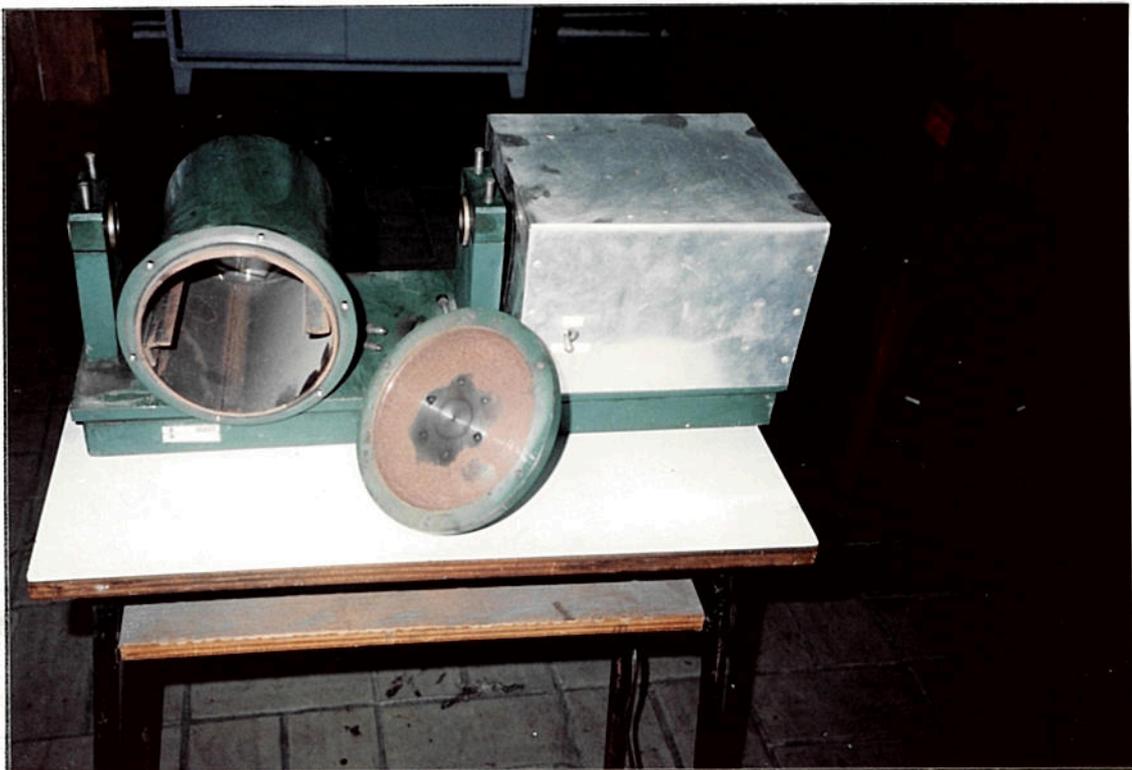


Fig. 9 - Fotografia do tambor utilizado nos testes laboratoriais.

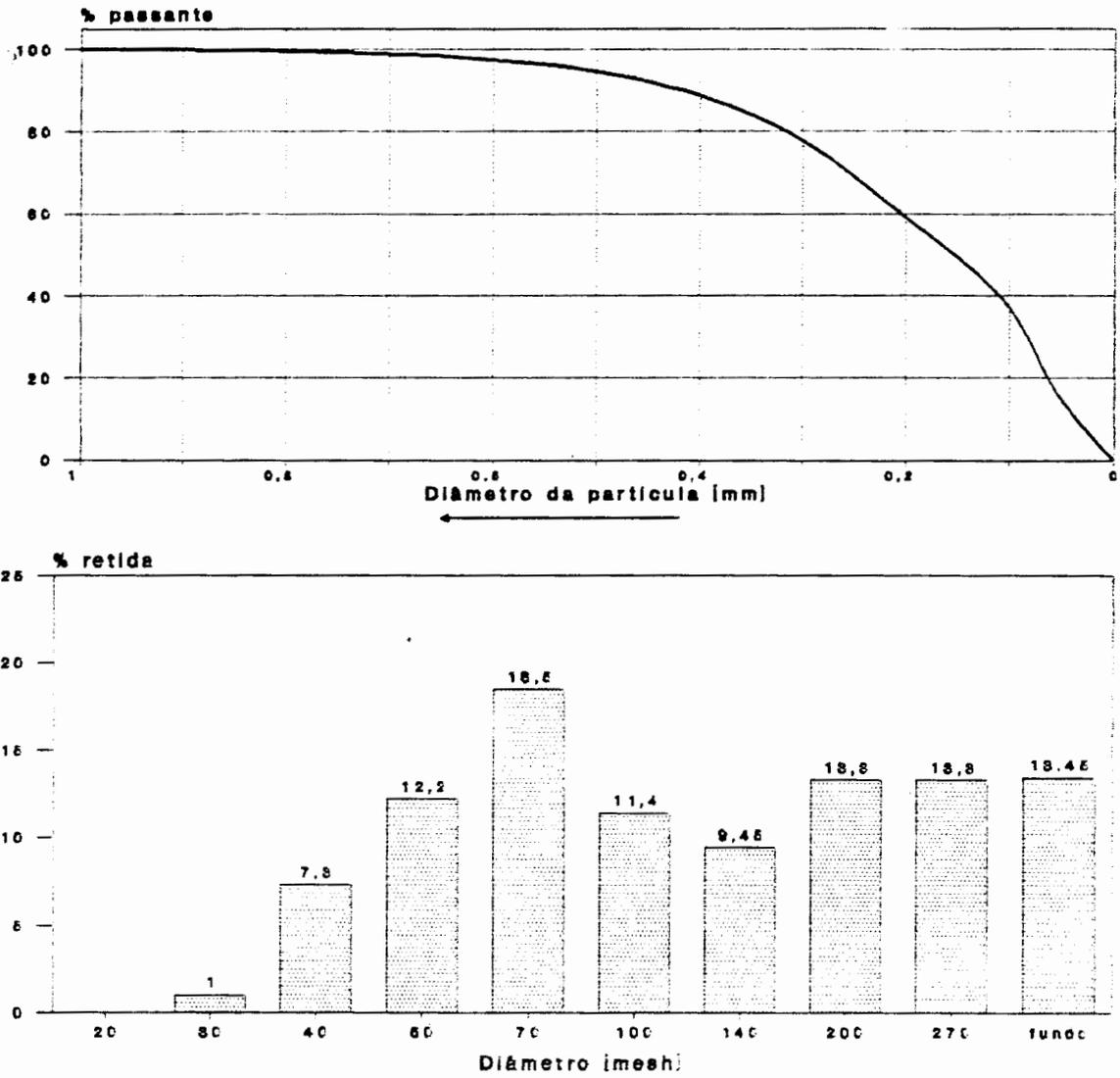


Fig. 10 - Distribuição granulométrica dos finos de ferro-
esponja utilizados na seção 3

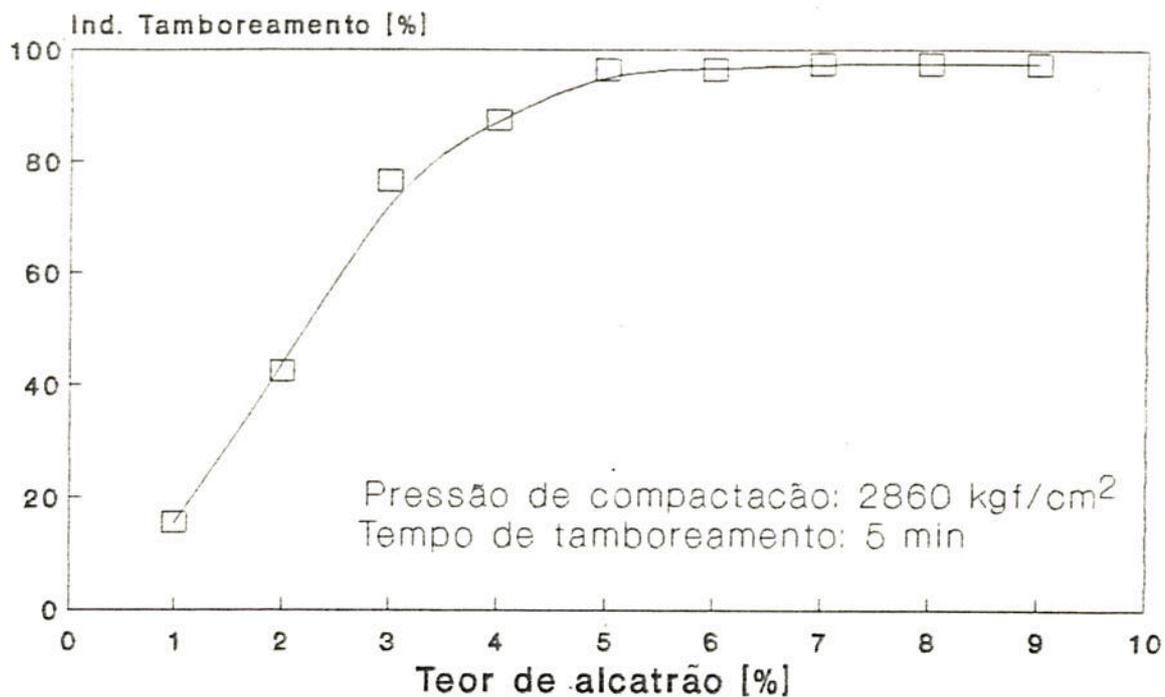


Fig. 11 - Variação do índice de tamboreamento dos briquetes produzidos em função do teor de alcatrão.

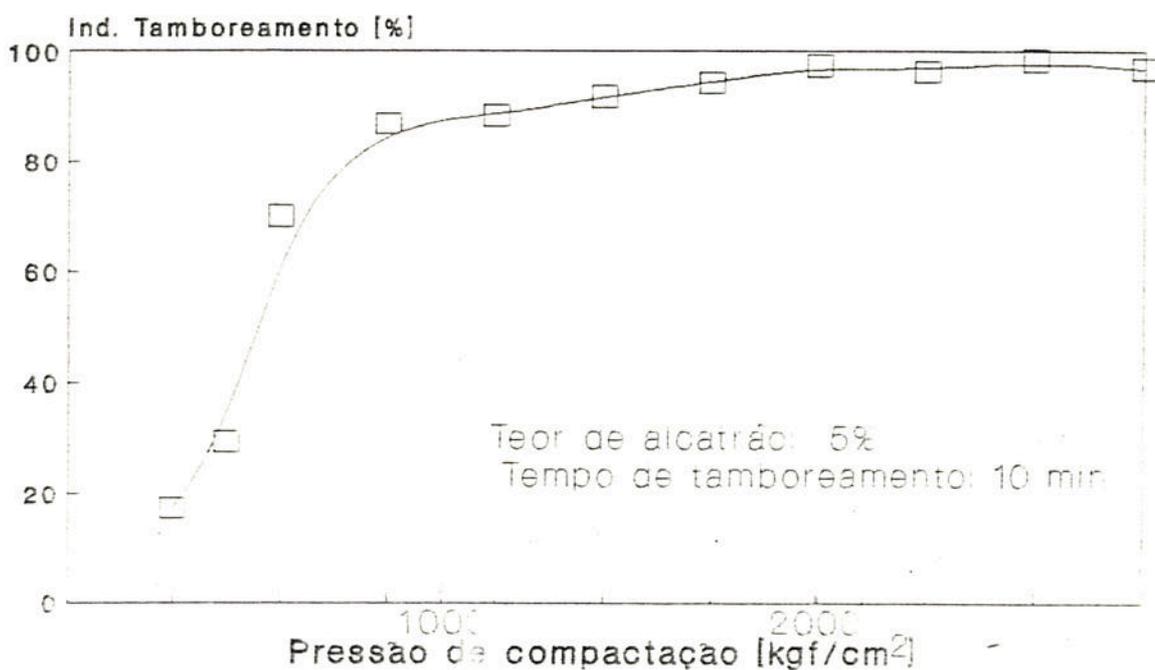


Fig. 12 - Variação do índice de tamboreamento dos briquetes produzidos em função da pressão de compactação utilizada.

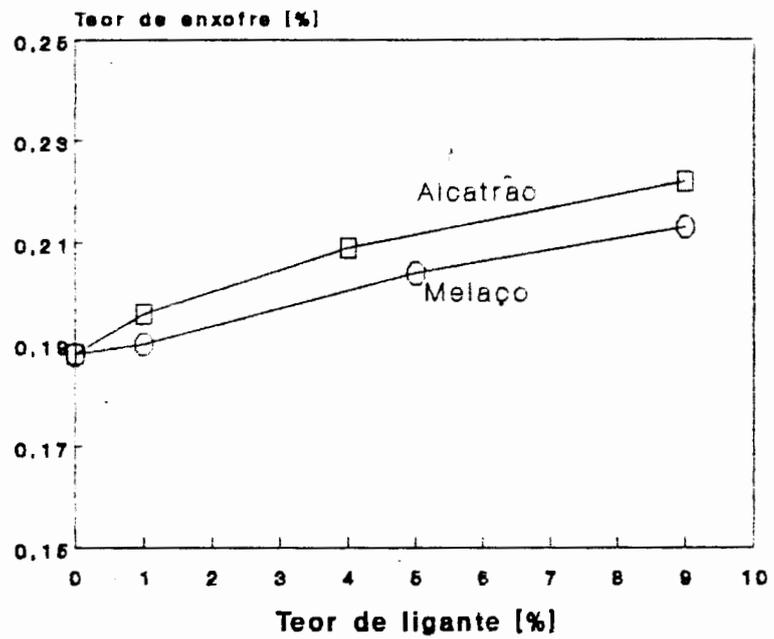


Fig. 13 - Variação do teor de enxofre dos briquetes produzidos em função da quantidade de ligante adicionada.

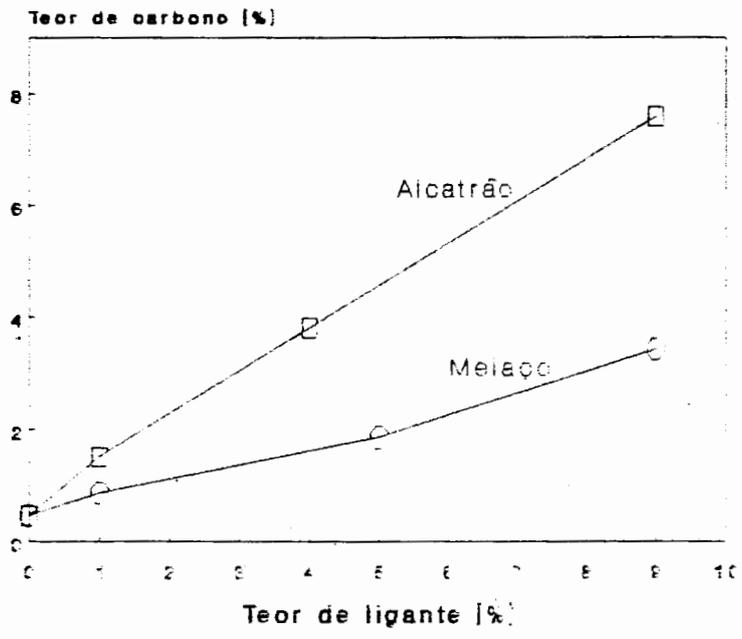


Fig. 14 - variação do teor de carbono dos briquetes produzidos em função da quantidade de ligante adicionada.

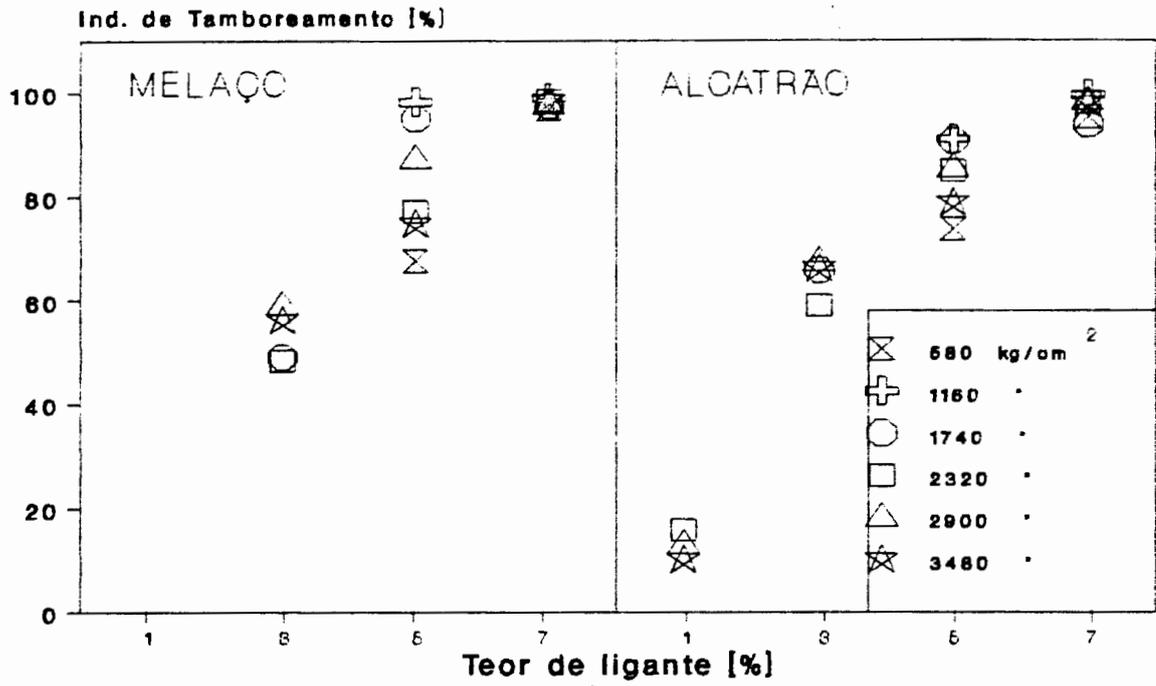


Fig. 15 - Variação do índice de tamboreamento em função da porcentagem e tipo de ligante para várias pressões de compactação

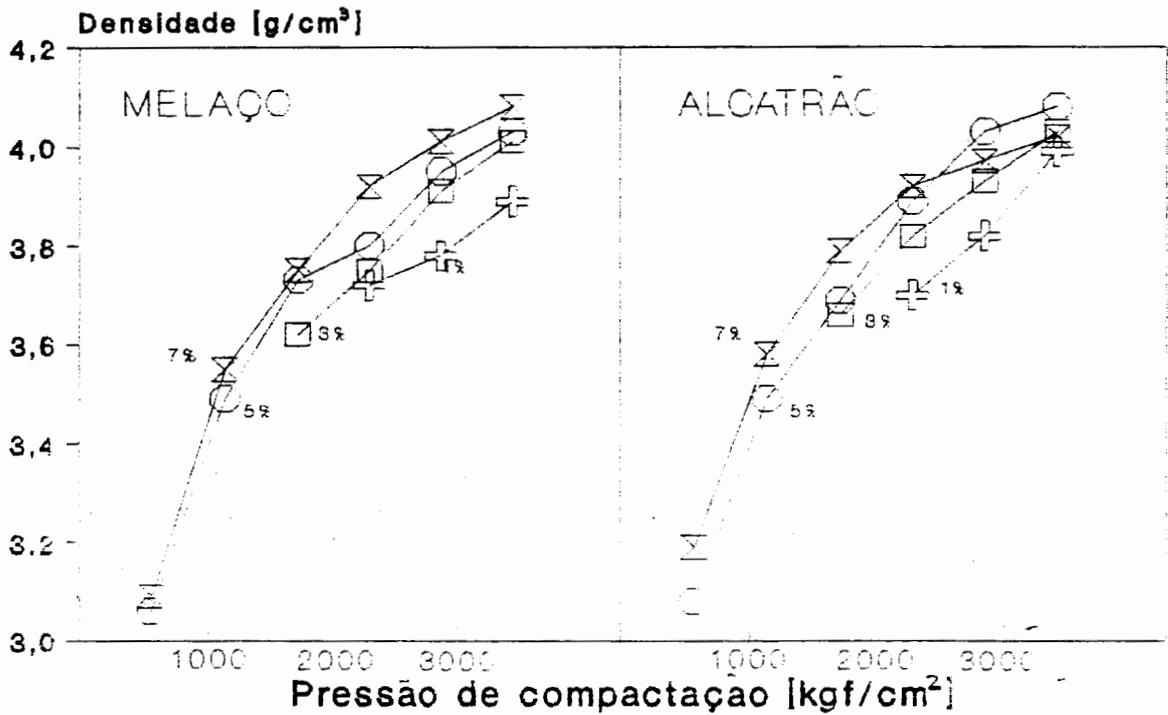


Fig. 16 - Variação da densidade em função da pressão de compactação para várias porcentagens dos ligantes - melação e alcatrão.

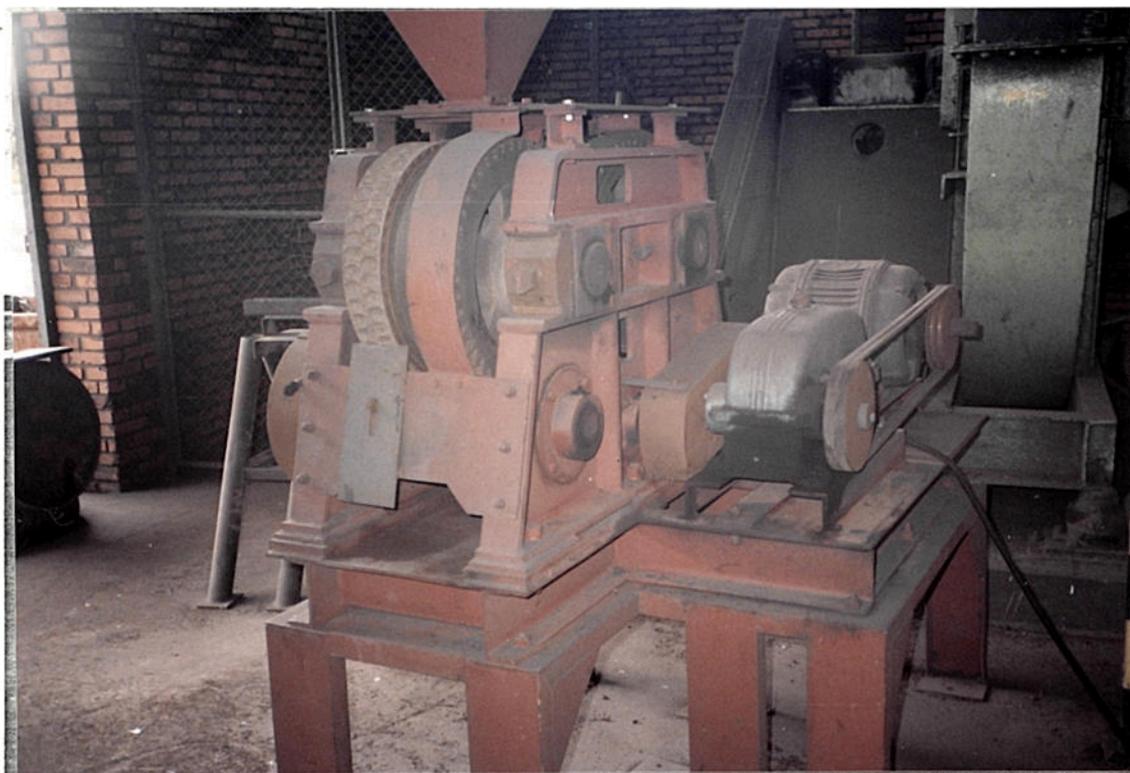


Fig. 17 - Fotografia da máquina briquetadora contínua.

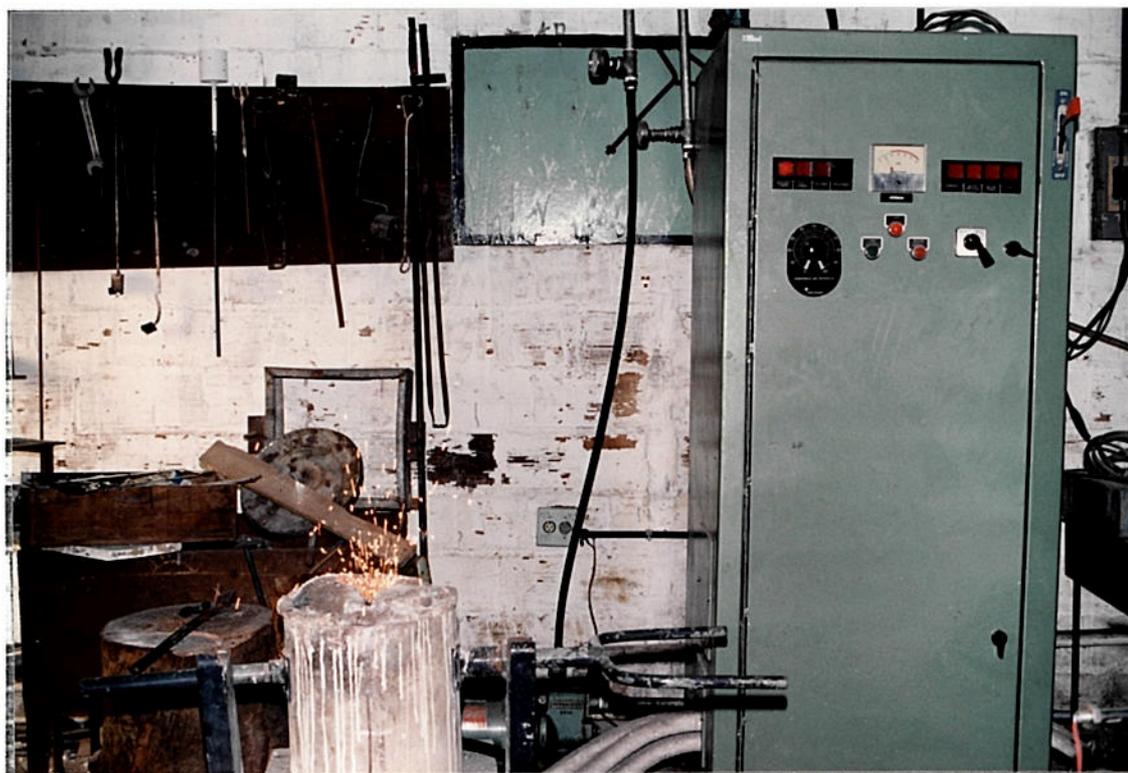


Fig. 18 - Fotografia do forno de indução empregado.

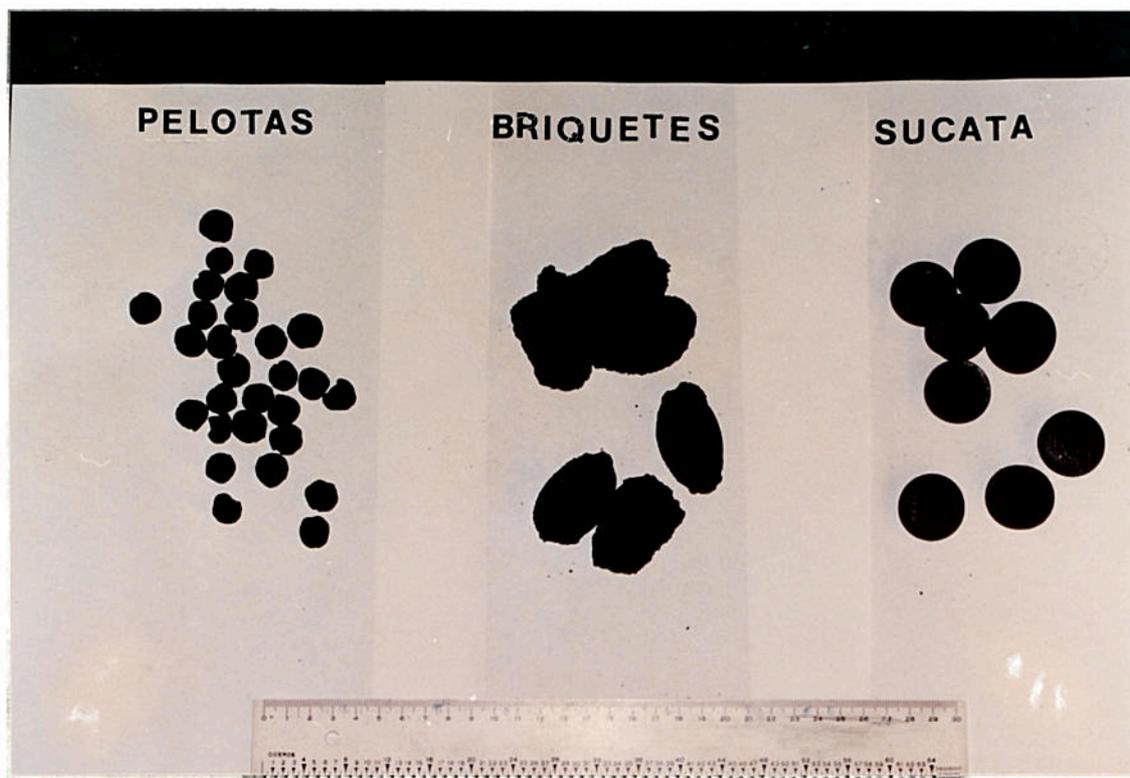


Fig. 19 - Fotografia das matérias-primas empregadas na fusão.



Fig. 20 - Fotografia da operação de vazamento.

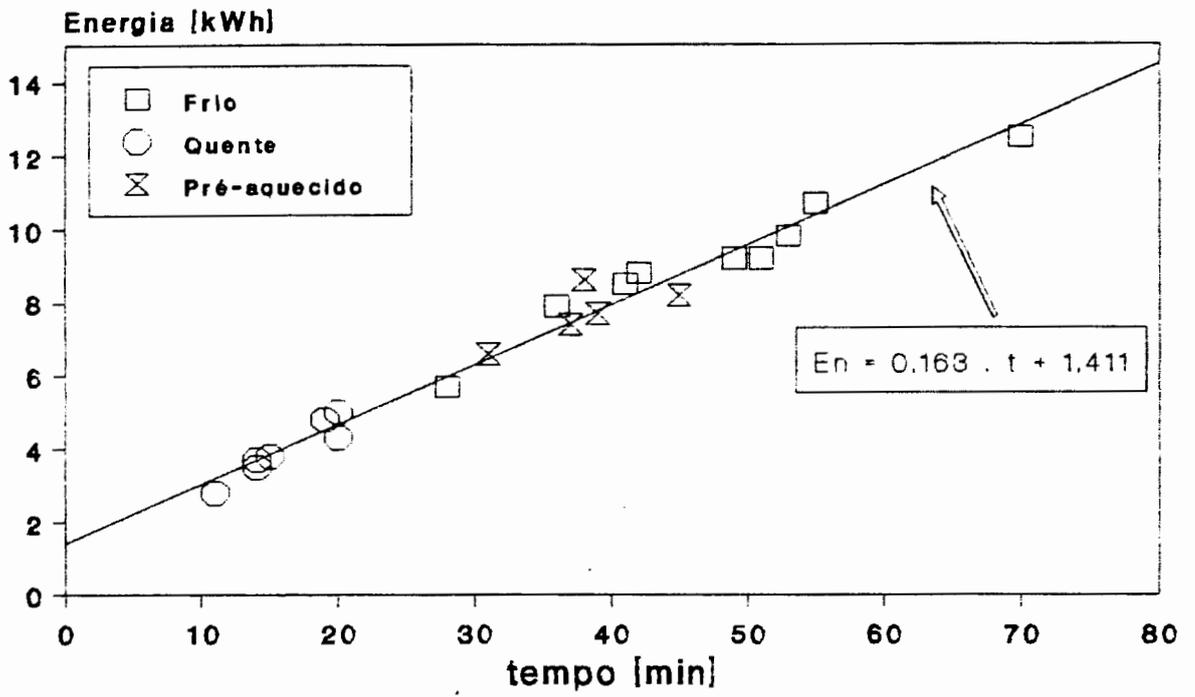


Fig. 21 - Variação do consumo de energia para produção de aço em função do tempo da corrida

9. ANEXOS

9.1 - Processo SL/RN

O processo SL/RN (Stelco, Lurgi, Republic steel e National lead) utiliza carvão não coqueificável como redutor do minério de ferro. A fig. A1 mostra um esquema deste processo.

É um processo contínuo cujo principal componente é um forno tubular rotativo dotado de uma pequena inclinação que propicia o movimento da carga ao longo do forno. As matérias-primas: carvão, minério e agente dessulfurante são alimentadas no início do forno e entram em contato com um gás em contracorrente. O processo baseia-se no princípio de realizar a redução do minério juntamente com a gaseificação do carvão. O interior do reator apresenta duas zonas distintas: a de atmosfera redutora, dentro da carga, onde os óxidos de ferro do minério reagem com o carbono do carvão liberando CO; e a de atmosfera oxidante, acima da carga, onde o oxigênio do ar soprado ao longo do forno, queima os voláteis do carvão e o CO formado durante a redução do minério liberando energia e ocasionando aumento da temperatura (Leito: $\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$ e Gases: $\text{CO} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$).

A metalização aumenta até a saída do forno, onde há um sopro de carvão para evitar a reoxidação da carga que está a uma temperatura de aproximadamente 1000 °C. A seguir, o ferro-esponja formado e o char (resíduo) entram no resfriador rotativo onde terão sua temperatura reduzida a cerca de 100 °C. O ferro-esponja é separado do char em separadores magnéticos e então classificado e armazenado.

9.2 - Processo HyL

O processo HyL (Hojalata y Lamina) utiliza gás natural como redutor do minério de ferro. A figura A2 mostra um fluxograma simplificado do processo.

É um processo descontínuo, sem reciclagem de gás, onde a redução do minério se dá em ciclos alternados em quatro reatores tipo retorta. Cada um dos reatores passa pelas seguintes fases:

- aquecimento e pré-redução do minério de ferro;
- redução final;
- resfriamento e carburação do ferro utilizado;
- descarga de ferro-esponja e recarga de minério.

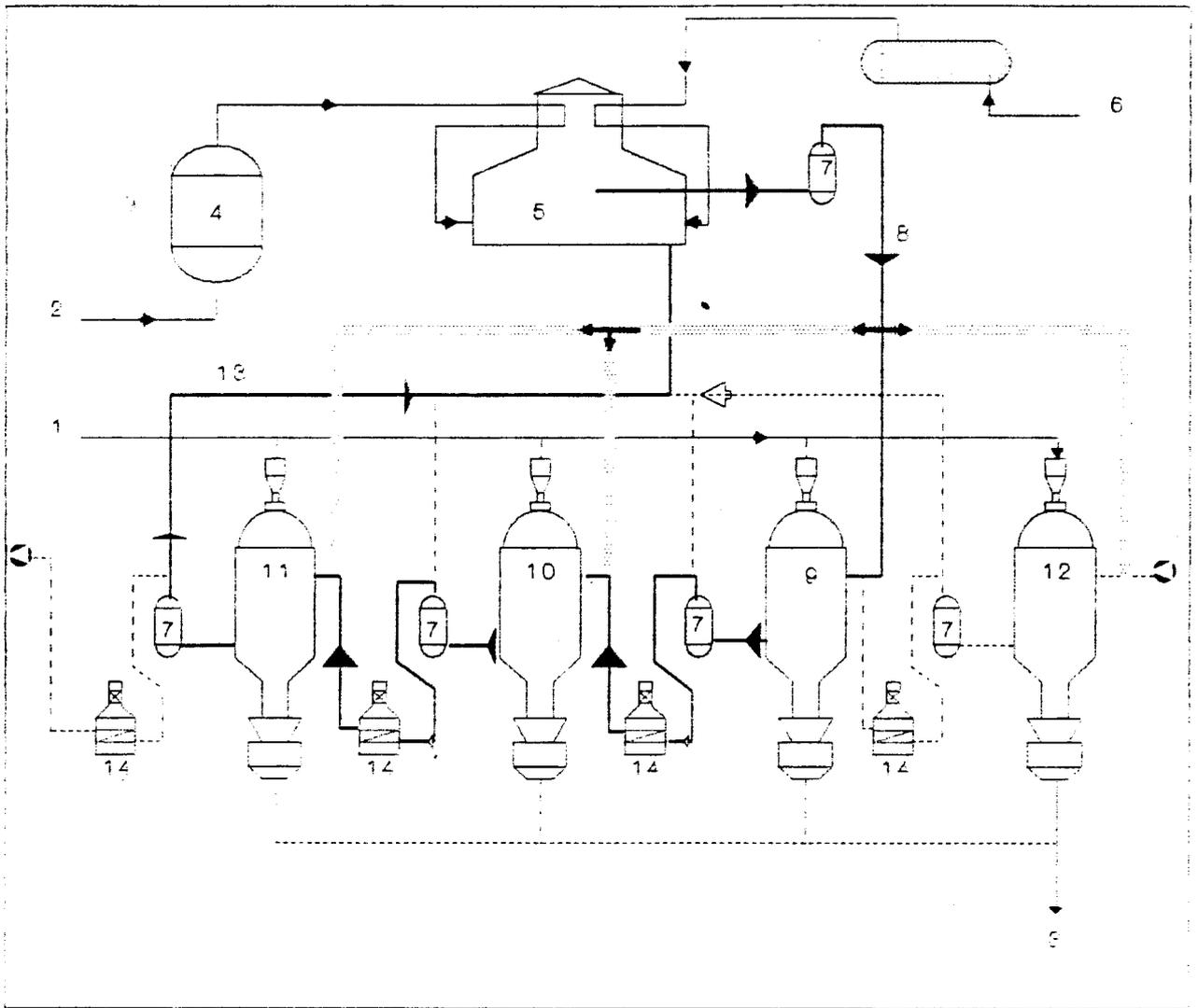
O gás redutor é obtido pela reforma catalítica de gás natural em presença de vapor d'água. O gás natural é previamente dessulfurado para proteger o catalisador. Após o resfriamento, necessário para retirar o excesso de água, obtém-se um gás frio, com alto poder redutor.



O gás redutor frio inicialmente passa pelo reator em que o minério está totalmente reduzido e quente. Aquece, resfriando a carga e promovendo a deposição de carbono. O gás aquecido e com alto poder redutor passa então ao reator em que está o minério pré-reduzido, procedendo à redução final deste até um alto teor metálico. O gás sai deste reator, é resfriado, para retirar o excesso de vapor e é novamente aquecido, entrando com

o seu poder reductor já bastante baixo no reator que está em fase de pré-redução. Finalmente, o gás pobre (gás de topo) é usado no aquecimento do reformador. O quarto reator está em fase de carga e descarga.

Este ciclo completa-se em intervalos de 8 a 12 horas e apenas o fluxo de gás é alternado, ficando a matéria-prima sempre no mesmo reator, que necessita portanto de sistemas completos de carga, descarga e circulação de gases para exercer todas as quatro fases.



- | | |
|-------------------------|-------------------------------|
| 1. Minério | 9. Reator - RESFRIAMENTO |
| 2. Gás natural | 10. Reator - REDUÇÃO FINAL |
| 3. Ferro-esponja | 11. Reator - PRÉ-REDUÇÃO |
| 4. Dessulfurador | 12. Reator - CARGA E DESCARGA |
| 5. Reformador | 13. Gas de topo |
| 6. Vapor | 14. Pré-aquecedor |
| 7. Resfriamento e purga | |
| 8. Gas reductor | |

Fig. A2 - Fluxograma simplificado do processo HYL.

9.3 - Históricos de fusão

FUSÃO 1	SUCATA	FORNO FRIO
---------	--------	------------

HORA	TEMPO min	POTÊNCIA kW	ENERGIA kWh	MENSAGEM
8:40	0	6,8	0	Ligado. Sucata e CaO
9:10	30	12,4	3,4	
9:35	55	15,6	8,6	
9:45	65	16,0	11,2	
9:50	70	16,0	12,5	1a fusão completa
9:53	78	9,5	13,8	
10:17	97	14,0	17,1	Temperatura T1- 1531 oC
10:22	102	16,0	18,3	Adição 2a carga
10:32	112	16,0	20,9	2a fusão completa
10:34	114	16,0	21,5	Engalolamento. Infolo.
10:38	118	16,0	22,5	Engalolamento. Fim.
10:44	124	16,0	24,1	Adição de CaO
10:47	127	0	24,9	Temperatura T2- 1600 oC
10:48	128	12,4	24,9	
10:49	129	12,4	25,1	Alumínio
10:50	130	0	25,3	Vazamento

CARGA 1			CARGA 2		
tempo	energia	massa	tempo	energia	massa
70 min	12,5 kWh	2,54 kg	10 min	2,6 kWh	2,55 kg

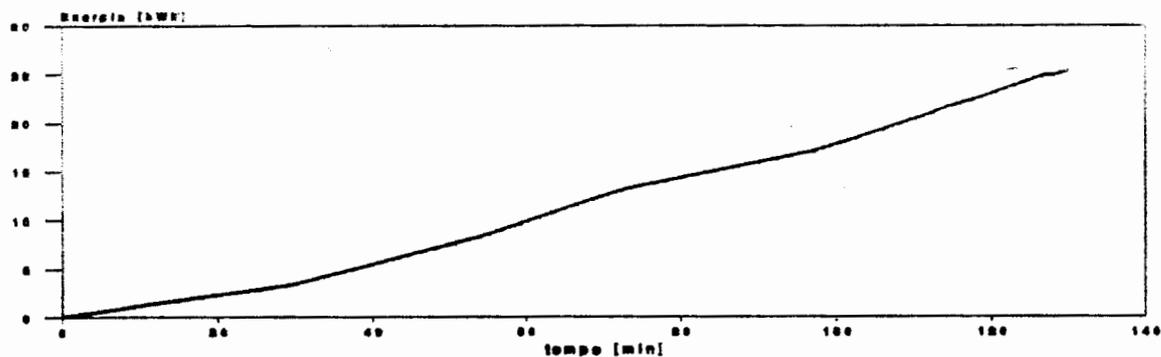
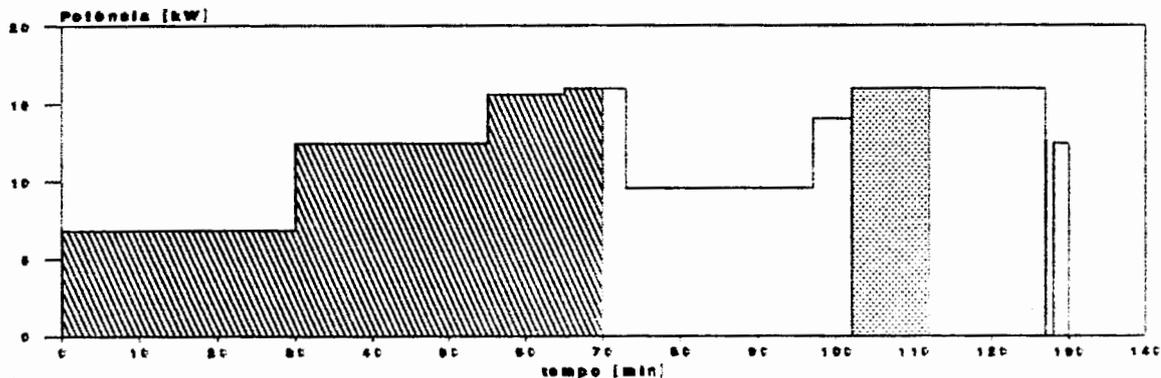


Fig. A3 - Histórico da fusão 1.

FUSÃO 3	FERRO-ESPONJA	FORNO FRIO
---------	---------------	------------

HORA	TEMPO min	POTÊNCIA kW	ENERGIA kWh	MENSAGEM
14:20	0	10,0	0	Ligado. Sucata.
14:43	23	10,0	3,8	CaO
15:02	42	15,0	7,0	
15:13	53	15,0	9,8	1a Fusão completa
15:16	56	15,0	10,6	Temperatura T1 = 1631 oC
15:20	60	15,0	11,6	Adição 2a carga
15:34	74	16,8	15,0	
15:38	78	16,8	16,1	2a Fusão completa
15:44	84	16,8	17,8	Retirada de escória. Início.
15:53	93	0	20,3	Temperatura T2 = 1734 oC
15:54	94	10,4	20,3	
15:55	95	0	20,6	Vazamento

CARGA 1			CARGA 2		
tempo	energia	massa	tempo	energia	massa
53 min	9,7 kWh	2,5 kg	18 min	4,6 kWh	2,5 kg

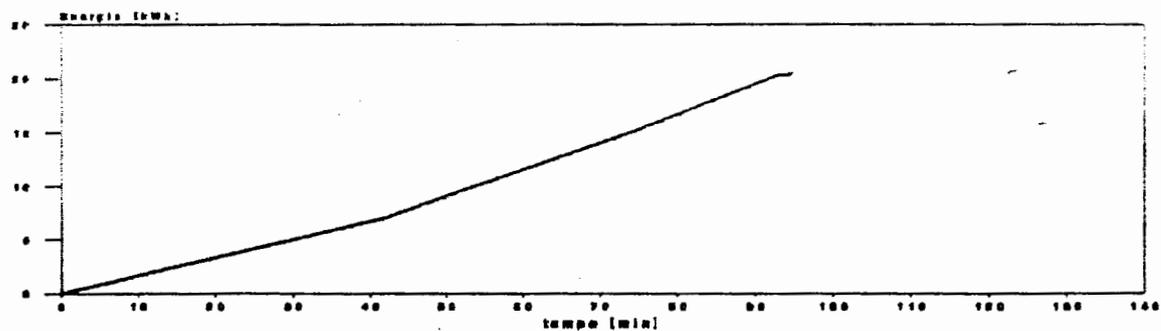
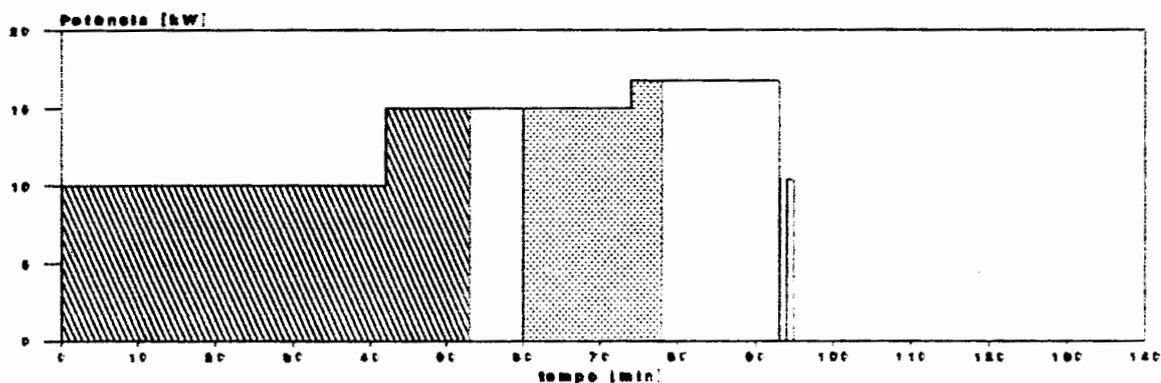


Fig. A4 - Histórico da fusão 3.

FUSÃO 4	FERRO-ESPONJA	FORNO QUENTE
---------	---------------	--------------

HORA	TEMPO min	POTÊNCIA kW	ENERGIA kWh	MENSAGEM
16:00	0	15,8	0	Ligado. Sucata + CaO.
16:14	14	15,8	3,7	1a Fusão completa
16:17	17	0	4,5	Temperatura T1 = 1531 oC
16:18	18	15,0	4,5	Adição 2a carga
16:36	36	15,0	9,0	2a Fusão completa.
16:47	47	15,0	11,7	Rompimento do refratário
16:48	48	0	12,0	Vazamento

CARGA 1			CARGA 2		
tempo	energia	massa	tempo	energia	massa
14 min	3,6 kWh	2,5 kg	18 min	4,5 kWh	2,5 kg

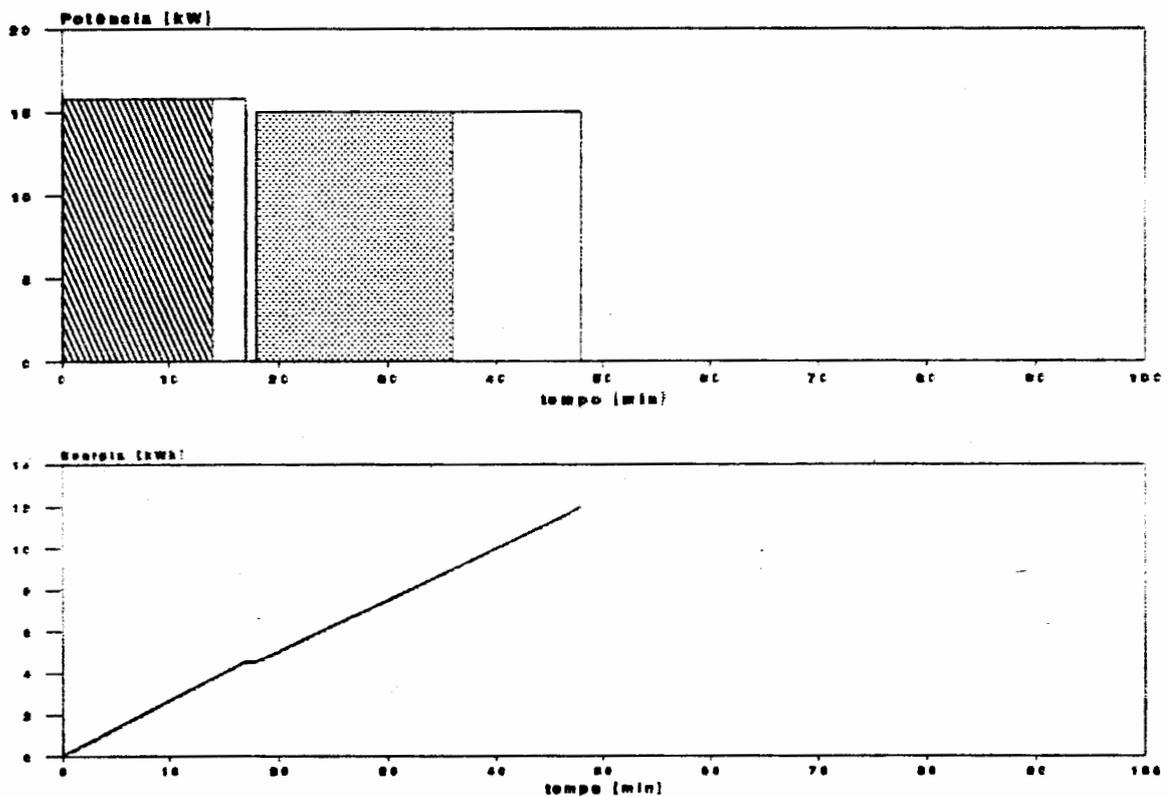


Fig. A5 - Histórico da fusão 4.

FUSÃO 5	FERRO-ESPONJA	FORNO FRIO
---------	---------------	------------

HORA	TEMPO min	POTÊNCIA kW	ENERGIA kWh	MENSAGEM
8:40	0	4,0	0	Ligado. Sucata + CaO.
8:46	6	10,0	0,3	
9:17	37	15,0	5,7	
9:31	51	15,0	9,2	1a Fusão completa
9:32	52	0	9,4	
9:33	53	15,0	9,4	
9:34	54	15,0	9,7	Adição 2a carga
10:02	82	18,0	16,7	
10:06	86	18,0	17,9	2a Fusão completa
10:13	93	16,0	20,0	Retirada de escória. Início.
10:14	94	16,0	20,2	Problema: baixa T da carga
10:26	106	0	23,4	Temperatura T2 = 1480 oC
10:27	107	18,0	23,4	
10:47	127	18,0	29,4	Perda de material
10:47	127	0	29,4	Vazamento

CARGA 1			CARGA 2		
tempo	energia	massa	tempo	energia	massa
51 min	9,1 kWh	2,5 kg	32 min	8,2 kWh	2,5 kg

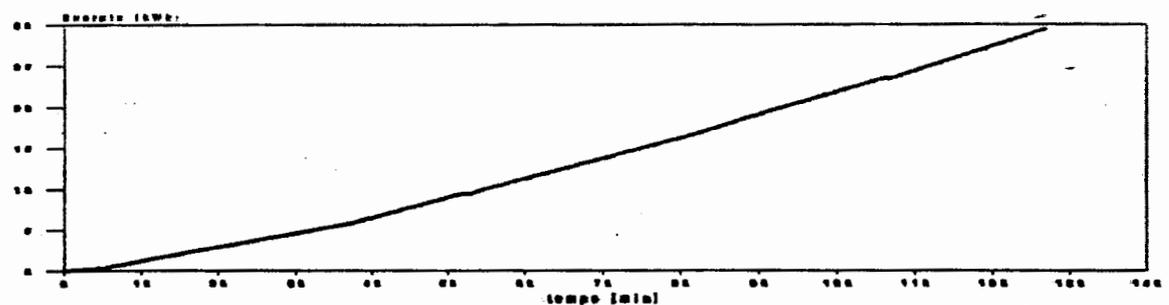
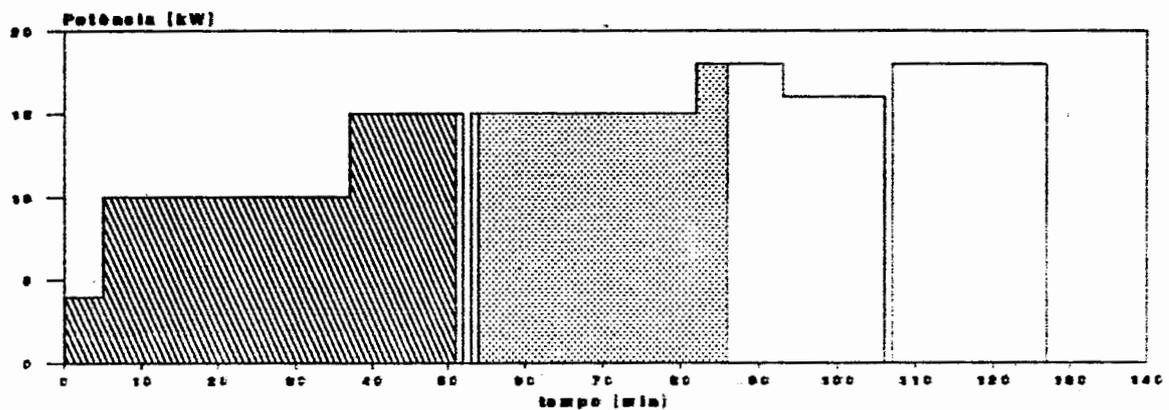


Fig. A6 - Histórico da fusão 5.

FUSÃO 6	BRIQUETE	FORNO QUENTE
---------	----------	--------------

HORA	TEMPO min	POTÊNCIA kW	ENERGIA kWh	MENSAGEM
10:48	0	15,0	0	Ligado. Sucata + CaO
11:05	17	16,0	4,8	
11:07	19	16,0	4,8	1a fusão completa
11:08	20	16,0	5,1	Adição 2a carga
11:29	41	18,0	10,7	2a fusão completa
11:40	52	0	14,0	Temperatura T2 - 1610 oC
11:41	53	18,0	14,0	Retirada da escória. Início.
11:43	55	18,0	14,6	Alumínio
11:54	66	0	17,9	Vazamento

CARGA 1			CARGA 2		
tempo	energia	massa	tempo	energia	massa
19 min	4,7 kWh	2,5 kg	21 min	5,6 kWh	2,5 kg

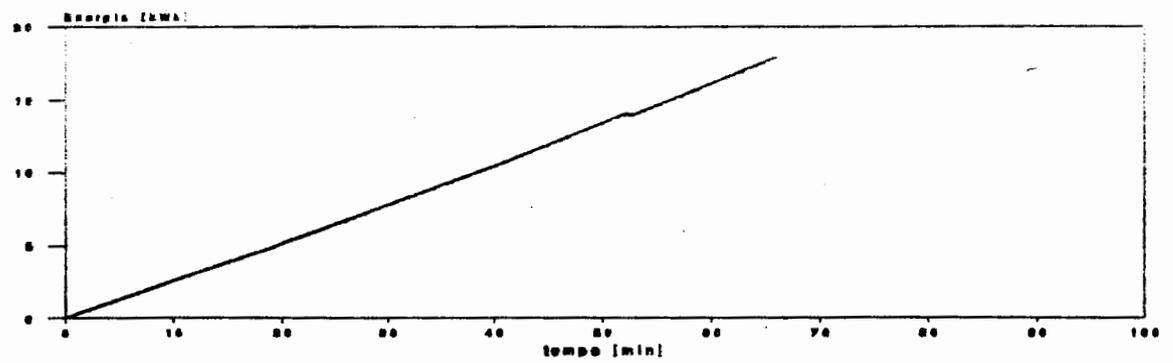
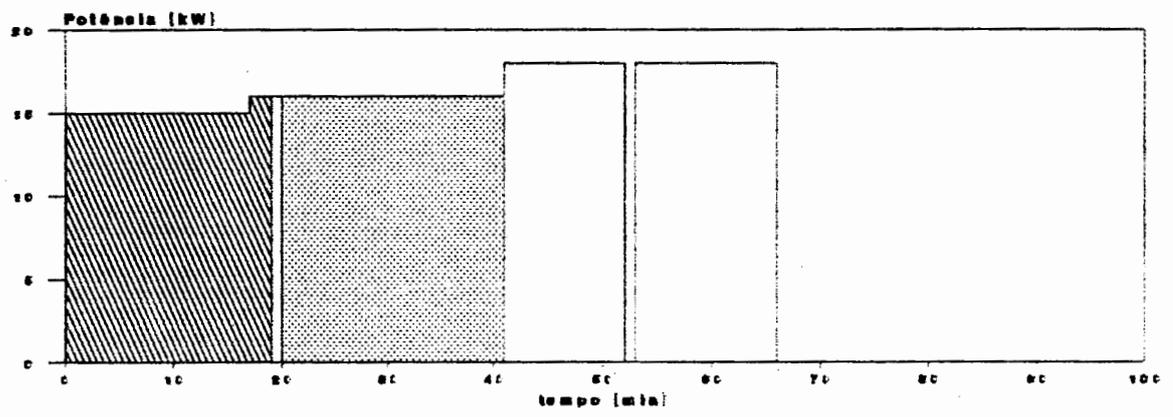


Fig. A7 - Histórico da fusão 6.

FUSÃO 7	FERRO-ESPONJA	FORNO FRIO
---------	---------------	------------

HORA	TEMPO min	POTÊNCIA kW	ENERGIA kWh	MENSAGEM
14:06	0	12,0	0	Ligado. Sucata + CaO
14:41	36	15,0	7,0	
14:47	41	15,0	8,5	1a fusão completa
14:47	41	15,0	8,5	Adição 2a carga
15:14	68	15,0	15,3	2a fusão completa
15:21	75	0	17,0	Temperatura T2 = 1690 oC
15:22	76	15,0	17,0	
15:26	80	15,0	18,0	Retirada de escória. Início
15:27	81	15,0	18,3	Alumínio
15:28	82	0	18,5	Vazamento

CARGA 1			CARGA 2		
tempo	energia	massa	tempo	energia	massa
41 min	8,5 kWh	2,5 kg	27 min	6,7 kWh	2,5 kg

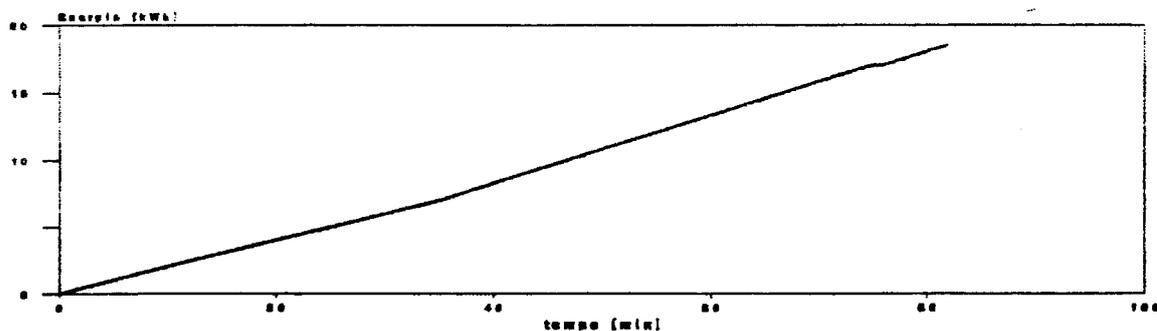
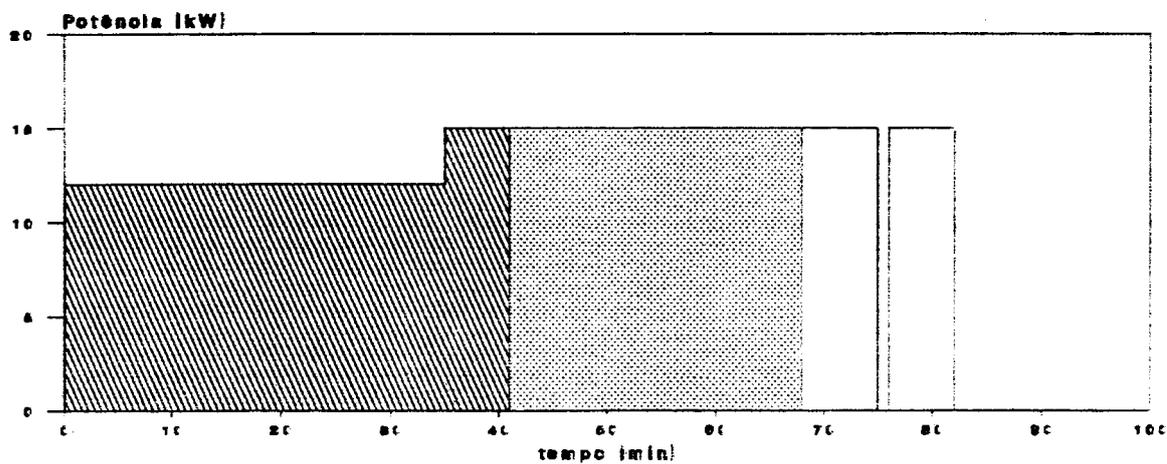


Fig. A8 - Histórico da fusão 7.

FUSÃO 8	BRIQUETE	FORNO QUENTE
---------	----------	--------------

HORA	TEMPO min	POTÊNCIA kW	ENERGIA kWh	MENSAGEM
15:26	0	12,0	0	Ligado. Sucata + CaO
15:41	15	15,0	3,0	
15:46	20	15,0	4,3	1a fusão completa
15:47	21	0	4,5	Temperatura T1 = 1590 oC
15:48	22	15,0	4,5	
15:49	23	15,0	4,8	Adição 2a carga
16:14	48	15,0	11,0	2a fusão completa
16:15	49	18,0	11,3	Engalolamento
16:26	60	0	14,6	Temperatura T2 = 1656 oC
16:30	64	0	14,6	Alumínio
16:30	64	0	14,6	Vazamento

CARGA 1			CARGA 2		
tempo	energia	massa	tempo	energia	massa
20 min	4,2 kWh	2,5 kg	25 min	6,2 kWh	2,5 kg

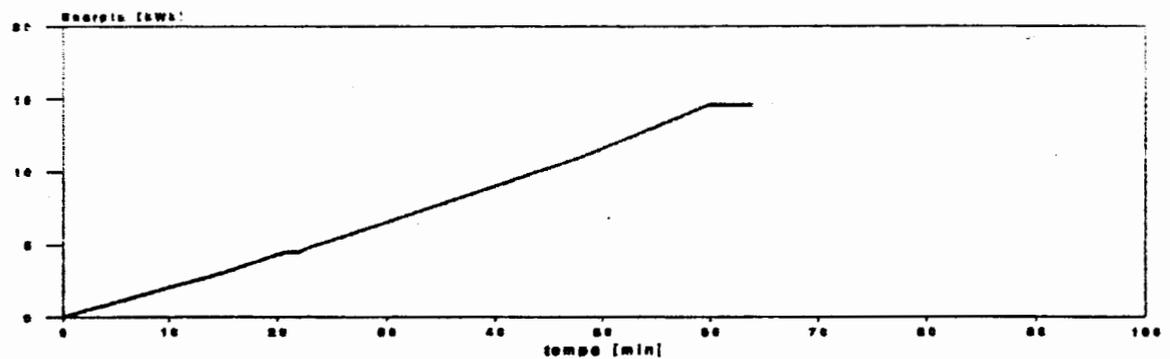
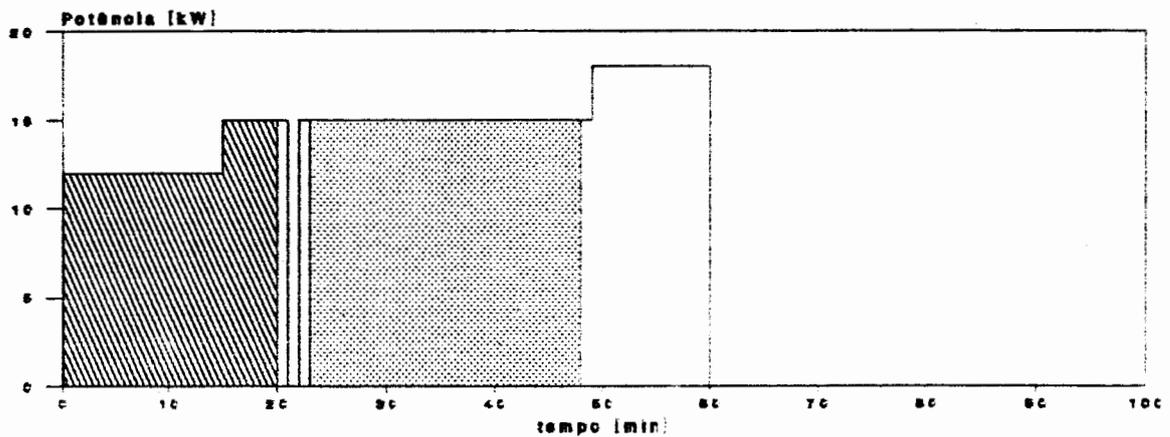


Fig. A9 - Histórico da fusão 8.

FUSÃO 9	FERRO-ESPONJA	FORNO FRIO
---------	---------------	------------

HORA	TEMPO min	POTÊNCIA kW	ENERGIA kWh	MENSAGEM
9:15	0	7,0	0	Ligado. Sucata + CaO
9:25	10	15,0	1,2	
9:43	28	15,0	5,7	1a fusão completa
9:43	28	15,0	5,7	Temperatura T1 = 1515 oC
9:44	29	15,0	5,9	Adição 2a carga
9:53	38	17,0	8,2	
10:10	55	17,0	13,0	2a fusão completa
10:15	60	17,0	14,4	Retirada escória / adicao de alumínio
10:28	73	17,0	18,1	Temperatura T2 = 1770 oC
10:28	73	0	18,1	Vazamento

CARGA 1			CARGA 2		
tempo	energia	massa	tempo	energia	massa
28 min	5,6 kWh	2,5 kg	26 min	7,0 kWh	2,5 kg

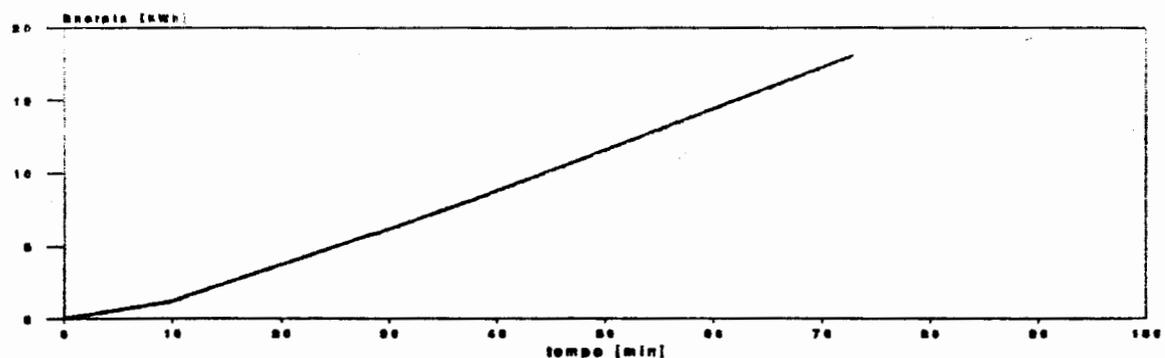
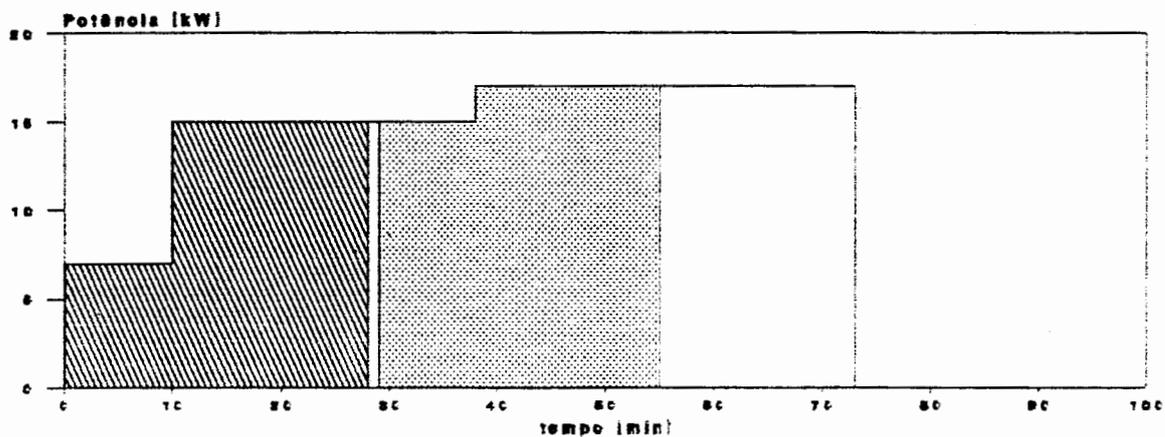


Fig. A10 - Histórico da fusão 9.

FUSÃO 10	BRIQUETE	PRÉ-AQUECIDO
----------	----------	--------------

HORA	TEMPO min	POTÊNCIA kW	ENERGIA kWh	MENSAGEM
8:52	0	12,0	0	Ligado. Sucata + CaO
9:10	18	15,0	3,6	
9:30	38	15,0	8,6	1a fusão completa
9:31	39	0	8,9	Temperatura T1 = 1550 oC
9:32	40	15,0	8,9	Adição 2a carga
9:55	63	15,0	14,6	2a fusão completa
10:02	70	15,0	16,4	Retirada de escória. Início
10:08	76	0	17,9	Temperatura T2 = 1674 oC
10:09	77	15,0	17,9	Alumínio
10:12	80	0	18,6	Vazamento

CARGA 1			CARGA 2		
tempo	energia	masse	tempo	energia	masse
38 min	8,6 kWh	2,5 kg	23 min	5,7 kWh	1,5 kg

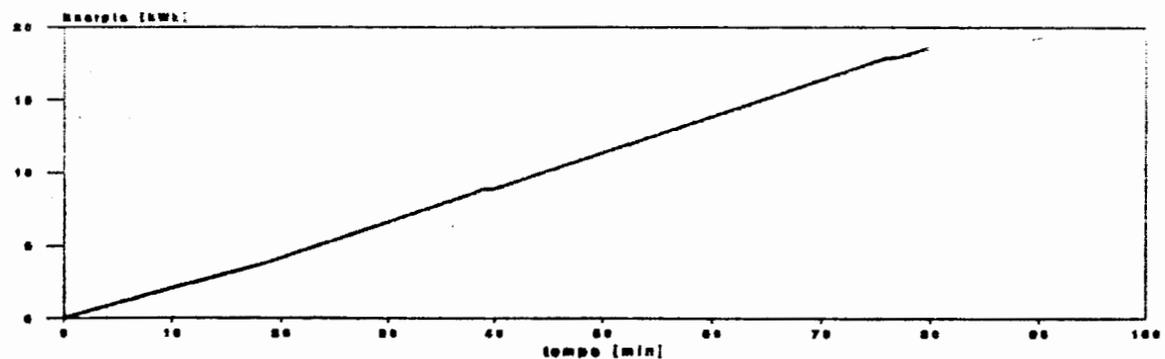
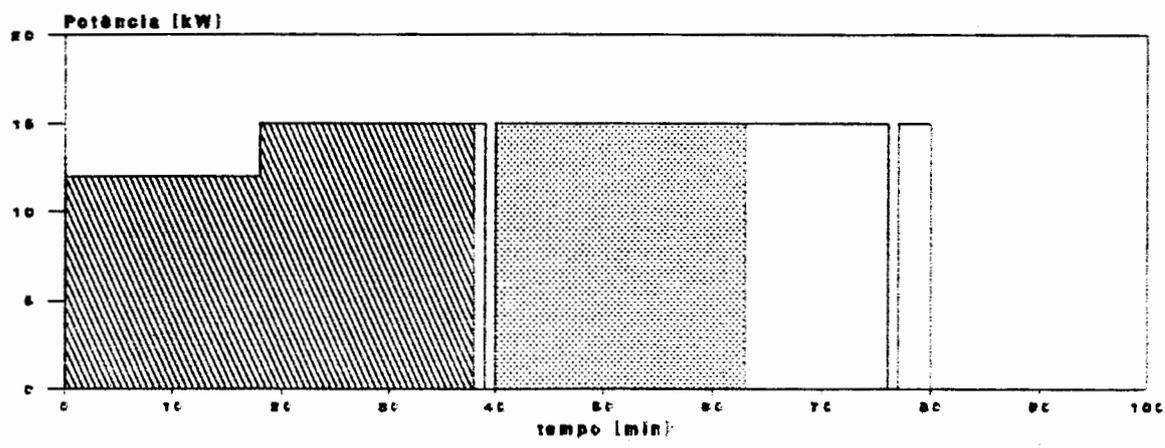


Fig. A11 - Histórico da fusão 10.

FUSÃO 11	SUCATA	FORNO QUENTE
----------	--------	--------------

HORA	TEMPO min	POTÊNCIA kW	ENERGIA kWh	MENSAGEM
10:14	0	17,0	0	Ligado. Sucata + CaO
10:24	10	17,0	2,8	1a fusão completa
10:25	11	0	3,1	Temperatura T1 = 1623 oC
10:26	12	17,0	3,1	Adição 2a carga
10:39	25	17,0	6,8	2a fusão completa
10:44	30	17,0	8,2	Retirada de escória. Início
10:51	37	0	10,2	Temperatura T2 = 1639 oC
10:52	38	16,0	10,2	Alumínio
10:52	38	0	10,2	Vazamento

CARGA 1			CARGA 2		
tempo	energia	massa	tempo	energia	massa
10 min	2,8 kWh	2,0 kg	13 min	3,6 kWh	2,0 kg

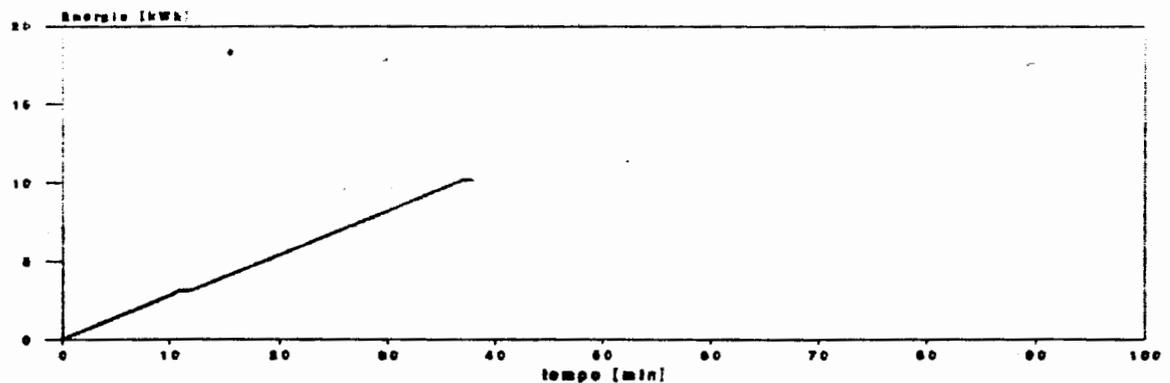
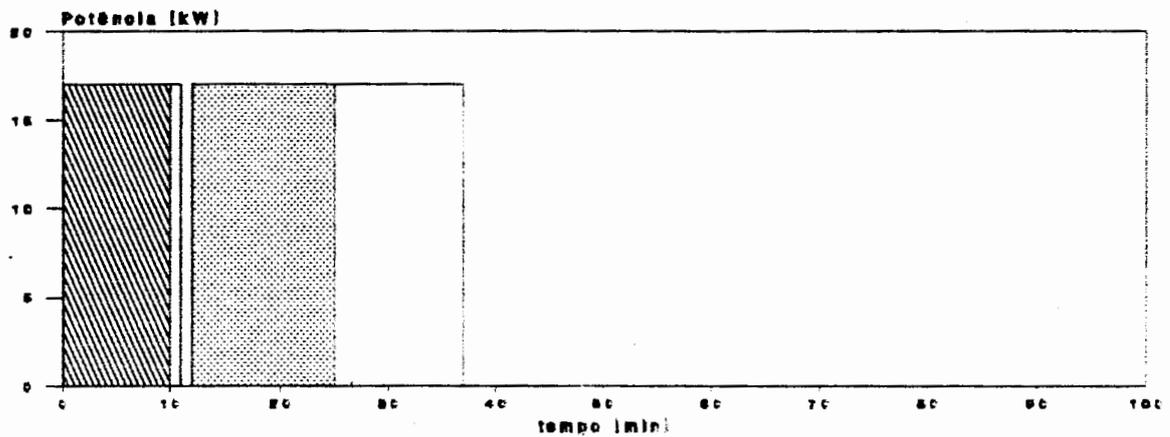


Fig. A12 - Histórico da fusão 11.

FUSÃO 12	BRIQUETE	PRÉ-AQUECIDO
----------	----------	--------------

HORA	TEMPO min	POTÊNCIA kW	ENERGIA kWh	MENSAGEM
14:09	0	15,0	0	Ligado. Sucata + CaO
14:47	38	15,0	9,5	1a fusão completa
14:49	40	10,0	10,0	Corrida das fotos
15:02	53	15,0	12,2	Adição 2a carga
15:08	59	15,0	13,7	
15:39	90	15,0	21,4	2a fusão completa
15:45	96	15,0	22,9	Ret. escória / adicao de alumínio
15:46	97	0	23,2	Temperatura T2 = 1725 oC
15:46	97	0	23,2	Vazamento

CARGA 1			CARGA 2		
tempo	energia	massa	tempo	energia	massa
38 min	9,5 kWh	2,0 kg	37 min	9,2 kWh	2,0 kg

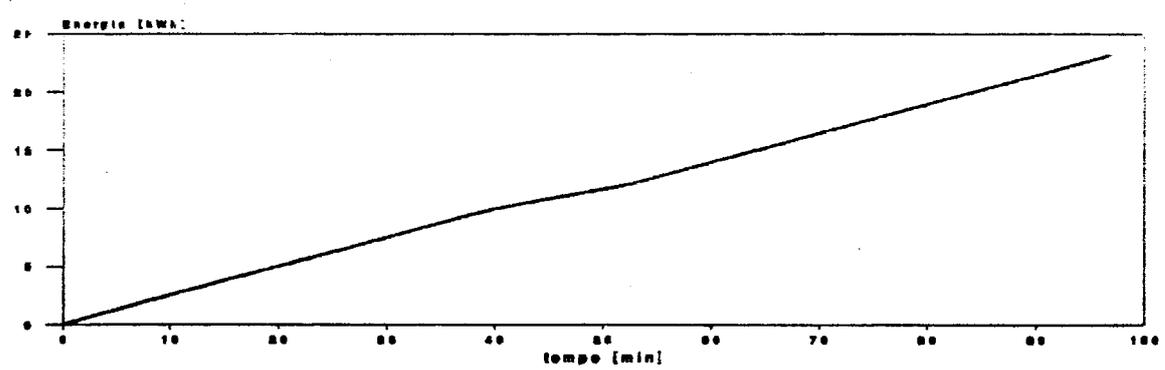
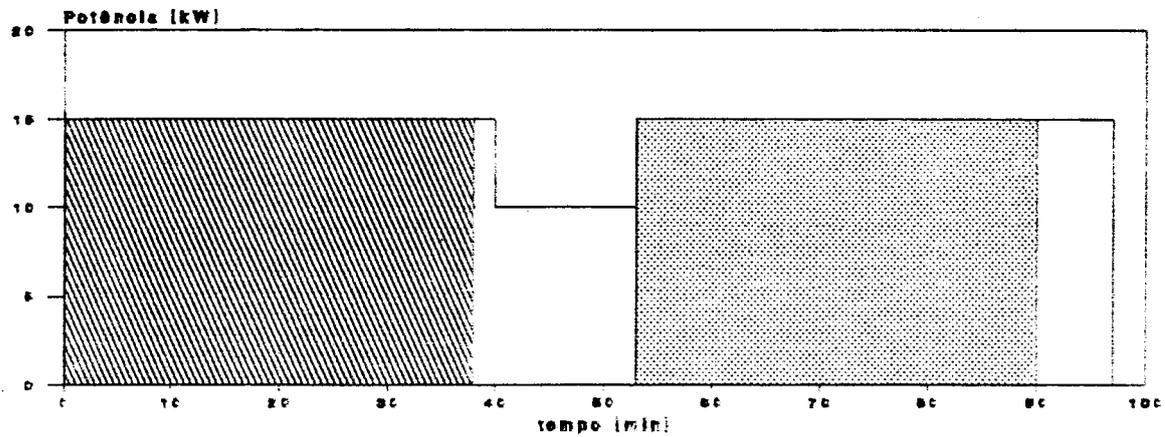


Fig. A13 - Histórico da fusão 12.

FUSÃO 13	SUCATA	FORNO QUENTE
----------	--------	--------------

HORA	TEMPO min	POTÊNCIA kW	ENERGIA kWh	MENSAGEM
16:04	0	16,0	0	Ligado, Sucata + CaO
16:21	17	16,0	4,5	1a fusão completa
16:22	18	0	4,8	Temperatura T1 = 1614 oC
16:23	19	16,0	4,8	Adição 2a carga
16:36	31	16,0	8,0	2a fusão completa
16:37	33	16,0	8,5	Retirada de escória. Início
16:39	35	0	9,1	Temperatura T2 = 1672 oC
16:40	36	16,0	9,1	Alumínio
16:40	36	0	9,1	Vazamento

CARGA 1			CARGA 2		
tempo	energia	massa	tempo	energia	massa
17 min	4,5 kWh	2,0 kg	12 min	3,2 kWh	2,0 kg

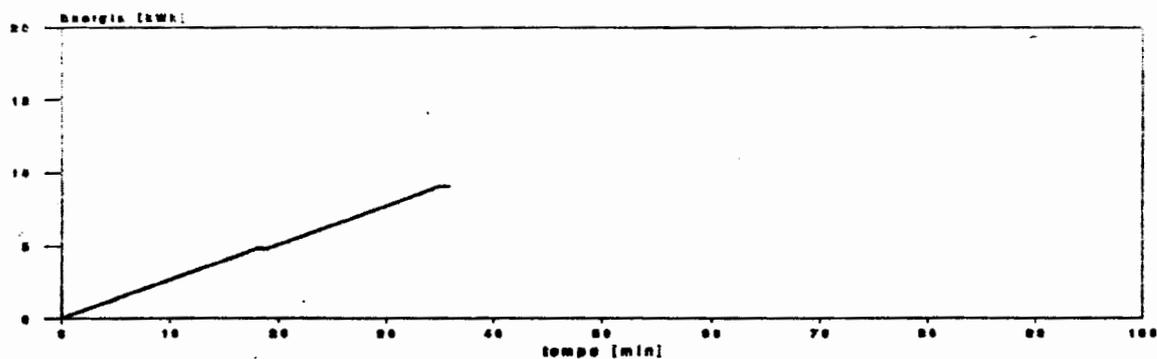
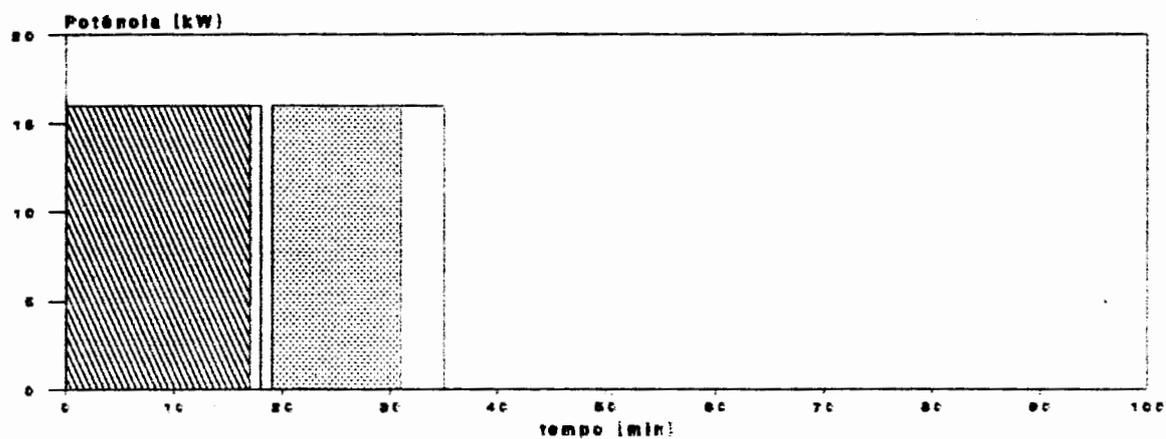


Fig. A14 - Histórico da fusão 13.

FUSÃO 14	SUCATA	FORNO FRIO
----------	--------	------------

HORA	TEMPO min	POTÊNCIA kW	ENERGIA kWh	MENSAGEM
15:14	0	10,0	0	Ligado. Sucata + CaO
15:51	37	15,0	6,2	
16:03	49	15,0	9,2	1a fusão completa
16:06	52	0	9,9	Temperatura T1 = 1555 oC
16:07	53	15,0	9,9	Adição 2a carga
16:28	74	15,0	15,2	2a fusão completa
16:34	80	0	16,7	Temperatura T2 = 1580 oC
16:35	81	15,0	16,7	Retirada de escória. Início
16:38	84	15,0	17,4	Alumínio
16:40	86	0	17,9	Vazamento

CARGA 1			CARGA 2		
tempo	energia	massa	tempo	energia	massa
49 min	9,1 kWh	2,5 kg	21 min	6,2 kWh	2,5 kg

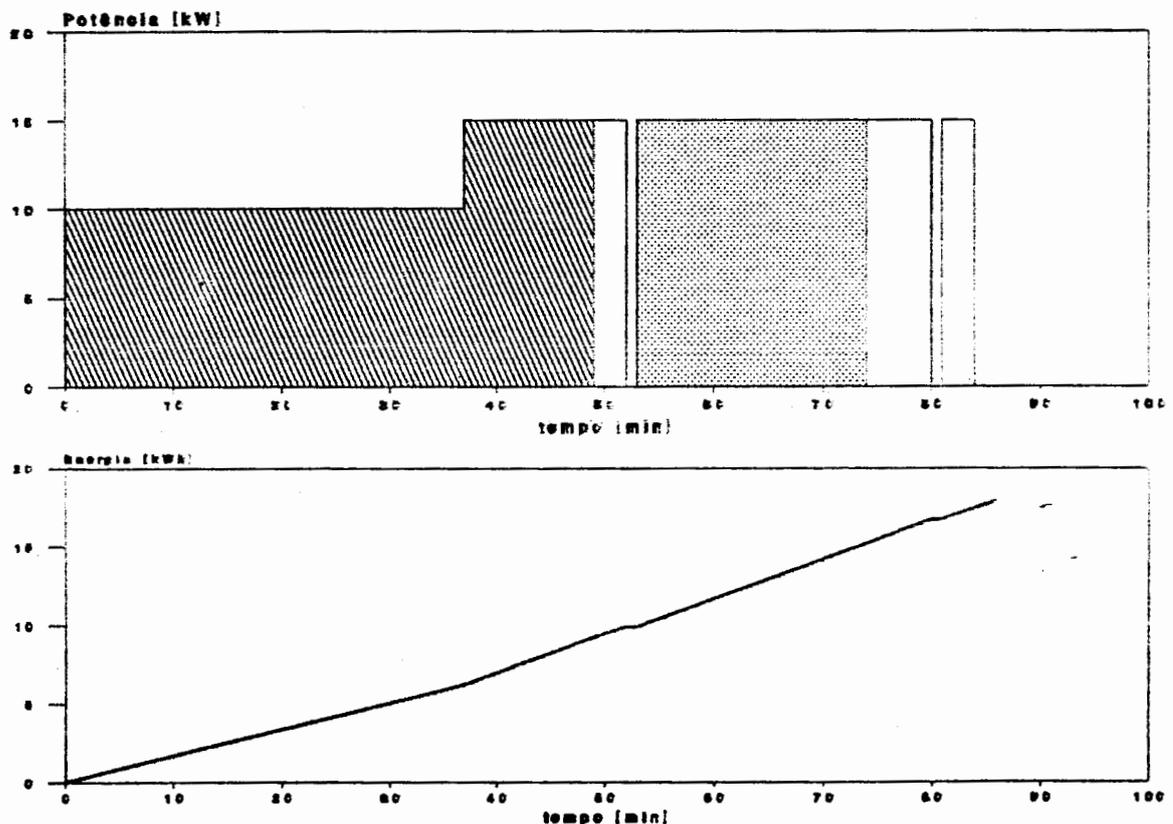


Fig. A15 - Histórico da fusão 14.

FUSÃO 15	BRIQUETE	FORNO FRIO
----------	----------	------------

HORA	TEMPO min	POTÊNCIA kW	ENERGIA kWh	MENSAGEM
8:55	0	10,0	0	Ligado. Sucata + CaO
9:32	37	15,0	6,2	
9:50	55	15,0	10,7	1a fusão completa
9:51	56	0	10,9	Temperatura T1 = 1537 oC
9:52	57	15,0	10,9	Adição 2a carga
9:58	63	18,0	12,4	
10:22	87	18,0	19,6	2a fusão completa
10:23	88	18,0	19,9	Retirada da escória. Início
10:28	93	0	21,4	Temperatura T2 = 1606 oC
10:29	94	15,0	21,4	Aluminio
10:32	97	0	22,2	Vazamento

CARGA 1			CARGA 2		
tempo	energia	massa	tempo	energia	massa
55 min	10,6 kWh	2,5 kg	30 min	8,7 kWh	2,5 kg

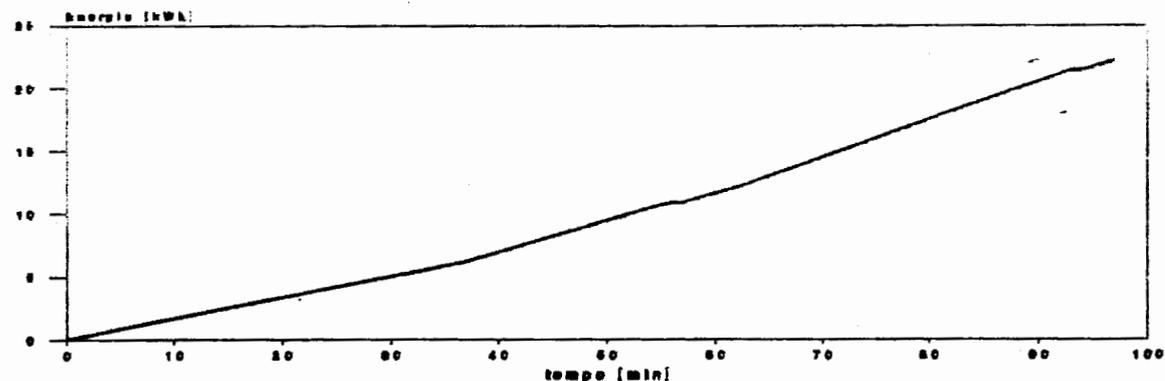
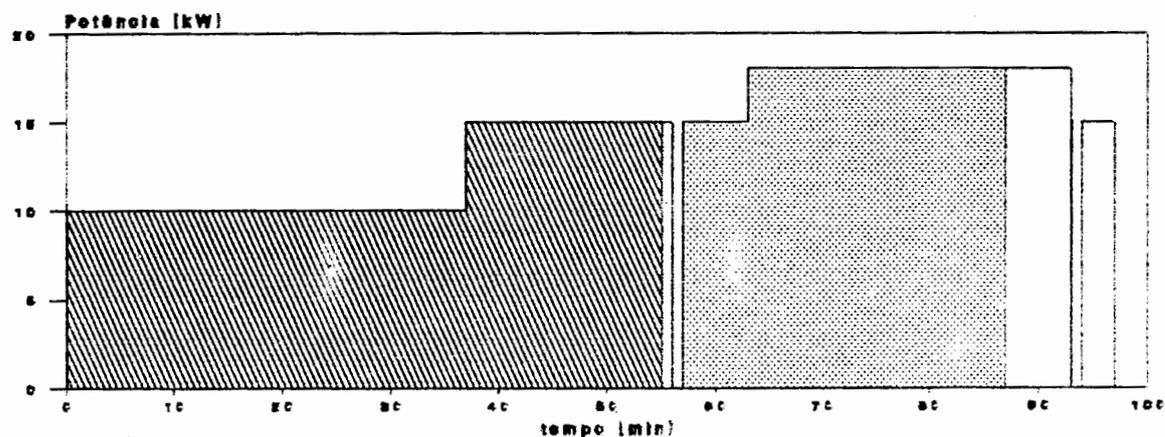


Fig. A16 - Histórico da fusão 15.

FUSÃO 16	SUCATA	FORNO QUENTE
----------	--------	--------------

HORA	TEMPO min	POTÊNCIA kW	ENERGIA kWh	MENSAGEM
10:35	0	15,0	0	Ligado. Sucata + CaO
10:50	15	15,0	3,8	1ª fusão completa
10:51	16	0	4,0	Temperatura T1 = 1547 oC
10:52	17	15,0	4,0	Adição 2ª carga
11:11	36	18,0	8,8	
11:13	38	18,0	9,4	2ª fusão completa
11:14	39	18,0	9,7	Retirada de escória. Início
11:15	40	18,0	10,0	Alumínio
11:18	43	0	10,9	Temperatura T2 = 1622 oC
11:20	45	0	10,9	Vazamento

CARGA 1			CARGA 2		
tempo	energia	massa	tempo	energia	massa
15 min	3,7 kWh	2,5 kg	21 min	5,8 kWh	2,5 kg

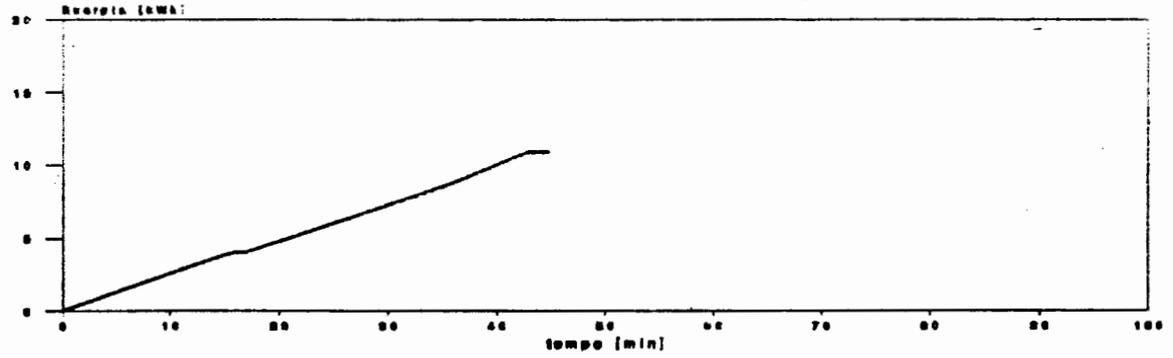
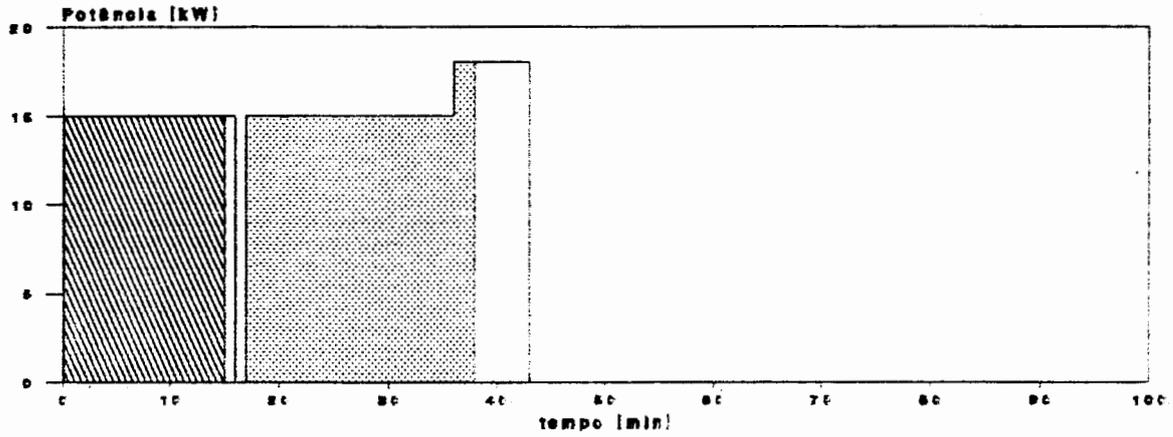


Fig. A17 - Histórico da fusão 16.

FUSÃO 17	BRIQUETE	PRÉ-AQUECIDO
----------	----------	--------------

HORA	TEMPO min	POTÊNCIA kW	ENERGIA kWh	MENSAGEM
14:30	0	10,0	0	Ligado. Sucata + CaO
15:07	37	15,0	6,2	
15:15	45	15,0	8,2	1a fusão completa
15:16	46	15,0	8,4	Temperatura T1 = 1547 oC
15:17	47	15,0	8,7	Adição 2a carga
15:27	57	18,0	11,2	
15:45	75	18,0	16,6	2a fusão completa
15:47	77	18,0	17,2	Retirada de escória. Início
15:51	81	18,0	18,4	Alumínio
15:53	83	0	19,0	Vazamento

CARGA 1			CARGA 2		
tempo	energia	masse	tempo	energia	masse
45 min	8,1 kWh	2,5 kg	28 min	7,9 kWh	2,5 kg

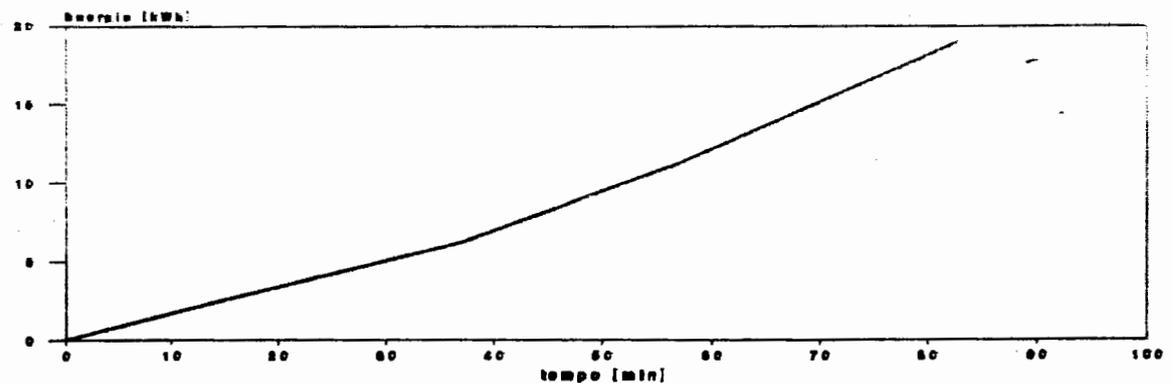
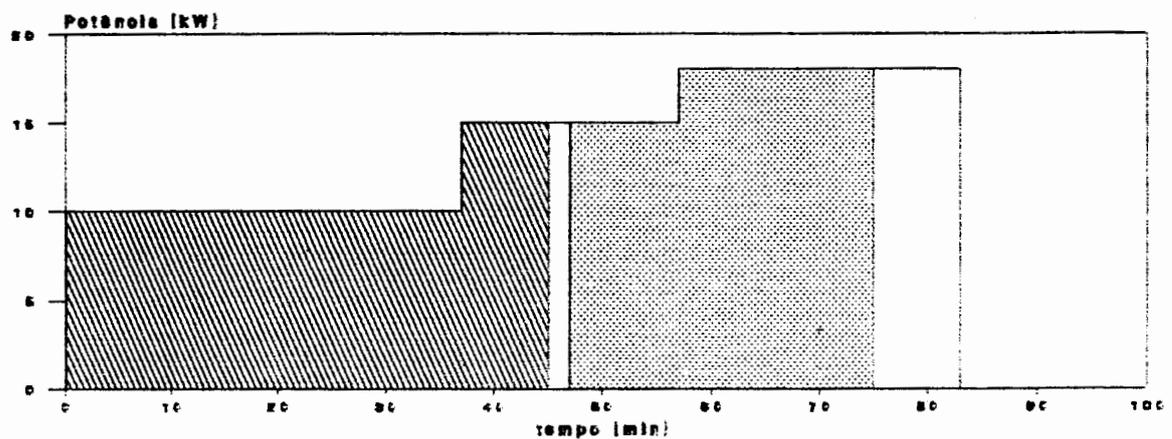


Fig. A18 - Histórico da fusão 17.

FUSÃO 18	FERRO-ESPONJA	PRÉ-AQUECIDO
----------	---------------	--------------

HORA	TEMPO min	POTÊNCIA kW	ENERGIA kWh	MENSAGEM
8:27	0	10,0	0	Ligado. Sucata + CaO
8:49	22	15,0	3,7	
9:04	37	15,0	7,4	1a fusão completa
9:08	41	0	8,4	Temperatura T1 = 1614 oC
9:09	42	15,0	8,4	Adição 2a carga
9:36	69	15,0	15,2	2a fusão completa
9:43	76	17,0	16,9	
9:48	81	17,0	18,3	Retirada de escória. Início
9:50	83	0	18,9	Temperatura T2 = 1734 oC
9:51	84	12,0	18,9	
9:54	87	12,0	19,5	Alumínio
9:55	88	0	19,7	Vazamento

CARGA 1			CARGA 2		
tempo	energia	massa	tempo	energia	massa
37 min	7,4 kWh	2,5 kg	27 min	6,7 kWh	2,5 kg

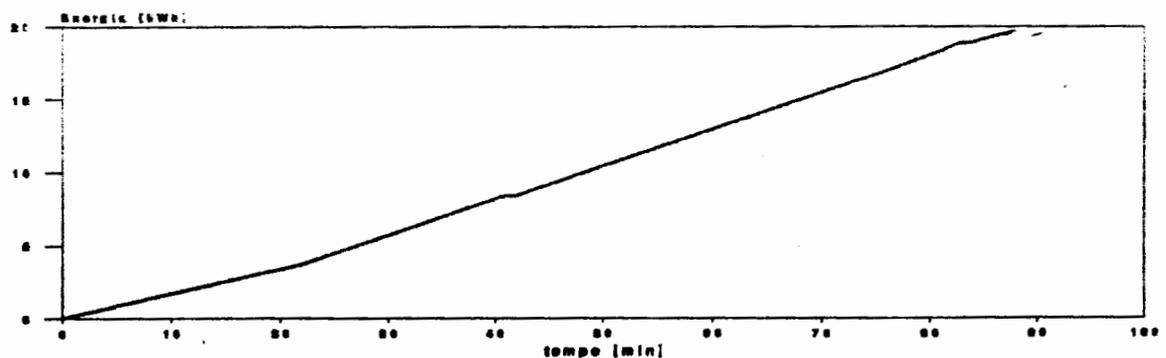
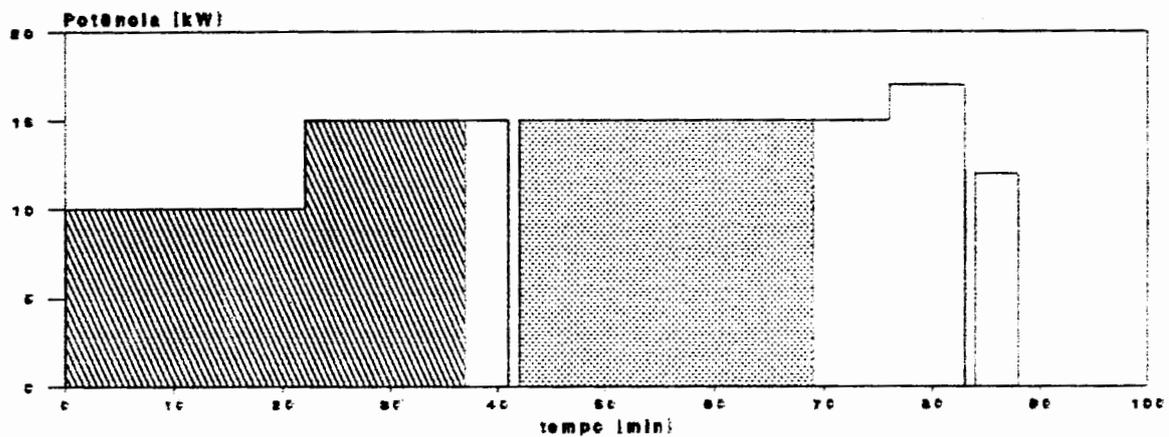


Fig. A19 - Histórico da fusão 18.

FUSÃO 19	FERRO-ESPONJA	FORNO QUENTE
----------	---------------	--------------

HORA	TEMPO min	POTÊNCIA kW	ENERGIA kWh	MENSAGEM
9:58	0	15,0	0	Ligado. Sucata + CaO
10:12	14	15,0	3,5	1a fusão completa
10:14	16	0	4,0	Temperatura T1 = 1556 oC
10:15	17	15,0	4,0	Adição 2a carga
10:40	42	15,0	10,3	2a fusão completa
10:42	44	18,0	10,8	Retirada de escória. Início
10:46	48	18,0	12,0	Alumínio
10:48	50	0	12,6	Temperatura T2 = 1752 oC
10:49	51	17,0	12,6	
10:50	52	0	12,8	Vazamento

CARGA 1			CARGA 2		
tempo	energia	massa	tempo	energia	massa
14 min	3,5 kWh	2,5 kg	25 min	6,2 kWh	2,5 kg

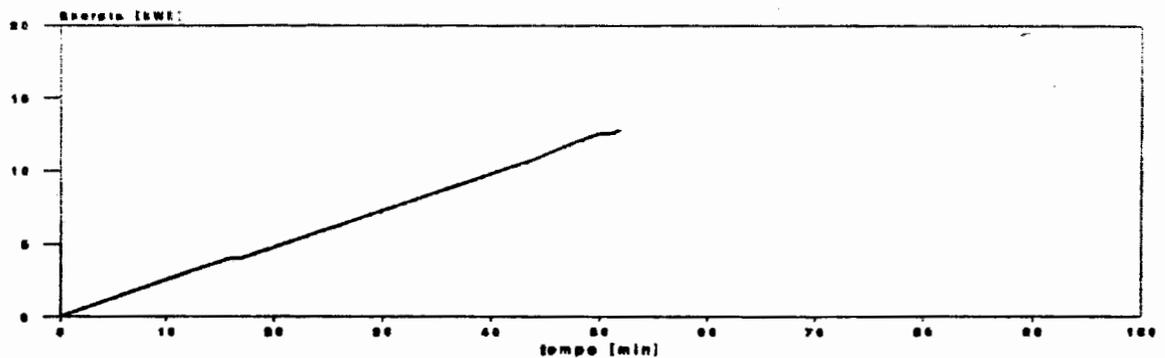
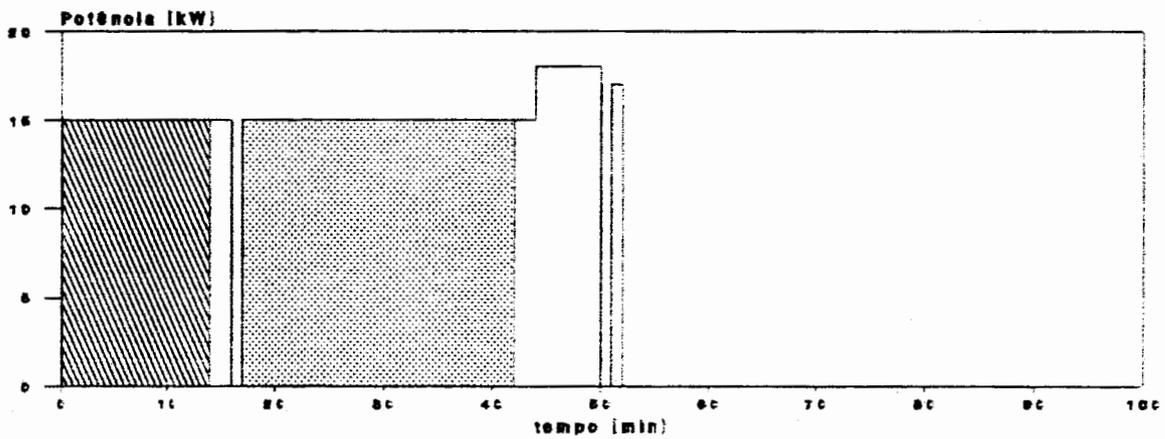


Fig. A20 - Histórico da fusão 19.

FUSÃO 20	SUCATA	PRÉ-AQUECIDO
----------	--------	--------------

HORA	TEMPO min	POTÊNCIA kW	ENERGIA kWh	MENSAGEM
14:10	0	9,0	0	Ligado. Sucata + CaO
14:31	21	15,0	3,1	
14:49	39	15,0	7,7	1a fusão completa
14:50	40	0	7,9	Temperatura T1 = 1539 oC
14:51	41	15,0	7,9	Adição 2a carga
15:05	55	18,0	11,4	
15:09	59	18,0	12,6	2a fusão completa
15:10	60	18,0	12,9	Retirada de escória. Início
15:12	62	0	13,5	Temperatura T2 = 1648 oC
15:13	63	18,0	13,5	Alumínio
15:18	66	0	14,4	Vazamento

CARGA 1			CARGA 2		
tempo	energia	massa	tempo	energia	massa
39 min	7,6 kWh	2,5 kg	18 min	4,7 kWh	2,5 kg

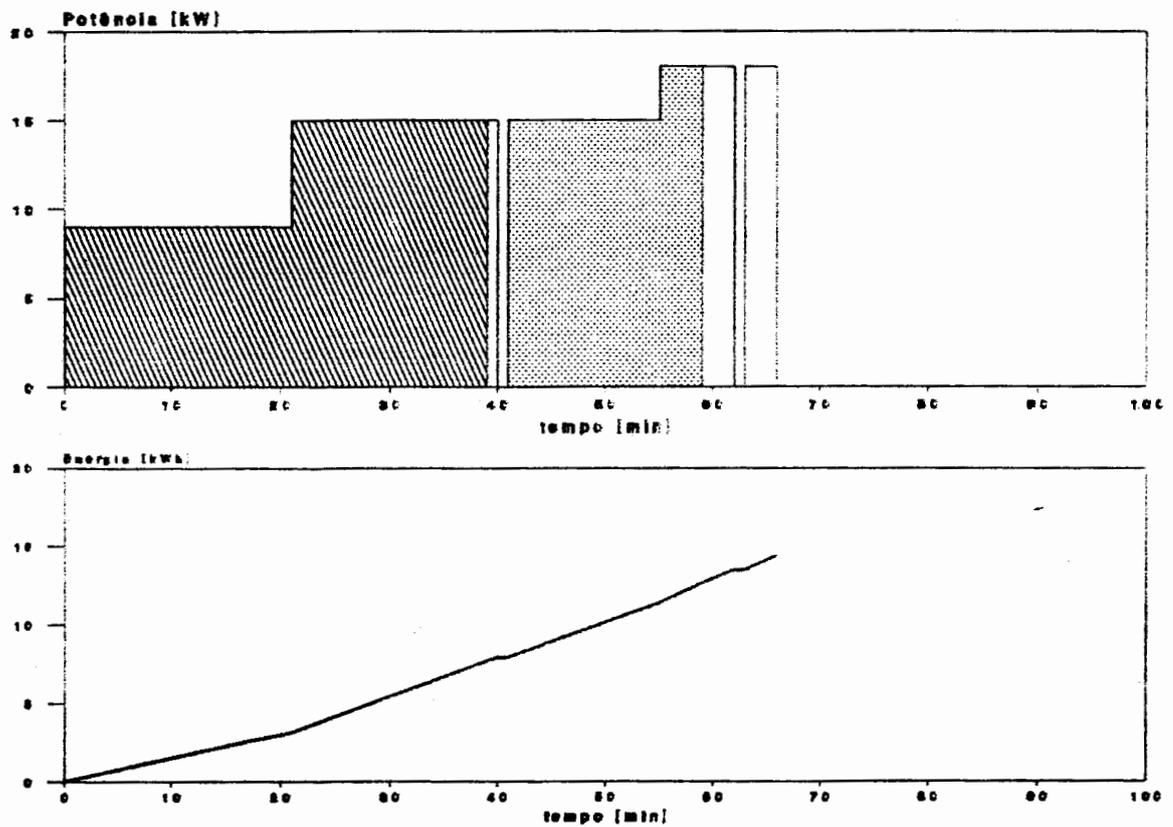


Fig. A21 - Histórico da fusão 20.

FUSÃO 21	BRIQUETE	FORNO QUENTE
----------	----------	--------------

HORA	TEMPO min	POTÊNCIA kW	ENERGIA kWh	MENSAGEM
15:19	0	15,0	0	Ligado. Sucata + CaO
15:33	14	15,0	3,5	1a fusão completa
15:36	17	0	4,3	Temperatura T1 = 1648 oC
15:37	18	18,0	4,3	
15:41	22	18,0	5,5	Adição 2a carga
15:58	39	18,0	10,5	2a fusão complete
15:59	40	18,0	10,8	
16:00	41	18,0	11,2	Retirada de escória. Início
16:03	44	0	12,0	Temperatura T2 = 1761 oC
16:04	45	0	12,0	Al / Vazamento

CARGA 1			CARGA 2		
tempo	energia	massa	tempo	energia	massa
14 min	3,5 kWh	2,5 kg	17 min	5,1 kWh	2,5 kg

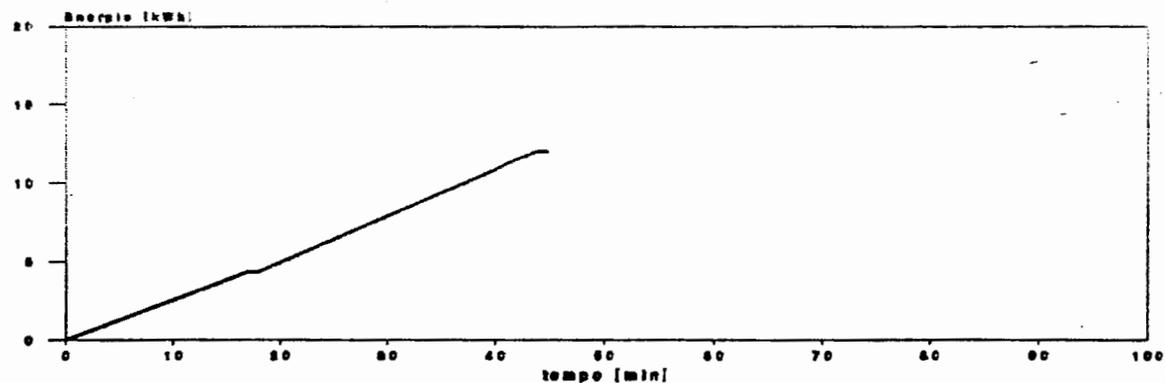
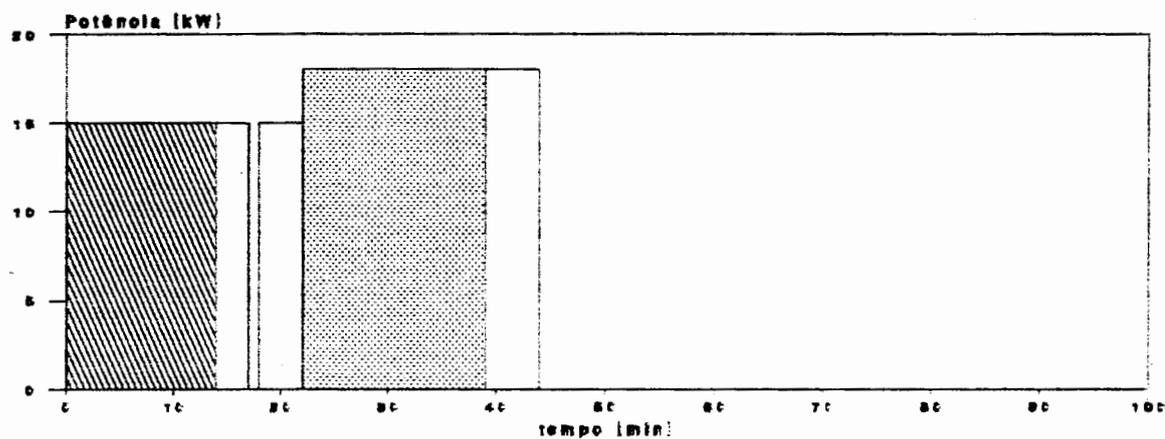


Fig. A22 - Histórico da fusão 21.

FUSÃO 22	FERRO-ESPONJA	FORNO QUENTE
----------	---------------	--------------

HORA	TEMPO min	POTÊNCIA kW	ENERGIA kWh	MENSAGEM
18:06	0	15,0	0	Ligado. Sucata + CaO
18:17	11	15,0	2,8	1a fusão completa
18:20	14	0	3,6	Temperatura T1 = 1530 oC
18:21	15	18,0	3,6	Adição 2a carga
18:42	36	18,0	9,8	2a fusão completa
18:48	42	18,0	11,6	Retirada de escória. Início
18:49	43	0	11,9	Temperatura T2 = 1770 oC
18:50	44	18,0	11,9	Alumínio
18:54	48	0	13,1	Vazamento

CARGA 1			CARGA 2		
tempo	energia	massa	tempo	energia	massa
11 min	2,7 kWh	2,5 kg	21 min	6,3 kWh	2,5 kg

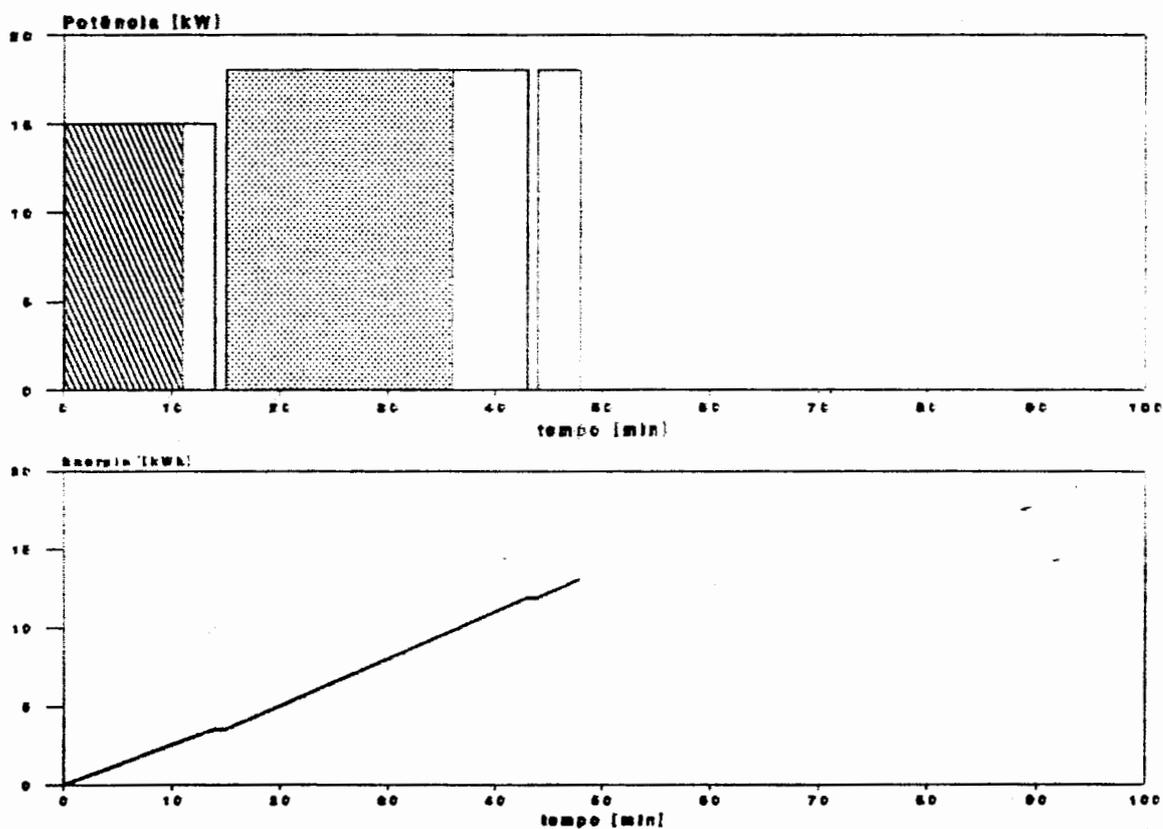


Fig. A23 - Histórico da fusão 22.

FUSÃO 23	FERRO-ESPONJA	PRÉ-AQUECIDO
----------	---------------	--------------

HORA	TEMPO min	POTÊNCIA kW	ENERGIA kWh	MENSAGEM
9:00	0	10,0	0	Ligado. Sucata + CaO
9:14	14	16,0	2,3	
9:31	31	16,0	6,6	1a fusão completa
9:32	32	0	6,8	Temperatura T1 = 1630 oC
9:33	33	18,0	6,8	Adição 2a carga
9:48	48	18,0	11,3	2a fusão completa
9:51	51	0	12,2	Temperatura T2 = 1664 oC
9:52	52	18,0	12,2	Retirada de escória. Início
9:57	57	18,0	13,7	Alumínio
10:00	60	0	14,6	Vazamento

CARGA 1			CARGA 2		
tempo	energia	massa	tempo	energia	massa
31 min	6,6 kWh	2,5 kg	15 min	4,5 kWh	2,5 kg

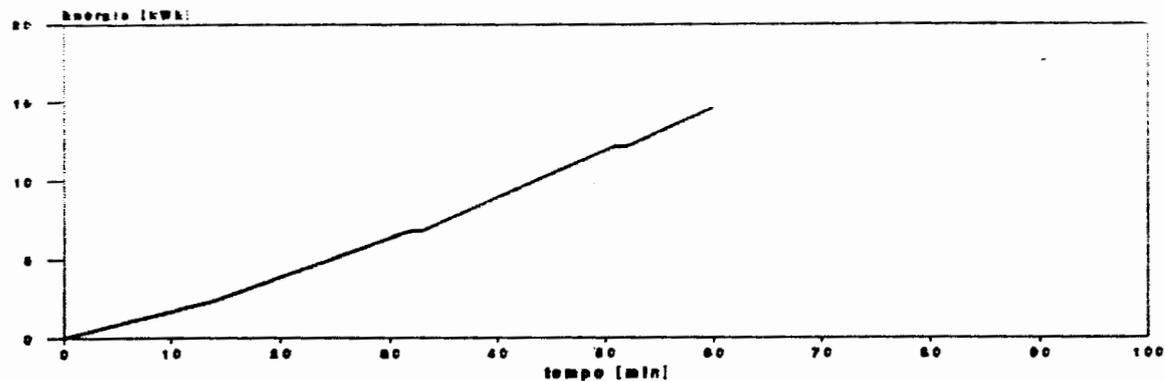
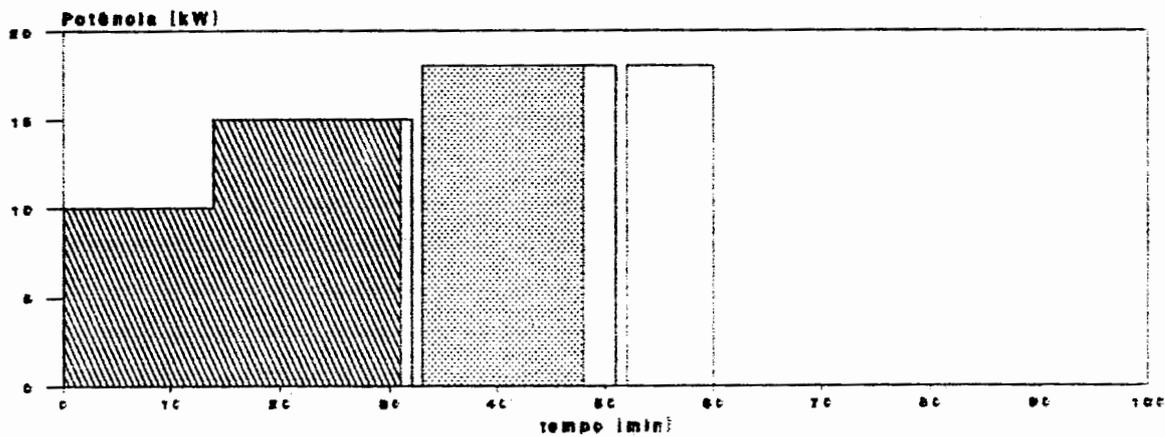


Fig. A24 - Histórico da fusão 23.

FUSÃO 24	BRIQUETE	FORNO QUENTE
----------	----------	--------------

HORA	TEMPO min	POTÊNCIA kW	ENERGIA kWh	MENSAGEM
10:03	0	15,0	0	Ligado. Sucata + CaO
10:18	15	15,0	3,8	1a fusão completa
10:19	16	0	4,0	Temperatura T1 - 1522 oC
10:20	17	18,0	4,0	Adição 2a carga
10:36	33	18,0	8,8	2a fusão completa
10:40	37	18,0	10,0	Retirada de escória. Início
10:44	41	0	11,2	Temperatura T2 - 1734 oC
10:46	43	18,0	11,2	Alumínio
10:48	45	0	11,8	Vazamento

CARGA 1			CARGA 2		
tempo	energia	masse	tempo	energia	masse
15 min	3,7 kWh	2,5 kg	16 min	4,8 kWh	2,5 kg

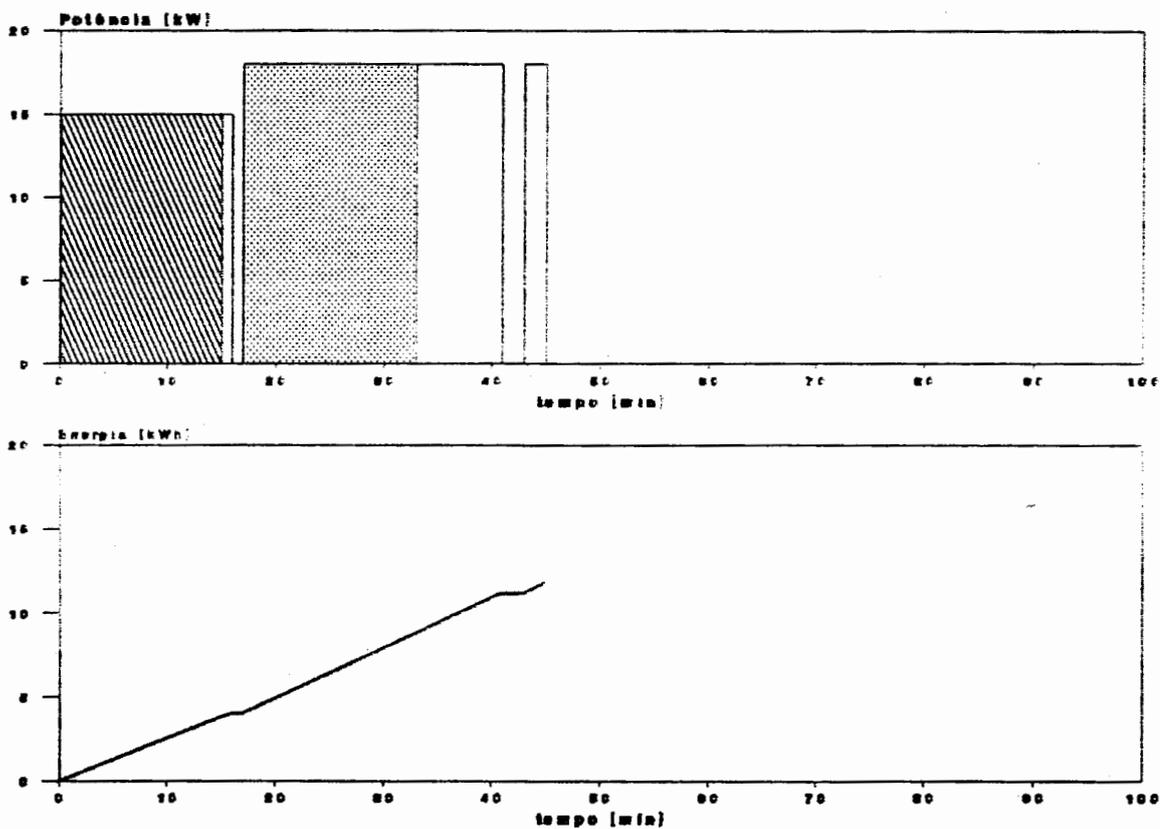


Fig. A25 - Histórico da fusão 24.

FUSÃO 25	BRIQUETE	FORNO FRIO
----------	----------	------------

HORA	TEMPO min	POTÊNCIA kW	ENERGIA kWh	MENSAGEM
8:39	0	10,0	0	Ligado. Sucata + CaO
8:59	20	15,0	3,3	
9:21	42	15,0	8,8	1a fusão completa
9:22	43	0	9,1	Temperatura T1 = 1547 oC
9:23	44	15,0	9,1	Adição 2a carga
9:41	62	18,0	13,6	
9:49	70	18,0	16,0	2a fusão completa
9:51	72	18,0	16,6	Retirada de escória. Início
9:54	75	0	17,5	Temperatura T2 = 1589 oC
9:55	76	18,0	17,5	Alumínio
9:57	78	0	18,1	Vazamento

CARGA 1			CARGA 2		
tempo	energia	massa	tempo	energia	massa
42 min	8,8 kWh	2,5 kg	26 min	6,9 kWh	2,5 kg

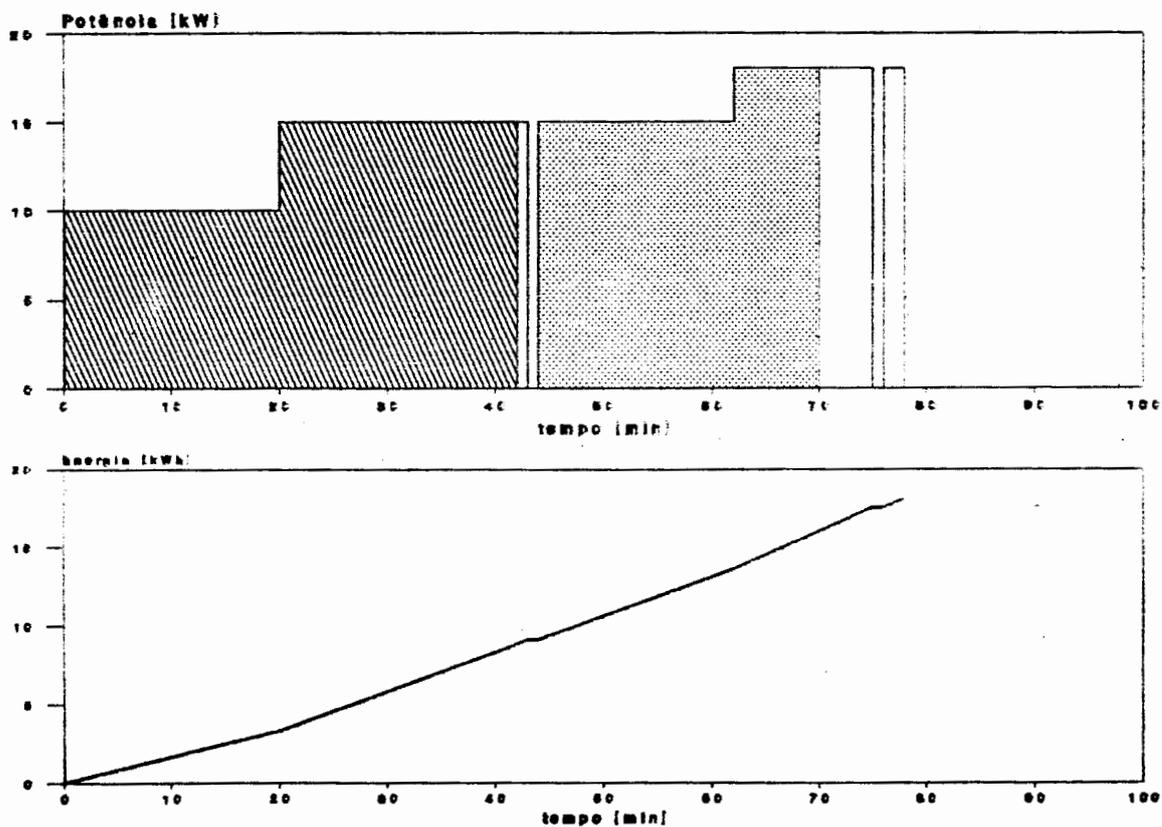


Fig. A26 - Histórico da fusão 25.

FUSÃO 26	BRIQUETE	FORNO QUENTE
----------	----------	--------------

HORA	TEMPO min	POTÊNCIA kW	ENERGIA kWh	MENSAGEM
10:00	0	15,0	0	Ligado. Sucata + CaO
10:20	20	15,0	6,0	1a fusão completa
10:26	26	0	6,3	Temperatura T1 = 1572 oC
10:26	26	18,0	6,3	Adição 2a carga
10:49	49	18,0	13,2	2a fusão completa
10:50	50	18,0	13,5	Retirada de escória. Início
10:55	55	0	15,0	Temperatura T2 = 1597 oC
10:56	56	18,0	15,0	Alumínio
11:02	62	0	16,8	Vazamento

CARGA 1			CARGA 2		
tempo	energia	massa	tempo	energia	massa
20 min	5,0 kWh	2,5 kg	23 min	6,9 kWh	2,5 kg

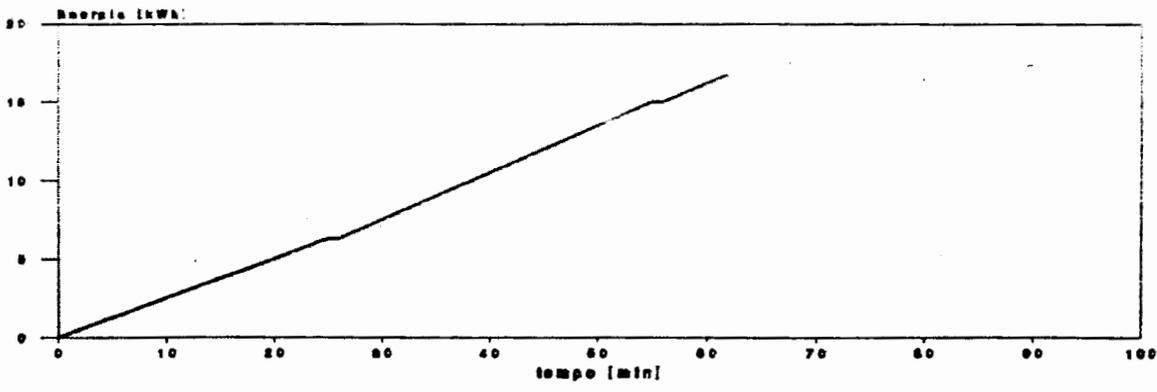
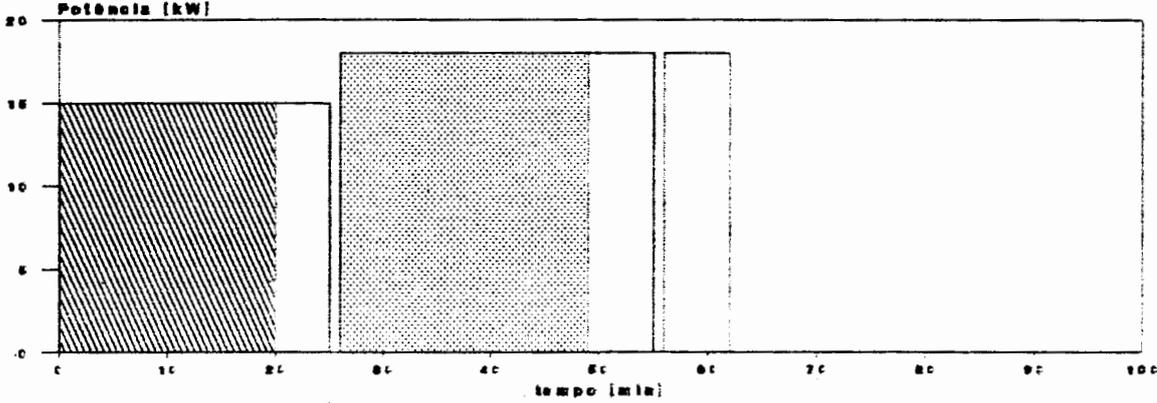


Fig. A27 - Histórico da fusão 26.

FUSÃO 27	FERRO-ESPONJA	FORNO FRIO
----------	---------------	------------

HORA	TEMPO min	POTÊNCIA kW	ENERGIA kWh	MENSAGEM
14:39	0	10,0	0	Ligado. Sucata + CaO
14:56	17	15,0	2,8	
15:08	29	18,0	5,8	
15:15	36	18,0	7,9	1a fusão completa
15:17	38	0	8,6	Temperatura T1 = 1630 oC
15:18	39	18,0	8,6	Adição 2a carga
15:44	65	18,0	16,3	2a fusão completa
15:45	66	18,0	16,6	Retirada de escória. Início
15:46	67	0	16,9	Temperatura T2 = 1665 oC
15:47	68	18,0	16,9	
15:51	72	18,0	18,1	Aluminio
15:53	74	0	18,7	Vazamento

CARGA 1			CARGA 2		
tempo	energia	massa	tempo	energia	massa
36 min	7,9 kWh	2,5 kg	26 min	7,8 kWh	2,5 kg

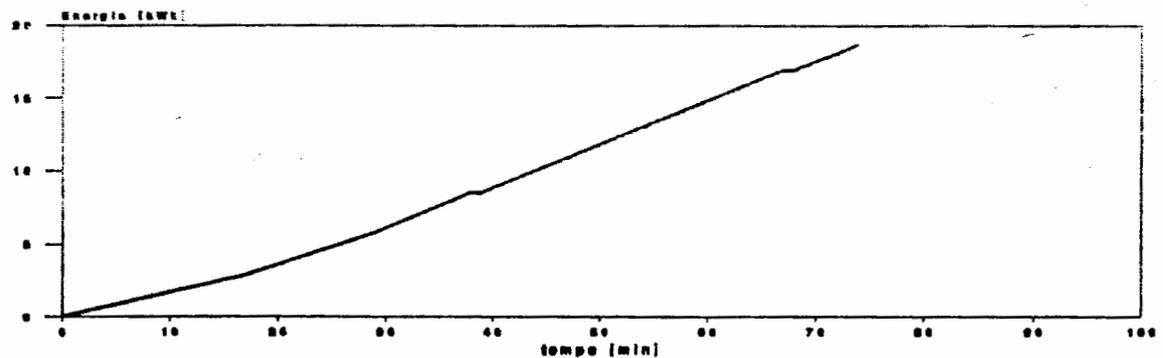
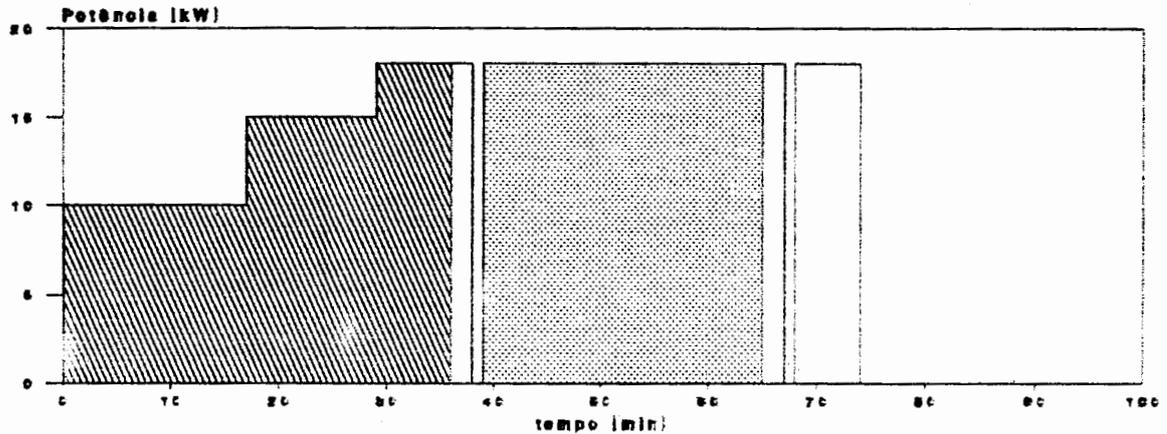


Fig. A28 - Histórico da fusão 27.