

ESTUDO DE DESSULFURAÇÃO NA PLANTA DE BANCADA PARA COMBUSTÃO DE CARVÃO EM LEITO FLUIDIZADO DO NETeF

Pedro H. L. Paludo

Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - Av. Trabalhador São-carlense, n.º. 400, 13566-590, São Carlos - SP, Brazil.
pedropaludo@yahoo.com.br

Ivonete Ávila

Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - Av. Trabalhador São-carlense, n.º. 400, 13566-590, São Carlos - SP, Brazil.
iavila@sc.usp.br

Anderson A. U. Moraes

Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - Av. Trabalhador São-carlense, n.º. 400, 13566-590, São Carlos - SP, Brazil.
ubices@sc.usp.br

Julio E. Lindo Samaniego

Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - Av. Trabalhador São-carlense, n.º. 400, 13566-590, São Carlos - SP, Brazil.
jelindo@sc.usp.br

Manoel C. D. Costa

Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - Av. Trabalhador São-carlense, n.º. 400, 13566-590, São Carlos - SP, Brazil.
mcosta@sc.usp.br

Josmar D. Pagliuso

Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - Av. Trabalhador São-carlense, n.º. 400, 13566-590, São Carlos - SP, Brazil.
josmar@sc.usp.br

Fernando E. Milioli

Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - Av. Trabalhador São-carlense, n.º. 400, 13566-590, São Carlos - SP, Brazil.
milioli@sc.usp.br

Resumo. O grupo de pesquisa do Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos (NETeF) da EESC-USP desenvolve pesquisas em combustão de carvão e absorção de SO₂ por calcários em reatores de leito fluidizado. Um dos sistemas experimentais disponíveis para pesquisa é uma planta de bancada para combustão em leito fluidizado atmosférico borbulhante projetada e construída no próprio NETeF. Neste trabalho apresenta-se os principais detalhes construtivos e de projeto da planta, descreve-se etapas de testes realizados, problemas ocorridos e soluções encontradas. Obtém-se resultados de ensaios de dessulfuração por calcário na combustão de carvão mineral. Utilizou-se carvão energético CE4500 procedente de Criciúma-SC e calcário dolomítico de Ipeuna-SP. A variável principal de análise foram a relação (Ca+Mg)/S de alimentação. Foram medidas concentrações de SO₂, O₂ e CO₂ na descarga do reator. A partir dos dados empíricos determinou-se a conversão e o coeficiente global de taxa de reação na dessulfuração. Apresenta-se discussões relativas aos resultados obtidos, e relacionadas às emissões observadas.

Palavras chave: dessulfuração; combustão de carvão; leito fluidizado.

1. Introdução

O carvão mineral constitui-se em importante fonte de energia não renovável do Brasil e apresenta-se como alternativa viável para suprir as crescentes demandas no setor energético brasileiro. As reservas disponíveis conhecidas estão estimadas em 32 bilhões de toneladas, e são suficientes para séculos de exploração termoelétrica em larga escala. Os problemas freqüentemente associados à queima dos carvões minerais referem-se principalmente à poluição ambiental. O carvão nacional está na categoria de "Carvão Betuminoso de Alto Volátil C, não Coqueificável" da classificação ASTM. Possui altos teores de cinzas, que variam de 40 a 60% e altos teores de enxofre (de 1 a 6%) (Süffert, 1997).

Na queima de combustíveis contendo enxofre, tais como carvões minerais e óleos pesados, produz-se significativas emissões de SO₂, um dos gases causadores da chuva ácida. Assim, procedimentos de dessulfuração de gases da combustão são empregados para minimizar impactos ambientais. Absorventes calcários são largamente empregados para remoção de óxidos de enxofre de gases da combustão. Quando submetido a altas temperaturas o calcário natural absorve energia para calcinar, formando principalmente óxido de cálcio (CaO) e de magnésio (MgO) com a liberação de dióxido de carbono (CO₂), aumentando assim a sua porosidade (Equações 1 e 2). Expostos ao SO₂, o CaO e MgO sulfatam produzindo principalmente sulfato de cálcio e de magnésio (Equações 3 e 4).



Alguns autores afirmam que apenas o CaO dos calcários é absorvente de SO_x nas temperaturas de interesse em processos de combustão, posto que o produto MgSO₄ torna-se instável a altas temperaturas (Weidemann e Boller, 1990; Fuertes e Fernandez, 1995). Outro argumento é que a reação do MgO com o SO₂ é muito lenta e não ocorre sulfatação significativa (Borgwardt e Harvey, 1972). Há também na literatura evidência da ocorrência de MgSO₄ como produto da reação (Borgwardt, 1970). Contudo, alguns resultados obtidos no NETeF apontam uma possível atividade do MgO (Pagliuso et al., 2002).

Reatores de leito fluidizado são de grande aplicação na queima de combustíveis potencialmente poluidores, principalmente visando exploração termoelétrica. O processo permite redução efetiva de emissões poluentes, e consta entre as denominadas *clean coal technologies*. Nos reatores de leito fluidizado os óxidos de enxofre são eficientemente removidos pela adição de absorventes calcários, sendo injetados na própria câmara de combustão promovendo remoção de SO_x *in loco*, no mesmo ambiente em que é formado (Van Houte e Delmon, 1979).

A absorção de óxidos de enxofre por calcários depende amplamente dos complexos padrões de escoamento que se desenvolvem nos combustores de leito fluidizado. As taxas de reação são controladas por efeitos cinético-químicos e de transporte de massa de gases reativos. Há várias resistências à reação a considerar, notadamente devido ao transporte do gás reativo através do filme gasoso que envolve as partículas reativas; devido à difusão do gás reativo através de camadas externas reagidas de cada partícula; devido à difusão do gás reativo através da estrutura porosa de núcleos de partícula não reagidos; e resistência cinético-química. Pode-se distinguir resistências à reação intrínsecas (intra-partículas) e externas (externas as partículas). As resistências intrínsecas são de difícil avaliação individual. São em geral determinadas em bloco, como uma resistência efetiva resultante da composição de efeitos difusivos e cinético-químicos intra-partícula. A composição das resistências intrínsecas com resistências externas as partículas permite estabelecer coeficientes globais de taxa de reação.

O Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos (NETeF) da EESC-USP desenvolve pesquisas em reatores de leito fluidizado gás-sólido. As pesquisas enfatizam a minimização de emissões poluentes, e refere-se a estudos reativos e da mecânica dos fluidos dos escoamentos em ambientes fluidizados. Vários trabalhos feitos em batelada com atmosfera simulada de queima de carvão (ar com SO₂ em concentrações de 1000 ppm) foram realizados no reator de leito fluidizado de bancada do NETeF para investigar o processo de dessulfuração por calcário na combustão de carvão. Foram avaliados: efeito da temperatura na conversão e no coeficiente global de taxa de reação (Costa, 2000; Camargo, 2001), efeito da granulometria do calcário (Silva, 2001), influência do tamanho médio de partícula de diferentes calcários (Silva, 2003) e efeito da concentração de SO₂ na sulfatação de calcários (Samaniego Lindo, 2003). Os primeiros trabalhos do grupo em que fez-se a queima de carvão mineral energético brasileiro no reator de bancada do NETeF foram desenvolvidos por Michels Jr. (2004) e Costa (2005).

Neste trabalho apresenta-se os principais detalhes construtivos e de projeto da planta de bancada, descreve-se etapas de testes realizados, problemas ocorridos e soluções encontradas. Apresenta-se resultados de ensaios de dessulfuração por calcário na combustão de carvão mineral brasileiro.

2. Sistema Experimental

O Esquema da planta de bancada para combustão em leito fluidizado, idealizado construído e em funcionamento no NETeF é apresentado na Fig. (1).

O reator é uma coluna cilíndrica com diâmetro interno de 0,160 m, altura de 0,450 m e espessura de parede de 3mm. O material é aço inoxidável AISI 304, sendo este material imune ao ataque de enxofre e resistente a temperaturas elevadas. A escolha da geometria cilíndrica foi feita por simplicidade de confecção. Dispensou-se o uso de material refratário resultando em maior resistência mecânica, maior volume útil e versatilidade nas mudanças de temperaturas.

No topo do reator há uma tampa cônica com visor de inspeção onde são feitas as conexões do sistema de alimentação de particulado e do ciclone, colocado na exaustão. O ciclone foi construído conforme a configuração *Stairmand* e possui na sua descarga de sólidos um recipiente fechado que coleta, para análise posterior, o material arrastado com os gases de processo (elutriado). O recipiente possui seção cônica e uma válvula de esfera na sua parte

inferior para facilitar a descarga do particulado. No topo do ciclone, está fixada à sonda do sistema de análise de gases.

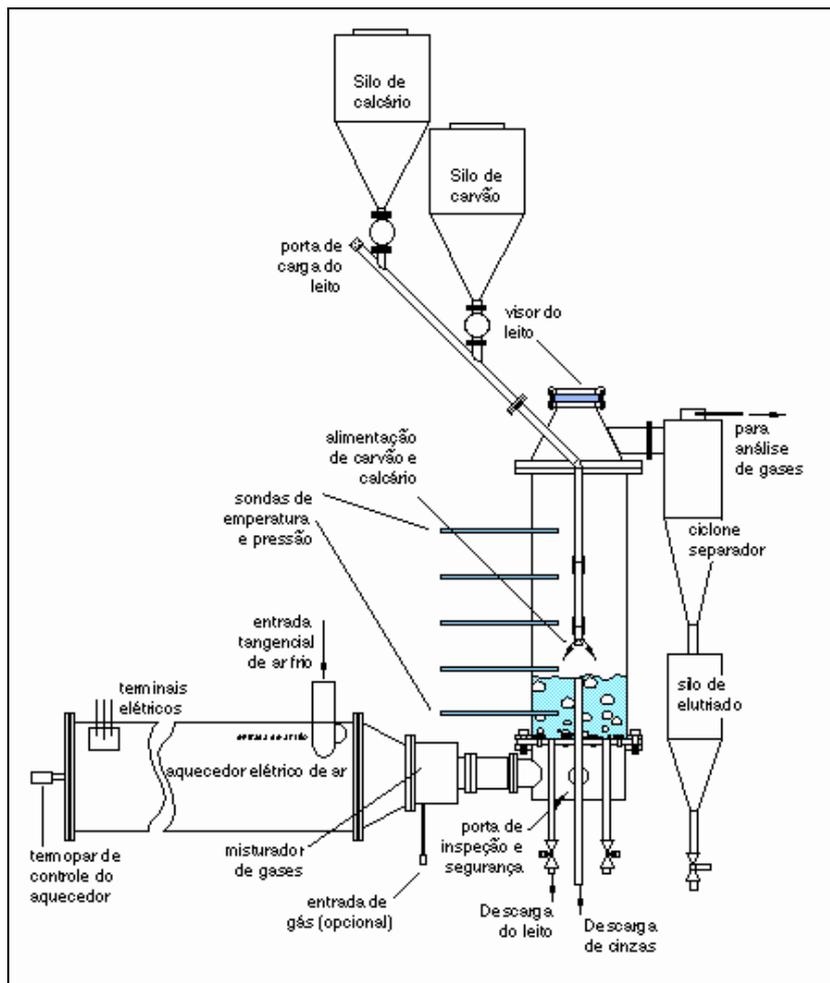


Figura 1. Esquema da planta de bancada para combustão em leito fluidizado, idealizado, construído e em funcionamento no NETeF.

Na parte inferior da coluna há a câmara plena, separada do reator por meio da placa injetora. O *plenum*, ou câmara plena, tem a função de homogeneizar a pressão do ar de fluidização à montante da placa injetora. A câmara plena é ligada ao misturador de gases, cuja utilidade prática é misturar SO₂ ao ar quente nos estudos de simulação da atmosfera de queima de carvão.

O projeto da placa de injetores obedece ao procedimento desenvolvido no NETeF (Lombardi, Pagliuso e Goldstein Jr., 1997) para assegurar movimentação e homogeneidade em todo volume do leito. Os injetores são construídos em aço inoxidável, sendo projetados de tal modo que a perda de carga concentra-se nos orifícios assegurando igual vazão de ar em cada um deles. A extensão dos canais radiais dos injetores é suficiente para prevenir retorno de sólido ao *plenum* e o topo cônico facilita a movimentação do leito. Como o ar chega ao reator já aquecido, não há necessidade de elevar-se os injetores acima da placa distribuidora para proteção térmica da mesma, sendo estes montados rente à placa permitindo que o reator seja mais baixo, ou então, que o *freeboard* seja mais alto. São utilizados 13 injetores com 5 ou 6 furos, dependendo da sua localização. Os injetores possuem diâmetro externo de 0,01489 m, diâmetro interno de 0,00693 m, diâmetro dos canais radiais de 0,002 m e comprimento de canal de 0,00398 m.

A parede externa do reator é isolada com fibra cerâmica (Fiber-Frax) com espessura de 0,025 m. Para garantir a uniformidade radial da temperatura no interior do leito, montou-se uma resistência elétrica sob o isolamento térmico. A resistência minimiza a perda de calor do leito e inibe a formação do gradiente térmico.

O sistema de alimentação de ar de fluidização é constituído por um ventilador centrífugo com vazão de 5,94 m³ min⁻¹ e pressão de 1,5 mH₂O a 3500 rpm. Uma válvula globo foi utilizada para o ajuste manual da vazão de ar e um sistema de placa de orifício para sua quantificação. A placa de orifício foi construída em aço inoxidável seguindo-se a norma ASME (1959), utilizando-se tomadas de pressão do tipo *corner taps*. Vários componentes foram empregados na linha. O tubo do sistema de medida de vazão tem comprimento linear sem acidentes de 2,5m à montante e 1,3 m à jusante da placa de orifício e diâmetro de 0,0387 m. O diâmetro do orifício da placa é 0,01176 m. Manômetros de tubo em “U” foram utilizados para medição das pressões e determinação da vazão no sistema.

Como não é possível encontrar um aquecedor de ar comercial que atendesse às necessidades da planta de bancada

(altas temperaturas e amplas faixas de vazão de ar), o mesmo foi totalmente projetado e construído no NETeF. O aquecedor de ar é do tipo regenerativo e consiste em dois tubos concêntricos de aço inoxidável 304 com comprimento de 1,5 m. O casco externo possui diâmetro externo de 0,2 m e espessura de 0,002 m, enquanto que o interno apresenta diâmetro de 0,16 m e espessura de 0,004 mm. O casco interno abriga um feixe hexagonal de 37 tubos de molita com diâmetro externo de 0,018 m e diâmetro interno de 0,015 m \times 1,2 m de comprimento. Dentro dos tubos de molita estão alojadas dezoito resistências elétricas de fio Kantal DS com diâmetro de 0,0025 m num total de 155 m de fios enrolados em espiras com diâmetro externo de 0,011 m e diâmetro interno de 0,006 m. A potência total das resistências elétricas é de 10 kW. Como o efeito da radiação térmica no interior dos tubos não pode ser desprezado, a temperatura máxima atingida pela resistência não está na sua extremidade de saída, mas a cerca de $\frac{3}{4}$ do comprimento do aquecedor. O tubo central do feixe não abriga resistências (suas extremidades são fechadas), e sua função é alojar quatro termopares de segurança, igualmente distanciados.

A instrumentação de medida de temperatura do sistema é composta de quinze termopares do tipo K (Cromel-Alumel) com fios de 0,001 m de diâmetro, construídos com técnica desenvolvida no NETeF. Os termopares utilizados no reator foram isolados eletricamente com cerâmica de alumina com diâmetro externo de 0,003 m, sendo encamisados em tubos de aço inoxidável com diâmetro externo 0,005 m. O encamisamento da alumina é necessário para proteção contra choques mecânicos ou esforços elevados que podem quebrá-las e permitir contato entre os fios, resultando em erros na leitura. Foram instalados um total de quinze termopares com 0,16 m de comprimento, possuindo capacidade de movimentação radial para determinação do perfil de temperaturas.

As leituras consideradas para análise dos resultados são dadas por dez termopares localizados na região do leito onde as reações de interesse ocorrem. Outros cinco termopares estão localizados no aquecedor de ar. Há um termopar que indica as maiores temperaturas dentro do aquecedor, sendo utilizado como segurança para proteção das resistências elétricas, e outro localizado na saída do aquecedor que atua como controle da temperatura do ar.

Os efluentes gasosos são coletados na descarga de gases do ciclone e suas concentrações são medidas em analisadores Horiba Enda 1400 - modelo VIA-510 para os gases SO₂, CO e CO₂ e modelo MPA-510 para o gás O₂. O modelo VIA-510 utiliza o método de absorção de radiação no infravermelho e o MPA-510 utiliza o método de variação de pressão magnética, que ocorre quando um gás paramagnético atravessa uma região de campo magnético heterogêneo. Os analisadores, que possuem precisão de 0,5 % do fundo de escala e de quatro a cinco faixas de calibração, são conectados eletricamente ao sistema de aquisição de dados que recebe e processa continuamente as leituras. Os analisadores de gases são calibrados antes do início de operação da bancada experimental. A calibração dos analisadores é feita com gás padrão primário contendo frações do gás de análise em balanço de N₂ equivalentes a 70 ou 80 % do fundo de escala na várias faixas de calibração. Procurou-se manter as linhas de amostragem de gases tão curtas quanto possível, de forma a minimizar reações químicas e mistura na linha, que pudessem alterar o resultado e também diminuir a velocidade de resposta dinâmica na aquisição.

A aquisição de dados de concentrações de gases e de temperaturas é realizada por um computador equipado com placa de aquisição e programa *Lab View* da *National Instruments Corp.* As leituras de pressão são feitas a cada 5 min nos manômetros de tubo em "U", sendo inseridas manualmente no programa pelo operador, quando necessário. Desta forma, através de um programa específico, o computador apresenta em tempo real velocidades de fluidização, concentrações de gases e temperaturas.

Os sistemas de alimentação de carvão e de calcário são constituídos por duas válvulas rotativas acopladas a conjuntos motor-reductor de corrente contínua. Em razão das pequenas quantidades alimentadas (cerca de 1 kg/h), foi necessário construir as câmaras no próprio eixo e utilizar material de vedação na parede, invertendo o *design* convencional. O controle de rotação de cada válvula é feito com uma fonte de corrente contínua de precisão cuja voltagem pode ser fixada entre 3 e 12 V.

3. Problemas e Soluções

Aglomerção de carvão e calcário nas válvulas: as válvulas rotativas de alimentação de carvão e calcário foram inicialmente projetadas como um eixo de aço inoxidável 304 com oito cavidades com cantos a 90°. Isto favorecia o empacotamento do material particulado de forma que o mesmo não era totalmente descarregado da cavidade, implicando em variações de vazão mássica e diminuição considerável da capacidade de alimentação da válvula. Esse problema foi resolvido com a mudança da geometria das câmaras para a forma semi-esférica. Essa geometria possui ângulo de saída favorável que não permite a retenção de material sólido. Entretanto, ainda houve alguns empacotamentos de calcário nas câmaras, devido possivelmente à umidade excessiva de alguma parte desse material. Para evitar ao máximo a possibilidade desse problema influenciar os resultados, o duto de alimentação de calcário foi constantemente monitorado visualmente e sempre que necessário aplicava-se pancadas leves no corpo da válvula para eliminar qualquer empacotamento de calcário. Com o carvão este problema não ocorreu.

Falha nos motores de acionamento das válvulas rotativas: inicialmente foram utilizados motores de passo para acionamento das válvulas rotativas. Nas faixas de rotações de 0,20 a 1 Hz ocorria travamento das válvulas por torque insuficiente dos motores de passo. A solução foi a troca destes motores de passo por sistemas motor-reductor iguais aos empregados em limpadores de pára-brisa de automóveis. Esses motores são de corrente contínua e operam com tensão de 3 a 12 V com torque suficiente para impedir qualquer travamento das válvulas rotativas.

Altura baixa de entrada de carvão e calcário: a altura de queda do carvão da saída da válvula de alimentação até a entrada no reator era de 0,5 m. O carvão percorria um tubo de alimentação que fazia duas curvas de 45 ° antes de cair no leito. Adicionalmente parte do tubo de alimentação ficava dentro do reator e era aquecido a temperaturas iguais ou superiores à temperatura de ignição do carvão. Isto fazia com que parte do carvão gaseificasse e liberasse voláteis e alcatrão ainda dentro do tubo de alimentação, causando seu entupimento devido à aglutinação do carvão causada pelo alcatrão. A solução foi a retirada desse tubo de dentro do reator, substituição do ponto de entrada por outro que permite uma entrada praticamente vertical do carvão no reator, e elevação da altura de queda desse material para obter-se maior quantidade de movimento das partículas na entrada do reator.



Figura 2. (a) Aquecedor de ar, reator, silos de alimentação de carvão e calcário. (b) Silos de alimentação de carvão e calcário e válvulas de alimentação. (c) Aquecedor de ar, reator, quadro de controle. (d) Válvulas de alimentação de carvão e calcário com motores de acionamento. (e) Reator com material particulado do leito ao fundo.

Problemas de aglomeração em algumas partes do leito: a aglomeração de material particulado (carvão, calcário e cinzas) ocorre principalmente no início da alimentação de carvão para o leito do reator, que está relativamente frio, cerca de 450 – 500 °C. Nesta faixa de temperaturas, se a taxa de alimentação de carvão for alta ocorre problema semelhante àquele do tubo de alimentação dentro do leito, ou seja, gaseificação e liberação de alcatrão. Por isso o processo inicial de alimentação de carvão deve ser intermitente e com taxa de alimentação em torno de 30 a 40 % da prevista para operação em regime permanente.

Entupimento da linha de amostragem de gases: o ponto de picada da sonda de amostragem encontra-se logo na saída do ciclone e, embora o ciclone retenha a maior parte do particulado elutriado, ainda assim uma quantidade considerável de material particulado escapa pela saída do ciclone. Parte desse material é formada por partículas finas de carvão não queimado, mas em processo de gaseificação e molhadas por alcatrão. Muitas dessas partículas são sugadas para dentro da sonda e aderem na sua parede interna até obstruir completamente a sonda. Além disso as partículas que passam pela sonda vão ficando retidas no filtro primário dos analisadores de gás e, juntamente com a umidade gerada na combustão, obstruem o filtro. A solução para este problema foi a adoção de procedimento de limpeza da sonda com ar comprimido a cada teste, e troca do filtro quando saturado de partículas e umidade.

Infiltração de ar na linha de amostragem de gases: este problema era consequência do entupimento da sonda e também de vazamentos ou folgas nas conexões das mangueiras de teflon e flanges dos filtros e do condensador de umidade. A solução para minimizar a infiltração de ar foi a aplicação de abraçadeiras em todas as conexões de mangueiras de teflon e silicone e teste de estanqueidade dos filtros e condensador.

Entupimento do dreno do leito e controlador de sua altura: nos testes iniciais, o tubo de drenagem do leito trabalhava conectado a um reservatório de aço inoxidável completamente fechado. Assim, quando ocorria o

entupimento deste tubo (com diâmetro interno de 0,01 m) não se tinha indicação deste fato. Somente depois de horas de operação é que se percebia o problema, pois parte do corpo do reator na região do *freeboard*, que deveria ficar escura, apresentava-se incandescente. O nível do leito não aumentava de forma linear devido ao aumento simultâneo da taxa de elutrição. A solução para este problema foi a retirada do reservatório de aço inoxidável fechado e utilização de um reservatório aberto. Assim a drenagem de cinzas do leito era constantemente monitorada visualmente e, quando a drenagem era interrompida, prontamente se injetava ar comprimido no tubo de drenagem e o processo voltava ao normal. Este procedimento de injeção de ar comprimido foi necessário poucas vezes ao longo de muitos testes.

Entupimento da linha de alimentação de carvão e calcário: este problema foi devido ao aquecimento elevado da tampa cônica do reator onde está a entrada de carvão e calcário para o reator. Esse aquecimento ocorreu em consequência da elevação do nível do leito por entupimento do dreno, e pela combustão de voláteis e produtos de gaseificação quando se tentava operar o reator com altas taxas de alimentação de carvão. Com a tampa cônica em temperatura acima ou próxima de ignição do carvão, este sofria o processo de molhagem por alcatrão e aderira na parede do tubo de alimentação até obstruí-lo completamente. Quando isto ocorria a temperatura do leito caía rapidamente e o teste era abortado.

4. Materiais Particulados

O carvão utilizado é um carvão energético obtido do beneficiamento de carvão mineral da região de Criciúma-SC, denominado CE4500 (i.e. com poder calorífico superior de 4500 kcal/kg). O minério bruto é um carvão betuminoso com altos teores de cinzas e enxofre, e o CE4500 é obtido por britagem e lavagem deste carvão. O beneficiamento permite considerável redução dos teores de minerais inertes (principalmente sílico aluminosos) e de enxofre (principalmente sulfetos). O carvão CE4500 apresenta, em média, 35,36 % de carbono fixo, 22,13 % de voláteis, 42,52 % de cinzas e 2,39 % de enxofre.

O calcário utilizado como absorvente neste trabalho é o calcário de Ipeuna (SP), classificado como dolomítico, segundo a classificação dada por Malavolta (1981), i.e., contendo de 13 a 20 % de MgO no calcário calcinado. Seguindo a nomenclatura utilizada nos trabalhos desenvolvidos no NETeF, o calcário dolomítico de Ipeuna, é denominado por DP.

Areia é utilizada como material inerte do reator de leito fluidizado. Foi utilizada areia de quartzosa industrial (AG 30-40) doado pela Mineração Jundu Ltda., localizada em Descalvado (SP).

5. Metodologia de Redução de Dados

Nos experimentos de combustão de carvão em reator de leito fluidizado mede-se concentrações de descarga de gases da combustão, e de entrada de gases no ar de fluidização. Entre estes gases estão SO₂, O₂, CO₂ e CO. Mede-se também concentrações de gases através do leito, usadas para determinar concentrações médias no volume do leito. A partir das medições determina-se a conversão e coeficiente global de taxa de reação na combustão do carbono fixo do carvão, e na sulfatação do calcário.

Segundo Ross e Davidson (1981), assume-se que o carbono do carvão seja oxidado para formar CO, que é posteriormente oxidado no meio fluidizado para gerar CO₂. Para controle de combustão intrínseco, assume-se que apenas a concentração O₂ e a massa de carbono fixo limitem a taxa de reação. Da mesma forma, para controle de sulfatação intrínseco assume-se que apenas a concentração de SO₂ e a massa de calcário limitem a taxa de reação.

Em reatores de leito fluidizado, como o escoamento em torno de partículas reativas ocorre a baixos números de Reynolds, o transporte de massa externo é difusivo (Avedesian e Davidson, 1973). Para estabelecer taxas de reação sob controle externo, aplica-se a lei de difusão de Fick para descrever o transporte de gases no meio fluidizado (transportes de O₂ na direção de uma partícula individual de carvão, e de SO₂ na direção de uma partícula individual de calcário). Para a combustão, a taxa de reação sob controle externo será igual a taxa de consumo de O₂ na superfície externa das partículas de carvão. Para a sulfatação, a taxa de reação sob controle externo será igual a taxa de consumo de SO₂ na superfície externa das partículas de calcário.

Um parâmetro importante para análise de resultados de dessulfuração é a relação molar (cálcio+magnésio)/enxofre. Há considerável discussão na literatura relacionada à efetividade do Mg para absorção de SO₂ (ver, por exemplo, Crnkovic et al., 2006). Nos estudos realizados no NETeF têm-se considerado o Mg ativo em vista de evidências experimentais apontando para conversões superiores a 100 % quando a absorção pelo Mg é desconsiderada (Costa, 2000).

A relação $(Ca+Mg)/S$ na alimentação do reator é dada por:

$$(Ca + Mg)/S = \frac{F_A \left(\frac{Y_{Ca}}{W_{Ca}} + \frac{Y_{Mg}}{W_{Mg}} \right)}{F_F \left(\frac{Y_S}{W_S} \right)} \quad (5)$$

A seguinte simbologia é utilizada na equação acima, e no equacionamento descrito nas seções seguintes:

A	Área da seção transversal do leito fluidizado, m^2
C_i^s, C_i^e	Concentrações do gás i na descarga e na entrada do reator, $kmol/m^3$
$C_{i,\infty}$	Concentração do gás i distante da superfície de uma partícula, $kmol/m^3$
C_i^A, C_i^C	Concentração do gás i na descarga do reator, com e sem injeção de calcário, $kmol/m^3$
F_F, F_A	Taxas de alimentação de carvão e de calcário no reator, kg/s
K_C, K_S	Coefficientes globais de taxa de reação do carbono fixo do carvão e de sulfatação, m/s
M_F, M_A	Massas de carvão e de calcário no reator em regime permanente de operação, kg
n_F, n_A	Números de partículas de carvão e de calcário no reator em regime permanente de operação, adm
r	Raio de partícula, m
$\mathfrak{R}_C, \mathfrak{R}_{O_2}$	Taxas de reação para uma partícula de carvão, de C, $kmol_C/s$, e de O_2 , $kmol_{O_2}/s$
\mathfrak{R}_{SO_2}	Taxa de absorção de SO_2 por uma partícula de calcário, $kmol_{SO_2}/s$
R_C	Taxa de consumo de carbono fixo no reator, $kmol_C/s$
U	Velocidade superficial de fluidização, m/s
W	Peso molecular, $kg/kmol$
X_C, X_S	Conversão de carbono fixo, $kmol_{C\text{ reagido}}/kmol_{C\text{ alimentado}}$, e de calcário, $kmol_{SO_2\text{ absorvido}}/kmol_{Ca+Mg\text{ alimentado}}$
Y	Fração mássica, adm
η_S	Eficiência de absorção de enxofre no reator, adm
ρ_F, ρ_A	Densidade aparente do carvão e do calcário alimentados, kg/m^3

5.1. Combustão de carvão mineral

Define-se conversão de carbono fixo como a relação entre a sua taxa de consumo para formar $CO + CO_2$, e a sua taxa de alimentação no reator. Assim, tem-se:

$$X_C = \frac{UA \left[(C_{CO}^s - C_{CO}^e) + (C_{CO_2}^s - C_{CO_2}^e) \right]}{F_F \left(\frac{Y_C}{W_C} \right)} \quad (6)$$

Considere-se a possibilidade de controle de taxa de reação por fatores intrínsecos (cinética química + transporte de massa de gases intra-partícula), externos (transporte de massa de gases no meio particulado) ou combinados. Correlações podem ser estabelecidas para a taxa de reação considerando cada uma destas condições.

Considerando-se o caso mais genérico de controle de taxa de reação combinado intrínseco/externo, a taxa de reação do carbono fixo de uma partícula de carvão pode ser expressa como:

$$\mathfrak{R}_C = 2\mathfrak{R}_{O_2} = 8\pi r^2 K_C C_{O_2,\infty} \quad (7)$$

A taxa de consumo de carbono fixo para todas as partículas de carvão do leito pode ser obtida de:

$$R_C = UA \left[(C_{CO}^s - C_{CO}^e) + (C_{CO_2}^s - C_{CO_2}^e) \right] = n_C \cdot \mathfrak{R}_C \quad (8)$$

Assumindo um K_C médio efetivo para todas as partículas de carvão do leito, obtém-se

$$K_C = \frac{\rho_F r}{6M_F} UA \frac{(C_{CO}^s - C_{CO}^e) + (C_{CO_2}^s - C_{CO_2}^e)}{C_{O_2,\infty}} \quad (9)$$

Observa-se que $C_{CO}^s, C_{CO}^e, C_{CO_2}^s$ e $C_{CO_2}^e$ são diretamente medidos nos experimentos. $C_{O_2,\infty}$ é determinado como o valor médio obtido de perfis de concentração de O_2 medidos através do volume do reator.

5.2. Dessulfuração por calcário

Nos experimentos em reator de leito fluidizado mede-se concentrações de SO_2 na descarga do reator. A partir das medições determina-se parâmetros taxa de conversão e coeficiente global de taxa de sulfatação de calcários. Define-se conversão do calcário como a relação entre a taxa de absorção de SO_2 (ou de reação de $Ca + Mg$), e a taxa de

alimentação de (Ca + Mg). Assim, obtém-se:

$$X_S = \frac{UA(C_{SO_2}^C - C_{SO_2}^A)}{F_A \left(\frac{Y_{Ca}}{W_{Ca}} + \frac{Y_{Mg}}{W_{Mg}} \right)} \quad (10)$$

No caso da dessulfuração, é também usual definir-se uma eficiência de remoção de SO₂ no reator, dada por:

$$\eta_S = \frac{(C_{SO_2}^C - C_{SO_2}^A)}{C_{SO_2}^C} \quad (11)$$

Considere-se a possibilidade de controle de taxa de reação por fatores intrínsecos, externos ou combinados. Correlações podem ser estabelecidas para a taxa de reação considerando cada uma destas condições. Da mesma forma que para a combustão do carvão, a taxa de absorção de SO₂ por uma partícula de calcário pode ser expressa como:

$$\mathfrak{R}_{SO_2} = 4\pi r^2 K_S C_{SO_2, \infty} \quad (12)$$

A taxa de absorção de SO₂ para todas as partículas de calcário do leito pode ser obtida de:

$$R_{SO_2} = UA(C_{SO_2}^C - C_{SO_2}^A) = n_A \cdot \mathfrak{R}_{SO_2} \quad (13)$$

Assumindo um K_S médio efetivo para todas as partículas de calcário do leito, obtém-se:

$$K_S = \frac{\rho_A r}{3M_A} UA \frac{(C_{SO_2}^C - C_{SO_2}^A)}{C_{SO_2, \infty}} \quad (14)$$

6. Resultados e Discussões

Anteriormente à partida do reator de leito fluidizado de bancada é necessário fazer toda a preparação do sistema experimental, tais como: a limpeza e montagem do sistema, preparação dos sólidos (carvão, calcário e areia), calibração (analisadores de gases, termopares e sistema de alimentação dos sólidos), etc. Esta preparação demanda aproximadamente cinco dias. Optou-se em trabalhar com faixas granulométricas abertas. Testes com alimentação contínua requererem maiores quantidades de materiais, comparando-se a testes em batelada, demandando muito tempo na preparação e separação dos particulados. As análises granulométricas dos materiais sólidos utilizados nos testes foram feitas previamente seguindo a descrição dada por Howard (1989), obtendo-se:

$$d_{m(\text{carvão})} \cong 0,383 \text{ mm}, \quad d_{m(\text{calcário})} \cong 0,718 \text{ mm} \quad \text{e} \quad d_{m(\text{areia})} \cong 0,410 \text{ mm}$$

As vazões mássicas de carvão e de calcário são dadas pelas curvas de calibração das respectivas válvulas rotativas. Aplica-se durante 60 s tensões variando-se de 0,5 em 0,5 V para cada sólido. Recolhe-se o material em um recipiente e pesa-se em seguida. Calcula-se a vazão mássica (em g/s) e plota-se *vazão mássica* × *tensão aplicada*, obtendo-se as equações de calibração através do ajuste linear dos pontos. As equações correspondentes são:

$$\dot{m}_{\text{carvão}} = -0,14977 + 0,09411 \cdot V \quad \text{e} \quad \dot{m}_{\text{calc}} = -0,0755 + 0,12323 \cdot V$$

Após todos os preparativos necessários, procedeu-se à execução do experimento. Inicialmente o leito é formado por 3 kg de areia, sendo esta massa fluidizada com ar aquecido até sua temperatura atingir 500 °C e velocidade superficial de 0,6 m/s. Nesta condição o carvão é adicionado no leito gradativamente até atingir-se uma temperatura em torno de 850 °C. Amostras dos gases de combustão emitidos na descarga são extraídas continuamente para os analisadores de gases que medem as concentrações de CO₂, O₂ e SO₂. Atingida a condição de regime, adiciona-se calcário a uma taxa inicial constante. As cinzas são constantemente drenadas por um tubo que adentra ao leito, mantendo-se seu nível constante. O material elutriado retido no ciclone é drenado periodicamente.

O reator de bancada se comportou de maneira muito estável durante todos os testes. Não ocorreram problemas que comumente acontecem em testes com queima contínua de carvão mineral, como entupimento da alimentação contínua e formação de aglomerado no interior do leito. Realizaram-se quatro testes contínuos de absorção de SO₂ sendo que cada teste teve duração aproximada de 2 h (incluindo-se a estabilização das concentrações dos gases e temperatura, limpeza e troca de filtros de drenagem e retirada do material elutriado). Os parâmetros que se variou em cada teste foram as taxas de alimentação de calcário e carvão. Com isso obteve-se diferentes relações (Ca+Mg)/S. Na Fig.3 mostra-se o reator de leito fluidizado em operação. Nota-se a incandescência do reator durante a operação.

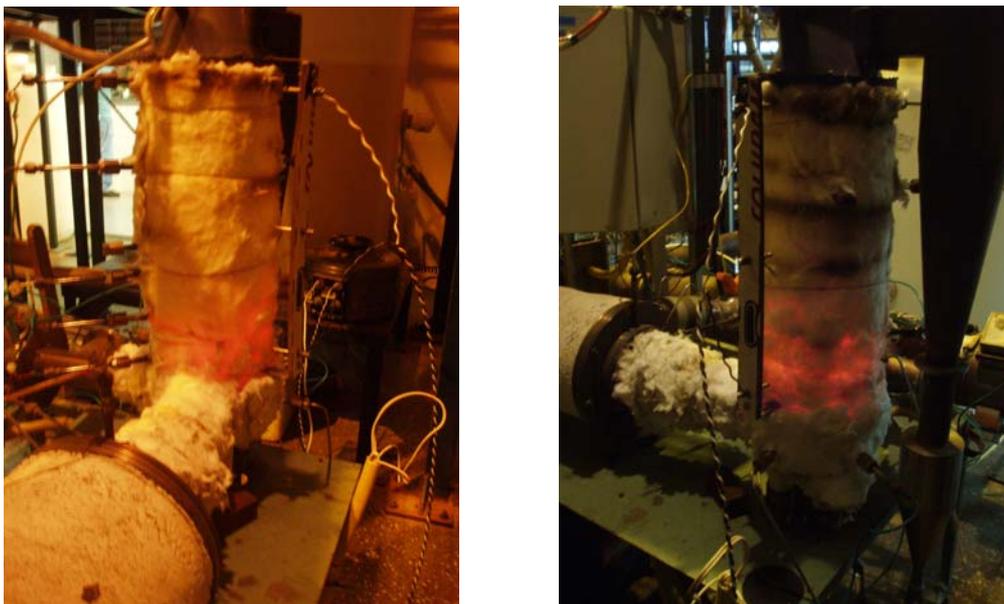


Figura 3. Reator de Leito Fluidizado de Bancada do NETeF em operação.

Na Fig. 4 apresenta-se os resultados obtidos nos quatro testes realizados, para as relações $(Ca+Mg)/S$ consideradas.

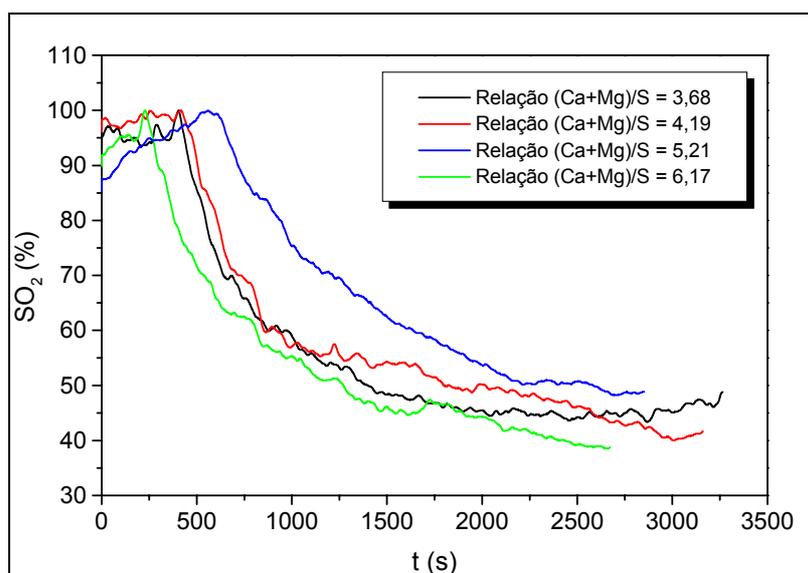


Figura 4. Variação da concentração de SO_2 (C_{SO_2}) na saída do reator de leito fluidizado de bancada do NETeF em função do tempo (t).

Nota-se em todos os casos que inicialmente há altas concentrações de SO_2 . Espera-se o sistema entrar em regime e que a concentração de SO_2 registrado no analisador se estabilize para proceder à alimentação de calcário. A partir da alimentação do calcário nota-se diminuição na concentração de SO_2 e novamente espera-se que a concentração de SO_2 registrada no analisador fique aproximadamente estável.

Com a tensão aplicada calculou-se as vazões mássicas de carvão e calcário e obteve-se a relação de $(Ca+Mg)/S$. Os resultados são apresentados na Tab. 1. Observa-se que para os quatro testes só foi possível operar com relações $(Ca+Mg)/S$ maiores de 3 devido à limitação de torque em rotação baixa do motor da válvula. Relações $(Ca+Mg)/S$ menores que 3 levaram ao travamento da válvula rotativa.

Controlou-se a temperatura de operação para $850\text{ }^\circ\text{C}$. Durante a realização dos experimentos conseguiu-se manter a temperatura estabilizada oscilando em $5\text{ }^\circ\text{C}$ em torno da temperatura de $845\text{ }^\circ\text{C}$. Em um único momento a temperatura atingiu um pico de $905\text{ }^\circ\text{C}$ durante o processo de aquecimento do reator, já com alimentação de carvão. Neste momento, desligou-se o sistema de aquecimento de ar e abrindo-se de forma gradativa a válvula paralela para ar frio até a estabilização da temperatura ($\approx 850\text{ }^\circ\text{C}$).

Tabela 1. Obtenção da Relação (Ca+Mg)/S

Testes	Tensões Aplicadas (V)		Vazão Mássica (g/s)		Relação (Ca+Mg)/S
	$T_{Carvão}$	$T_{Calcário}$	$\dot{m}_{calvão}$	$\dot{m}_{calcário}$	
1	5,5	1,5	0,3678	0,1093	3,68
2	5,8	1,7	0,3960	0,1339	4,19
3	5,5	2,1	0,3678	0,1832	6,17
4	5,6	1,9	0,3772	0,1586	5,21

□ - Dados Experimentais; □ - Dados Calculados

De acordo com a alimentação de carvão em cada teste, as concentrações de SO₂ na saída do reator, sem adição de calcário, variaram em torno de 800 ppm e 1010 ppm. Ajustou-se a velocidade de fluidização em torno de 0,65 m/s, sendo aproximadamente 6 vezes a velocidade mínima de fluidização (U_{mf} – Wen e Yu, 1966). As curvas e os dados de aquisição obtidos durante a operação do reator são apresentados na Fig. 4 e na Tab. 2 respectivamente.

Tabela 2. Resultados obtidos na aquisição de dados durante os testes.

Testes	T_m^* (°C)	U (m/s)	$C_{SO_2}^{SC}$ (ppm)	$C_{SO_2}^{CC}$ (ppm)	ρ_{SO_2} (kg/m ³)
1	846	0,639	801	352	0,6302
2	847	0,648	1008	412	0,6298
3	842	0,659	837	328	0,6326
4	848	0,664	846	413	0,6290

□ - Dados Experimentais; □ - Dados Calculados

(*) T_m a temperatura média de cada teste.

O valor de U é dado pelo programa durante a aquisição sendo calculada a partir da diferença de pressão obtida com a placa de orifício com construção e algoritmo de cálculo segundo norma ASME, incluindo todos os fatores de correção previstos pela norma (Pagliuso, 1994).

Os valores de $C_{SO_2}^{SC}$ e $C_{SO_2}^{CC}$ são calculados após os experimentos, sendo dados pela média em torno do ponto de maior e menor concentração respectivamente.

De maneira geral a temperatura do leito variou pouco com a taxa de alimentação de calcário. Era de se esperar que a temperatura diminuísse com o aumento da taxa de alimentação de calcário, pois no início da alimentação o calcário frio que entra no leito tende a baixar sua temperatura. As Tab. 3 e 4 apresentam dados necessários aos cálculos.

Tabela 3. Dados gerais.

m_{leito} (g)	A (m ²)	ρ_{calc} (kg/m ³)	$d_{m(cal)}$ (mm)	r (m)
1087	0,0201	2850	0,718	0,000359

Tabela 4. Massa atômica ou molar e Fração molar dos sólidos

Massa Atômica ou Molar (kg kmol ⁻¹)			Fração (%)		
W_{Ca}	W_{Mg}	W_S	Y_{Ca}	Y_{Mg}	Y_S
40,08	24,31	32,1	0,1707	0,1173	0,0235

Considerando-se o calcário e carvão mineral utilizados no presente trabalho obteve-se os valores da conversão (X_S), eficiência de absorção de SO₂ (η_S) e coeficiente global de taxa de reação (K_S) através das Eqs. (10), (11) e (14) respectivamente, nas condições experimentais do reator de leito fluidizado do NETeF. Os resultados são apresentados na Tab. 5.

Tabela 5. Resultados Obtidos.

Testes	X_S ($kmol_{SO_2}/kmol_{Ca+Mg}$)	K_S (m/s)	η_S (%)
1	0,0571	0,0224	56,05
2	0,0627	0,0234	59,13
3	0,0400	0,0194	60,81
4	0,0394	0,0148	51,18

Costa (2005) realizou experimentos contínuos no reator de bancada do NETeF com relações (Ca+Mg)/S iguais a 2, 3, 4 e 5, e a temperatura de processo em torno de 900 °C. O autor obteve valores de taxa de conversão e de coeficiente global de reação relativamente próximos aos obtidos no presente estudo. Entretanto, nos testes de Costa (2005) o rendimento foi cerca de 30 % maior. Porém a concentração inicial de SO₂ nos testes de Costa (2005) foi aproximadamente o dobro da concentração inicial deste trabalho. Assim, observa-se que as concentrações iniciais de SO₂ influenciam significativamente nas taxas de reação e conseqüentemente nos resultados.

7. Conclusões

A eficiência dos processos de remoção de SO₂ nos reatores de leito fluidizado é fortemente influenciada pela concentração inicial dos gases do processo (dióxido de enxofre). Isto porque as concentrações iniciais dos reagentes influenciam as taxas de reação (cinética química).

O tempo de residência dos gases no reator, sendo este diretamente proporcional ao volume da massa contida no mesmo, influencia a conversão do processo. Quanto maior a massa do reator, maior a conversão e vice-versa.

Neste trabalho obtiveram-se conversões bastante baixas, que pode ser atribuído ao tempo de residência dos gases no leito ser bastante reduzido. Este problema pode ser corrigido aumentando-se a altura do leito.

8. Agradecimentos

Ao Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos (NETeF), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP) pela infra-estrutura necessária ao desenvolvimento deste trabalho.

À FAPESP pelo apoio financeiro. (05/50152-5).

9. Referências

- Avedesian, M. M. and Davidson, J. F., 1973, "Combustion of carbon particles in a fluidised bed", Trans. Inst. Chem. Engrs., Vol. 51, pp. 121-131.
- Borgwardt, R. H.; Harvey, R. D., 1972, "Properties of carbonate rocks to SO₂ reactivity", Env. Sc. Tech., 6, 350-360.
- Borgwardt, R.H., 1970, "Kinetics of the reaction of SO₂ with calcined limestone". Environ. Sci. Technol., v. 4, nr.1, p.59-63.
- Camargo, F.L., 2001, "Qualificação de calcário brasileiro quanto à absorção de SO₂ em leito fluidizado para condições típicas de combustão de carvão", Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, v.1,p.54- 63.
- Costa, M. C. D., 2000, "Efeito da Temperatura sobre a Conversão e o Coeficiente de Taxa de Reação na Absorção de SO₂ por Calcário em Reator de Leito Fluidizado", Dissertação de Mestrado, EESC-USP, 174p.
- Costa, M.C.D., 2005, "Emissões poluentes na combustão em leitos fluidizados de carvão mineral", Tese de Doutorado, EESC-USP, 114p.
- Crnkovic, P. M., Milioli, F. E. and Pagliuso, J. D., 2006, "Kinetics study of the SO₂ sorption by Brazilian dolomite using thermogravimetry", *Thermochimica Acta* (accepted for publication).
- Davison, J.F and Harrison, D., 1993, "Fluidised Particles", Cambridge Universit, Press, Cambrigge-UK.
- Fuertes, A.B., Fernandez, M.J., 1995, "Kinetics of the calcium sulfate decomposition". Trans. IChemE, vol. 73, Part A.
- Lombardi, G., Pagliuso, J.D. and Goldstein Jr., L., 1997, "Performance of a tuyère gás distributor", *Powder Technology*, v.94, p. 5-14.
- Lyngfelt, A. and Leckner, B., 1989, "SO₂ capture in fluidized-bed boilers: re-emission of SO₂ due to reduction of CaSO₄", *Chemical Engineering Science*, v.44, n.2 p.207-13.
- Malavolta, E., 1981, "Manual de Química Agrícola: Adubos e Adubação", 3.ed. São Paulo, Ed. Agronômica Ceres, 596p.
- Michels Jr., V., 2004, "Influência da temperatura na absorção de SO₂ por calcários na combustão em leito fluidizado de carvão mineral", Dissertação de Mestrado, EESC-USP, 111f.
- Pagliuso, J.D., 1994, "Determinação do coeficiente de transferência do calor em leito circulante: influência da distribuição granulométrica", Tese de Doutorado, EESC-USP, v.2, p.4.18-4.31.
- Pagliuso, J.D., Milioli, F.E., Crnkovic, P.M., Costa, M.L.D., Silva, G.F., Camargo, F.L., 2002, "Absorption of sulfur dioxide by different types of limestone in fluidized bed reactor and TGA". AICHE Annual Meeting, Indianápolis.
- Ross, I. B. and Davidson, J. F., 1981, "The combustion of carbon particles in a fluidised bed", Trans. Inst. Chem. Engrs., Vol. 59, pp. 108-114.
- Samaniego Lindo, J.E.S., 2003, "Efeito da concentração de SO₂ nas reações de calcinação e sulfatação de calcários em reator de leito fluidizado", Dissertação de Mestrado, EESC-USP, 116p.
- Silva, F.F da, 2003, "Efeito da distribuição granulométrica do calcário na absorção de SO₂ em reator de leito fluidizado", Dissertação de Mestrado, EESC-USP, 114p.
- Silva, G.F. da, 2001, "Efeito do tamanho médio de particulado sobre a conversão e o coeficiente global de taxa de reação na absorção de SO₂ por calcário em reator de leito fluidizado", Dissertação de Mestrado, Universidade de

São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, v.1, p. 44-79.

Spitsbergen, U.; Vincent, C. J.; Longe, T. A., 1981, "Comparison of selected European limestones for desulphurization of gases from atmospheric fluidized bed combustion", *J. Inst. Energy*, 54, 94-99.

Süffert, T., 1997, "Carvão nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina", Porto Alegre: CPRM, p. 1-39.

Toomey, R. D. and Johnstone, H.F., 1952, "Gaseous fluidization of solid particles", *Chemical Engineering Progress*, v. 48, p. 220-226.

Van Houte, G.; Delmon, B., 1979, "Kinetics of reaction of CaCO₃ with SO₂ and O₂ below 650 °C", *J. Chem. Soc. Faraday Trans. I.*, v.75, p.1593-1605.

Weidemann H.G., Boller, A., 1990, "Thermogravimetric studies of the reactions between dolomite and sulfur dioxide", *Solid State Ionics*, v.43, p.53-60.

Wen, C. Y. e Yu, Y. H., 1966, "A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity", *AIChE Journal*, v.12, n.3, p. 610-612.

DESULFURATION STUDY IN THE PLANT FOR COAL COMBUSTION IN BED FLUIDIZED OF THE NETeF

Pedro H. L. Paludo

Group and Thermal and Fluids Engineering, School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, Av. Trabalhador São-carlense 400, 13566-590, São Carlos - SP, Brazil.
pedropaludo@yahoo.com.br

Ivonete Ávila

Group and Thermal and Fluids Engineering, School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, Av. Trabalhador São-carlense 400, 13566-590, São Carlos - SP, Brazil.
iavila@sc.usp.br

Anderson A. U. Moraes

Group and Thermal and Fluids Engineering, School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, Av. Trabalhador São-carlense 400, 13566-590, São Carlos - SP, Brazil.
ubices@sc.usp.br

Julio E. Lindo Samaniego

Group and Thermal and Fluids Engineering, School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, Av. Trabalhador São-carlense 400, 13566-590, São Carlos - SP, Brazil.
jelindo@sc.usp.br

Manoel C. D. Costa

Group and Thermal and Fluids Engineering, School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, Av. Trabalhador São-carlense 400, 13566-590, São Carlos - SP, Brazil.
mccosta@sc.usp.br

Josmar D. Pagliuso

Group and Thermal and Fluids Engineering, School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, Av. Trabalhador São-carlense 400, 13566-590, São Carlos - SP, Brazil.
josmar@sc.usp.br

Fernando E. Milioli

Group and Thermal and Fluids Engineering, School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, Av. Trabalhador São-carlense 400, 13566-590, São Carlos - SP, Brazil.
milioli@sc.usp.br

Abstract

Group and Thermal and Fluids Engineering (NETeF), School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo (EESC-USP) develops researches on combustion of mineral coal and the absorption of SO₂ by limestones in fluidized bed. One of the experimental systems available for research is a bench scale plant to combustion in atmospheric bubbling fluidized bed that was projected and built in the own NETeF. This work shows the main details of construction and project of the plant, performed tests stages, occurred problems and solution obtained. The results of desulfuration experiments by limestone of mineral coal were obtained. A CE4500 energetic coal from Criciúma-SC was used, alongside with a dolomitic limestone from Ipeuna-SP. The parameters varied for analysis were the (Ca+Mg)/S feeding ratio and the time of residence of the limestone in the reactor. Gas concentrations were measured at the reactors exit (SO₂, O₂ e CO₂). The conversion and the global reaction rate coefficient for sulfur absorption by limestone were determined in a bench scale fluidized bed reactor. Discussions are showing about the results obtained regarding to emissions observed.

Keywords: dessulfuration; coal combustion; bed fluidized.