

Serragem de madeira ao forno de cal: uma opção para economia de energia

MFN -0864

N CHAMADA:

TITULO: Serragem de madeira ao forno de cal: uma opção para economia de energia

AUTOR(ES): BUSNARDO, C.A.VARANTE, P.E.D.BARRETO N., F.R.LUDERS, W.E.RAFIN, A.L.PUIG, F.FOELKEL, C.E.B.

EDICAO:

IDIOMA: português

ASSUNTO:

TIPO: Congresso

EVENTO: Congresso Anual da ABCP, 13

PROMOTOR: ABTCP

CIDADE: São Paulo

DATA: 24-28.11.1980

IMPRESSÃO: Sao Paulo, 1980, ABTCP

PAG/VOLUME: p.225-237,

FONTE: Congresso Anual da ABCP, 13, 1980, São Paulo,

p.225-237

AUTOR ENTIDADE:

DESCRIPTOR:

RESUMO:

SERRAGEM DE MADEIRA AO FORNO DE CAL: UMA OPÇÃO PARA ECONOMIA DE ENERGIA

CARLOS A. BUSNARDO
PAULO E.D. VARANTE
FLORIANO R. BARRETO NETO
WILSON E. LUDERS
ANTONIO L. RAFFIN
FLOREAL PUIG
CELSO E.B. FOELKEL
Riocell

Sinopse

Tanto os ensaios laboratoriais como os industriais revelaram o largo potencial existente para o uso da serragem de madeira como combustível complementar no forno de cal. As adições de serragem mostraram, como efeito mais evidente, uma economia significativa e importante de óleo combustível, sem que houvessem ocorrido problemas operacionais, ambientais ou de qualidade de cal durante o período e ensaio industrial.

INTRODUÇÃO

Com o "apertar do cinto" em termos de economia de energia fóssil em todas as atividades que dependem dela, a busca de novas alternativas passou a ser um exercício diário no trabalho dos técnicos de todos os setores, e também no de produção de celulose e papel. Sendo essa atividade de conversão, uma das mais ligadas à geração e utilização de biomassa lenhosa, pois é a madeira ou outra fibra vegetal qualquer a sua principal matéria-prima, certamente que algumas das perdas tradicionais no preparo e manuseio da mesma passariam a interessar como fonte de combustível.

A política energética brasileira

tem-se direcionado na análise de fontes alternativas de energia para substituição gradual do óleo fóssil. As principais sugestões são para se incrementar o uso do carvão mineral, da energia nuclear e hidroelétrica, do álcool e da madeira e correlatos.

Depois de representar a principal fonte de energia para o consumo do homem, durante milênios, a madeira passa a ter uma nova chance, com a volta à consideração da mesma, como uma das principais alternativas brasileiras para a solução do problema energético.

Fábricas de celulose consomem enormes quantidades do produto florestal para suas atividades de conversão. Como em todo processo, existem perdas de madeira no preparo e manuseio do material: essas perdas ocorrem no campo, no transporte e na preparação da madeira, quando essa é transformada em cavacos. Nessa última operação, onde as toras de madeira são fragmentadas em cavacos, que é a forma da madeira necessária para sofrer a deslignificação por processos químicos, costuma-se formar quantidade variável de serragem.

A serragem formada na picagem da madeira é inevitável, pelas próprias características da operação. O que se pode conseguir é reduzir o teor de serragem formado, controlando-se as principais variáveis que colaboram para sua maior ou menor formação. Dentre essas variáveis podem-se citar: teor de umidade da madeira, diâmetro das toras, afiação e regulagem das facas do picador, estado de deterioração da madeira, espécies de madeira, etc.

A serragem é indesejável prosseguir junto aos cavacos para o cozimento, pois além de consumir maior quantidade de reagentes químicos no mesmo, dando como conseqüência menores rendimentos e polpas de piores propriedades físico-mecânicas, ela também traz problemas operacionais em digestores contínuos.

Dessa forma, costuma-se classificar os cavacos, removendo-se e descartando-se os chamados "finos" ou serragem. A remoção dessa serragem pelos meios disponíveis não é, entretanto, total. Como os cavacos são úmidos, uma porção apreciável de serragem fina ainda permanece aderida aos cavacos, após a peneiragem.

Em geral, durante a picagem da madeira, costuma-se formar de 1 a 3% de serragem sobre o peso da madeira ingressante ao processo. Em uma condição operacional regular, cerca de 2% de serragem são continuamente retirados pelas peneiras classificatórias. Transformando-se em quantidades, para uma fábrica de 800 toneladas/dia de celulose de eucalipto, geram-se e separam-se cerca de 30 toneladas/dia de serragem. Essa serragem constitui-se, hoje, em uma das principais perdas do processo. Em termos volumétricos, 30 toneladas de serragem seca equivalem a cerca de 100 metros cúbicos estéreos de madeira. Os usos dados à serragem separada são poucos. Em geral, ela é simplesmente jogada fora, vendida a preço insignificante, ou transformada em pasta mecano-química.

Quando a crise energética começou, as atenções voltaram-se para a serragem. As idéias surgidas eram sempre no sentido de se compactá-la em briquetes ou peletes e se comercializá-la como combustível lenhoso. Os problemas encontrados eram o preço para uma instalação desse tipo e a própria quantidade de serragem, que era pequena para justificar um investimento e um dimensionamento especial de uma miniplanta de briquetamento ou pelotização. Além disso, as unidades de prensagem da serragem exigem insumos, inclusive relativamente alta demanda de vapor. Por outro lado, vender a serragem como tal, encontra o inconveniente de ser a serragem muito volumosa, onerando o custo de transporte.

A única solução para a serragem como energia deveria ser encontrada portanto internamente à fábrica. Em 1979, MERLIN relatou uma experiência promissora realizada nas Indústrias Klabin do Paraná de Celulose, onde se usou casca de madeira como combustível auxiliar em forno de cal. Embora com algumas dificuldades operacionais, o autor concluiu, que a substituição parcial do óleo combustível ao forno de cal por casca era viável, e isso não ocasionava perturbações maiores à produção normal da fábrica.

A partir dessas boas tentativas, resolveu-se que talvez a solução para a serragem fosse a queima em forno de cal, atuando como um combustível complementar. Dessa forma, decidiu-se pesquisar o assunto, tanto laboratorial como operacionalmente, visando verificar a viabilidade

técnica do uso da serragem do eucalipto para queima em forno de cal. Lembramos que o setor de caustificação/forno de cal é uma unidade padrão em modernas fábricas de celulose kraft, sendo portanto a presente experiência aplicável a todos os que dispuserem de serragem abundante e desse setor industrial em seu processo.

OBJETIVOS

A Riocell - Rio grande Cia de Celulose do Sul é uma fábrica de celulose de fibra curta, que utiliza o processo kraft para deslignificação da madeira. Esse processo tem como um dos principais consumidores de combustível o forno de cal, no setor de recuperação do álcali. A função do forno de cal é converter o carbonato de cálcio (CaCO_3), formado no setor de caustificação do licor verde, novamente em hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , que é usado na regeneração de um dos agentes ativos do licor de cozimento, que é o hidróxido de sódio (NaOH).

O presente estudo visa analisar uma forma de se reduzir o consumo de óleo combustível no forno de cal, substituindo-o parcialmente por serragem de madeira de eucalipto.

METODOLOGIA E RESULTADOS

Para a avaliação do desempenho e da potencialidade desse combustível auxiliar, procederam-se experiências no laboratório e no forno de cal, sendo que os dados obtidos nas experiências foram relacionados através de balanços térmicos e de massa.

1ª FASE: EXPERIÊNCIAS EM LABORATÓRIO PARA VERIFICAR O POTENCIAL DA SERRAGEM

Inicialmente, desenvolveram-se pesquisas em laboratório, procedendo-se à calcinação da lama de cal em mufla, para se avaliar a influência da presença de serragem na lama, quando realizada a queima. Objetivava-se verificar se a combustão era total, se permaneceriam pontos de carvão junto à cal, se a cal tinha sua característica alterada, etc.

Uma série de dados passarão a ser a seguir discutidos, principalmente quanto às qualidades da cal e balanços materiais e térmicos do sistema. Resta mencionar o fato, que frente ao alto reciclo a que é submetido o efluente do sistema de caustificação/forno de cal, a lama e a cal da Riocell no momento de realização dos testes, estavam relativamente

ricas em inertes e a cal final apresentava baixo teor de cal útil.

O objetivo inicial dos testes em laboratório era que se obtivesse uma economia de cerca de 5% no consumo de óleo combustível no forno. Decidiu-se então, grosseiramente, se estimar a dosagem de serragem a se adicionar junto à lama de cal.

A) Dados diários para cálculos:

- Vazão média de lama aos filtros: 470 l/min
- Densidade da lama: 1,31 kg/l
- % sólidos na lama: 38,5%

B) Lama seca ao filtro e por extensão ao forno de cal

$$470 \frac{\text{litros}}{\text{minuto}} \times 1,31 \frac{\text{toneladas}}{1000 \text{ litros}} \times 0,385 = 0,237 \text{ t/mi}^n$$

$$0,237 \frac{\text{t}}{\text{min}} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hora}} \times 24 \frac{\text{horas}}{\text{dia}} = 341,3 \text{ t/dia}$$

ou aproximadamente
340 t./dia

C) Proporção de serragem na alimentação

O objetivo era a substituição base poder calorífico superior útil de 5% do consumo de óleo combustível por serragem.

a) Dados de produção e consumo

- Consumo específico médio de óleo: 170 kg/t. cal
- Economia de 5% = 8,5 kg óleo/t. cal
- Produção do forno = 200 t. cal/dia
- Economia desejada:

$$200 \frac{\text{t. cal}}{\text{dia}} \times 8,5 \frac{\text{kg óleo}}{\text{t. cal}} = 1700 \frac{\text{kg óleo}}{\text{dia}}$$

- 1 tonelada óleo = 9700 M cal
- 1 tonelada serragem seca = 4400 M cal
- 1 tonelada serragem a 40% de umidade = 600 kg secos
- calor gerado na combustão de 1 tonelada de serragem úmida (Q_g)
- $Q_g = 0,6 \times 4400 - QP$
- $Q_g = 2640 - QP$
- onde QP é o calor perdido pela água da umidade

b) Dados para o cálculo de QP

- Temperatura de entrada da lama = 54° C
- Temperatura da câmara de fumaça = 140° C
- Calor necessário para aquecer a umidade até 100° C
- $Q_1 = 0,4 \times 1 \times (100 - 54) = 18,4 \text{ M cal}$
- Calor para evaporar a água
- $Q_2 = 0,4 \times 540 = 216 \text{ M cal}$
- Calor para superaquecer o vapor até a temperatura de exaustão dos gases

$$Q_3 = 0,4 \times 0,48 \times (140 - 100) = 7,7 \text{ M cal}$$

- Cálculo de QP

$$QP = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$QP = 18,4 + 216 + 7,7 = 242,1 \text{ M cal.}$$

c) Poder calorífico superior útil da serragem úmida (Q 1).

$$Q 1 = 2640 - QP = 2640 - 242,1$$

$$Q 1 = 2640 - QP = 2640 - 242,1$$

$$Q 1 = 2397,9 \text{ M cal}$$

ou aproximadamente

$$2400 \text{ M cal/t. serragem a 40\% umidade}$$

d) Conversão óleo, combustível/serragem

$$1 \text{ tonelada óleo } \frac{9200}{2400} = 4 \text{ toneladas serragem a 40\% de água}$$

e) Peso de serragem a ser usado para a economia desejada

$$1,7 \text{ t. óleo} \times \frac{4 \text{ t. serragem}}{1 \text{ t. óleo}} = 6,8 \text{ t. serragem}$$

f) Proporção de serragem a ser usada base lama seca para 5% de economia de óleo

$$\frac{6,8 \text{ t. serragem/dia}}{340 \text{ t. lama seca/dia}} \times 100 = 2\%$$

D) Proporção de conchas na alimentação do forno de cal

A reposição de cálcio no sistema da Riocell é feita pela incorporação de conchas junto à lama. O consumo de conchas é da ordem de 7,95 kg de conchas por tonelada de celulose produzida. Isso dá um consumo médio diário de cerca de 6,4 toneladas de conchas.

- Proporção de conchas base lama seca

$$\frac{6,4 \text{ t. concha/dia}}{340 \text{ t. lama seca/dia}} \times 100 = 1,9\%$$

E) Experiência laboratorial

Uma amostra de lama foi retirada na entrada do forno, secada e analisada para teor de CaCO_3 e teor de cal útil, o que resultou em 77,4% e 0% respectivamente. Retiraram-se também amostras de serragem e de concha nos locais de depósito ao ar livre.

Com as proporções previamente determinadas para as misturas de lama seca, serragem úmida e concha como tal, elegeram-se os seguintes tratamentos:

T₁ = lama de cal

T₂ = lama de cal + 2% de serragem

T₃ = lama de cal + 1,9% de conchas

T₄ = lama de cal + 2% de serragem + 1,9% de conchas

Para cada tratamento, misturavam-se os constituintes da alimentação e se depositavam as misturas em cadinhos de platina para os ensaios

na mufla. A quantidade de lama de cal seca por tratamento era de 10 gramas.

Os recipientes, contendo as amostras, foram levados à mufla e submetidos ao calor, em uma experiência que constou basicamente de dois testes:

Teste 1) Elevou-se a temperatura rapidamente até 500°C, mantendo-se esta condição durante uma hora. Após, as amostras eram retiradas do forno, tendo seus respectivos conteúdos analisados para:

a) CaO útil

b) CaCO_3

c) Perda ao rubro

Teste 2) Para outro conjunto de amostras, elevou-se a temperatura até 500°C rapidamente, mantendo-se esta temperatura durante 1 hora. Após, elevou-se até 800°C mantendo, da mesma forma, durante 1 hora. A seguir, as amostras foram retiradas do forno e as mesmas análises da etapa anterior foram repetidas, exceto a perda ao rubro.

Os resultados alcançados estão apresentados nos Quadros 1 e 2.

em mufla de laboratório, procurou-se analisar a forma como a cal se apresentava e nada de anormal foi detectado visualmente nos tratamentos onde se adicionava serragem em relação aos demais. Qualitativamente a cal também mostrava-se aceitável em todos os tratamentos, embora tenha sido notado um teor de cal útil ligeiramente menor para aqueles onde se adicionava serragem. Obviamente, as perdas de peso eram maiores nos tratamentos T₄ (lama + serragem + conchas), decrescendo para T₂ (lama + serragem), T₃ (lama + concha) e T₁ (lama). Já para a "calcinação" executada a 500°C não se notava, a olho nu, a presença de partículas de serragem ou de carvão nos tratamentos T₄ e T₂, sendo que a perda de peso porcentual acima de 6% para esses tratamentos deve explicar, com sobras, a queima da maior parte da serragem adicionada.

Os resultados laboratoriais indicaram que a cal não mostraria carvão na sua saída do forno, o que seria trágico para o licor branco, e que a

Análise	Tratamento			
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
Perda de peso na queima, %	5,11	6,19	5,69	6,54
Cal útil na cal resultante, %	1,96	1,54	2,24	1,68
CaCO_3 na cal resultante, %	76,13	76,89	77,78	77,28
Perda ao rubro da cal resultante, %	35,94	36,50	35,31	36,47

Quadro 1: Ensaio de calcinação em mufla de laboratório. Teste nº 1: uma hora a 500°C

Análise	Tratamento			
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
Perda de peso na queima, %	39,01	39,89	39,11	40,04
Cal útil na cal resultante, %	76,16	74,48	76,16	75,32
CaCO_3 na cal resultante, %	2,76	1,38	2,39	1,42

Quadro 2: Ensaio de calcinação em mufla de laboratório. Teste nº 2: uma hora a 500°C seguido de uma hora a 800°C

500°C a serragem já estaria queimada. Assim, optou-se pela realização de teste industrial no próprio forno de cal, pois esperava-se, com isso, que na zona intermediária do forno a serragem já deveria ter-se consumido, liberando energia para auxiliar a secar a lama na zona de secagem.

2ª FASE: EXPERIÊNCIAS NO FORNO DE CAL

I) O forno de cal da Riocell

O forno de cal, instalado no setor de requeima de cal da Riocell, foi construído pela F.L. Smith e consiste em um tubo rotativo inclinado, com 85 m de comprimento e 3,3 de diâmetro, revestido de tijolos refratários. Está apoiado em 3 suportes dispostos de tal maneira, que conferem ao eixo axial uma inclinação de 2,25%. O acionamento normal do forno é feito por um motor de 125 HP, acoplado a um redutor e a um variador de velocidade de controle remoto. Esse conjunto está ligado a um pinhão, que comunica o movimento à coroa, ligada ao corpo do forno por um sistema de molas, que compensa as dilatações e contrações no forno.

A produção nominal diária do forno é de 200 toneladas de cal com 85% de CaO.

A alimentação consiste quase em sua totalidade de lama de cal proveniente da seção de caustificação do licor verde. Por caustificação desse licor verde forma-se o licor branco e sobra um resíduo, o qual pode ser separado por decantação, que é a lama de cal. A lama decantada é lavada em dois lavadores de lama para remoção do licor branco residual. A seguir, é encaminhada aos misturadores de lama e daí segue para os filtros de tambor rotativo, sendo mais uma vez lavada e seca por ação de vácuo, até atingir a consistência de entrada no forno. O filtrado, contendo sólidos, é reaproveitado, sendo enviado ao recaustificador. Nesse percurso, a lama é oxidada pela injeção de ar comprimido. O objetivo é se promover a uma oxidação do Na₂S presente para diminuição das emissões de TRS do forno.

Para compensar as perdas de carbonato de cálcio ocorridas no processo, existe um sistema de "make-up" para adição de conchas ou calcário.

Após sair dos filtros, a lama é alimentada juntamente com as conchas (quando se faz a reposição) através de uma rosca alimentadora ao forno. Pelo efeito combinado da **rotação e da inclinação do forno, a lama desloca-se em direção da zona de calcinação, recebendo o calor dos**

gases de exaustão, que circulam em contracorrente.

Pode-se dividir o corpo do forno em zonas características que são: zona de secagem, zona de preaquecimento e zona de calcinação.

Na zona de secagem existe um conjunto de corrente, que tem suas extremidades fixas nas paredes do forno. As correntes homogeneizam a lama, mergulhando e saindo da massa por ação da gravidade e da rotação, promovendo um íntimo contato da mesma com os gases quentes. Essa ação permite que se ganhe maior eficiência na transferência de calor e também auxilia na formação das pelotas de lama. A temperatura na região final da zona de secagem atinge 500 a 600°C.

Quando a lama sai da zona de secagem, agora na forma de pequenas pelotas, ela passa para a zona de preaquecimento, onde a temperatura se eleva gradativamente, completando-se a secagem, produzindo-se a **queima total da matéria orgânica** contida na lama, e produzindo uma expansão na rede cristalina do calcário, o que acarreta formação de microfissuras, as quais facilitarão a reação de calcinação.

Finalmente, o material passa para a zona de calcinação, onde ocorre a reação de dissociação do CaCO₃. Note-se, que a temperatura teórica de dissociação do CaCO₃ é de 898°C a 760 mm de Hg e atmosfera de 100% de CO₂. Entretanto, como as condições do forno industrial são diferentes, necessita-se de uma temperatura mais alta ($\pm 1100^\circ\text{C}$), devendo-se porém evitar uma temperatura muito alta, o que produziria modificações na estrutura da cal, diminuindo sua porosidade, sinterizando os cristais e tornando menor a reatividade do CaO em seu processo de apagamento ou hidratação. A temperatura e o tempo de permanência nessa zona são fatores de fundamental importância para se produzir uma cal de boa qualidade e **reatividade e, conseqüentemente, uma eficiente reação de caustificação e boa sedimentação:**

Nas condições do forno da Riocell, estima-se o tempo de retenção da lama no forno em duas horas.

O combustível usado para provocar o calor, que calcina o CaCO₃ e seca a lama, é o óleo combustível tipo BPF. Esse passa por um trocador de calor, atinge a temperatura de cerca de 130°C, sendo então enviado ao queimador por meio de uma bomba, a qual fornece a pressão necessária para que, após a mistura com o ar primário, o combustível seja pulverizado e esteja pronto para

queimar. O queimador produz lavagem de pressão e de entrada de ar, de tal forma, que se pode regular o comprimento e a largura da chama, deslocando-se assim a zona de calcinação para mais longe ou mais perto da saída.

O forno da Riocell possui satélites, que são cilindros instalados na periferia do corpo. Um conjunto de placas convenientemente instaladas no interior dos tubos guia a cal para fora destes, passando em contracorrente o ar secundário, que é preaquecido.

As perdas de calor em fornos rotativos desse tipo são fundamentalmente função do comprimento do forno, da umidade da lama ingressante, do isolamento térmico e das unidades de recuperação de calor especialmente projetadas para essa finalidade.

Os gases de exaustão passam por um "scrubber" lavador de gases e as partículas de lama removidas pela água de lavagem retornam ao sistema via recaustificador (tanque intermediário entre o clarificador de licor branco e o primeiro lavador de lama).

II) Adaptações para o uso de serragem no forno de cal

A adição de serragem ao forno teve que se adaptar ao sistema existente, pois tratava-se de uma primeira experiência de viabilidade técnica e não se desejava alterar sensivelmente o mesmo. Decidiu-se, assim, valer-se do sistema existente para alimentação de pedra calcária ou conchas para reposição de perdas. Essa solução, apesar das vantagens já mencionadas, restringia os dias de testes áqueles em que não houvesse alimentação de conchas ou calcário. Dessa forma, nunca se testou a adição simultânea de conchas e serragem, porém tudo leva a crer que não existiriam maiores problemas, se o sistema fosse dimensionado para comportar tal carga. Além disso, a adição de serragem ficava amarrada às condições climáticas, quer pelos problemas de manuseio da mesma nos dias chuvosos, como pela alta umidade que ela conteria nessas situações, o que desaconselhava seu uso como combustível auxiliar.

O sistema de alimentação da pedra calcária consiste, essencialmente, em um depósito alimentador, um empurrador, uma correia transportadora, um moinho de martelos, um elevador de canecas, para levar a pedra moída a um silo, e uma rosca alimentadora com um variador de velocidade.

A serragem era colocada no depósito alimentador por meio de máqui-

na móvel dotada de caçamba. Dai, ela seguia pelo sistema até o silo e era alimentada pela rosca à lama de cal. Lama desaguada e serragem ingressavam então juntas e misturadas no forno de cal.

Inicialmente, diversos problemas operacionais foram encontrados até se conseguir uma uniforme e contínua alimentação de serragem. Os problemas iniciais se agravavam nos locais onde havia estreitamento para a passagem da serragem: isso acontecia na alimentação do elevador de canecas, na saída do depósito alimentador e na saída do silo. Apareciam problemas também nas áreas onde havia incrustações de calcário ou conchas, pois as incrustações provocavam aglomeração de serragem, causando entupimento da tubulação. No silo e no depósito alimentador, o acúmulo de serragem nas camadas inferiores promovia a formação de verdadeiros "pacotes", que impediam o escoamento normal, interrompendo constantemente a alimentação.

Na tentativa de solucionar esses problemas, tomaram-se algumas medidas, tais como:

- a) cuidadosa limpeza do sistema de alimentação após a adição de concha ou calcário.
- b) instalação de vibradores pneumáticos externos no silo e no depósito alimentador;
- c) escolha de serragem com umi-

dade e granulometria adequadas. Serragens úmidas e/ou deterioradas e/ou ricas em pó eram desaconselhadas.

d) manutenção de um nível mínimo de serragem no silo, pois a prática mostrou, que um nível alto geralmente tornava mais difícil a desobstrução da saída do silo, quando isso se tornava necessário fazer.

Com essas medidas, melhoraram sensivelmente as condições de operação, sem contudo ser a condição ideal, pois tratava-se naturalmente de uma adaptação. Isso decorre da inadequação desse tipo de alimentação para um material como a serragem, que tem características bem distintas do calcário ou da concha, como p.e., ângulo de repouso, peso específico, etc. Em razão disso, uma vigilância constante em todo o sistema de alimentação era conduzida, de forma a se garantir um fluxo contínuo e uniforme de combustível ao forno. Durante todo o período de experiência, o fluxo de serragem ao forno era medido de 2 em 2 horas, retirando-se também amostras para se avaliar o teor de umidade da serragem.

III. Características da serragem utilizada

Foram retiradas, ao acaso, três amostras da serragem alimentada ao forno para avaliação de sua distribuição granulométrica. Os resultados encontrados estão apresentados no Quadro 3.

Quadro 3: Características granulométricas da serragem

Malha			Granulometria, %			
ABNT	Tyler	Abertura (mm)	1	2	3	\bar{x}
6	6	3,36	7,73	5,59	6,81	6,71
10	9	2,00	11,87	8,96	10,69	10,51
14	12	1,41	13,83	12,64	12,94	13,14
18	16	1,00	16,47	19,00	20,07	19,18
35	32	0,50	34,73	35,77	35,64	35,38
45	42	0,35	8,40	10,51	7,86	8,92
60	60	0,250	3,44	5,08	3,86	4,13
120	115	0,125	1,16	1,95	1,83	1,65
140	150	0,105	0,11	0,25	0,23	0,20
170	170	0,088	0,05	0,08	0,13	0,087
200	200	0,074	0,06	0,04	0,03	0,043
230	250	0,062	0,04	0,05	0,08	0,057
325	325	0,044	0,03	0,03	0,07	0,043
>325	-	-	0,005	0,008	0,01	0,0077

Determinou-se também a densidade aparente da serragem, em quatro amostras distintas, obtendo-se um valor médio de 143 kg a.s./m³.

IV) Ensaios realizados

Definidas as melhores condições operacionais, iniciaram-se os ensaios de avaliação da serragem como combustível auxiliar no forno de cal. Procurou-se então adaptar um ensaio estatisticamente planejado e programado com rigor científico, sobre uma condição extremamente variável, que é uma situação de operação industrial. Assim sendo, mantinha-se um levantamento rigoroso sobre todas as variáveis envolvidas no processo. Como se tornava impossível fixar as variáveis por períodos longos de tempo, procedia-se aos ensaios com e sem serragem, de forma intermitente, para depois escolher situações de operação, onde todas as variáveis envolvidas tivessem comportamento bem homogêneo. Escolheram-se então, para avaliação, períodos de 12 a 24 horas de funcionamento do forno, onde a operação do mesmo se mantivesse a mais homogênea possível. Cada um desses períodos era definido como uma repetição do tratamento estatístico. As médias das diversas características analisadas e medidas eram então associadas a essa repetição.

Durante sete meses se realizaram os ensaios, alternando épocas com adição de serragem, com períodos sem adição de serragem mas com adição de conchas, e períodos com adição apenas da lama. Os quatro primeiros meses foram usados mais para se levantar os problemas e se tentar solucioná-los, ficando os dados levantados nos três últimos meses como representativos do ensaio. Inclusive, precisa-se lembrar o fato, que a queima de serragem gerava uma nova situação operacional e tornava-se necessário descobrir, de novo, a melhor forma de operar o forno, buscando o melhor balanço entre os combustíveis envolvidos.

O planejamento estatístico envolveu então três tratamentos, com três repetições cada, num total de nove parcelas. Os tratamentos estudados foram os seguintes:

T1: forno funcionando sem serragem, utilizando-se apenas de óleo combustível

T2: forno funcionando com adição de cerca de 4,0 toneladas de serragem seca por dia, além de óleo combustível

T3: forno funcionando com adição de cerca de 7,4 toneladas de serra-

gem seca por dia, além do óleo combustível

Cada tratamento continha três repetições. Conforme já mencionado, definia-se como uma repetição, ao período de funcionamento homogêneo do forno por 12 a 24 horas, mantidas todas as demais variáveis bem similares para todos os três tratamentos.

As adições de serragem, média, máxima e mínima, para as parcelas onde isso ocorria, foram as apresentadas no Quadro 4.

Resta mencionar, que adotaram-se apenas os três tratamentos em questão, porque se atingiu em T₃, a capacidade máxima do sistema de

alimentação de serragem ao forno. Para fluxos maiores, ocorriam entupimentos freqüentes, impedindo que a operação se desenvolvesse normalmente. Entretanto, desde que se dispusessem de sistemas convenientes para alimentação de serragem, poder-se-ia aumentar o fluxo para até cerca de 20 t/dia de serragem seca, o que significaria o consumo total pelo forno da serragem gerada no setor de preparação de cavacos. Observar que as condições do ensaio permitiram absorver no máximo a terça parte da serragem produzida pela fábrica, havendo, portanto, ainda apreciável quantidade do combustível serragem à disposição.

A avaliação da eficiência da serragem como combustível complementar foi feita através de balanços térmicos e de material em todas as três situações correspondentes aos tratamentos T₁, T₂ e T₃. Baseados nos balanços, definiram-se os consumos energéticos específicos e se compararam os três tratamentos por meio de análise da variância. Balanços energéticos e mássicos foram realizados e calculados a cada hora de funcionamento do forno nas três situações. O período correspondente a cada parcela tinha então calculado os seus balanços horários médios, envolvendo todas as variáveis.

Para o cálculo dos balanços foram definidas e numeradas as variáveis que o compunham. A seguir, essas estão listadas e associadas aos números que as caracterizam.

Quadro 4: Valores médios, máximos e mínimos de adição de serragem

Valores	Tratamento			
	T ₂		T ₃	
	kg/min.	t./ dia	kg/min	t./ dia
<u>Médios</u>				
1. ^a repetição	2,833	4,079	4,820	6,940
2. ^a repetição	2,842	4,092	5,153	7,420
3. ^a repetição	2,788	4,015	5,483	7,896
\bar{x} Médio	2,821	4,062	5,152	7,419
<u>Mínimos</u>				
1. ^a repetição	2,533	3,648	4,671	6,726
2. ^a repetição	2,533	3,648	4,823	6,945
3. ^a repetição	2,538	3,655	4,867	7,008
\bar{x} Mínimo	2,535	3,650	4,787	6,893
<u>Máximos</u>				
1. ^a repetição	3,172	4,568	5,012	7,217
2. ^a repetição	3,188	4,591	5,659	8,149
3. ^a repetição	3,208	4,619	6,582	9,478
\bar{x} Máximo	3,189	4,592	5,751	8,281

Número	Significado	Unidade
(1)	Vazão de lama aos filtros	l/h
(2)	Densidade média da lama	kg/l
(3)	Peso de sólidos em cada 1 kg de lama que vai aos filtros	kg
(4)	Peso dos sólidos que vão aos filtros	kg/h
(5)	Peso de água na lama que vai aos filtros	kg/h
(6)	Peso de sólidos em cada 1 kg de lama que entra no forno	kg
(7)	Vazão de água de lavagem dos filtros	l/h
(8)	Peso de sólidos em 1 kg de filtrado	kg
(9)	Vazão mássica de filtrado	kg/h
(10)	Sólidos no filtrado	kg/h
(11)	Sólidos que entram no forno	kg/h
(12)	Peso equivalente em CaCO ₃ em cada 1 kg de sólido que entra no forno	kg
(13)	CaCO ₃ que entra no forno	kg/h
(14)	Vazão mássica total de lama que entra no forno (água + sólidos)	kg/h
(15)	Água que entra no forno	kg/h
(16)	Temperatura de entrada da lama	°C
(17)	Calor necessário para aquecer a água até 100°C	kcal/h
(18)	Calor de vaporização da água	kcal/kg
(19)	Calor gasto para evaporar a água	kcal/h
(20)	Temperatura na câmara de fumaça	°C
(21)	Calor específico médio do vapor	kcal/kg°C
(22)	Calor gasto para superaquecer o vapor	kcal/h
(23)	Peso equivalente em cal para cada kg de CaCO ₃	kg
(24)	Peso equivalente de cal que entra no forno	kg/h
(25)	Calor de formação do CaO	kcal/kg

Número	Significado	Unidade
(26)	Calor necessário para dissociar o CaCO_3	kcal/h
(27)	Vazão de água na saída do "scrubber"	kg/h
(28)	Peso de sólidos em cada 1 kg de água do "scrubber"	kg
(29)	Peso de sólidos na água do "scrubber"	kg/h
(30)	Sólidos (poeira) na chaminé	kg/h
(31)	Peso de sólidos arrastados pelos gases	kg/h
(32)	Peso da cal produzida	kg/h
(33)	Temperatura da cal na saída	°C
(34)	Temperatura média ambiente	°C
(35)	Calor específico da cal e dos inertes	kcal/kg°C
(36)	Calor perdido na descarga da cal	kcal/h
(37)	Peso de inertes em cada 1 kg de sólidos que entram no forno	kg
(38)	Peso de inertes nos sólidos que entram no forno	kg/h
(39)	Peso de inertes na cal impura	kg/h
(40)	Calor perdido nos inertes junto à cal	kcal/h
(41)	Calor perdido nos sólidos junto com os gases	kcal/h
(42)	Peso equivalente em CO_2 em 1 kg de CaCO_3	kg
(43)	Peso de CO_2 proveniente da dissociação do CaCO_3	kg/h
(44)	Calor específico médio dos gases	kcal/kg°C
(45)	Calor perdido no CO_2 da lama	kcal/h
(46)	Peso do óleo combustível que entra no forno (densidade = 0,95)	kg/h
(47)	Temperatura de entrada do óleo	°C
(48)	Calor específico do óleo	kcal/kg°C
(49)	Calor que entra com o óleo	kcal/h
(50)	Poder calorífico do óleo	kcal/kg
(51)	Calor produzido pela combustão do óleo	kcal/h
(52)	Peso de CO_2 produzido pela combustão de 1 kg de óleo	kg
(53)	Peso de CO_2 produzido pela combustão do óleo	kg/h
(54)	Peso da água produzida pela combustão de 1 kg de óleo	kg
(55)	Peso da água produzida pela combustão do óleo	kg/h
(56)	Oxigênio necessário para queimar 1 kg de óleo	kg
(57)	Oxigênio necessário para combustão do óleo	kg/h
(58)	Peso de ar correspondente a 1 kg de oxigênio	kg
(59)	Peso do ar necessário para combustão do óleo	kg/h
(60)	Peso de nitrogênio em 1 kg de ar	kg
(61)	Percentual em peso de O_2 nos gases de saída	%
(62)	Peso de O_2 nos gases de saída	kg/h
(63)	Peso do ar que entra no forno	kg/h
(64)	Peso do nitrogênio que entra e sai do forno	kg/h
(65)	Calor perdido no CO_2 produzido pela combustão do óleo	kcal/h
(66)	Entalpia do vapor d'água na temperatura de saída	kcal/kg
(67)	Entalpia da água na temperatura ambiente	kcal/kg
(68)	Calor perdido na água produzida pela combustão do óleo	kcal/h
(69)	Calor perdido no nitrogênio do ar para queima do óleo	kcal/h
(70)	Calor perdido no oxigênio do ar para queima do óleo	kcal/h
(71)	Peso úmido da serragem que entra no forno	kg/h
(72)	Peso de secos em 1 kg de serragem que entra no forno	kg
(73)	Peso da serragem seca que entra no forno	kg/h
(74)	Peso de água em cada 1 kg de serragem que entra no forno	kg
(75)	Peso da água de umidade da serragem que entra no forno	kg/h
(76)	Peso de cinzas em cada 1 kg de serragem seca	kg
(77)	Peso das cinzas produzidas pela combustão da serragem	kg/h
(78)	Peso da água produzida pela combustão de 1 kg de serragem seca	kg
(79)	Peso da água produzida pela combustão da serragem	kg/h
(80)	Peso do CO_2 produzido pela combustão de 1 kg de serragem seca	kg
(81)	Peso do CO_2 produzido pela combustão da serragem	kg/h
(82)	Peso de O_2 necessário para combustão de 1 kg de serragem	kg
(83)	Peso de O_2 necessário para combustão da serragem	kg/h
(84)	Peso de ar correspondente a 1 kg de oxigênio	kg
(85)	Peso de ar necessário para combustão da serragem	kg/h
(86)	Poder calorífico da serragem base seca	kcal/kg
(87)	Calor gerado pela combustão da serragem	kcal/h
(88)	Calor necessário para aquecer a água de umidade da serragem até 100°C	kcal/h
(89)	Calor necessário para evaporar a água de umidade	kcal/h
(90)	Calor necessário para superaquecer o vapor	kcal/h

Número

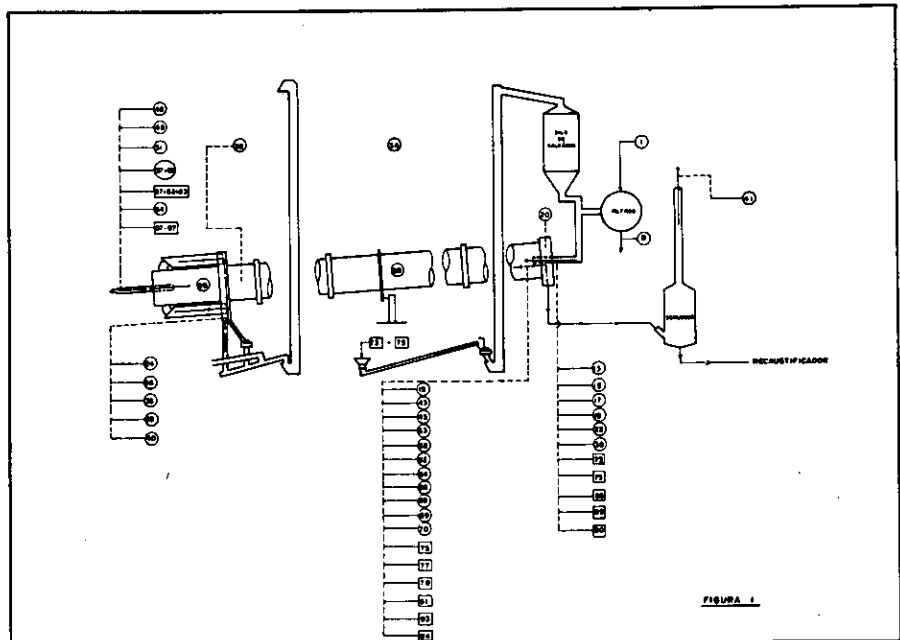
Significado

Unidade

(91)	Calor específico das cinzas de serragem	kcal/kg°C
(92)	Calor perdido nas cinzas da serragem	kcal/h
(93)	Calor perdido no CO ₂ da combustão da serragem	kcal/h
(94)	Calor perdido na H ₂ O de combustão da serragem	kcal/h
(95)	Temperatura em que inicia a combustão da serragem	°C
(96)	Calor específico da serragem	kcal/kg°C
(97)	Calor necessário para aquecer a serragem até a temperatura da combustão	kcal/h
(98)	Temperatura na zona intermediária	°C
(99)	Temperatura na zona de calcinação	°C

Para simplificação dos balanços horários, tomou-se o rendimento da calcinação como igual a 100%, embora por cálculos tenha-se observado que o mesmo era da ordem de 98,4% a 99%. No anexo I, está apresentada a forma como foi calculado um dos balanços horários, representando o exemplo, um balanço térmico e material de uma situação onde estava sendo adicionada serragem e óleo como combustíveis. A adição de serragem, no exemplo em pauta, era de cerca de 169,42 kg/h, equivalente a 4,066 t./dia.

Com o objetivo de permitir uma mais fácil localização dos parâmetros principais dos balanços realizados, elaborou-se a Figura 1, onde tais parâmetros estão mostrados pelos seus números respectivos em um esquema simplificado do forno de



Quadro 5: Balanços de material resumidos: médias por parcela e por tratamentos dos balanços horários (kg/h)

Parâmetros	Tratamento											
	T ₁				T ₂				T ₃			
	1	2	3	\bar{x}	1	2	3	\bar{x}	1	2	3	\bar{x}
MATERIAL QUE ENTRA	63557,2	64987,8	60019,2	62854,7	61740,6	61124,3	61724,8	61529,9	55586,9	59374,1	59595,1	58185,4
- CaCO ₃ da lama (13)	11443,7	12195,8	11548,5	11729,3	11087,8	10924,6	11025,7	11012,6	9375,5	9888,8	10841,7	10035,3
- Água da lama (15)	11704,0	12273,6	10024,7	11334,1	10821,9	10767,4	10460,8	10683,4	9182,5	10302,5	10477,9	9987,6
- Inertes da lama (38)	2799,0	2805,8	2070,0	2558,3	2713,4	3583,5	3539,3	3278,7	2283,1	2570,7	2659,6	2504,5
- Óleo (46)	1685,9	1781,3	1587,5	1678,2	1571,3	1567,5	1615,0	1584,6	1330,0	1425,0	1393,3	1382,8
- N ₂ (64)	28378,1	28383,3	27496,5	28088,0	27832,8	26800,3	27453,4	27362,2	25982,2	27309,5	26488,0	26586,6
- O ₂ (57+62+83)	7546,6	7547,9	7312,1	7468,9	7401,6	7127,0	7300,6	7276,4	6875,7	7262,4	7043,9	7060,7
- Serragem seca (73)	-	-	-	-	169,4	207,8	191,1	189,4	277,8	299,2	359,4	312,1
- Água de umidade da serragem (75)	-	-	-	-	142,6	146,2	138,9	142,6	300,1	316,2	331,2	315,8
MATERIAL QUE SAI	63557,2	64987,8	60019,2	62854,7	61740,5	61124,3	61724,8	61529,9	55588,0	59375,3	59596,5	58186,6
- Água da lama (15)	11704,0	12273,6	10024,7	11334,1	10821,9	10767,4	10460,8	10683,4	9182,5	10302,5	10477,9	9987,6
- Cal da lama (24)	8408,5	8829,7	8467,1	8568,4	8209,0	6117,8	6174,4	6167,1	5250,3	5537,7	6071,4	5619,8
- Inertes da lama (38)	2799,0	2805,8	2070,0	2558,3	2713,4	3583,5	3539,3	3278,7	2283,1	2570,7	2659,6	2504,5
- CO ₂ da lama (43)	5035,2	5366,2	5081,3	5160,9	4878,5	4808,8	4851,3	4845,5	4125,2	4351,1	4770,3	4415,5
- CO ₂ da combustão do óleo (53)	5243,1	5539,8	4874,9	5219,3	4886,7	4874,9	5022,6	4928,1	4136,3	4431,8	4333,3	4300,5
- H ₂ O da combustão do óleo (55)	2282,8	2422,6	2131,8	2282,4	2137,0	2131,8	2196,4	2155,1	1808,8	1938,0	1894,9	1880,6
- O ₂ (62)	1696,6	1366,8	1872,9	1645,4	1737,3	1427,9	1457,7	1541,0	1912,0	1942,2	1758,0	1870,7
- N ₂ (64)	28378,1	28383,3	27496,5	28088,9	27832,8	26800,3	27453,4	27362,2	25982,2	27309,5	26488,0	26586,6
- Água de umidade da serragem (75)	-	-	-	-	142,6	146,2	138,9	142,6	300,1	316,2	331,2	315,8
- Cinzas da serragem (77)	-	-	-	-	0,64	0,79	0,73	0,72	1,06	1,14	1,37	1,19
- Água da combustão da serragem (79)	-	-	-	-	89,3	109,6	100,8	99,9	147,0	158,4	190,3	165,2
- CO ₂ da combustão da serragem (81)	-	-	-	-	291,2	357,2	328,4	325,6	478,4	516,2	620,2	538,6

cal. Os números envolvidos por um círculo referem-se a parâmetros comuns a todos os tratamentos, enquanto os números envolvidos por um quadrado referem-se apenas aos

tratamentos com adição de serragem como combustível complementar.

Elaborados e calculados os balanços térmicos e de material, médios para cada parcela, procurou-se rela-

cionar nos Quadros 5 e 6, apenas os principais parâmetros envolvidos nos balanços, para se verificar as principais diferenças entre os tratamentos.

Quadro 6: Balanços térmicos resumidos: médias por parcela e por tratamentos dos balanços horários (kcal/h)

Parâmetros	Tratamento											
	T ₁				T ₂				T ₃			
	1	2	3	\bar{X}	1	2	3	\bar{X}	1	2	3	\bar{X}
CALOR QUE ENTRA	16447201	17380547	15298319	16375689	16031456	16357528	16455904	16281630	14138311	15155313	15096633	14796819
- Calor que entra com o óleo (49)	24335	102422	95069	73942	85400	83077	85595	84691	78669	85001	82416	82029
- Calor da combustão do óleo (51)	16352866	17278125	15204750	16278580	15241610	15410875	15576260	15409581	12901000	13822500	13515333	13412944
- Calor de combustão da serragem (87-97)	-	-	-	-	704448	863575	794049	787357	1158642	1247812	1489085	1301846
CALOR UTILIZADO	14702413	15458450	13803468	14668110	13868149	13897754	13933008	13866303	12323991	13477790	14003387	13268389
- Calor para aquecer a água da lama (17)	482602	490943	451112	474886	432878	473764	460275	455639	422384	473914	481987	459432
- Calor para evaporar a água da lama (19)	8235111	6627733	5413343	6092062	5483858	5814380	5648827	5649022	4958539	5583334	5658106	5393326
- Calor para superaquecer o vapor de água da lama (22)	207313	185166	192474	194934	194180	206733	210389	203761	152894	192931	196704	180842
- Calor para dissociar o CaCO ₃ da lama (26)	4926957	5250658	4972398	5050004	4773517	4703357	4746879	4741251	4036427	4257402	4667651	4320493
- Calor perdido na cal que sai do forno (36)	90157	98940	103066	97721	78663	63445	67389	70166	84205	85761	95896	88621
- Calor perdido nos inertes junto com a cal (40)	38718	41054	32985	37586	34459	37163	38629	36750	36624	38501	42008	39044
- Calor perdido na poeira junto com os gases (41)	25747	23824	35269	28280	23827	82185	66599	57530	21738	36689	32074	30167
- Calor que sai com o CO ₂ da lama (45)	153564	158076	170823	160821	142063	139975	143795	141944	131838	143904	171007	148916
- Calor que sai com o CO ₂ da combustão do óleo (65)	159746	163193	163885	162275	142302	141958	146871	144377	132217	146721	143346	140761
- Calor que sai com a H ₂ O da combustão do óleo (88)	1460510	1541481	1380767	1460919	1350137	1343844	1386631	1360204	1165213	1252405	1224510	1214045
- Calor que sai com o N ₂ (69)	870192	836115	924376	876894	810491	780426	813717	801545	829866	908772	885563	875067
- Calor que sai com o O ₂ (70)	51794	40264	62962	51673	50591	42583	43207	45460	61141	65747	60592	62493
- Calor para aquecer a umidade de serragem até 100°C (88)	-	-	-	-	5703	6433	6113	6083	13808	14543	15354	14568
- Calor para evaporar a umidade de serragem (89)	-	-	-	-	76993	78948	75022	76988	162067	170728	178839	170545
- Calor para superaquecer o vapor de umidade de serragem (90)	-	-	-	-	2558	2807	2801	2722	4976	5846	6268	5731
- Calor perdido nas cinzas de serragem (92)	-	-	-	-	14	18	17	16	26	29	35	30
- Calor perdido no CO ₂ da queima da serragem (93)	-	-	-	-	8480	10402	9735	9539	15292	17099	20496	17629
- Calor perdido na água gerada na queima da serragem (94)	-	-	-	-	56451	69063	63612	63049	94729	102363	122954	106682
PERDA NA CARCAÇA												
- kcal/h	1744788	1922047	1346222	1671019	2363309	2359774	2522896	2415326	1814320	1647523	1093446	1518430
- %	10,6	11,1	8,8	10,2	14,7	14,4	15,3	14,8	12,8	11,1	7,2	10,4

A partir dos balanços térmicos e de massa, procurou-se estabelecer uma forma viável de se relacionar os diversos tratamentos, no que concerne ao consumo específico de óleo. Em geral, a base fixa, que se costuma adotar, é a produção de cal na saída do forno. Decidiu-se porém que essa não se constituía, no caso, em um bom índice, em função do teor variável e elevado de inertes, o que atrapalharia os cálculos. Optou-se então, como base fixa, pelo fluxo de lama seca ao forno de cal. Como essa lama entra no forno com um teor variável de umidade, decidiu-se expressar o consumo específico como a quantidade útil de óleo necessário para ser consumida apenas pela lama seca. Subtraíram-se assim os gastos de óleo para aquecer, evaporar e elevar a temperatura do vapor da água da lama ingressante ao forno.

O calor gasto com a água da lama era constituído de: calor gasto para aquecer a água até 100°C, calor para evaporar a água, calor para supera-

quecer o vapor até a temperatura de saída dos gases.

Os resultados obtidos para o consumo específico de óleo para os três tratamentos constam do Quadro 7.

Quadro 7: Consumo específico de óleo combustível em kg óleo/t. lama/seca

Repetição	Tratamento		
	T ₁	T ₂	T ₃
1	68,54	68,30	65,11
2	69,25	67,72	62,82
3	71,12	65,52	54,81
\bar{X}	69,64	67,18	60,92

Quadro 8: Análise da variância para consumo específico de óleo

Causa de variação	GL	QM	F
Tratamento	2	60,5512	5,45 *
Resíduo	6	11,1168	
Total	8	187,8034	

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade

Os valores obtidos foram analisados estatisticamente pelos testes F e de Tuckey, conforme mostra a análise da variância do Quadro 8.

A diferença mínima significativa pelo teste de Tuckey, ao nível de 5% de probabilidade, foi calculada como $\delta = 8,35$.

Dessa forma apenas os tratamentos T₁ e T₃ diferiram estatisticamente.

Baseados nos dados obtidos para consumos específicos, o uso de cerca de 4 t./dia de serragem seca ao forno permitiu uma economia de aproximadamente 3,5% de óleo combustível. No caso de se adicionar 7,4 t./dia de serragem, atingiu-se a elevada economia de 12,52% de óleo. Entretanto, esse valor deve ser encarado com ressalvas devido ao valor anormal obtido para a 3ª repetição do tratamento T₃. Abandonando esse valor e trabalhando-se apenas com a média das duas outras repetições, obteve-se uma economia de 8,16% de óleo combustível, o que é mais aceitável.

Para se avaliar o comportamento qualitativo de todo o setor de caustificação/forno de cal durante o período da experiência, retiraram-se também as médias de algumas características analisadas rotineiramente. No Quadro 9 estão apresentados os valores médios dessas propriedades para os três tratamentos ensaiados na pesquisa.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Tanto os ensaios laboratoriais como os industriais revelaram o largo potencial existente para o uso de serragem como combustível complementar no forno de cal. As adições de serragem testadas no forno de cal mostraram como efeito mais evidente uma economia significativa e importante do óleo combustível. Entretanto, é mesmo possível que maiores economias possam ser alcançadas, se maiores quantidades de serragem fossem adicionadas ao forno. Infelizmente, as limitações na forma de adicionar a serragem impediram se tirar conclusões do comportamento do forno e da economia de óleo para mais altas cargas de serragem.

Ao longo de toda a experiência industrial com serragem, não se notaram

Quadro 9: Características médias do setor caustificação/forno de cal durante a experiência

Características	Tratamento		
	T ₁	T ₂	T ₃
<u>Lama</u>			
- fluxo para os filtros, l/min.	461,2	470,0	422,5
- densidade para os filtros, kg/l	1,32	1,31	1,31
- % sólidos	37,66	37,73	39,13
<u>Filtro de lama I</u>			
- água de lavagem, l/min.	42,6	50,0	49,2
- NaOH na saída, %	0,68	0,53	0,72
- % sólidos na saída	54,6	56,0	55,1
<u>Filtro de lama II</u>			
- água de lavagem, l/min.	43,7	59,2	55,0
<u>Filtrado</u>			
- densidade, °Bé	1,24	0,57	3,73
- % sólidos	1,93	1,40	1,83
- álcali total, g/l	6,31	6,22	7,87
<u>Queimador de óleo</u>			
- temperatura óleo, °C	133,4	134,0	130,3
- fluxo, m ³ /h	1,70	1,66	1,44
<u>Forno de cal</u>			
- temperatura da câmara de fumaça, °C	139,1	137,3	137,3
- temperatura da zona intermediária, °C	523,3	549,2	566,7
- temperatura da zona de queima, °C	1087,5	1103,3	1090,4
- velocidade, rpm	1,14	1,04	1,06
- CaCO ₃ na lama na zona intermediária, %	79,14	80,50	80,29
<u>Gases de exaustão</u>			
- O ₂ (Orsat), %	2,98	3,90	4,45
- H ₂ S, ppm	9,7	6,9	6,3
<u>"Scrubber" - Água</u>			
- % sólidos	1,19	1,42	1,58
- álcali total	1,79	2,20	3,40
<u>Cal queimada</u>			
- % CaCO ₃	1,85	1,67	1,74
- CaO útil, %	69,28	69,73	70,50
<u>Serragem</u>			
- umidade, %	-	46,39	50,38
<u>Lama processada</u>			
- seca, kg/h	14315	14132	12540
- úmida, kg/h	25681	24720	22527
<u>Cal impura produzida</u>			
- fluxo, kg/h	8159	7817	7243

problemas, no que concerne à qualidade da cal, que se mostrava de características semelhantes à cal usualmente obtida sem serragem. Não foram constatadas diferenças físicas, químicas ou estruturais na cal, os licores branco e verde não apresentavam resíduos de combustão, e todo o sistema caustificação/forno de cal funcionou por todo o período sem restrições operacionais. Interessante mencionar, é que as amostras de lama coletadas na zona intermediária do forno já não apresentavam traços de serragem, indicando que a mesma já houvera queimado.

As emissões aéreas pela chaminé do forno também não se alteraram para pior pelo uso de serragem, apenas tendo-se notado uma maior concentração em sólidos e álcali na água de lavagem

residual do "scrubber". Inclusive a emissão de H₂S era diminuída quando se usava serragem, por dois motivos principais: aumento do teor de O₂ residual nos gases de exaustão e diminuição na carga de óleo combustível ao forno, óleo esse com alto teor de enxofre.

Como a condição operacional com serragem era algo diferente do usual, o sistema de queima ensaiado não pode ser considerado como otimizado. Certamente, com base em balanços bem cuidadosos, é possível se trazer o forno a uma condição de ótima operação com serragem. Tanto é verdade que a operação não estava otimizada, que observou-se uma maior perda de calor pela carcaça do forno, mostrando que havia um ligeiro desbalanceamento térmico no forno, quando se usava serragem.

Isso pode ser também constatado pelo aumento da temperatura na zona intermediária do forno, quando se usava serragem (Quadro 9).

Como conclusão geral, pode-se con-

firmar a perfeita viabilidade técnica da serragem como combustível auxiliar ao forno de cal do setor de caustificação/requeima de cal em fábricas de celulose kraft.

ANEXO I

Exemplo de balanço horário térmico e de material do forno de cal, quando do uso de serragem como combustível complementar.

BALANÇO TÉRMICO E DE MATERIAL (RESUMO)		<u>Material que sai</u>	
<u>Local:</u>	forno de cal	- Água da lama (15)	10821,96 kg/h
<u>Situação:</u>	adição de serragem e óleo combustível	- Cal da lama (24)	6208,05 kg/h
A) <u>Balanço térmico horário médio</u>		- Inertes da lama (38)	2713,36 kg/h
<u>Calor que entra</u>		- CO ₂ da calcinação (43)	4878,54 kg/h
- calor que entra com o óleo (49)	85400,16 kcal/h	- CO ₂ da combustão do óleo (53)	4886,74 kg/h
- calor da combustão do óleo (51)	15241610,00 kcal/h	- H ₂ O da combustão do óleo (55)	2136,97 kg/h
- calor da combustão da serragem (87 - 97)	704448,36 kcal/h	- O ₂ (62)	1737,34 kg/h
Calor total = 16031458,52 kcal/h		- N ₂ (64)	27832,79 kg/h
<u>Calor utilizado</u>		- Água de umidade da serragem (75)	142,58 kg/h
- calor para aquecer a água da lama (17)	432878,40 kcal/h	- Cinzas da serragem (77)	0,64 kg/h
- calor para evaporar a água da lama (19)	5483858,40 kcal/h	- Água da combustão da serragem (79)	89,35 kg/h
- calor para superaquecer o vapor formado da água da lama (22)	194160,03 kcal/h	- CO ₂ da combustão da serragem (81)	291,23 kg/h
- calor para dissociar o CaCO ₃ da lama (26)	4773517,64 kcal/h	Total = 61740,55 kg/h	
- calor perdido na cal que sai do forno (36)	78662,89 kcal/h	C) <u>Discriminação dos balanços</u>	
- calor perdido nos inertes junto à cal (40)	34459,36 kcal/h	1. <u>Lama (CaCO₃, inertes e água)</u>	
- calor perdido na poeira junto com os gases (41)	23826,88 kcal/h	1.1. <u>Lama e água aos filtros</u>	
- calor que sai com o CO ₂ gerado da lama (45)	142063,08 kcal/h	(1) (2) (3) (5)	
- calor que sai com o CO ₂ da combustão do óleo (65)	142301,87 kcal/h	28200 x 1,31 x (1-0,377) =	23014,87 kg/h
- calor que sai com a água parada na combustão do óleo (68)	1350137,65 kcal/h	(1) (2) (3) (4)	
- calor que sai com o N ₂ (69)	810480,84 kcal/h	28200 x 1,31 x 0,377 =	13927,13 kg/h
- calor que sai com o O ₂ residual (70)	50591,34 kcal/h	(1) (2) (6) (3) (7) (8) (9)	
- calor para aquecer a umidade da serragem até 100°C (88)	5703,20 kcal/h	{ 28200 x 1,31 x (0,56-0,377) + 6870 x 0,56 }	19216,64 kg/h
- calor para evaporar a umidade da serragem (89)	76993,20 kcal/h	(6) (8)	
- calor para superaquecer o vapor gerado pela umidade da serragem	2558,07 kcal/h	(0,56-0,008)	
- calor perdido nas cinzas da serragem (92)	14,34 kcal/h	(9) (8) (10)	
- calor perdido no CO ₂ de queima da serragem (93)	8460,62 kcal/h	19216,64 x 0,008 =	153,73 kg/h
- calor perdido na H ₂ O da queima da serragem (94)	56451,33 kcal/h	1.2. <u>Lama ao forno</u>	
Calor total utilizado = 13868149,14 kcal/h		(4) (10) (11)	
<u>Perda na carcaça do forno</u>		13927,13 - 153,73 =	13773,4 kg/h
calor que entra - calor utilizado		(11) (12) (13)	
16031458,52 - 13868149,14 = 2363309,38 kcal/h		13773,40 x 0,805 =	11087,59 kg/h
Perda percentual = $\frac{2363309,38}{16031458,52} \times 100 = 14,7\%$		1.3. <u>Água que entra no forno</u>	
		(6) (11) (14)	
		(1,0,56) x 13773,40 =	24595,36 kg/h
		(14) (11) (15)	
		24595,36 - 13773,40 =	10821,96 kg/h
		1.4. <u>Calor para aquecer a água da lama até 100°C</u>	
		(15) (16) (17)	
		10821,96 x (100-60) =	432878,40 kcal/h
		(15) (16) (19)	
		10821,96 x 540 =	5843858,40 kcal/h
		(15) (20) (22)	
		10821,96 x (137,3-100) x 0,481 =	194160,03 kcal/h
		1.5. <u>Calor para dissociar o CaCO₃</u>	
		(13) (23) (24)	
		11087,59 x 0,56 =	6208,05 kg/h
B) <u>Balanço material</u>			
<u>Material que entra</u>			
- CaCO ₃ da lama (13)	11087,59 kg/h		
- Água da lama (15)	10821,96 kg/h		
- Inertes da lama (38)	2713,36 kg/h		
- Óleo combustível (46)	1571,30 kg/h		
- N ₂ (64)	27832,79 kg/h		
- O ₂ (57 + 62 + 83)	7401,55 kg/h		
- Serragem seca (73)	169,42 kg/h		
- Água da serragem (75)	142,58 kg/h		
Total = 61740,55 kg/h			

	(24)		(25)		(26)			
	6209,05	x	768,8	=	4773517,64	kcal/h		
2.	<u>Serragem ao forno</u>							
2.1.	<u>Serragem seca que entra</u>							
	(71)		(72)		(73)			
	312,00	x	0,543	=	169,42	kg/h		
2.2.	<u>Água de umidade da serragem</u>							
	(71)		(74)		(75)			
	312,00	x	0,457	=	142,58	kg/h		
2.3.	<u>Peso das cinzas produzidas</u>							
	(73)		(76)		(77)			
	169,42	x	0,0038	=	0,64	kg/h		
2.4.	<u>Água produzida pela combustão da serragem</u>							
	(73)	(77)		(78)		(79)		
	(169,42-0,64)	x	0,5294	=	89,35	kg/h		
2.5.	<u>CO₂ produzido pela combustão da serragem</u>							
	(73)	(77)		(80)		(81)		
	(164,42-0,64)	x	1,7255	=	291,23	kg/h		
2.6.	<u>Ar necessário para combustão da serragem</u>							
	(73)	(77)		(82)		(83)		
	(169,42-0,64)	x	1,2549	=	211,80	kg/h		
	(83)		(84)		(85)			
	211,80	x	4,76	=	1008,17	kg/h		
2.7.	<u>Calor produzido pela combustão da serragem</u>							
	(73)		(86)		(87)			
	169,42	x	4400	=	745448,00	kcal/h		
2.8.	<u>Calor para aquecer a umidade da serragem até 100°C</u>							
	(75)		(16)		(88)			
	142,58	x	(100-60)	=	5703,20	kcal/h		
2.9.	<u>Calor para evaporar a umidade da serragem</u>							
	(75)		(18)		(89)			
	142,58	x	540	=	76993,20	kcal/h		
2.10.	<u>Calor para superaquecer o vapor da umidade da serragem</u>							
	(75)		(20)		(90)			
	142,58	x	(137,3-100)	x	0,481	=	2558,07	kcal/h
2.11.	<u>Calor perdido nas cinzas</u>							
	(77)		(20)	(34)		(91)		
	0,64	x	(137,3-25,3)	x	0,2	=	14,34	kcal/h
2.12.	<u>Calor perdido no CO₂ da combustão da serragem</u>							
	(81)		(20)	(34)		(44)		
	291,23	x	(137,3-25,3)	x	0,26	=	8480,62	kcal/h
2.13.	<u>Calor perdido na água da combustão da serragem</u>							
	(79)		(66)	(67)		(94)		
	89,35	x	(557,1-25,3)	=	56451,33	kcal/h		

2.14.	<u>Calor para aquecer a serragem até a temperatura de combustão</u>							
	(80)		(95)	(16)		(96)		
	169,42	x	(500 - 60)	x	0,56	=	40999,64	kcal/h
3.	<u>"Make-up" de calcário ou concha</u>							
	Não ocorreu.							
4.	<u>Descarga de cal</u>							
4.1.	<u>Poeira retida na água do "scrubber"</u>							
	(27)		(28)		(29)			
	64246,00	x	0,012	=	770,96	kg/h		
4.2.	<u>Poeira na chaminé</u>							
	(30)							
	80					kg/h		
4.3.	<u>Peso de sólidos arretados pelos gases</u>							
	(29)		(30)		(31)			
	770,96	+	80	=	850,96	kg/h		
4.4.	<u>Peso teórico de cal produzida</u>							
	(24)		(31)	(12)	(23)			
	6209,05	-	(850,96 x 0,805	x	0,56)	=	5825,44	kg/h
4.5.	<u>Calor perdido na descarga da cal</u>							
	(32)		(33)	(34)		(35)		
	5825,44	x	(80-25,3)	x	0,25	=	79662,79	kcal/h
4.6.	<u>Peso de inertes na lama</u>							
	(11)		(37)		(38)			
	13773,40	x	0,195	=	2713,36	kg/h		
4.7.	<u>Peso de inertes na cal</u>							
	(11)		(31)	(37)		(39)		
	(13773,40 - 850,96)	x	0,195	=	2519,88	kg/h		
4.8.	<u>Calor perdido nos inertes junto à cal</u>							
	(39)		(33)	(34)		(35)		
	2519,88	x	(80-25,3)	x	0,25	=	34459,36	kcal/h
4.9.	<u>Calor perdido na poeira junto com os gases</u>							
	(31)		(20)	(34)		(35)		
	850,96	x	(137,3-25,3)	x	0,25	=	23826,88	kcal/h
5.	<u>Gases liberados pela calcinação da lama</u>							
5.1.	<u>Peso do CO₂ na lama</u>							
	(13)		(42)		(43)			
	11087,59	x	0,44	=	4878,54	kg/h		
5.2.	<u>Calor perdido no CO₂ da lama</u>							
	(43)		(20)	(34)		(44)		
	4878,54	x	(137,3-25,3)	x	0,26	=	142063,08	kcal/h

6. Combustão do óleo

6.1. Calor que entra com o óleo

$$\begin{matrix} (46) & & (48) & & (47) & (34) & & & & (49) \\ 1571,3 & \times & 0,5 & \times & (134-25,3) & = & 85400,16 & \text{kcal/h} \end{matrix}$$

6.2. Calor produzido pela combustão do óleo

$$\begin{matrix} (46) & & & & (50) & & & & & (51) \\ 1571,3 & \times & & & 9700 & = & 15241610,00 & \text{kcal/h} \end{matrix}$$

6.3. CO₂ produzido pela queima do óleo

$$\begin{matrix} (46) & & & & (52) & & & & & (53) \\ 1571,3 & \times & & & 3,11 & = & 4886,74 & \text{kg/h} \end{matrix}$$

6.4. H₂O produzida pela queima do óleo

$$\begin{matrix} (46) & & & & (54) & & & & & (55) \\ 1571,3 & \times & & & 1,36 & = & 2136,97 & \text{kg/h} \end{matrix}$$

6.5. Peso de O₂ e ar necessário para queima do óleo

$$\begin{matrix} (46) & & & & (56) & & & & & (57) \\ 1571,3 & \times & & & 3,47 & = & 5452,41 & \text{kg/h} \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} (57) & & & & (58) & & & & & (59) \\ 5452,41 & \times & & & 4,76 & = & 25850,47 & \text{kg/h} \end{matrix}$$

7. Balanço de combustão

7.1. Peso do excesso de O₂ na combustão do óleo e serragem

$$\begin{matrix} (61) & (62) & (64) & (65) & (66) & (67) & (68) & (69) & (70) & (71) & (72) & (73) & (74) & (75) \\ 10021,60 & - & 142,55 & + & 90,35 & - & 4870,54 & + & 4930,74 & - & 2136,97 & + & 291,23 & + & (1029,17 + 25850,47 + 2727,34) \\ & & & & & & & & & & & & & & 100 \end{matrix}$$

7.2. Ar que entra no forno para queima do óleo e serragem

$$\begin{matrix} (59) & (65) & (62) & & (48) & & & & & (63) \\ 25850,47 & + & 1008,17 & + & 1737,34 & \times & 4,76 & = & 35231,38 & \text{kg/h} \end{matrix}$$

7.3. Peso do nitrogênio que entra a partir do ar de combustão

$$\begin{matrix} (63) & & & & (60) & & & & & (64) \\ 35231,38 & \times & & & 0,78 & = & 27832,78 & \text{kg/h} \end{matrix}$$

7.4. Calor perdido nos gases de combustão

$$\begin{matrix} \text{CO}_2 \\ (53) & (20) & (34) & & (44) & & & & & (65) \\ 4886,74 & \times & (137,3-25,3) & \times & 0,26 & = & 142301,87 & \text{kcal/h} \end{matrix}$$

H₂O

$$\begin{matrix} (55) & & & & (66) & (67) & & & & (68) \\ 2136,97 & \times & & & (657,1-25,3) & = & 1350137,65 & \text{kcal/h} \end{matrix}$$

N₂

$$\begin{matrix} (64) & (20) & (34) & & (44) & & & & & (69) \\ 27832,78 & \times & (137,3-25,3) & \times & 0,26 & = & 810490,84 & \text{kcal/h} \end{matrix}$$

O₂

$$\begin{matrix} (62) & (20) & (34) & & (44) & & & & & (70) \\ 1737,34 & \times & (137,3-25,3) & \times & 0,26 & = & 50591,34 & \text{kcal/h} \end{matrix}$$

LITERATURA CITADA

MERLIN, E.S.B. - *Utilização de casca de madeira como combustível auxiliar em forno de cal - Uma experiência promissora.* XII Congresso Anual ABCP, 1979, 8 p.