

Caroline Santa Rosa Landgraf

Redução do Óxido de Cromo Presente em Resíduo de Aço Inoxidável

Trabalho de Formatura Apresentado
à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para Obtenção de
Título de Graduação em Engenharia

São Paulo
2007

Caroline Santa Rosa Landgraf

Redução do Óxido de Cromo Presente em Resíduo de Aço Inoxidável

Trabalho de Formatura Apresentado
à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para Obtenção de
Título de Graduação em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Orientador: Prof. Titular
Jorge Alberto Soares Tenório

São Paulo
2007

RESUMO

As indústrias têm investido cada vez mais em pesquisa e tecnologia de processos que diminuam a geração de resíduos. Essa preocupação deve-se à diminuição de custos e aos riscos ao meio ambiente.

A produção de aços inoxidáveis tem aumentado ao longo dos anos gerando mais resíduos também. Estes materiais são ricos em óxidos de cromo e outros óxidos que não podem ser depositados sem o devido tratamento e em locais apropriados.

Os estudos feitos tiveram como objetivo principal a redução do óxido de cromo através de redução silicotérmica e carbotérmica. Nos dois tipos de redução feitos, foram determinadas três basicidades distintas em três temperaturas. A distinção entre as duas reduções, além do tipo de redutor, foram os fornos utilizados.

ABSTRACT

The industries have increasingly invested in research and technology processes to reduce the generation of waste. This concern is due to the reduction of costs and risks to the environment.

The production of stainless steel has increased over the years also generating more waste. These materials are rich in oxides of chromium and other oxides which can not be filed without the proper treatment and in appropriate locations.

The studies were made as main goal the reduction of oxides of chromium through silicon reduction and carbon reduction. In both types of reductions made were determined three basicities in three different temperatures. The distinction between the two reductions is the furnaces were used, in addition to the type of reducer,

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e irmãos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pois Ele me deu o discernimento e a perseverança para a confecção deste trabalho.

Aos meus pais, Marcus Landgraf e Marli Santa Rosa Landgraf, e aos meus irmãos, Thales Santa Rosa Landgraf e Daniele Santa Rosa Landgraf, pelo amor, apoio e paciência tão necessários.

Ao Professor Dr. Jorge Alberto Soares Tenório que com sua orientação e conhecimento auxiliou no processo do meu crescimento profissional.

Ao Danilo, técnico do Hall Tecnológico, pela paciência e auxílio nos trabalhos realizados.

À Clélia e Gilberto, funcionários da biblioteca, pela paciência e auxílio nas pesquisas realizadas.

Aos familiares e amigos que acreditaram e auxiliaram na conclusão deste trabalho.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Produção Mundial Do Aço Bruto 1996, 2001, 2006	1
Figura 2	Esquema do Forno Elétrico a Arco	7
Figura 3	Conversor AOD	8
Figura 4	Conversor VOD	8
Figura 5	Principais Mecanismos de Emissão de Poeiras	10
Figura 6	Etapas de Eclosão de uma Bolha de Gás	11
Figura 7	Influência do fluxo de Gás no Banho	11
Figura 8	Forno de Resistência	18
Figura 9	Forno de Indução	23
Figura 10	Esquema de Injeção	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Ranking dos 10 maiores produtores de aço bruto do mundo	2
Tabela 2	Tópicos abordados pela NBR, ABNT	4
Tabela 3	Classificação dos resíduos conforme NBR 10004	4
Tabela 4	Tipo e local de coleta do resíduo	14
Tabela 5	Composição química dos resíduos e redutores	15
Tabela 6	Composição dos Briquetes	17

Sumário

1	Introdução.....	1
2	Normas sobre Resíduos	4
3	Fabricação do Aço Inoxidável.....	6
4	Principal Mecanismo de Geração de Poeiras:.....	9
5	Redução do Óxido de Cromo	12
6	Metodologia	14
6.1	Característica do resíduo e redutores ⁽²⁰⁾ :	14
6.2	Ensaios.....	16
6.2.1	Ensaios com briquetes.....	16
6.2.2	Montagem e calibragem do aparato experimental utilizado nos experimentos de briquetes.....	17
6.2.3	Experimentos de introdução dos briquetes no aço líquido utilizando-se o aparato experimental.....	19
6.2.4	Experimentos Preliminares	20
6.3	Ensaios de injeção.....	21
6.3.1	Montagem e calibragem do aparato experimental utilizado nos ensaios de injeção	22
6.3.2	Procedimentos utilizados nos experimentos de injeção dos resíduos no aço líquido utilizando o aparato experimental.....	24
6.3.3	Experimentos com cadinhos de grafite	25
6.4	Dificuldades encontradas durante os ensaios	27
7	Resultados e Discussão	30
7.1	Experimentos de introdução de briquetes de resíduos no aço líquido.....	30
7.2	Experimentos de injeção no aço líquido	30
	Bibliografia	31

1 Introdução

No Brasil e no mundo, a preocupação com o meio ambiente tem crescido consideravelmente. Com isso, as indústrias têm investido cada vez mais em processos que diminuam a emissão de gases e produção de resíduos. Para essa tarefa, tornou-se necessário o investimento em pesquisa e desenvolvimento visando reciclagem, reaproveitamento e reuso.

A indústria siderúrgica tem uma forte preocupação nessa área, já que seus produtos podem ser 100% reciclados, diminuindo o consumo de matérias-primas e insumos que causam grande impacto ao meio ambiente.

Em 2006, o mercado mundial de aço teve um forte crescimento de produção e demanda pelo quinto ano consecutivo. O aumento da produção mundial de aço bruto foi de 65,3% em dez anos. De 2005 para 2006, o aumento foi de 8,8%, ou seja, 1239,5 milhões de toneladas, o terceiro ano consecutivo de produção acima de 1 bilhão. A China e a região asiática foram as maiores responsáveis por esse aumento, tendo a primeira produzido 418,8 milhões de toneladas em 2006 e superado o Japão e a Rússia em exportações^(1,2). A figura 1⁽¹⁾ ilustra o crescimento da China frente às outras regiões do mundo. Em uma década ela praticamente triplicou sua produção e diminuindo o papel da Europa e das Américas do Sul e do Norte.

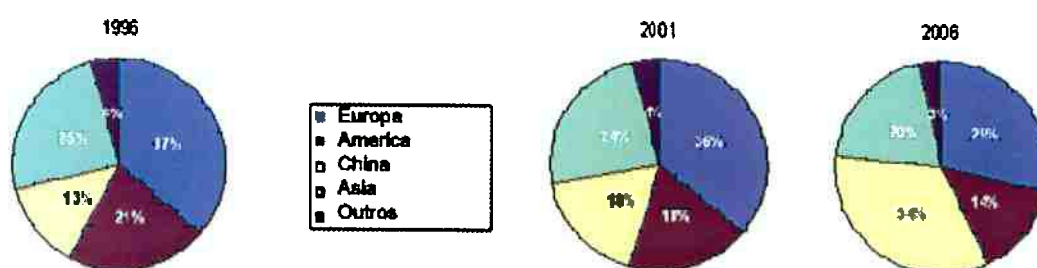


Figura 1-Produção mundial do aço bruto em 1996, 2001 e 2006. ⁽¹⁾

No ano de 2006 houve um decréscimo de produção de 2,2%, no Brasil, segundo o Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS), em relação ao ano de 2005, levando o país a ocupar a décima posição no ranking mundial, tabela 1⁽¹⁾. No entanto, a produção do Brasil ficou em 30,9 milhões de toneladas de aço bruto produzido.

Apesar da queda em 2006, há previsões de que o Brasil possa produzir em 2010 cerca de 50 milhões de toneladas devido aos investimentos realizados no setor ⁽²⁾. Isso aumentaria a produção de resíduos provenientes do processo.

Tabela 1-Ranking dos 10 maiores produtores de aço bruto do mundo ⁽¹⁾

Posição 2006	Posição 2005	País	2006	2005	% de 2006 em relação a 2005
1	1	China	418,8	355,8	17,7
2	2	Japão	116,2	112,5	3,3
3	3	EUA	98,5	94,9	3,8
4	4	Rússia	70,6	66,1	6,8
5	5	Coréia do Sul	48,4	47,8	1,3
6	6	Alemanha	47,2	44,5	6,1
7	7	Índia	44,0	40,9	7,6
8	8	Ucrânia	40,8	38,6	5,7
9	10	Itália	31,6	29,4	7,5
10	9	Brasil	30,9	31,6	-2,2

O aumento da produção de aço, inclusive de aço inoxidável, trouxe uma elevação na produção de poeiras, lamas e escórias que são geradas durante o processo de fabricação. Esses resíduos têm sido motivo de muita preocupação para as siderúrgicas, pois contêm alto teor de cromo, ferro e níquel que são considerados resíduos perigosos, segundo a legislação brasileira, e têm que ser depositados em locais apropriados^(3,4,5,6,7,8). A disposição em locais específicos desses materiais onera os custos de produção, pois são distantes de onde foram produzidos, não podem ser depositados sem tratamento prévio e tem custo de manutenção bastante elevado^(3,4,9).

As legislações de disposição de resíduos industriais estão sendo modificadas em metais pesados presentes. A maior parte destes materiais têm sido estabilizadas antes de serem descartadas. Essa estabilização consiste em solidificação ou fixação, convertendo a poeira em um sólido não-perigoso⁽⁹⁾. Caso esse resíduo não tenha sido previamente tratado, pode se tornar um risco ambiental devido à mobilidade de elementos tóxicos⁽¹⁰⁾.

O resíduo brasileiro difere do resíduo mundial em composição. A maior parte do aço utilizado, principalmente Europa e Estados Unidos, são aços carbono galvanizados, gerando sucata rica em zinco e, quando adicionada ao banho, enriquece o resíduo com este elemento também. No Brasil, a utilização de aços galvanizados não é tão intensa, havendo pouca disponibilidade de sucata deste material, sendo os resíduos brasileiros constituídos basicamente de ferro, cromo e níquel⁽¹¹⁾.

Para diminuir os custos de produção e, por consequência, o volume de resíduos gerados, as indústrias têm investido cada vez mais em pesquisas que tornem possíveis a recuperação de parte dos metais contidos, retornando ao processo de fabricação⁽⁴⁾.

Existem vários processos cujo principal objetivo é a reciclagem do metal contido no resíduo, porém nenhuma das soluções são econômica e ambientalmente viáveis. O controle operacional de formação das poeiras e lamas diminui o montante gerado e facilita sua manipulação para seguir rotas de reciclagem ou outros fins. Além da diminuição da quantidade a ser reciclada, diminui-se, também, a perda de metal na rota de produção⁽¹²⁾.

Conhecendo-se o mecanismo de formação da poeira e como os parâmetros do processo afetam o mesmo, é possível controlar a geração e diminuir o impacto por ela gerado^(11,12).

A composição dos resíduos dos fornos elétricos a arco é variável, pois dependem, além da sucata utilizada, do tipo de aço que será produzido, condições de operação e procedimentos⁽¹³⁾.

2 Normas sobre Resíduos

A legislação brasileira que trata dos resíduos são as normas NBR, Normalização Brasileira de Resíduos, classificadas pela ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. São quatro normas que abordam o tema, porém cada uma com sua respectiva abordagem explicitada na tabela 2.

Segundo a norma brasileira NBR 10004⁽⁵⁾, resíduos sólidos são aqueles encontrados no estado sólido ou semi-sólido, resultantes de atividades da comunidade, indústria, doméstica, hospitalar, agrícola, de serviços e varrição. Inclui-se o lodo proveniente de tratamento de água, equipamentos e controle da poluição.

Tabela 2-Tópicos abordados pela NBR, ABNT

NBR	Tópico
10004 ⁽⁵⁾	Resíduos Sólidos - Classificação
10005 ⁽⁶⁾	Lixiviação de Resíduos – Procedimento
10006 ⁽⁷⁾	Solubilização de Resíduos – Procedimento
10007 ⁽⁸⁾	Amostragem de Resíduos – Procedimento

Os resíduos também são classificados de acordo com sua periculosidade que, conforme suas características, podem oferecer riscos à saúde pública e/ou riscos ao meio ambiente. A norma citada anteriormente classifica os resíduos em três grupos denominados classes, indicadas na tabela 3.

Tabela 3-- Classificação dos resíduos conforme NBR 10004⁽⁵⁾

Classe dos Resíduos	Classificação
Classe I	Perigosos
Classe II a	Não-Inertes
Classe II b	Inertes

Os resíduos classe I, considerados perigosos, têm essa determinação depois de avaliados quanto à sua inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade em patogenicidade.

A classificação de resíduos perigosos é formada pelos contaminantes químicos, incluindo produtos orgânicos, metais pesados, como cromo, cádmio, chumbo, entre outros produtos.

A sua deposição em aterros ainda é possível, visto que ainda há lugar para esse tipo de resíduo. Porém seu custo é oneroso para as indústrias porque estes depósitos estão distantes de seus centros de geração, sendo de alto custo para ser feito seu transporte até o local, bem como o gasto com a manutenção em locais apropriados que são isolados e têm que ser monitorados freqüentemente para que não haja nenhum tipo de impacto ambiental.

Os metais pesados serão de importância maior neste trabalho porque são eles os componentes de poeiras e lamas geradas na indústria do aço.

Na legislação vigente há limites nos teores de cada metal estipulados para o seu descarte, segundo as normas NBR's 10005⁽⁶⁾ e 10006⁽⁷⁾.

3 Fabricação do Aço Inoxidável

O forno utilizado na fabricação do aço inoxidável é o Forno Elétrico a Arco, figura 2⁽¹⁴⁾. A função deste tipo de forno é basicamente fusão de sucata e ligas, redução pela escória, remoção do enxofre e ajuste de composição que será realizado no conversor ou conversores^(15,16). Sua fonte de energia são os eletrodos de grafita que formam um arco entre estes e a carga metálica. Este forno é carregado com sucata, ligas e agentes formadores de escória, como a cal e o calcário⁽¹⁵⁾. O carbono, que é o principal problema, depende do material bruto que será carregado o forno. Se há falta de sucata de aço inoxidável, mais ferro-cromo de alto carbono terá que ser utilizado, aumentando a taxa de carbono do banho. Outros elementos como o cromo, o molibdênio e níquel são ajustados para que sua composição seja a mais próxima do produto final desejado^(15,16). O problema do excesso de carbono no banho é sua remoção. Quando se está produzindo aços contendo cromo pode-se haver oxidação do mesmo ao invés do carbono, perdendo-se cromo na escória. Para que o carbono seja reduzido, as temperaturas de trabalho no FEA são acima de 1700°C. O carbono residual do banho será retirado no conversor⁽¹⁶⁾, processo posterior à fusão.

Do FEA, o banho vai para o conversor. Os conversores podem ser o AOD (*Argon Oxygen Decarburization*), figura 3⁽¹⁷⁾, ou o VOD (*Vacuum Oxygen Decarburization*), figura 4⁽¹⁸⁾. No conversor, o banho sofre o refino secundário, que consiste em: descarburização, desfosforação, desgaseificação, adição de elementos especiais, acerto da composição, flotação de inclusões, redução da escória e dessulfuração⁽¹⁵⁾. No conversor AOD, o oxigênio e o gás inerte (argônio ou nitrogênio) são injetados através de ventaneiras ou lança, no fundo da panela e de topo, para a descarburização do aço, livre da escória do FEA, redução da escória e refino^(15,16). A injeção de nitrogênio tem suas desvantagens porque pode elevar o nível deste no banho⁽¹⁹⁾. Por isso, sua injeção é feita no início da corrida, por este ter um custo menor que o argônio, e injeta-se argônio no final da corrida para a remoção do nitrogênio⁽¹⁹⁾. A injeção da mistura de gases faz com que a pressão parcial de CO seja reduzida, induzindo a descarburização. A composição da mistura varia de acordo com a composição do banho conforme a atividade do carbono

diminuiu⁽¹⁶⁾. Caso esse processo não seja feito, o cromo poderá ser perdido também por oxidação, já que este elemento tem bastante afinidade com o oxigênio(B).

O conversor VOD é muito similar ao conversor AOD, porém não há adição de gases inertes misturados com o oxigênio pela lança de topo. A injeção de argônio é feita pelo fundo da panela para a agitação do banho. Neste conversor há redução da pressão interna do vaso, diminuindo a pressão parcial dos gases do banho, auxiliando na sua remoção, porém de um modo diferente, para minimizar a oxidação do cromo⁽¹⁹⁾. A taxa de injeção de oxigênio é controlada pela capacidade do sistema de vácuo e para que o respingo de metal seja o mínimo possível.

A produção dos aços inoxidáveis envolve de dois a três processos: processos Dúplex e Triplex ⁽²⁰⁾. Os dois processos consistem basicamente em se fazer a fusão no FEA e o refino secundário no conversor AOD ou VOD, sendo que no processo Triplex, após o FEA, há uma combinação dos dois conversores, consequência das vantagens que cada um dos conversores proporciona no refino do aço.

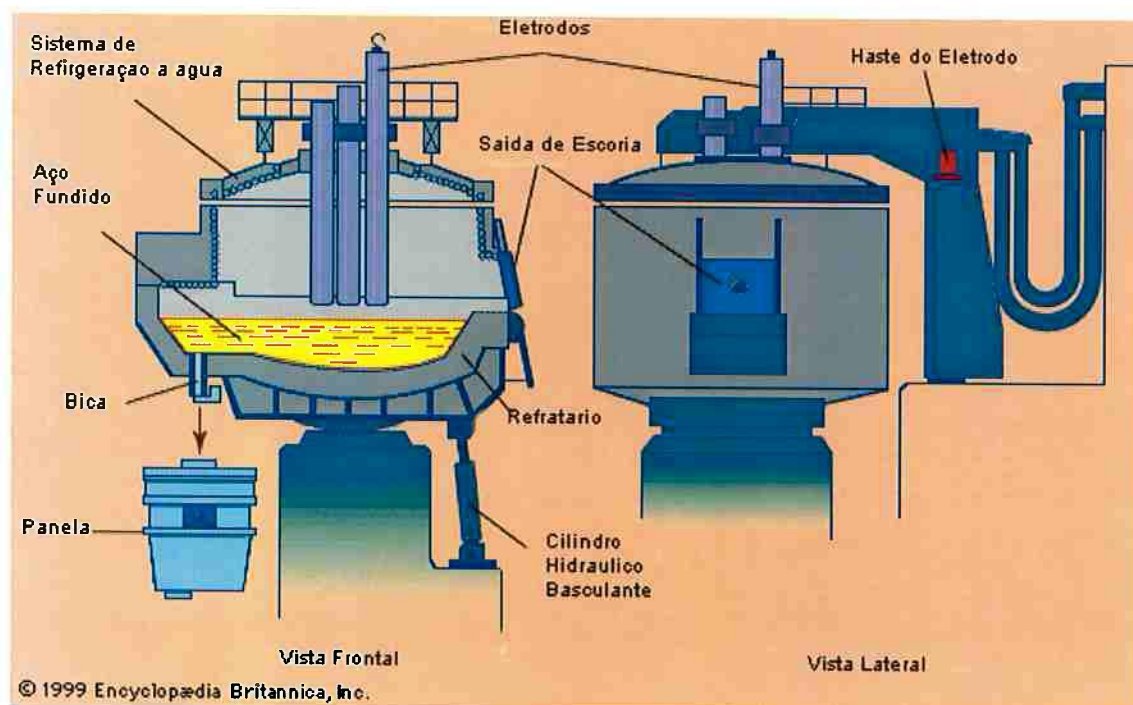


Figura 2-Esquema do Forno Elétrico a Arco⁽¹⁴⁾

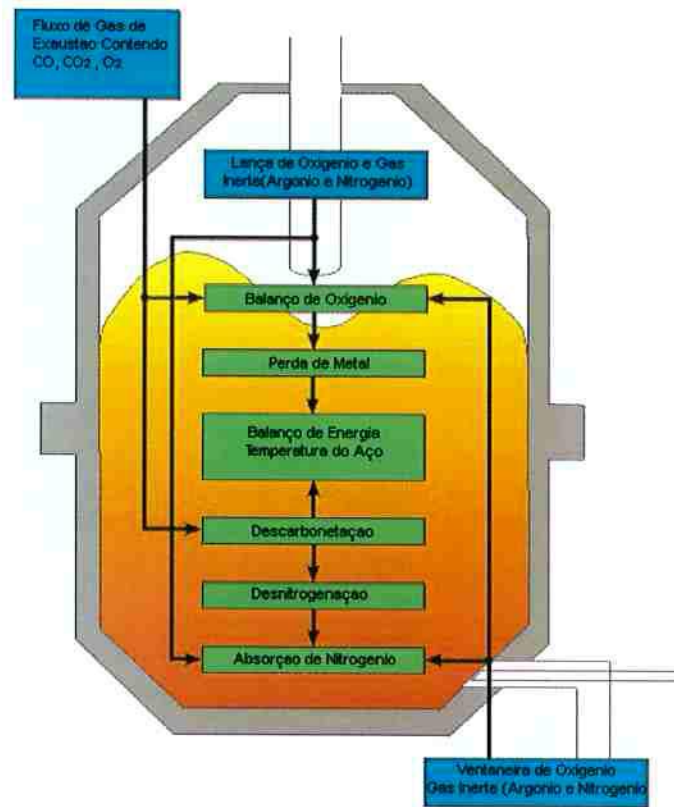


Figura 3- Conversor AOD ⁽¹⁷⁾

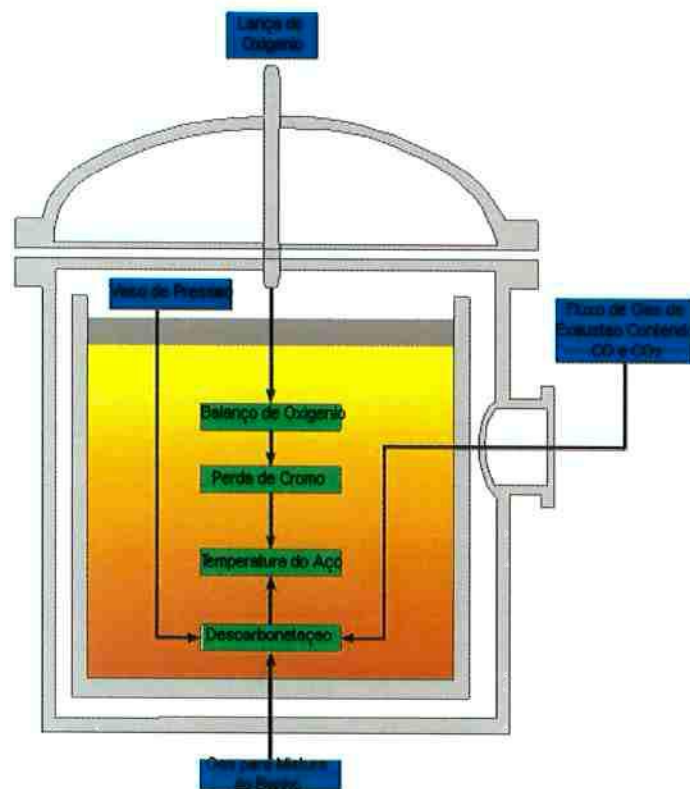


Figura 4- Conversor VOD ⁽¹⁸⁾

4 Principal Mecanismo de Geração de Poeiras:

A injeção de gases em banhos metálicos é uma operação básica em processos metalúrgicos para aumentar o poder calorífico do banho, transferência de massa e acelerar reações químicas. Se os gases injetados não forem completamente consumidos no banho, podem eventualmente escapar pela superfície do banho pela eclosão de gotículas e respingos⁽²¹⁾.

O conhecimento sobre a relação entre o fluxo de gás, propriedades físicas do líquido e a quantidade e distribuição granulométrica das gotículas são de grande importância para a minimização da geração de poeira e otimização de poder calorífico e transferência de massa entre o gás e o banho⁽²¹⁾. A produção de aço inoxidável produz entre 15 e 25 kg de poeiras por tonelada de aço^(22,23,24). A poeira coletada em filtros-manga no final do sistema de extração de fumos é o produto final de uma série de fenômenos, como emissão de partículas pelo banho metálico, transporte pelo fluxo de gás nos sistemas de extração de fumos, entre outros^(22,23,24).

Essas partículas têm diâmetro menor do que 20 μm , sendo 80% abaixo de 2 μm ⁽²²⁾. Algumas gotas maiores retornam ao banho, enquanto outras podem aderir à parede do forno⁽²¹⁾. As gotículas menores são carregadas pelo sistema de extração de fumos e coletadas em unidades de despoeiramento⁽²¹⁾.

Foram identificados dois mecanismos principais de formação de poeiras^(22,23,24,25). A primeira etapa consiste na emissão de precursores de poeiras que correspondem à formação, dentro do recipiente do forno, de vapores, gotas líquidas e partículas sólidas^(22,23,24). Numa segunda etapa, esses precursores se transformam em poeiras pela aglomeração e transformações físico-químicas ao longo do circuito de captação^(22,23,24).

Devido às diferentes fontes de precursores, somente a volatilização de solutos contidos no banho, figura 4⁽²³⁾, mecanismos 1 e 1', pelo rompimento das bolhas de monóxido de carbono saídas da descarburização do banho de aço, mecanismo 3^(22,23,24) participam de modo essencial na formação da poeira.

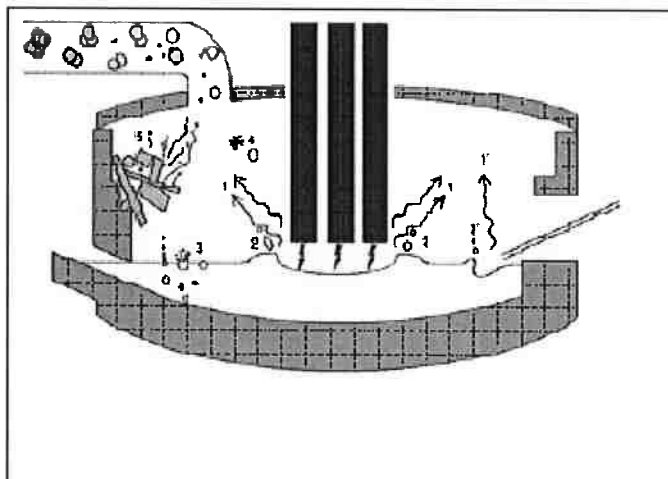


Figura 5 Principais Mecanismos de Emissão de Poeiras⁽²³⁾

Em seguida, os precursores podem se transformar fisicamente: condensação de vapores, solidificação rápida dos finos projetados em contato com uma atmosfera mais fria, aglomeração e coalescência de partículas sólidas e líquidas para formar partículas mais grossas^(22,23,24).

Os precursores podem então evoluir pela reação química, por exemplo, oxidação, com o carregamento gasoso, os quais variam a composição e a temperatura e, possivelmente, podem reagir com outras partículas precursoras^(22,23,24).

A emissão de finos pelo mecanismo de rompimento de bolhas de CO é um fenômeno preponderante, pois é responsável por cerca de 60% das partículas emitidas, sendo que a volatilização corresponde a 27% do total^(22,23,24).

A eclosão de uma bolha de gás na superfície de um líquido ocorre em três etapas. Ao se aproximar da superfície, a bolha levanta um filme líquido que afina progressivamente sob o efeito da ascensão da bolha e depois por drenagem, quando a bolha atinge a posição de equilíbrio.

Assim que o filme líquido atinge uma espessura crítica, a ruptura produz o que provoca a desintegração do filme em finas gotículas chamadas de gotículas de filme^(22,23,24). Depois do rompimento do filme, a cavidade resultante na superfície do líquido se fecha outra vez, provocando a impulsão de um jato suscetível de dar nascimento, pela desintegração, de gotas de jatos, figura 5⁽²³⁾.

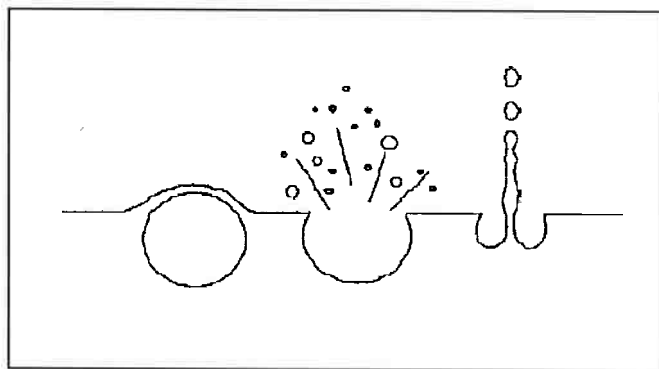


Figura 6 Etapas da Eclosão de uma Bolha de Gás⁽²³⁾

A vazão de gás também é importante no processo de formação de bolhas. A ascensão de gases do líquido pode alcançar a superfície tanto como bolhas simples, grupos de bolhas (espuma) ou na forma de canais gasosos. A seqüência característica é observada quando a velocidade linear do gás da superfície aumenta. Em cada caso, a interação do escape do gás com o líquido causa expulsão de líquido⁽²¹⁾.

Quando uma bolha simples alcança a superfície do banho, eventualmente rompe o filme da bolha causando pequeníssimos filmes formadores de gotas^(21,22,23). A cavidade da bolha colapsa causando uma onda que resulta em um jato central de líquido direcionado para cima chamado de jatos de gotas, os quais são tão grandes quando os filmes de gotas^(21,22,23,24).

Em um fluxo de gás maior, um jato gasoso é observado, resultando em respingos muito maiores. A formação de grupos de bolhas e bolhas grandes são fenômenos intermediários entre a bolha simples e o canal de gás⁽²¹⁾, figura 6⁽²¹⁾.

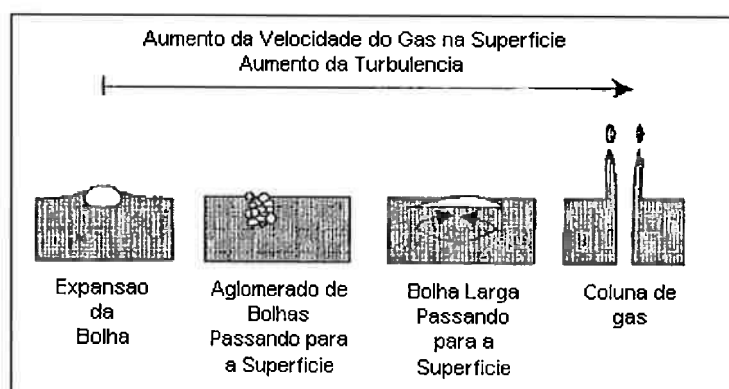


Figura 7 Influência do Fluxo de Gás no Banho⁽²¹⁾

5 Redução do Óxido de Cromo

Os aços inoxidáveis têm como um dos elementos de liga mais importantes o cromo⁽²⁶⁾. A formação de escória na produção desses aços é a variável mais importante, porque as características do metal dependem da composição e da basicidade da escória formada⁽²⁷⁾. A escória formada tem como principais constituintes a sílica, SiO_2 , o óxido de cálcio, CaO , e o óxido de alumínio, Al_2O_3 ⁽²⁷⁾. A concentração de óxido de cromo neste sistema ternário é independente da concentração de alumina, mas bastante dependente da concentração de sílica⁽²⁸⁾.

Durante a etapa de descarburização, a escória tem condições oxidantes⁽²⁶⁾. A injeção de oxigênio oxida o cromo primeiramente para, em seguida oxidar o carbono dissolvido ou sólido contido no banho, produzindo gás CO . A oxidação preferencial do cromo deve-se à afinidade do cromo pelo oxigênio injetado. Este óxido formado vai para a escória, carregado pela bolha de gás formada pelo gás injetado e oxidará o carbono^(26,29,30,31,32,34). O processo metalúrgico é influenciado diretamente pela solubilidade do cromo que, quanto mais alta, maior a perda de cromo para a escória^(26,29). A oxidação é controlada pela transferência de massa de cromo pelo gás ou transferência de massa na fase líquida na interface metal/gás⁽²⁹⁾. Devido a essa perda de cromo na escória, a redução do óxido de cromo é muito importante na produção deste tipo de aço⁽²⁶⁾.

A redução do óxido tem influências da temperatura, da basicidade da escória e da quantidade de agente redutor⁽²⁶⁾. A basicidade é definida como a razão entre óxidos básicos, como o óxido de cálcio, e óxidos ácidos, como a sílica⁽²⁷⁾. A redução aumenta como aumento da basicidade, pois a solubilidade do óxido de cromo diminui, sendo controlada pela transferência de massa de oxigênio pela interface metal/escória^(26,33). As mudanças na basicidade podem afetar a transferência de massa das espécies da escória⁽²⁹⁾. O equilíbrio da reação de redução é atingido mais rapidamente quanto maior a basicidade da escória⁽³³⁾. Porém, equilíbrio é atingido independente da basicidade⁽³³⁾. A basicidade determina a viscosidade da escória e baixa viscosidade beneficia a transferência de massa^(26,30,31,34). Altas viscosidades dificultam a difusão e a transferência de massa, diminuindo a taxa de redução⁽²⁸⁾. Quanto maior o teor de agente redutor, maior a redução e, portanto, maior a concentração de cromo no aço líquido⁽²⁶⁾.

A temperatura de fusão da escória também é afetada pela sua basicidade, sendo que o aumento da basicidade diminui a temperatura de fusão⁽²⁷⁾. Com o aumento da temperatura do banho, a taxa de redução do óxido de cromo aumenta, porém, em temperaturas abaixo de 1450°C, há somente uma pequena formação de fase líquida, desacelerando a reação de redução do óxido⁽³⁴⁾. Altas temperaturas favorecem termodinamicamente as reações de redução, pois estas são de natureza endotérmica e aumentam a difusão nas fases líquidas e sólidas⁽³²⁾.

Na redução silicotérmica, é adicionado ferro-silício, que é conhecido como um redutor eficiente, porque o silício é o principal agente redutor⁽²⁶⁾. A adição de silício auxilia na formação de uma escória líquida no início da reação, auxiliando na redução do óxido de cromo^(31,34). O cromo é reduzido da escória pelo silício que reage com o oxigênio proveniente do óxido, formando sílica que vai para a escória⁽²⁶⁾. Quanto maior a basicidade da escória e maior o conteúdo de ferros-liga, menor é o equilíbrio de distribuição de cromo entre metal e escória, levando a uma maior recuperação do elemento⁽²⁶⁾.

6 Metodologia

Neste tópico serão descritos as características dos resíduos e os ensaios com briquetes e de injeção que foram realizados no Hall Tecnológico do Departamento de Engenharia de Materiais e Metalurgia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

6.1 Característica do resíduo e redutores⁽²⁰⁾:

O resíduo utilizado neste trabalho foi o resíduo LV. Este resíduo provém do processo VOD (Vacuum Oxygen Decarburization) e foi chamado de LV, pois é um resíduo do tipo lama (L), gerado por este processo VOD (V).

Existem outros tipos de resíduos gerados na produção do aço inoxidável, que provêm de diferentes etapas da fabricação do mesmo, tabela 4⁽²⁰⁾, como fusão de sucata e ligas e refino do aço nos conversores. Estão em forma de poeiras e lamas, mas, no caso deste trabalho especificamente, nem todos os resíduos foram estudados. Esses resíduos são provenientes de indústrias brasileiras produtoras do aço inoxidável.

Tabela 4-Tipo e local de coleta do resíduo⁽²⁰⁾

Tipo de Resíduo	Local de coleta ou geração do resíduo
Poeira	FEA – Câmara de mistura
Poeira	FEA – Filtros de mangas
Poeira	Conversores LD e MRP-L - Filtros de mangas
Lama	Conversor AOD – Sistema de limpeza de gases
Poeira	Conversor AOD – Filtros de mangas
Lama	Esmerilhadeira – Filtros de mangas
Lama	Processo VOD

A caracterização dessa lama foi feita por Nolasco ⁽²⁰⁾, por diversas técnicas, sem sofrer qualquer tratamento físico, químico ou mecânico, sendo somente feita a retirada da umidade, feita em estufa, a 100°C, obtendo-se poeiras dos mesmos. Mesmo aqueles em forma de lama, após a retirada da umidade, ficavam em forma de poeira.

Para a caracterização foram utilizadas diversas técnicas:

- Análise química;
- Análise granulométrica;
- Densidade;
- Difração de raios-X;
- Microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- Análise de microrregiões por dispersão de energia (EDS).

A composição química do resíduo e do redutor (Fe75Si) utilizados nos experimentos estão listados na tabela 5. A cal tem pureza laboratorial de 99,5%. Outro redutor utilizado foram cadinhos de grafite com 99% de pureza, indicados na compra. Não há especificações sobre as impurezas contidas no cadinho.

Tabela 5- Composição química dos resíduos e redutores

Elemento	Resíduo LV (teor em massa) ⁽²⁰⁾	FeSi75 (teor em massa) ⁽²⁰⁾	Cadinho (%)
Al	-	0,420	-
Ca	0,38	0,930	-
C	1,20	0,048	99,0
Cl	0,95	-	-
Cr	13,40	-	-
F	0,01	-	-
Fe total	51,30	-	-
Fe metálico	0,10	-	-
Mg	0,05	-	-
K	2,66	-	-
Mn	9,38	-	-
Na	2,05	-	-
Ni	2,93	-	-
P	0,03	0,032	-

Elemento	Resíduo LV (teor em massa) ⁽²⁰⁾	FeSi75 (teor em massa) ⁽²⁰⁾	Cadinho (%)
Pb	0,15	-	-
Si	0,93	70,560	-
S	0,10	0,007	-
Ti	-	0,033	-
Zn	0,31	-	-

6.2 Ensaios

Inicialmente foi feito o peneiramento de todos os componentes, para que tivessem a mesma granulometria. Foram utilizadas peneiras de 40 mesh, 60 mesh e 100 mesh para o resíduo, a cal e o redutor. Após a separação granulométrica, os materiais foram acondicionados em recipientes para utilização posterior.

6.2.1 Ensaios com briquetes

Os briquetes eram compostos de poeira, cal e redutor FeSi75. As massas dos componentes dos briquetes foram apuradas, homogeneizadas e introduzidas no molde de aço para ser levado à prensa. Na prensa, aplicou-se, no conjunto, uma pressão de 14,5 MPa, por 5 minutos. Após esse tempo, o sistema foi aliviado e o briquete retirado do molde com cuidado, já que não foi utilizado ligante, para avaliação da massa final.

A avaliação da massa final é necessária devido à perda de massa na etapa de passagem do resíduo do homogeneizador para o molde metálico.

O molde possui 15 mm de diâmetro interno e a altura dos briquetes era entre 7 a 12 ± 2 mm.

Para a massa de resíduo utilizada em cada briquete foi calculada a massa de redutor (FeSi75), baseada na composição química e na forma como os óxidos se encontravam no mesmo, sendo considerada a redução completa dos óxidos FeO, Cr₂O₃, NiO e P₂O₅, que seriam reduzidos pelo redutor.

Para a massa de redutor e cal, foram consideradas também as basicidades binária das escórias desejadas para os experimentos, definida como CaO/ SiO₂, para os valores de 0,5; 1 e 1,5. Apesar de haver sílica e cal no resíduo, houve

necessidade de acréscimo da última para o ajuste das basicidades desejadas e considerando a escória formada quando da adição do briquete no banho de aço líquido.

Os teores de cada componente dos briquetes estão listados na tabela 6.

Tabela 6 Composição dos Briquetes

Basicidade	Resíduo	FeSi75	Cal
0,5	78,1	21,5	0,4
1,0	77,1	21,2	1,7
1,5	77,5	21,3	1,2

A massa de resíduo dos briquetes foi fixada em 30g cada, sendo que a massa de cal e redutor depende da basicidade para a qual o ensaio está determinado. Não houve outro tipo de redutor utilizado nos experimentos, além de não ter sido adicionado redutor e nem cal em excesso, sendo somente adicionado a quantidade estequiométrica necessária para a redução dos óxidos contidos no resíduo. Com isso, a massa final de cada briquete é variável de acordo com a massa de redutor/cal acrescida na massa de resíduo.

Foram fabricados três briquetes para essa etapa, sendo cada um em uma basicidade distinta. Estes briquetes tinham que ser feitos no dia do ensaio, ou até no máximo no dia anterior, visto que, com as tensões acumuladas nos mesmos, eles se desfaziam com facilidade ao serem manuseados.

6.2.2 Montagem e calibragem do aparato experimental utilizado nos experimentos de briquetes

Para essa primeira etapa, foi utilizado um forno tubular horizontal, marca Lindberg Blue, modelo STF54434C, temperatura de trabalho até 1700°C, com resistências como elementos de aquecimento de dissiliceto de molibdênio. Foi feita uma alteração principal que é a posição das resistências, para que o forno fosse usado na posição vertical.

O forno foi conectado a um controlador de temperatura Lindberg Blue, modelo CC59256PCOMC, que pode trabalhar com até 16 programas. A tensão é de 208/240V, frequência de 50/60 Hz e potência de 5000W. Suas dimensões são 406 mm x 483 mm x 559 mm, largura, comprimento e altura, respectivamente. Seu orifício, por onde se coloca um tubo cerâmico é de 76,2 mm. A massa total do forno é de 43 kg. O termopar utilizado era do tipo B.

A figura 7 mostra o conjunto do forno vertical, controlador de temperatura e estrutura de aço utilizado nos experimentos de introdução de briquetes no banho de aço líquido.

No interior do forno foi introduzido, como já mencionado, um tubo de alumina com 99,7 de pureza, 808 mm de comprimento, 69 mm de diâmetro externo e 9 mm de espessura, funcionando como retorta, permitindo o controle da atmosfera interna do forno.



Figura 8 Forno de Resistência

As extremidades do tubo foram vedadas por dois flanges que possuíam abertura para:

- Entrada para gases inertes para o interior do aparato;
- Entrada para termopares;
- Entrada para coleta de amostra;

- Entrada para o amostrador;
- Saída para gases gerados e injetados na retorta;
- Visor.

Após a finalização da montagem, foi feito o levantamento térmico do conjunto, para a localização ideal do suporte do cadinho para os experimentos. O suporte é um refratário, apoiado numa base de aço inoxidável, ASTM 316, que se movimentava na vertical.

6.2.3 Experimentos de introdução dos briquetes no aço líquido utilizando-se o aparato experimental

Em cada experimento era feito o carregamento do cadinho de alumina com cerca de 400 g de aço e o cadinho era colocado no forno antes do início do aquecimento.

O aquecimento do forno era feito em uma taxa de 10°C por minuto até a temperatura desejada, e mantida por cerca de 1 hora e meia para sua estabilização. Este procedimento durava cerca de 4 horas. As temperaturas de ensaios eram de 1570, 1600 e 1630°C .

O argônio era acionado a cerca de 40 minutos antes da realização do ensaio para que a atmosfera se tornasse inerte por completo. A sua injeção era feita pela parte inferior do sistema, a uma vazão de 5 l/min., controlado por um rotâmetro, através de canais de aço inoxidável.

Quando o sistema estava com a temperatura estável, fazia-se a retirada da amostra 0 (zero), que serve para se ter controle da composição do aço no qual será adicionado o briquete e controle da incorporação do cromo no banho. Depois de retirada essa amostra, faz-se a adição do briquete no banho. O briquete, em contato com o aço, desfaz-se e dá-se início à reação, verificado pela fumaça formada pelos gases voláteis das reações químicas. Os tempos de retirada de amostras eram 30, 60, 90, 120, 300 e 600 segundos.

Finalizado o ensaio, um procedimento padrão tinha que ser seguido para manter o aparato em perfeitas condições de uso para o próximo ensaio. Consiste em resfriamento do forno a uma taxa de resfriamento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min.}$, interrompendo-se o fornecimento de gás argônio após a solidificação do banho e escória formada.

Quando a temperatura do forno estiver baixa, faz-se a retirada do cadinho de seu interior e posterior desligamento do controlador. A temperatura de retirada do cadinho tem que ser baixa, pois ele pode estourar e causar algum acidente sério.

A coleta das amostras é feita com um amostrador de sílica a vácuo, sendo introduzido no banho e retirado após o preenchimento completo do mesmo com amostra do banho. Esse amostrador é cilíndrico e possui em media 132 mm de comprimento e 4 mm de diâmetro, e sua massa é de cerca de 6,07 g em média.

A duração de cada experimento durava pouco mais de 8 horas, sendo que para se chegar a uma temperatura de 1700°C eram necessárias cerca de 4 horas, 1,5 h para a estabilização da temperatura, 30 min. para a realização do ensaio e mais 2 horas para a redução da temperatura.

As 4 horas necessárias para que se atingisse a temperatura de 1600°C deve-se ao fato de que, até 1400°, o aumento da temperatura seguia rigorosamente o programa do controlador, porém, acima desta temperatura, a taxa de aquecimento diminuía devido às perdas térmicas.

6.2.4 Experimentos Preliminares

No primeiro ensaio houve problemas com o aquecimento do aparato, visto que, o isolamento térmico do forno estava em péssimas condições. Foi utilizada uma manta térmica para o isolamento. A princípio a tarefa foi bem sucedida. O ensaio foi realizado, mas com a falta de experiência, nem todas as amostras foram retiradas nos tempos determinados.

Mesmo seguindo as recomendações de início e fim de experimento, houve problemas com as resistências do forno. Houve duas que trincaram, e com isso, tornaram-se inutilizáveis.

Foi necessário esperar o dia seguinte para a reposição das resistências, pois essas resistências são muito sensíveis e poderia haver mais quebras caso os procedimentos de resfriamento não fossem seguidos, e assim fazer outro ensaio.

O segundo ensaio nem foi possível ser feito. A resistência quebrou antes de chegar a 1500°C. Descobriu-se que o sistema de resfriamento da parte elétrica do

forno estava danificado, além de outros defeitos que não puderam ser diagnosticados no momento.

Com isso foi determinada a reforma do forno para que não houvesse mais problemas com ele.

O forno foi completamente desmontado para a troca dos ventiladores da parte elétrica. Verificou-se que também o refratário estava em péssimas condições. A manta isolante não era suficiente para dar continuidade aos trabalhos. Como havia outro forno horizontal sem uso, foram pegadas as melhores peças de cada um para a montagem de um bom sistema refratário.

Mesmo com as reformas feitas, o forno não tinha condições de ser utilizado, pois os problemas continuavam. Com isso, passou-se para outro projeto, o de injeção de resíduo.

6.3 Ensaios de injeção

As amostras para os ensaios de injeção eram preparadas somente com poeira e cal, pois o redutor foi modificado para o carbono. A poeira utilizada foi a mesma dos ensaios com briquetes, LV.

Os procedimentos para a preparação das amostras foram semelhantes também, ou seja, a adição de cal era a quantidade estequiométrica necessária para a redução dos óxidos contidos no resíduo. A quantidade de redutor não pode ser especificada. Sabia-se que estava sendo adicionada no banho pelo consumo dos cadinhos. Com isso, a massa final de cada experimento era variável de acordo com a massa de cal adicionada no redutor.

Assim como nos ensaios com briquetes, foi-se estipulada três basicidades distintas, sendo: 1, 3 e 5. Ao serem preparadas, as amostras eram colocadas em estufa a 100°C para a retirada completa da umidade dias antes de serem feitos os ensaios.

Para ser feita a injeção, foram utilizados tubos de alumina, de cerca de 80 cm de comprimento e ½ polegada de diâmetro, que eram conectados por uma mangueira de borracha na injetora e na saída de gás argônio.

6.3.1 Montagem e calibragem do aparato experimental utilizado nos ensaios de injeção

Foi utilizado o forno de indução, figura 8, da marca Inductotherm, modelo VIP-PT 100, de potência de 30kW e 9kHz de frequência. As dimensões do forno são: 900 mm de altura, 220 mm de diâmetro interno, 360 mm de diâmetro externo e 250 mm de profundidade. Houve necessidade de colocar uma tampa refratária, já que o forno não possui uma tampa própria. Essa tampa tem um diâmetro de 255 mm de diâmetro, 80 mm de altura e um furo passante de 4 mm de diâmetro. Apesar de já haver o furo passante, foi necessário fazer dois furos para que se passasse 2 tubos que estavam conectados na saída de argônio, para controle da atmosfera interna do forno, e outro para a passagem do tubo que estava conectado na injetora.

No início dos trabalhos, havia necessidade de ser feita uma preparação interna do forno com pedaços de grafite nos espaços vazios, além do cadinho, para aumentar o campo indutivo.

Posteriormente, foi verificado que este processo de preenchimento não estava dando os resultados desejados, ou seja, não estavam sendo obtidas as temperaturas desejadas. Foi decidido que deveria se utilizar um sucetor de grafite, com pureza mais baixa, para aumentar o campo indutivo. A não necessidade de pureza alta para o sucetor é que este não entra em contato com o banho, portanto, não será adicionado nas amostras como o cadinho. Os cadinhos de grafite e os sucetores utilizados nos processos eram usinados na própria Escola Politécnica, feita somente a compra de tarugos de grafite.

O sistema de injeção é composto por uma injetora de rosca sem fim, movimentada por um motor de 4 Cv, local para a alimentação do sistema e entrada de gás de arraste. Os esquemas do sistema, bem como, o percurso das amostras na injetora, estão mostrados na figura 9.



Figura 9 Forno de Indução

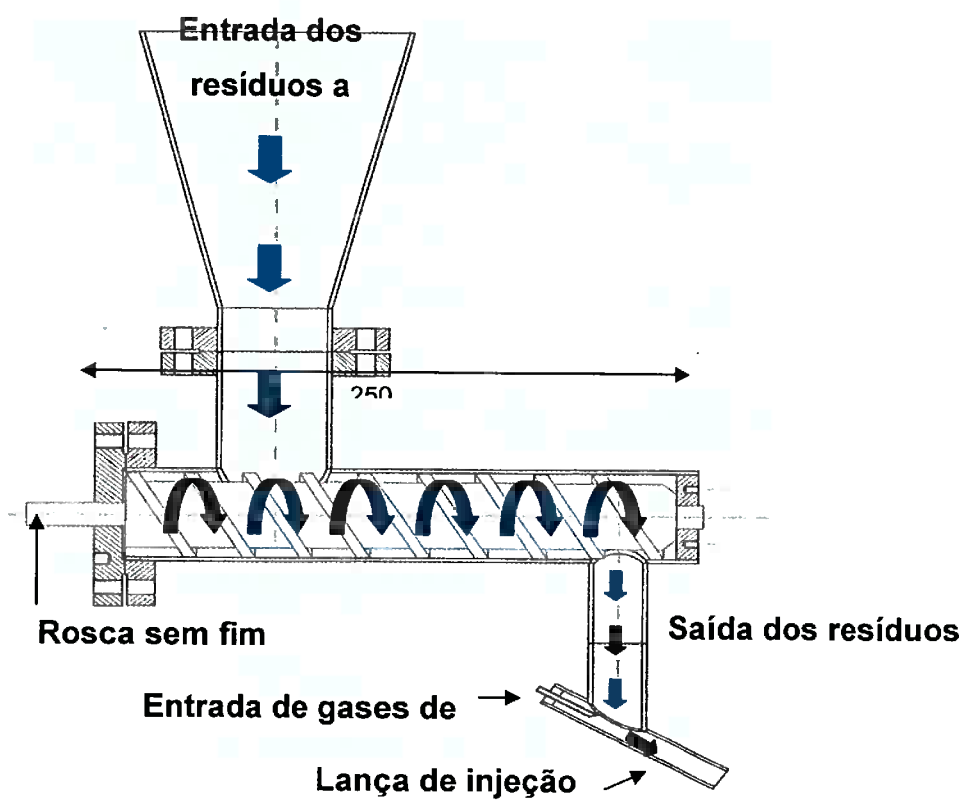


Figura 10 Esquema de Injeção

Para o começo de um ensaio, coloca-se o sucetor no forno e o cadinho de grafite dentro do sucetor. Neste cadinho está a amostra de aço ASTM1020, cerca de 400g. Tapa-se o forno e coloca-se a mistura de resíduo e cal na injetora antes de acionar a entrada de gás argônio. Existem duas entradas distintas para o argônio, injetado por duas lanças de alumina. Uma fica dentro do banho porque serve de gás de arraste para o resíduo e a outra entrada é para tornar a atmosfera no interior do forno inerte e evitar a formação de escória. Assim que o sistema estiver pronto, aciona-se a entrada do gás.

Quando o sistema está com a temperatura estabilizada, retira-se a primeira amostra, chamada de amostra 0 (zero) e dá-se início a injeção. O controle de tempo não é feito logo em seguida ao acionamento da injetora porque se leva um tempo para que o resíduo entre em contato com o banho e se dê o início da reação. O início é verificado na ocorrência da saída de gases do banho. A partir deste ponto, retiram-se amostras nos tempos: 30, 60, 90, 120, 300 e 600 segundos. As temperaturas de trabalho determinadas foram: 1570, 1600 e 1630°C. E as basicidades foram determinadas em 1; 3 e 5.

O tempo de ensaio é por volta de 1,5 hora para o primeiro ensaio do dia, já que tem que se aquecer todo o sistema para que se inicie a fusão do aço. Após o primeiro ensaio, pode-se aproveitar o forno ainda quente para fazer outros ensaios, caindo o tempo para 50 minutos.

A injeção do resíduo só é feita quando o banho já estiver na temperatura desejada de trabalho. O controle da temperatura é feito através de um pirômetro óptico.

6.3.2 Procedimentos utilizados nos experimentos de injeção dos resíduos no aço líquido utilizando o aparato experimental

Em cada experimento eram preparadas as amostras com dois dias de antecedência, no mínimo, para a eliminação da umidade em estufa a 100°C.

O ensaio era preparado com o carregamento do forno com o sucetor e o cadinho de grafite em seu interior. Este cadinho de grafite continha cerca de 400 g de aço ASTM 1020.

A mistura, que continha resíduo e cal, era despejada na entrada da injetora antes do acionamento da entrada de argônio.

O forno era então acionado e sua frequência era aumentada de 20 em 20 min. para aumento da temperatura até a temperatura desejada. O controle da temperatura era feito pelo pirômetro óptico.

Simultaneamente ao acionamento do forno, abria-se o sistema de gás argônio, a uma vazão de 6 l/min., controlado por um rotâmetro obtenção de uma atmosfera inerte na câmara interna, sendo injetado pela lança de alumina.

Quando o banho estava no início da fusão, era necessário um aumento da vazão de argônio para 12 l/min., porque com a vazão menor, o gás não tinha força suficiente e entupia a lança.

A primeira amostra a ser retirada é a amostra 0 (zero). Essa amostra era somente o aço do banho sem conter resíduo. Posteriormente era adicionada a mistura como acionamento da injetora. O tempo e retirada das amostras não era feito assim que a injetora era acionada, pois a mistura tinha q percorrer todo o sistema antes de se incorporar ao banho. Sua incorporação era verificada pela saída de gases devido às reações químicas que ocorrem. Neste momento dá-se início à contagem do tempo e retirada das amostras nos tempos estipulados.

Finalizado o ensaio, desliga-se o forno e faz a retirada do cadinho contendo o aço líquido. Para aproveitar o forno ainda quente, coloca-se outro cadinho iniciando os procedimentos acima citados.

6.3.3 Experimentos com cadinhos de grafite

Os experimentos iniciais serviram para calibração do aparato experimental. A princípio, foram comparadas as temperaturas indicadas pelo pirômetro e aquelas indicadas pelo Termopar tipo B. Como esse termopar alcança temperatura de no máximo de 1600°C, a calibragem foi feita até 1590°C para evitar a danificação do mesmo.

Nestes experimentos, foi aproveitado para se fazer as retiradas de algumas amostras. A princípio, os ensaios seriam iniciados à temperatura de 1500°C, mas foi verificado que nesta temperatura o banho ainda não estava completamente líquido.

Devido a isso, a temperatura de início dos experimentos foi determinada para 1570°C, 1600°C e 1630°C.

A vazão de argônio também é muito importante, já que é o gás que irá arrastar o resíduo para o banho e tornar o sistema inerte. O gás sai de uma mangueira que tem uma chave em forma de T para separá-lo para outras duas mangueiras. Uma delas será colocada diretamente no sistema, que servirá como gás inerte. A outra será conectada ao sistema de injeção para fazer o arraste do resíduo.

Nesse sistema de injeção há outra mangueira que conecta o bico injetor e a lança que será colocada dentro do banho durante o processo de fundição do aço. Por isso a importância de se controlar a vazão de gás. Se o gás sai com uma vazão muito alta, é possível haver projeção de material mesmo antes de se iniciar o ensaio, mudando todas as configurações do experimento. Mesmo que o gás não projete nenhum material antes do início, durante o experimento pode haver projeções, visto que, as reações que ocorrem são violentas e liberam muitos gases. Porém, a vazão de gás tem que ser suficiente para que não ocorra o entupimento da lança de injeção, já que isto impede o ensaio de ser realizado.

O gás inerte é necessário porque não é desejável escória durante o procedimento. Os problemas resultantes da escória são: dificuldade de se obter a temperatura real do banho, já que a escória e o banho têm temperaturas distintas e, ao se fazer a retirada as amostras, se o amostrador entra em contato com a escória, ele amolece, dificultando sua retirada, tanto com amostra, como do próprio banho, podendo ficar retido no banho. Se caso este amostrador fique no banho, ele diminui a basicidade da escória, aumentando sua viscosidade, por ele ser sílica pura, e alterando os parâmetros iniciais.

Houve a necessidade de se determinar a quantidade de vezes de procedimentos que o cadinho de grafite iria realizar sem se danificar. A principal danificação dos cadinhos é o consumo da parede. Como ele reage com o banho, por ser a grafite o redutor utilizado, há um consumo de cerca de 5% de massa de grafite por ensaio. Como cada ensaio tem 400g de aço, são cerca de 20g de grafite.

Para amenizar a perda de cadinhos, foi feita a adição de grafite em pó junto com o aço, porém o resultado não foi o esperado. Ao se fazer a retirada do banho do cadinho, verificou-se que o pó não havia sido consumido, tendo sido consumida parede do cadinho. Sendo assim, esta hipótese foi descartada.

Devido a isso, teve-se que determinar o número de ensaios máximo para os cadinhos sem haver perfurações. Esse número seria cerca de 3 ensaios, podendo ser utilizado 4 vezes, mas com perigo de perfurar o mesmo.

Outro fator que foi determinado nesta primeira etapa é a velocidade de injeção. A velocidade que está sendo utilizada no momento é de 2,75 g/min. de injeção.

6.4 Dificuldades encontradas durante os ensaios

No início dos trabalhos as variáveis foram determinadas de acordo com as ocorrências durante o processo.

As temperaturas inicialmente eram de 1550, 1600 e 1650°C. Verificou-se que à temperatura de 1550°C o banho ainda não estava completamente líquido.

Determinou-se uma nova temperatura de 1570°C. mas mesmo com essa nova temperatura, o banho ainda tinha uma viscosidade muito alta, dificultando a entrada e principalmente a retirada dos amostradores. Por isso a temperatura de 1570°C foi descartada restando somente 1600 e 1630°C. A temperatura foi baixada de 1650 para 1630°C em função da segurança, já que poderia haver projeções de material e rompimento brusco dos cadinhos, principalmente o de alumina, já que não se sabia como este iria se comportar durante os ensaios.

Quanto à basicidade, os ensaios mostraram que se ela for muito baixa, o pouco de escória formada não estaria suficientemente fluida para a retirada de amostras, retendo o amostrador e alterando os procedimentos preestabelecidos, como o tempo para a retirada das amostras.

A vazão de argônio foi determinada no princípio em 6 l/min. durante todo o ensaio, mas esta se mostrou insuficiente quando o aço estava líquido no sistema que estava ligado na injetora e funcionava como arraste. Esta insuficiência causou perda de lanças de alumina, uma vez que as lanças entupiam pela baixa pressão do argônio no metal líquido. Essa baixa pressão foi ocasionada porque o sistema de vazão de argônio dividia-se em dois na saída da conexão do gás no laboratório, tornando a vazão de entrada no banho menor do que aquela lida. Outro fato que diminuiu a vazão foi a mangueira que está ligada no sistema de arraste da injetora é que a entrada do gás por esse sistema também se dividia em dois, sendo uma que

descia para o banho e outra que subia para a injetora, por isso a vazão era insuficiente para superar a pressão metalostática do banho. A solução encontrada foi aumentar a vazão para 12 l/min. quando o banho estava perto da temperatura de fusão. Esta solução também não foi satisfatória, pois ao abrir-se o sistema de injeção, restos de ensaios anteriores foram encontrados em seu interior, o que pode ter contaminado vários outros ensaios. Isso foi observado ao desmontar a mesma para limpeza. Havia refluxo de amostra dentro da injetora. Além de afetar os ensaios, pode ter acontecido de não haver entrado amostra suficiente para que a redução do cromo tenha a eficácia esperada ou até mesmo não ter ocorrido a injeção.

Houve também muitas perdas de lanças de alumina. A princípio foi devido ao entupimento da lança pelo banho de aço líquido o que fez com que a vazão de gás fosse aumentada. Outro fator determinante para a perda de lanças foi o choque térmico que ocorre se a lança não estiver dentro do aço quando este atinge a temperatura de fusão. No início a lança era posicionada fora do cadinho, porém dentro do forno para que a diferença de temperatura não fosse muito grande. Contudo, ela se rompia no limite da superfície do banho pelo choque térmico devido à diferença de temperatura continuar sendo grande e o gás inerte entrar na temperatura ambiente, ou seja, ainda frio. Quando a lança já estava posicionada dentro do banho, não ocorria seu rompimento.

O congelamento do banho também ocorria neste processo de colocação da lança no banho porque o gás estando frio em contato com o banho fazia-o se solidificar.

Com cada cadinho de grafite eram possíveis três ou no máximo quatro ensaios. Acontecia porque o próprio cadinho era consumido como redutor no processo e sua parede ia se tornando cada vez mais fina. Houveram vários cadinhos perfurados durante os ensaios. Cada vez que um cadinho desses furava, era necessário retirar-se o sucetor para a retirada do aço que vazava para dentro do mesmo. Nessa retirada, os pedaços de grafite que estavam em seu entorno caíam para dentro do forno, impossibilitando sua remontagem no mesmo dia. Essa impossibilidade era por motivos de segurança, visto que esses pedaços ainda estavam em temperaturas muito elevadas para serem manuseados.

Nos ensaios, observou-se que a temperatura, mesmo estabilizada no início, diminuía com a injeção de resíduo. Contudo, esta perda de calor não afetava a sua

realização, visto que a temperatura era recuperada rapidamente nos primeiros segundos de ensaios.

O controle de temperatura do forno era feito pelo pirômetro óptico. Como não havia a possibilidade de se usar um termopar, podem ter acontecido falhas na leitura da temperatura real do banho. O termopar não pôde ser utilizado porque a temperatura máxima que ele suporta é de 1600°C e haveria temperaturas de trabalho acima desta, além de ter influência do campo indutivo do forno em questão. As falhas na leitura da temperatura do aço são devido à formação de escória, que impede a leitura dentro do banho, e reflexibilidade do banho de aço.

O forno também estava com problemas de refrigeração que foram sanados sem que houvesse tempo hábil para terminar os ensaios e as amostras serem enviadas para o laboratório para análise química. Como o forno desarmava por falta de pressão de água houve perdas de ensaios. Esse desarme, por várias vezes, ocorria em temperaturas altas e a sua retomada era muitas vezes demorada. Então o forno perdia calor muito rápido, resfriando seu interior, aumentando o tempo de experimento.

Outro motivo de desarme foi a falta de refrigeração da placa de circuitos responsável pelo acionamento do forno. Este problema foi solucionado instalando um ventilador próximo para resfriá-lo durante os experimentos.

7 Resultados e Discussão

7.1 Experimentos de introdução de briquetes de resíduos no aço líquido

Não foi possível enviar para análise nenhuma amostra, visto que houve problema com a conservação do forno. Ele estava sem condições de uso, por isso a mudança da metodologia do projeto.

Foram feitas duas tentativas, mas foram frustradas. As resistências não agüentaram e acabaram trincando durante os ensaios.

7.2 Experimentos de injeção no aço líquido

Houve problemas que, como o projeto ainda estava em fase de calibragem, os ensaios feitos foram para acertos das variáveis encontradas durante os experimentos. Devido a isso, os resultados obtidos não foram satisfatórios para o envio de amostras para a análise química dos mesmos.

Bibliografia

1. <http://www.worldsteel.org>. Acesso em Janeiro 2007.
2. <http://www.infomet.com.br>. Acesso em Janeiro 2007.
3. NOLASCO-SOBRINHO, P.J., TENÓRIO, J.A.S. Reciclagem da Poeira e Lama Geradas na Fabricação de Aço Inoxidável. Revista Escola de Minas, v.57, n.2, p. 121-127, abr/jun,2004.
4. NOLASCO-SOBRINHO, P.J., TENÓRIO, J.A.S. Utilização de um Aparato em Escala de Laboratório para o Estudo da Recuperação do Cromo Contido em Resíduos Gerados na Produção de Aço Inoxidável. Revista Escola de Minas, v.57, n. 3, p.177-182, jul/set, 2004.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10004: Resíduos Sólidos: Classificação. Rio de Janeiro. 1987
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10005: Lixiviação de Resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro. 1987
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10006: Solubilização de Resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro. 1987
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10007: Amostragem de Resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro. 1987
9. PALENCIA, I. ET AL. Recycling EAF Dust Leaching Residue to the Furnace: a Simulation Study. JOM, v. 51, n. 8, p. 28-32, ago, 1999.
10. LAFOREST, G.; DUCHESNE, J. Characterization and Leachability of Electric Arc Furnace Dust Made from Remelting of Stainless Steel. Journal of Hazardous Materials B, v.135, p. 156-164, 2006.
11. MACHADO, J.G.M.S. ET AL. Chemical, Physical, Structural and Morphological Characterization of the Electric Arc Furnace Dust. Journal of Hazardous Materials B, v. 136, p. 953-960, 2006.
12. NEDAR, L. Dust Formation in a BOF Converter. Steel Research, v. 67, n. 8, p. 320-327, 1996.

13. XIA, D.K., PICKLES, C.A. Microwave Caustic Leaching of Electric Arc Furnace Dust. *Minerals Engineering*, v. 13, n. 1, p. 79-94, 2000.
14. <http://cache.eb.com/eb/image?id=1544&rendTypeld=4>. Acesso em Novembro 2007.
15. ENGH, T.A. Principles of Metal Refining. In: Wijk, O. *Stainless Steelmaking in converter*, , Oxford University Press, New York, 1992, p.281-301
16. TAYLOR, C.R. *Electric Arc Furnace Steelmaking*. Warrendale, Iron and Steel Society, 1985.
17. http://www.bfi.de/en/fields_of_activity/process_automation_steelmaking/aod_kcbs_converter.htm. Acesso em Novembro 2007.
18. http://www.bfi.de/en/fields_of_activity/process_automation_steelmaking/process_control_for_the_vod_plant.htm. Acesso em Novembro 2007.
19. http://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter_2/2i_1.html. Acesso em Novembro 2007.
20. NOLASCO-SOBRINHO, P.J. Reciclagem de Poeiras e Lamas Provenientes da Fabricação de Aço Inoxidável. 2004. p. 138. Tese (Doutorado). Escola Politécnica Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.
21. HAHN, I., NEUSCHÜTZ, D. Ejection of Steel and Slag Droplets from Gas Stirred Steel Melts. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 29, n. 3, p. 219-232, 2002.
22. GUÉZENNEC, A.G. ET AL. Dust Formation by Bubble-burst Phenomenon at the Surface of a Liquid Steel Bath, *ISIJ International*, v. 44, n. 8, p. 1328-1333, 2004.
23. GUÉZENNEC, A.G. ET AL. Mécanismes de Génese de Poussières au Four Électrique à Arc D'Acier. http://www.mines.inpl-nancy.fr/wwwlsg2m/theme_recherche/gt1_procedes_elaboration/operation_recherche/poussiere.pdf. Acesso em Novembro 2007
24. GUÉZENNEC, A.G. ET AL. Dust Formation in Electric Arc Furnace: Birth of the Particles. *Powder Technology*, v. 157, p. 2-11, 2005.
25. MA, G., GARBERS-CRAIG, A.M. Cr (VI) Containing Electric Furnace Dusts and Filter Cake from a Stainless Steel Waste Treatment Plant: Part 2- Formation Mechanisms and Leachability. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 33, n. 3, p. 238-244, 2006.

26. GUTIÉRREZ-PAREDES, J, ET AL. Chromium Oxide Reduction From Slag by Silicon and Magnesium. *Steel Research Int.*, v. 76, n. 11, p. 764-768, 2005.
27. SONG, P.S. ET AL. Melting Characteristics of Metal Wastes in an Electric Arc Furnace. *J. Ind.Eng. Chem.*, v.12, n. 2, p. 248-254, 2006.
28. SIMBI, D.J., TSOMONDO, M.B.C. Aspects of Smelting Reduction of Chromite Ore Fines in $\text{CaO-FeO-Cr}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ Slag System by Carbon Dissolved in High Carbon Ferrochromium Alloy Bath. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 29, n. 4, p.271-274,2002.
29. FRUEHAN, R.J. Rate of Reduction of Cr_2O_3 by Carbon and Carbon Dissolved in Liquid Iron Alloys. *Metallurgical Transactions B*, v. 8B, p. 429-433, 1977.
30. PEI, W., WIJK, O. Mechanism of Reduction of Chromium Oxide Dissolved in the $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ Slag by Solid Carbon. *Scandinavian Journal of Metallurgy*, v. 22, p. 30-37, 1993.
31. NAKASUGA, T ET AL.. Reduction of Cr_2O_3 in a Solid Powder State and in $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ Slags by Fe-C-Si Melts. *ISIJ International*, v. 41, n. 9, p. 937-944, 2001
32. DEMIR, O., ERIC, R.H. Reduction of Chromite in Liquid Fe-Cr-C-Si Alloys. *Metallurgical and Materials Transactions B*, v. 25, p. 549-559, Aug., 1994.
33. TSOMONDO, M.B.C., SIMBI, D.J. Kinetics of Chromite Ore Reduction from $\text{MgO-CaO-SiO}_2\text{-FeO-Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ Slag System by Carbon Dissolved in High Carbon Ferrochromium Alloy Bath. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 29, n.1, p. 22-28, 2002.
34. NAKASUGA, T. ET AL. Recovery Rate of Chromium from Stainless Slag by Iron Melts., *ISIJ International*, v. 44, n.4, p. 665-672, 2004.