

# **DETERMINAÇÃO DAS REAÇÕES QUE OCORREM EM UM INCINERADOR DE LEITO FIXO PARA RESÍDUOS SÓLIDOS DA INDÚSTRIA COUREIRO-CALÇADISTA**

**Marcelo Godinho**

Departamento de Engenharia de Química, Universidade Federal do RS  
Rua Luiz Englert S/N - CEP 90040-040 - Porto Alegre - RS –Brasil  
[godinho@enq.ufrgs.br](mailto:godinho@enq.ufrgs.br)

**Nilson Romeu Marcilio**

Departamento de Engenharia de Química, Universidade Federal do RS  
Rua Luiz Englert S/N - CEP 90040-040 - Porto Alegre - RS –Brasil  
[nilson@enq.ufrgs.br](mailto:nilson@enq.ufrgs.br)

**Leonardo Masotti**

Departamento de Engenharia de Química, Universidade Federal do RS  
Rua Luiz Englert S/N - CEP 90040-040 - Porto Alegre - RS –Brasil  
[masotti@enq.ufrgs.br](mailto:masotti@enq.ufrgs.br)

**Celso Brisolara Martins**

Consultor Autônomo na Área de Combustão  
[Cbmartins@zaz.com.br](mailto:Cbmartins@zaz.com.br)

**Resumo.** Neste trabalho é apresentado um histórico do projeto "Planta Piloto para a Incineração de Resíduos Sólidos da Indústria Coureiro-Calçadista". Além disto, a partir da caracterização do resíduo sólido da indústria Calçadista e do resíduo sólido da indústria Coureira (wet-blue), foi realizada uma avaliação das reações que ocorrem durante a incineração destes resíduos, tanto no reator de gaseificação quanto no reator de oxidação da planta piloto.

**Palavras chave:** incineração, gaseificação, resíduos sólidos

## **1. Introdução**

As alternativas existentes para a destinação dos resíduos sólidos da indústria Coureiro-Calçadista são a produção de couro regenerado, produção de materiais compostos para usos diversos, separação de cromo e proteína, incineração e disposição no solo. No Brasil a disposição do resíduo sólido em aterros é a opção mais utilizada pelas empresas, porém esta técnica gera problemas graves para o meio ambiente além de acumular um passivo de resíduo que inevitavelmente terá que ser destruído no futuro. A incineração dos resíduos sólidos da indústria Coureiro-Calçadista tem como vantagens a redução em torno de 90% do volume total do resíduo, podendo ainda possibilitar a recuperação do cromo após o tratamento das cinzas, além de gerar energia que pode ser aproveitada na própria indústria.

## **2. Histórico do projeto**

O Projeto "Planta Piloto para a Incineração de Resíduos Sólidos da Indústria Coureiro-Calçadista", em execução no Laboratório de Processamento de Resíduos (LPR), do Departamento de Engenharia Química da UFRGS, teve seu início no ano de 1997 em função da preocupação das empresas do setor Coureiro (empresas que atuam no setor de processamento de peles curtidas ao cromo) e da posição mais rigorosa do órgão oficial de fiscalização ambiental do Estado do Rio Grande do Sul - FEPAM - em relação a destinação dos resíduos sólidos gerados pelas referidas empresas. Como o farelo de couro, representa em torno de 90% do resíduo sólido total produzido por uma empresa curtidora, este material foi o foco principal do estudo desenvolvido à época.

O setor Coureiro possui uma posição importante dentro da matriz econômica do Estado do Rio Grande do Sul, sendo que a FUNDACOURO representa as empresas deste setor no tocante aos fatores tecnológicos que o compõe. Desta forma, a FUNDACOURO, à época, cumprindo seus objetivos, considerou de fundamental importância a pesquisa e os estudos de processos capazes de solucionar os problemas ambientais gerados pela maioria de seus associados, em função da destinação dos seus resíduos sólidos, tornando-se uma das parceiras do projeto.

Sabedora da relevância do problema ambiental causado pela má destinação dos resíduos sólidos da indústria Coureira a FAPERGS (Fundação de Amparo à Pesquisa do RS) tornou-se outra parceira no projeto apoiando o desenvolvimento desta tecnologia

Acreditando que o mercado na área de tratamento de resíduos sólidos industriais iria crescer muito nos próximos anos, a LUFTECH, empresa que tem como finalidade a fabricação de incineradores industriais voltados a proteção do meio ambiente, tornou-se outra parceira do projeto.

Assim sendo, a partir da definição dos parceiros envolvidos no projeto, iniciou-se a avaliação dos processos de incineração do resíduo sólido gerado pela indústria Coureira.

Os equipamentos para incineração de resíduos sólidos utilizados com maior frequência são os fornos rotativos, os fornos de grelha fixa ou móvel, os fornos de leito fluidizado e os incineradores de câmaras múltiplas. Os fornos rotativos apresentam freqüentemente problemas em relação a sua selagem. Com isto existe a possibilidade da entrada de ar falso na câmara de reação ou a saída dos gases do interior do equipamento, de acordo com a pressão que o equipamento está operando no interior da câmara de reação. A partir disto decidiu-se optar pela utilização de um reator de leito fixo com grelha móvel e com câmaras múltiplas em escala de bancada. Este equipamento, apresentado na Fig. (1), foi projetado pelos pesquisadores que atuam no LPR, sendo objeto da realização de três dissertações de mestrado. Foi construído pela LUFTECH, empresa parceira do projeto e possuidora de conhecimento técnico indispensável para a construção do equipamento.

Este equipamento tem capacidade para processar 1kg/h de resíduo e a sua estrutura consiste basicamente de um gaseificador (1), uma câmara de combustão de gases (2), um ciclone e um lavador de gases. O gaseificador, localizado logo abaixo da alimentação, tem por finalidade a secagem e a gaseificação do resíduo bem como o recolhimento das cinzas formadas nesta etapa do processo.

No reator de oxidação ocorre a reação dos gases oriundos do gaseificador com excesso de ar. O ciclone tem como função o abate do material particulado oriundo das etapas antecedentes. O lavador de gases retém os gases ácidos formados nas etapas anteriores bem como funciona como um abatedor de material particulado adicional ao ciclone.

Com o objetivo de aperfeiçoar a tecnologia descrita anteriormente projetou-se, também, um equipamento de bancada, apresentado na Fig.(2), com reator em leito fluidizado (1) e com câmaras múltiplas. A tecnologia em leito fluidizado apresenta uma transferência de calor e massa bem mais eficiente no interior do reator, já que o sólido nestas condições passa a se comportar como um fluido. Este equipamento foi objeto de uma dissertação de mestrado.

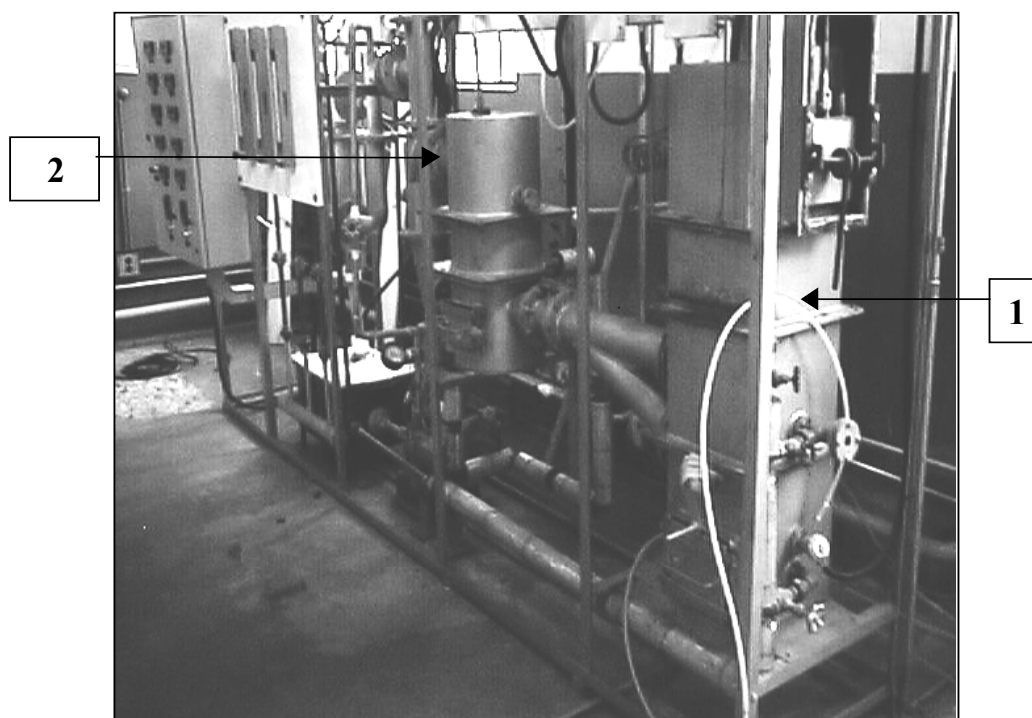


Figura 1- Incinerador com reator de leito fixo e com câmaras múltiplas.

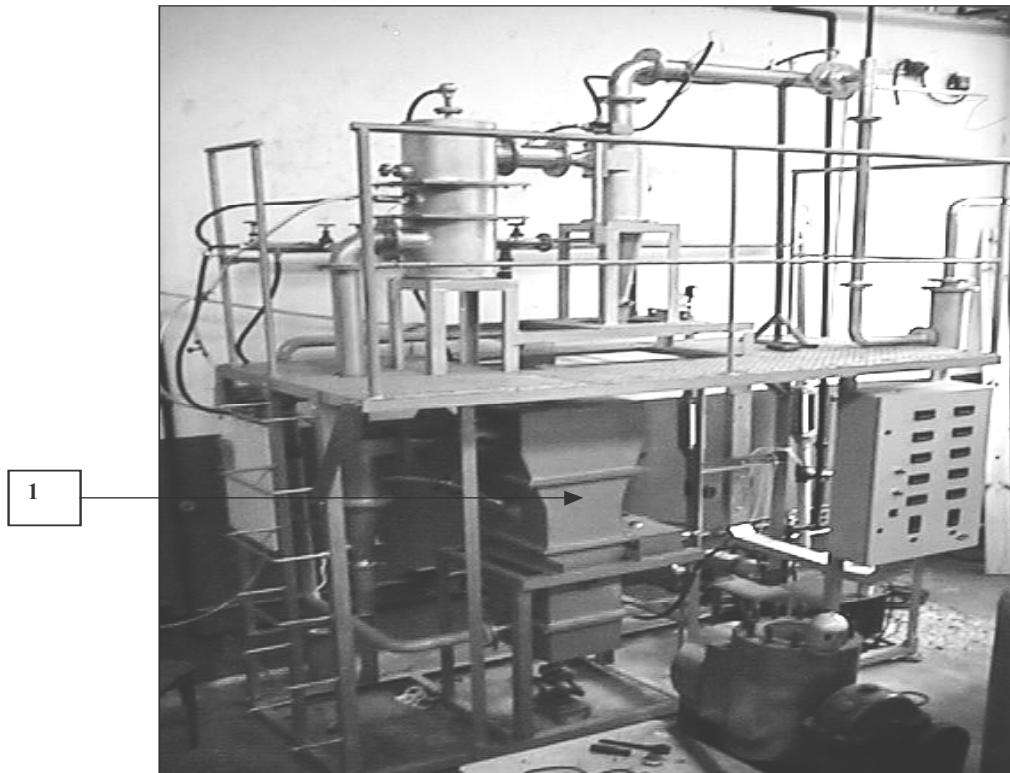


Figura 2- Incinerador com reator de leito fluidizado e com câmaras múltiplas.

Atualmente está sendo desenvolvida uma dissertação de mestrado e uma tese de doutorado no incinerador de leito fixo. Estes trabalhos dizem respeito às cinzas geradas no processo e a presença de compostos clorados (dioxinas e furanos) nas cinzas volantes. Este equipamento também gera dados necessários ao projeto da planta piloto.

No início de 2001 foi firmado um novo contrato entre os antigos parceiros do projeto com a inclusão da empresa Preservar. Esta empresa, situada no Município de Dois Irmãos-RS, funciona em sistema de cooperativa, reunindo 5 empresas do setor calçadista da região do Vale do Rio dos Sinos-RS e tem por finalidade a destinação dos resíduos das empresas cooperativadas.

Neste contrato foi acordado o dimensionamento, a construção e a operação de uma planta piloto com capacidade para processar 100kg/h de resíduo da indústria Coureiro-Calçadista. O início da operação da planta piloto está previsto, segundo o cronograma do projeto, para abril de 2002.

A planta piloto constitui-se dos reatores de gaseificação e de oxidação, seguidos por um sistema de tratamento dos gases de combustão. O fluxograma básico da planta piloto está apresentado na Fig. (3).

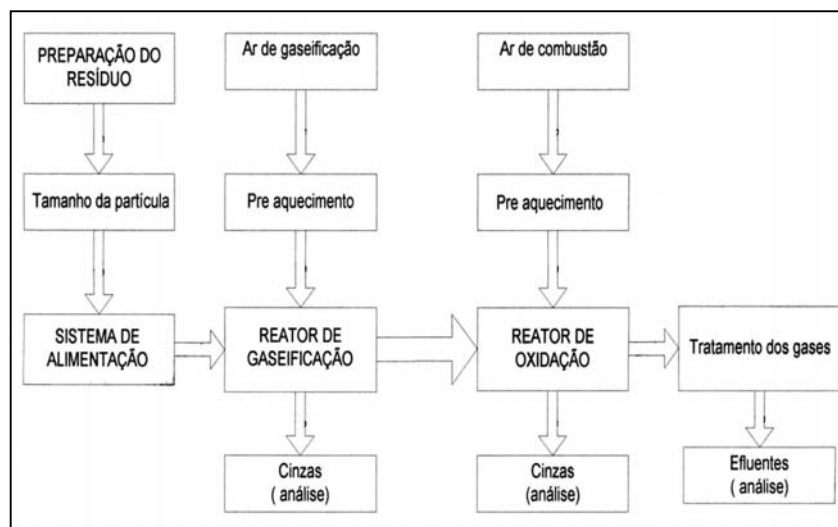


Figura 3: Fluxograma da planta piloto

O sistema de tratamento dos gases de combustão da planta piloto é composto de um ciclone que recebe os gases provenientes do reator de oxidação, sendo dimensionado para abater partículas com diâmetro superior a 5 µm. A seguir os gases de combustão escoam por um resfriador gás-ar que possui a função de diminuir a temperatura dos gases de 1000°C para 200°C. O resfriador é constituído de dois cilindros verticais concêntricos, tendo o cilindro interno 1,60 m de diâmetro e o cilindro externo 1,70 m de diâmetro. No espaço anular entre os cilindros estão dispostas 100 aletas longitudinais com a função de aumentar a área de transferência de calor entre os gases de combustão e o ar que escoam neste espaço, a uma taxa de 10.000 kg/h. O fluxo gasoso que deixa o resfriador gás-ar entra em um lavador tipo venturi. Neste equipamento, que tem a função de promover o contato gás-líquido, é injetada uma solução de NaOH com o objetivo de neutralizar os gases ácidos (SO<sub>2</sub> e HCl) formados nas etapas anteriores. Após o lavador venturi ocorre a separação dos gases de combustão da corrente líquida em um lavador decantador. A corrente gás-líquido proveniente do lavador venturi entra tangencialmente no lavador decantador, onde os gases se dirigem para a chaminé e o fluxo líquido decanta, sendo bombeado para uma torre de resfriamento, que tem a capacidade de resfriar 3.000 kg/h de água à 60°C para 30°C.

### 3. Caracterização do resíduo

Análises laboratoriais foram realizadas com o resíduo sólido da empresa Preservar (resíduo sólido da indústria calçadista). A amostra recebida foi triturada em um moinho de martelo industrial e após misturada em um homogeneizador tipo em Y para se obter uma amostra significativa do resíduo. O resultado da análise elementar expresso em (% p/p), está na Tab.(1).

Na Tab.(2) é apresentado o resultado obtido na análise imediata expresso em (%p/p). O poder calorífico superior, em base seca, do resíduo é 5.330 kcal/kg e o poder calorífico inferior, em base seca, é 5.000 kcal/kg. A quantidade de flúor apresentada na amostra foi de 22,4 ppm e o cromo total representa 0,80% da massa da amostra analisada.

Tabela 1 - Análise elementar do resíduo da indústria calçadista.

C	H	O	N	S	Cl	cinza
51,28	6,46	26,14	7,61	0,95	0,40	7,16

Tabela 2 - Análise imediata do resíduo da indústria calçadista.

Composição	Resultado(%)
Água (b.u.)	8,53
Cinzas (b.s.)	7,16
Matéria Volátil(b.s.)	76,28
Carbono Fixo (b.s.)	16,56

O resíduo sólido da indústria coureira (*wet blue*) foi cedido, tal como é produzido na operação de rebaixamento de peles curtidas ao cromo, pelas seguintes empresas localizadas no Vale do Rio dos Sinos - RS: Curtume Bender S/A, Irmãos Marchini e Cia. Ltda. e Bracol Ind. e Com. Ltda. Este resíduo foi quarteado através do método convencional de tronco de pirâmide com o objetivo de se obter uma amostra significativa para as análises laboratoriais. O resultado da análise elementar expresso em (% p/p), está na Tab.(3). Na Tab.(4) é apresentado o resultado obtido na análise imediata expresso em (%p/p). O poder calorífico superior, em base seca, do resíduo é 4760 kcal/kg. O teor de cromo total representa 1,83% da massa da amostra.

Tabela 3 - Análise elementar do resíduo da indústria coureira (*wet blue*)

C	H	O	N	S	Cl	cinza
45,45	6,03	20,42	16,59	1,29	0,56	9,66

Tabela 4 - Análise imediata do resíduo da indústria coureira (*wet blue*)

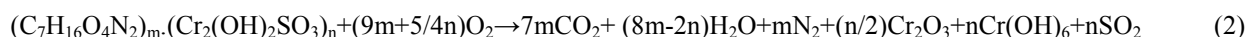
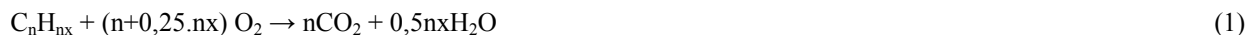
Composição	Resultado(%)
Água (b.u.)	18,70
Cinzas (b.s.)	9,66
Matéria Volátil(b.s.)	5,50
Carbono Fixo(b.s.)	84,84

#### 4. Reações na incineração do resíduo sólido

Na caracterização do resíduo sólido da indústria calçadista foi constatado que os principais materiais combustíveis presentes são aparas de couro (em torno de 50% do total em massa do resíduo) e materiais poliméricos sintéticos, sendo estes responsáveis pelo elevado poder calorífico do resíduo. O resíduo sólido da indústria coureira (*wet-blue*) trata-se de um material homogêneo constituído da pele animal curtida ao cromo.

Na representação esquemática dos reatores de gaseificação e de oxidação, apresentada na Fig.(4), ocorre a injeção do ar de gaseificação em quantidade subestequiométrica em relação a massa total de resíduo alimentada no reator. Na região próxima à entrada do ar de gaseificação (zona de oxidação), junto à parede do reator, a reação de combustão com formação de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O será favorecida em função da alta concentração de oxigênio nesta região.

A combustão, na zona de oxidação do reator de gaseificação, dos principais materiais contidos no resíduo sólido da indústria calçadista (poliméricos sintéticos e aparas de couro) ocorre segundo as Reações (1) e (2). Na combustão do resíduo sólido da indústria coureira ocorre apenas a Reação (2) na zona de oxidação do reator de gaseificação.



A zona de oxidação do reator de gaseificação é responsável pela formação dos agentes gaseificantes, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O, que posteriormente reagirão com o carbono fixo na zona de redução, que é a região de alta temperatura próxima à grelha. O calor gerado pelas Reações (1) e (2), no caso da combustão do resíduo sólido da indústria calçadista, é responsável pela manutenção da temperatura em torno de 500°C na zona de craqueamento do reator. No caso da combustão do *wet-blue* a temperatura da zona de craqueamento do reator será mantida pelo calor gerado pela Reação (2). Os produtos gasosos da combustão fluem de forma ascendente junto à parede do reator em direção à zona de desidratação. Na zona de desidratação os gases quentes trocam calor com o resíduo vaporizando a água contida no material (H<sub>2</sub>O<sub>(r)</sub>).

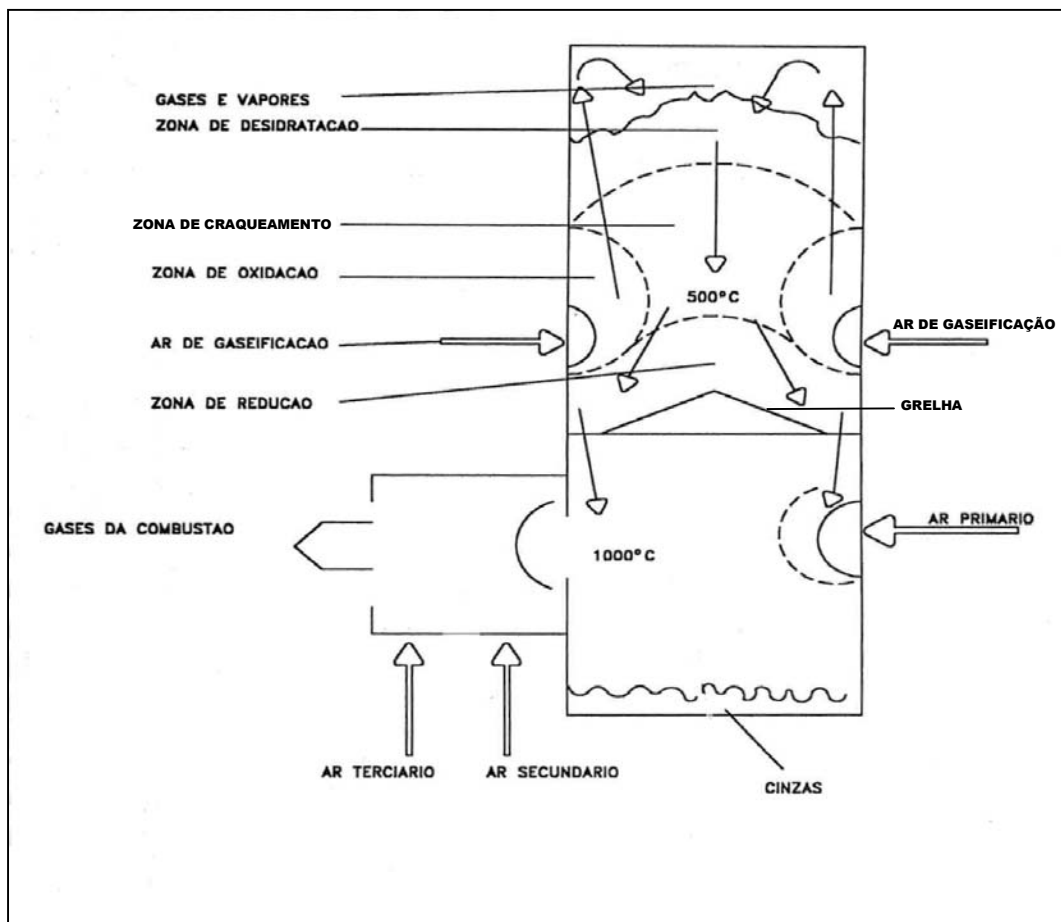


Figura 4 - Representação esquemática dos reatores de gaseificação e de oxidação

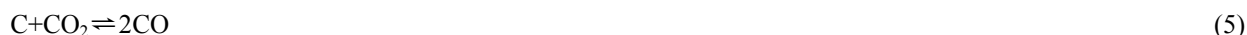
Os gases quentes, após escoarem pela zona de desidratação, fluem em contracorrente, de forma descendente, pelo centro do reator em direção à região onde ocorre a liberação de matéria volátil e o craqueamento das moléculas maiores (zona de craqueamento). A análise imediata mostra que a quantidade de matéria volátil presente no resíduo sólido da

indústria calçadista é alta, indicando que grande parte deste resíduo ao escoar pela zona de craqueamento formará hidrocarbonetos. Entretanto a análise imediata indica baixa quantidade de matéria volátil no *wet-blue*. Assim sendo, no caso da planta piloto estar operando com *wet-blue*, haverá pouca formação de hidrocarbonetos na zona de craqueamento e conseqüentemente haverá maior disponibilidade de carbono fixo na zona de redução. Desta forma quando a planta piloto estiver operando com o *wet-blue* haverá maior formação de gases combustíveis (CO e H<sub>2</sub>) no reator de gaseificação.

Os hidrocarbonetos e os gases combustíveis (CO e H<sub>2</sub>), formados respectivamente na zona de craqueamento e na zona de redução, serão oxidados no reator de oxidação. Na zona de craqueamento ocorre a Reação genérica (3).



Ao chegar a zona de redução, próxima a grelha do reator, o fluxo gasoso rico em CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O, reagirá com o carbono fixo presente no resíduo através das Reações (4) e (5).

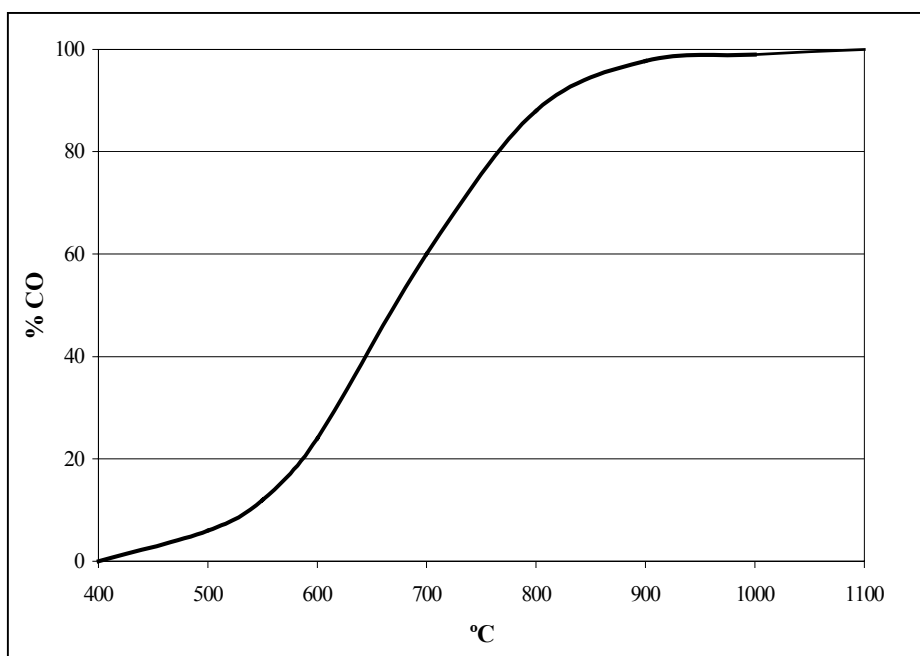


A temperatura na zona de redução é influenciada diretamente pela injeção de ar primário realizada logo abaixo da grelha. Pelas estimativas realizadas, a região próxima a grelha está a uma temperatura em torno de 1000°C. Observa-se pelas constantes de equilíbrio das Reações (4) e (5), à temperatura de 1000°C, apresentadas na Tab.(5), que haverá a oxidação completa do carbono fixo para a formação de CO e de H<sub>2</sub>. A Fig.(5) representa a curva de equilíbrio da Reação (5). Nesta figura observa-se que na temperatura de 1000°C a reação direta está amplamente favorecida à reação inversa, indicando a oxidação completa do carbono fixo a monóxido de carbono (CO).

Tabela 5 - Constantes de equilíbrio

Reação	Temperatura(°C)	K <sub>equilíbrio</sub>
(4)	1000	1,14.10 <sup>2</sup>
(5)	1000	2,08.10 <sup>2</sup>
(6)	1000	7,93.10 <sup>-3</sup>

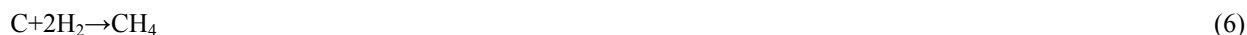
Fonte: Von Fredersdorff, 1963.



Fonte: Ponte Filho, 1988.

Figura 5 - Curva de equilíbrio da Reação (5)

Nas condições de operação do reator de gaseificação a Reação (6), apresentada abaixo, poderia acontecer na zona de redução, onde a temperatura estimada é de 1000°C e há uma pressão parcial de hidrogênio mais elevada em função da Reação (4). Porém, como se observa na Tab.(5), a sua constante de equilíbrio nesta temperatura é baixa o que indica que a conversão de carbono em metano (CH<sub>4</sub>) é muito pequena nesta zona do reator.



Considerando-se as reações que ocorrem no reator de gaseificação, haverá a formação de hidrocarbonetos e gases combustíveis (CO e H<sub>2</sub>), que serão oxidados no reator de oxidação, segundo as Reações (1), (7) e (8).



No interior do reator de gaseificação também ocorre a formação de HCl na forma da Reação (9), devido à presença de compostos clorados nos resíduos.



## 5. Conclusões

A partir da avaliação realizada neste trabalho pode-se concluir que:

- no caso da planta piloto estar operando com o resíduo sólido da indústria calçadista, as Reações (1), (2), (3), (4) e (5) ocorrerão no reator de gaseificação;
- no caso da planta piloto estar operando com o *wet-blue*, as Reações (2), (3), (4) e (5) ocorrerão no reator de gaseificação;
- independentemente do tipo de resíduo que estiver sendo processado no incinerador, ocorre a formação do HCl, segundo a Reação (9), no reator de gaseificação;
- as Reações (1), (7) e (8) ocorrem no reator de oxidação;

## 6. Referências

Von Fredersdorff, C. G., Elliott, M.; 1963, "Chemistry of Coal Utilization", New York.  
 Ponte, F. F.; 1988, "Gaseificadores de Leito Fixo", Brasília.

### DETERMINATION OF THE REACTIONS THAT HAPPEN IN AN INCINERATOR OF FIXED BED FOR SOLID WASTE OF THE LEATHER-SHOE INDUSTRY

**Marcelo Godinho**

Departamento de Engenharia de Química, Universidade Federal do RS  
 Rua Luiz Englert S/N - CEP 90040-040 - Porto Alegre - RS –Brasil  
[godinho@enq.ufrgs.br](mailto:godinho@enq.ufrgs.br)

**Nilson Romeu Marcilio**

Departamento de Engenharia de Química, Universidade Federal do RS  
 Rua Luiz Englert S/N - CEP 90040-040 - Porto Alegre - RS –Brasil  
[nilson@enq.ufrgs.br](mailto:nilson@enq.ufrgs.br)

**Leonardo Masotti**

Departamento de Engenharia de Química, Universidade Federal do RS  
 Rua Luiz Englert S/N - CEP 90040-040 - Porto Alegre - RS –Brasil  
[masotti@enq.ufrgs.br](mailto:masotti@enq.ufrgs.br)

**Celso Brisolará Martins**

Consultor Autônomo na Área de Combustão  
[Cbmartins@zaz.com.br](mailto:Cbmartins@zaz.com.br)

*Abstract: In this work is presented a historical of the project " Pilot Plant for the Incineration of Solid Residues of the Leather-Shoe Industry ". Besides, starting from the characterization of the solid residue of the Shoe industry and of the solid residue of the Leather industry (wet-blue), it was accomplished an evaluation of the reactions that happen during the incineration of these residues in the gasification reactor and in the oxidation reactor of the pilot plant.*

*Keywords: incineration, gasification, solid residues*