

2

Revisão Bibliográfica

2.1 Produção do Aço

O aço é um material básico para o processo de industrialização de um país e imprescindível para a produção de bens essenciais à sociedade. Sua participação está na ordem de 90% do consumo mundial de metais. Ele está presente, em tudo à nossa volta, em edificações, veículos, navios, ferrovias, aviões, motores, máquinas, implementos agrícolas e equipamentos diversos.

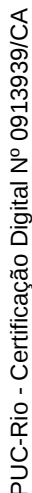
No processo de fabricação do aço, diversas são as rotas possíveis para a sua obtenção. As rotas mais difundidas são as Usinas Integradas e Usinas Semi-Integradas, onde a primeira tem como característica o emprego do minério de ferro e o coque como matérias-primas.

O Brasil é o maior produtor mundial de minério de ferro e o segundo maior exportador, só ficando atrás da Austrália. Por possuir a quarta maior reserva mundial de minério de ferro a rota de fabricação de aço que prevalece no Brasil é a integrada.

O processo de obtenção do aço via rota integrada decorre da redução do minério de ferro produzindo o ferro gusa ou ferro esponja. Há uma série de operações de transformações metalúrgicas. Basicamente pode-se dividir em quatro etapas: preparação das matérias-primas (minério de ferro e carvão mineral) nas fases de sinterização e coqueificação, produção do ferro-gusa, produção do aço (Forno e Forno Panela) e lingotamento.

As Usinas Semi-integradas tem como característica o emprego de sucata ferrosa e ferro gusa ambos no estado sólido. Como nas Usinas Integradas, ocorrem várias etapas de transformações metalúrgicas, que podem ser divididas em: preparação da sucata ferrosa (processamento Pátio de Sucatas), produção do aço (Forno e Forno Panela) e lingotamento.

Na Figura 1 o fluxograma das rotas de produção citadas acima.



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913939/CA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913939/CA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913939/CA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913939/CA

Para garantir a estabilidade do processo, toda carga é inspecionada visualmente. Qualquer material diferente do que habitualmente se recebe é segregado e faz-se análise de sua composição química. No entanto, dentro do conjunto de materiais que normalmente chega nas usinas pode ocorrer uma variabilidade, por exemplo, o cavaco de aço gerado no processo de usinagem de peças. Dependendo do tipo de aplicação destas peças terá uma composição química específica.

Hoje em dia há projetos que tentam analisar a composição química em larga escala [2], por exemplo, colocando medidor na correia que transporta a sucata processada no shredder. Porém, não é completamente difundido. Este mesmo problema ocorre com a sucata recuperada nas plantas de beneficiamento de escória. A determinação da composição química do aço recuperado da escória é relativamente simples, mas determinar a quantidade de aço que tem no material recuperado é uma atividade extremamente complexa.

O Pátio de Sucatas influencia significativamente no custo. O custo com a sucata representa cerca de 70% do custo do tarugo. A carga fria influencia os custos da fusão. A variação do *mix* tem impacto no consumo de energia, cales, coque, ligas e outros.

No quesito segurança a inspeção e identificação de fontes radioativas e de cilindros fechados e outros evitam que ocorram explosões e contaminações no aço líquido.

As atividades do Pátio de Sucatas abrangem o recebimento da sucata, a classificação, a estocagem, o processamento e o abastecimento das baias para armazenar as sucatas que serão utilizadas para a confecção do cestão e, posteriormente, o carregamento do forno.

O recebimento de sucata ocorre de 3 maneiras: gusa trazido principalmente por via férrea, a sucata que chega em caminhões e internamente através do retorno interno e a sucata recuperada.

O ferro gusa que chega ao Pátio é oriundo do processo de redução do minério de ferro em alto forno. Tem papel importante na carga como fonte de carbono e com baixo nível de elementos residuais. Seu emprego na carga fria pode variar de 25 a 35% dependendo de como esteja o mercado de sucatas.

Na fabricação de aços longos de baixo, médio e alto carbono existem três grupos de classificação de sucata: sucatas industriais, obsolescência e carburantes.

As duas primeiras são praticamente o mesmo tipo de sucata dada a diferença no nível de impureza intrínseca. As chamadas sucatas industriais que são sucatas geradas nas industriais possuem um nível de impureza e de oxidação menor que a de obsolescência. As sucatas carburantes são os ferros fundidos gerados em fundições.

Sucatas geradas internamente abrangem o retorno interno que é o sucateamento de material metálico gerado no Lingotamento Contínuo, nas Laminações, Trefilas, Fábrica de Pregos e logística, e a sucata recuperada na planta de beneficiamento de escória. Na verdade sucata recuperada é a parte metálica recuperada das escórias dos diversos processos da Aciaria, incluindo, a escória do FEA, a escória da virada da panela após etapa do Forno Panela, escória da virada do distribuidor após Lingotamento, remanescente nas panelas – bico e infiltrações.

A planta de recuperação, na maioria das usinas, fica sob responsabilidade de uma empresa terceirizada que fornece este material para ser empregado novamente no forno por um determinado valor. Há uma variação do valor dependendo do tipo de classificação do material que pode ser entre “A” e “B”. Para as duas classificações admite-se ainda certo percentual de escória e este justamente é o que diferencia os tipos de materiais. Para este projeto o foco está no estudo da recuperada obtida da escória do FEA. Assim, toda vez que for mencionado o termo sucata recuperada estará se referindo, única e exclusivamente, a parte metálica mais escória remanescente obtida da recuperação da escória do Forno Elétrico.

Após a etapa de processamento da sucata a mesma é carregada no cestão que irá abastecer o Forno Elétrico a Arco.

As origens do FEA remontam a 1878, quando W. Von Siemens patenteou um forno com dois eletrodos dispostos horizontalmente que criavam um arco indireto aquecendo a carga por irradiação. No entanto, esta invenção só começou a trilhar uma trajetória ascendente na produção de aço no século XX, quando os custos com a energia elétrica começaram a viabilizar o uso desta tecnologia. Com a estabilização da produção mundial de aço e a redução da demanda, as décadas de 80 e 90 caracterizaram-se pelo desenvolvimento de técnicas que buscavam a redução dos custos operacionais e o aumento da qualidade do produto final. Neste sentido, a combinação de um forno elétrico para fusão da matéria-prima e outro

para o refino do aço, denominado forno panela, vem ao encontro da necessidade de aumento da qualidade do aço produzido e do aumento da eficiência do processo. Assim, inúmeras foram as evoluções tecnológicas do FEA. Abaixo a Figura 2 ilustrando os principais avanços ao longo dos anos.

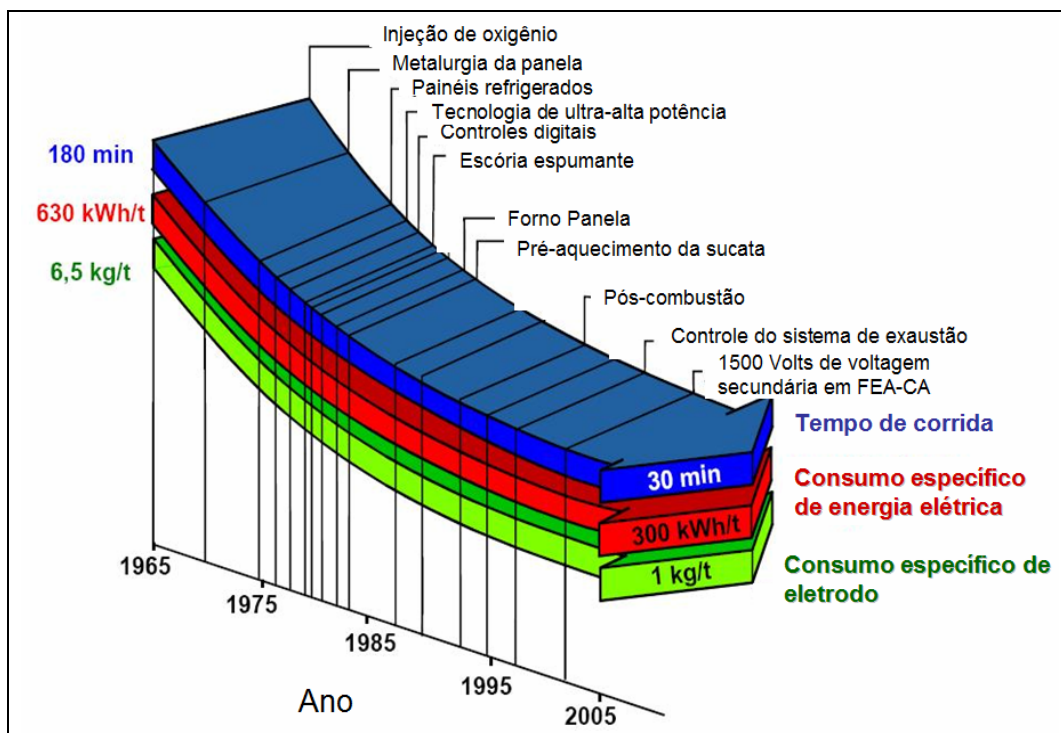


Figura 2. Evolução tecnológica do FEA ao longo da sua história. [3]

A Figura 3 apresenta os principais equipamentos presentes numa Aciaria que estão envolvidos na etapa do Forno Elétrico a Arco.

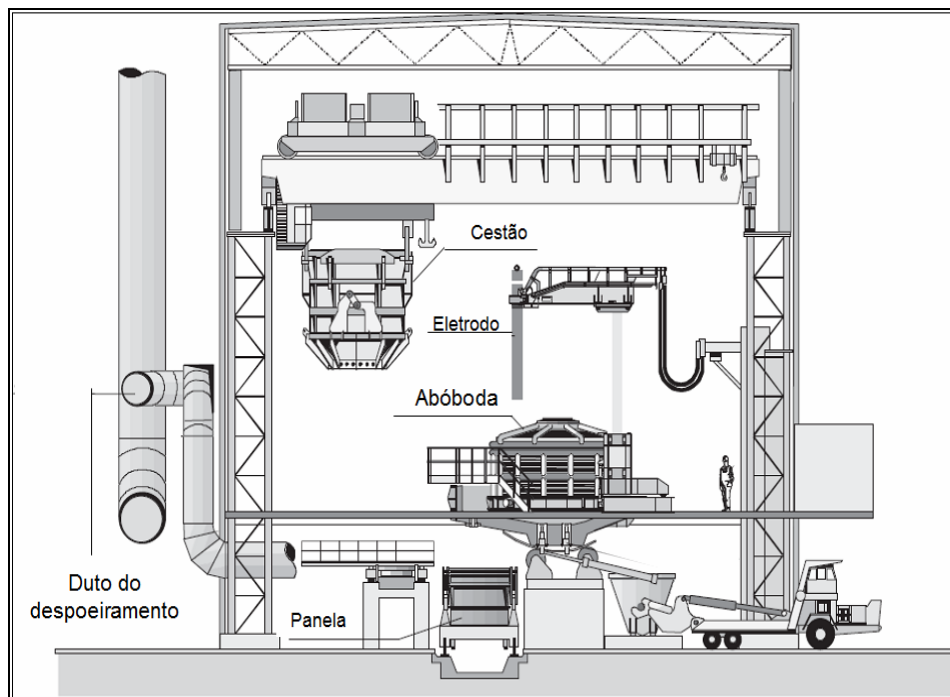


Figura 3. Instalações de uma típica Aciaria com FEA e seus principais equipamentos auxiliares: Cestão, Pote de escória, Panela, Ponte rolante e sistema de despoeiramento [4].

O Forno Elétrico a Arco foi planejado para ser empregado em um processo de batelada onde sua carga é sucata e gusa no estado sólido. As etapas deste processo são:

(a) Carregamento da sucata e gusa através do cestão; (b) Fusão da carga pela energia de combustível fóssil, elétrica e de reações exotérmicas de oxidação; (c) injeção de oxigênio para a descarbonização e formação de escória; (d) injeção combinada de carbono e oxigênio para formação da escória espumante para cobrir o arco elétrico, aumentando a eficiência energética, a proteção aos refratários e minimizando os danos aos painéis refrigerados; (e) remoção de escória para evitar a reversão do fósforo; (e) elevação da temperatura do banho entre 1620-1680⁰C para ser vazada na panela. A Figura 4 mostra as principais etapas do processo no FEA.

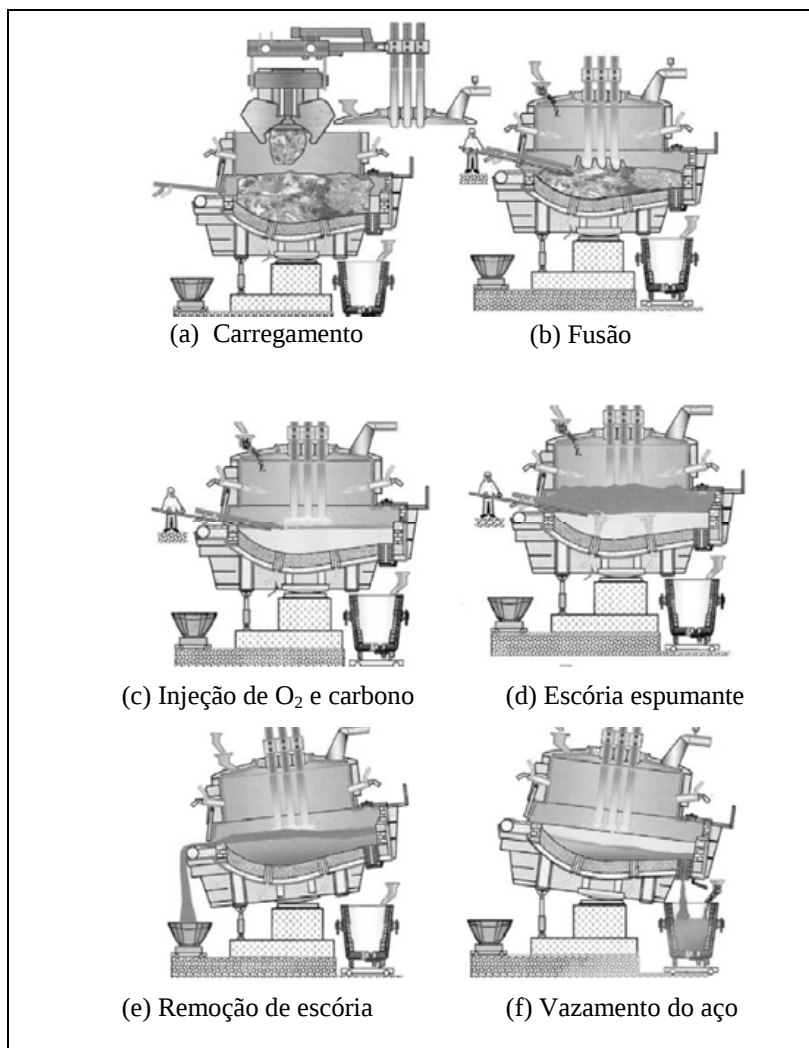


Figura 4. Etapas do processo de fusão e refino primário no FEA [5].

Os agentes elétrico e químico são de fundamental importância, pois são os responsáveis pela transferência de calor para a carga metálica possibilitando o processo de fusão.

O calor gerado pela energia elétrica é oriundo dos eletrodos de grafite onde ao se estabelecer uma diferença de potencial entre as colunas há a geração do arco elétrico promovendo a fusão da carga.

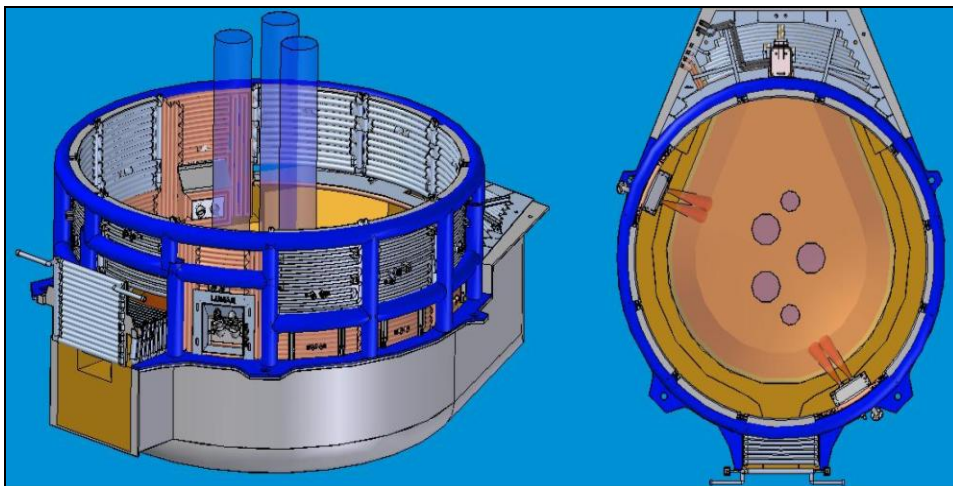


Figura 5. Desenho 3D de um típico FEA e sua vista superior.

O calor gerado pela energia química provem de:

1. Reações de oxidação com elementos químicos constituintes da carga metálica, tais com o silício (Si), manganês (Mn), carbono (C), ferro (Fe) e outros;
2. Reações de oxidação com elementos adicionados no forno, com o propósito de gerar energia, como o carbono (C) e metano (CH_4);
3. Reações de oxidação dos gases provenientes da queima dos dois primeiros grupos, tais como o monóxido de carbono (CO) e o hidrogênio (H_2).

Para possibilitar todas as reações de oxidação mencionadas acima é necessária a participação do oxigênio (O_2), sendo este inserido no processo por intermédio dos agentes químicos que serão apresentados a seguir.

Os agentes químicos são os responsáveis por facilitar a ocorrência de reações químicas. São eles os Queimadores, Injetores, Co-jets e a Lança.

Os queimadores através da injeção de gás combustível e oxigênio têm a função de transferir calor para carga metálica. Assim, para tirar o maior proveito destes equipamentos eles entram em operação logo após as etapas de carregamento. Os injetores são os responsáveis pela injeção de oxigênio no forno. Sua função é garantir a presença de oxigênio permitindo a ocorrência das reações de oxidação. Os Co-jets são equipamentos que injetam oxigênio e gás natural. Sendo que há dois pontos de injeção de oxigênio, um destes em velocidade supersônica. A Lança do manipulador posicionada na porta do forno injeta oxigênio no banho metálico e carbono na interface metal-escória. As lanças de

oxigênio supersônicas ficam posicionadas nas zonas frias do forno. Este nome se deve ao fato de se situarem fora da área de influência do eletrodo, como indicado pelas zonas brancas da Figura 6.

Tanto o Co-jet quanto a lança do manipulador por possuírem elevadas vazões de oxigênio e carbono são responsáveis por gerar turbulências na superfície do banho e, conseqüentemente, reações de oxidação e redução do ferro.

Com o intuito de proporcionar uma melhor visualização do posicionamento dos agentes químicos no forno é apresentada a Figura 6.

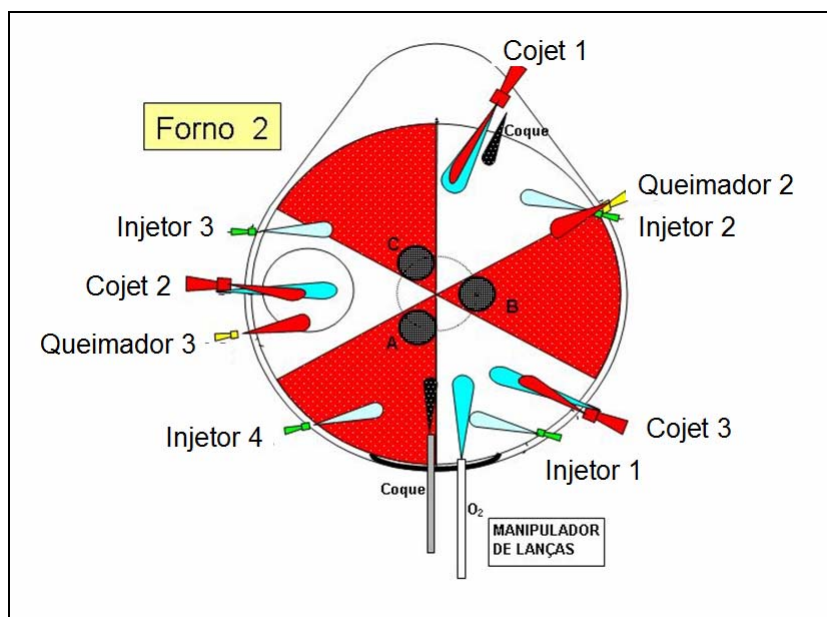


Figura 6. Layout químico do forno. A área em vermelho é conhecida como área quente do forno devido à proximidade com os eletrodos.

Porém, como toda atividade industrial há a geração de resíduos, sendo a escória o principal resíduo sólido. O volume de geração ao longo dos anos vem diminuindo significativamente, mas vale lembrar que é inevitável sua formação.

2.2 Escória

A escória é fundamental no processo de fabricação dos aços nas aciarias. É nela que os óxidos adicionados e que são gerados durante o processo se acumulam. A escória influencia a temperatura do banho, o consumo de refratários, a taxa de desfosforação, o consumo de energia, o rendimento metálico, entre outros. Assim, realizar um estudo sobre a escória significa dar um passo relevante na busca da estabilização do processo.

A escória do forno elétrico participa ativamente do processo de refino oxidante e representa um verdadeiro “raios-x” de como está o comportamento do forno ao longo da corrida. Sua importância é tanta que durante toda a corrida os operadores do forno a observam, e ao notar alguma alteração, fazem análises químicas para certificarem se está tudo transcorrendo conforme o esperado.

A escória da aciaria trata-se de uma mistura de óxidos que apresenta CaO, SiO₂, FeO, MnO, MgO, Al₂O₃, P₂O₅ como principais constituintes. As impurezas da carga contribuem com a SiO₂ (sílica) e Al₂O₃ (alumina). Cal calcítica (CaO) e dolomítica (CaO-MgO) são adicionadas ao processo de forma a neutralizar a sílica e assim proteger o refratário, e criar uma pequena quantidade de fase sólida (MgO saturado) que irá auxiliar o processo de espumação. Óxidos originários do processo de refino oxidante da carga (MnO, FeO, SiO₂, P₂O₅); óxidos gerados do desgaste dos refratários, principalmente o MgO. Na escória ainda há a presença de FeO oriundo da sucata carregada no forno e Ferro Metálico que foi misturado à escória por diversas razões que mais adiante serão explicadas.

Composição típica (componentes mais importantes, %massa):

FeO	20-50%
MnO	3-6%
CaO	20-40%
SiO ₂	10-20%
MgO	7-14%
P ₂ O ₅	1-2%
Cr ₂ O ₃	1-2%
Al ₂ O ₃	2-10%
Ferro Metálico	(A definir)

É de conhecimento geral que o processo de fusão influencia a quantidade de Ferro total nas escórias. Quanto menor a razão [kg C Total/ Nm³ O₂] empregado na lança do manipulador, maior tendência de oxidação do Fe e esperam-se teores de FeO mais elevados. Para apontar alguns dos principais parâmetros influentes sobre o aprisionamento de Fe⁰ nas escórias, citam-se: tempo de residência da escória no FEA, viscosidade e vazão de gases oriundos da reação geral $FeO + C = Fe + CO$. Portanto, aços primários produzidos objetivando baixo teor

de carbono %wt C < 0.06%, processados com baixa basicidade binária ($\text{CaO/SiO}_2 < 1.6$), baixa relação $[\text{kg C Total/ Nm}^3 \text{ O}_2]$ (< 0.6), limitado coque injetado para espumação < 4 kg Coque/ton, maior tempo de residência (slag-off tardio), são esperados altos teores de $\text{Fe}_x\text{O}_y > 40\%$, e baixos teores de Fe^0 na escória. Em contraste, aços produzidos com teores de carbono %wt C 0.08 – 0.12%, alta basicidade binária ($\text{CaO/SiO}_2 > 2.5$), alta relação $[\text{kg C Total/ Nm}^3 \text{ O}_2]$ (> 0.90), disponibilidade de coque injetado para espumação > 12 kg Coque/ton, maior tempo de residência (slag-off tardio), são esperados menores teores de Fe_xO_y ($< 25\%$) e baixos teores de Fe^0 na escória [6].

Ferro metálico e óxido de ferro estão normalmente presentes na escória. Duas razões principais para a presença de ferro na forma de óxido são o ferro já oxidado que foi inserido no processo devido ao emprego de sucata de obsolescência e, a outra, o ferro que se oxidou pela reação com oxigênio injetado no banho metálico.

Com relação à presença de ferro metálico pode-se dizer que durante o processo metalúrgico um grande número de gotas metálicas podem ser carreadas para o topo do banho devido à turbulência causada pelos gases injetados ou pela geração de gases devido a reações de oxidação principalmente do carbono. Outro fator que contribui para a presença de ferro metálico na escória é o impacto do gás soprado pela lança na superfície do banho metálico, assim, gotas metálicas são geradas e ejetadas do banho indo para a fase de emulsão (escória-metal-escória). Após um certo tempo de residência na fase emulsão, as gotas irão afundar para o banho metálico. Com isso, pode-se considerar que durante o processo as gotas metálicas ejetadas do banho são geradas numa certa taxa de ejeção para a fase escória. Pela força gravitacional e convecção, as gotas retornam ao banho metálico, numa taxa de decaimento, após permanecer um certo tempo na emulsão. Estas duas taxas governam a quantidade de gotas metálicas na emulsão. Na Figura 7 um desenho esquemático demonstrando o comportamento das taxas [7].

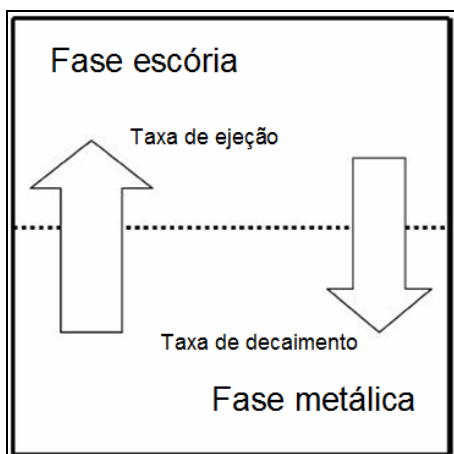


Figura 7. Diagrama esquemático do fluxo de emulsão.[7]

No início do processo de injeção de oxigênio em que o valor de gotas metálicas é baixo, a taxa de geração de gotas domina o processo. Com o passar do tempo, visto que a taxa de decaimento das gotas metálicas para o banho aumenta, a taxa de ejeção relativa diminui. Com o decorrer do processo um estado estacionário é alcançado onde a taxa de ambos os processos se torna igual, e um estado estacionário de gotas metálicas na emulsão se estabiliza. Assim, o número de gotas geradas por unidade de tempo e o seu tempo de residência determinam a quantidade de gotas metálicas na emulsão. O seu tempo de residência irá variar com a velocidade de decaimento da gota para o banho metálico e com a trajetória (altura) assumida pela mesma na emulsão. A velocidade de decaimento é função do tamanho da gota, das propriedades da emulsão (viscosidade) e da geração de bolhas de $\text{CO}_{(g)}$ na interface metal-escória, que também irá afetar o comportamento das gotas na emulsão.[8]

Outra forma de justificar a presença de ferro metálico na escória se deve ao fato que quando uma bolha de gás passa na interface metal/escória, um filme de aço é formado na superfície da bolha. Fazendo com que gotas metálicas sejam carreadas para a fase escória.

Se o filme é termodinamicamente instável, ele pode se romper e posteriormente dividir-se em gotas por algum estímulo tal como o deslocamento de bolhas cruzando a interface.

Na Figura 8 um desenho esquemático representando uma bolha de gás passando pela interface metal-escória ocasionando a formação de um filme de aço que irá para a fase escória.

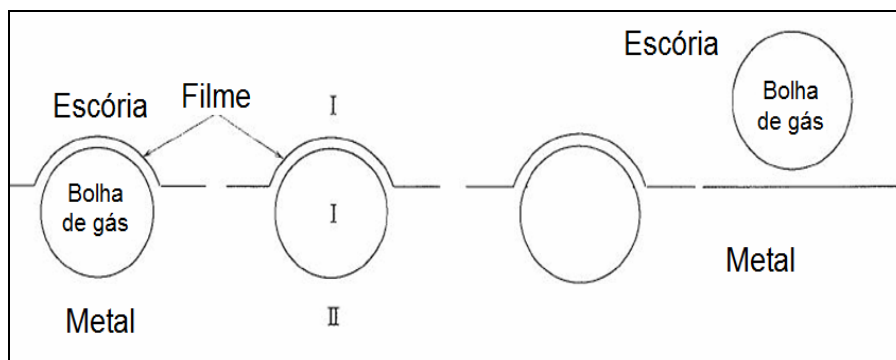


Figura 8. Formação de um filme na bolha gasosa. [8]

A escória espumante, como já mencionado, é de fundamental importância para otimizar o processo. Porém, sua formação também implica no aumento da presença de FeO e ferro metálico na escória. Os parâmetros-chaves que determinam as características da escória espumante representados pelo índice de espumação são: viscosidade, densidade, tensão de superfície e fração de fase sólida. Os efeitos de cada parâmetro no índice de espumação tem sido extensivamente estudados. É consenso que o índice de espumação aumenta com a elevação da viscosidade, a diminuição da densidade e da tensão de superficial. Os três parâmetros são diretamente dependentes da temperatura, da composição química da escória e da quantidade de partículas sólidas em suspensão. Além disso, tem sido estabelecido que menores tamanhos de bolhas no banho aumentam o índice de espumação. Normalmente, ele é mínimo para escórias com $\text{CaO/SiO}_2 = 1,2$ e aumentam para basicidades maiores, ou menores, que este valor. A adição de grandes quantidades de cal calcítica e/ou dolomítica irá causar um aumento na espumação devido à queda na temperatura, aumento da viscosidade e diminuição do fluxo de dissolução e saturação de MgO na escória. Altos níveis de atividade na superfície de substâncias tais como P_2O_5 e V_2O_5 na escória, que reduzem a tensão de superfície podem também contribuir para a escória espumante. No entanto, o índice de espumação pode ser reduzido pelas seguintes causas: adição de fluidizantes tais como fluorita (acima de 5% CaF_2) que é conhecida por reduzir a viscosidade e aumentar o fluxo de dissolução; adição de Al_2O_3 , que também melhora a dissolução da cal calcítica (para corridas sem cal dolomítica); e adição de substâncias de pouca molhabilidade tais como: coque, carvão mineral, carvão vegetal, etc.[9]

Sucata oxidada ou uma elevada utilização de oxigênio no FEA pode causar altos níveis de oxidação do banho como também a diminuição do rendimento

metálico, aumento do consumo de energia, aumento do consumo de refratários, entre outras. Sobre estas circunstâncias, a redução do FeO pelo carbono dissolvido no banho não é suficiente para reduzir os níveis de oxidação da escória. Para superar a situação descrita, é feita a injeção de materiais carbonáceos no banho para reduzir a alta quantidade de ferro. Várias vantagens são trazidas sobre esta operação: aumento do rendimento metálico, $[C]/[O]$ relação próxima do equilíbrio termodinâmico, condições de espumação da escória, maior rendimento das ligas de vazamento, menor tempo de processamento no forno panela devido o aço estar menos oxidado. [10] Na figura 9 um exemplo do processo de injeção de oxigênio e coque pelas lanças do manipulador posicionado na porta do forno.

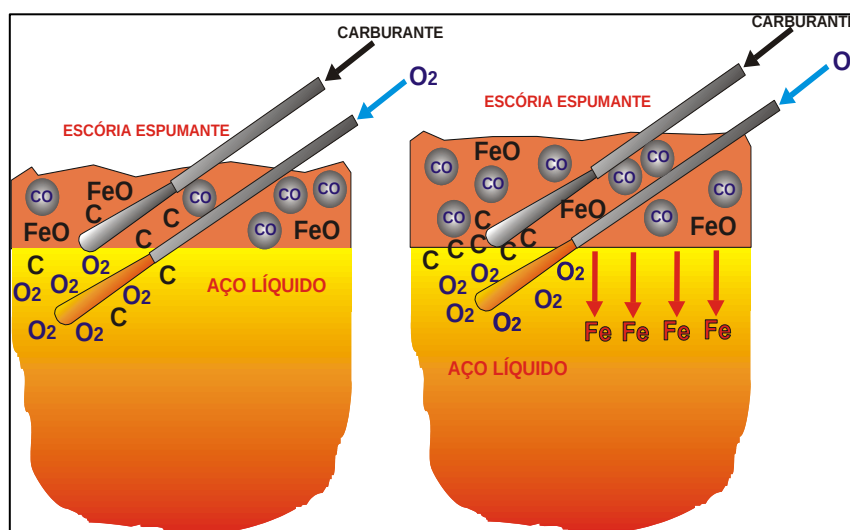


Figura 9. Posicionamento da lança dentro do banho.

A redução do óxido de ferro é uma típica reação que ocorre na escória e que contribui para a diminuição da quantidade de ferro presente, auxiliando no aumento do rendimento metálico. Esta redução é uma reação heterogênea e, portanto, implica na transferência de massa como também em reações químicas interfaciais com mecanismos de controle de taxa. A redução do óxido de ferro envolve a formação de uma fase gasosa CO-CO₂ quando partículas de escória estão em contato com fontes de carbono. A Figura 10 apresenta 3 maneiras em que o óxido de ferro pode reagir com as fontes de carbono.

- (a) Gota Fe-C na escória;
- (b) Gota de escória no banho metálico;
- (c) Fontes de carbono representado por uma partícula de grafite na escória.

Os casos (a) e (b) são tipicamente as reações que favorecem a espumação e podem ser simplificados no sistema (d) com os constituintes Fe-C-Gás-Escória. A condição (C) C_{gr} -Gás-Escória é relatado no sistema (e). [8]

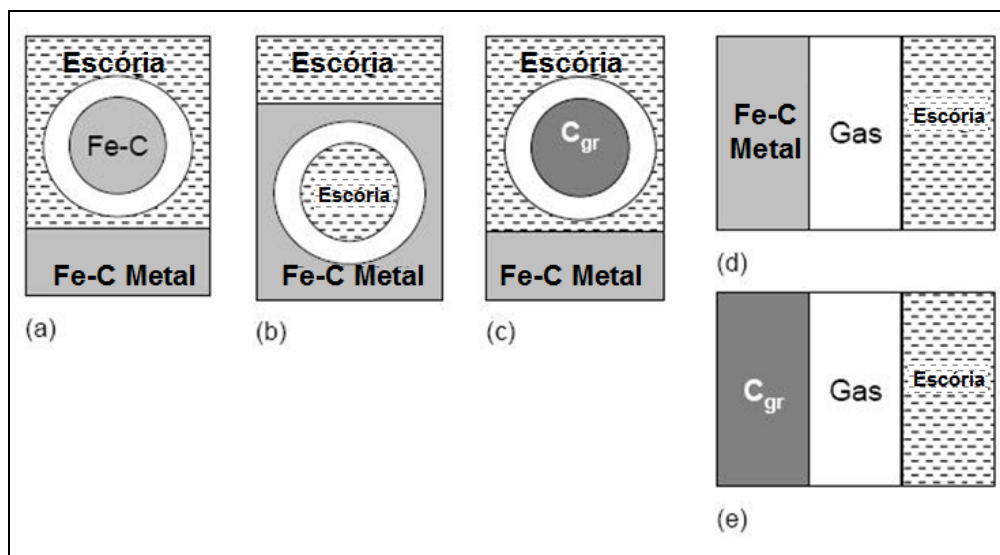
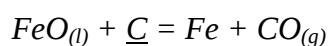
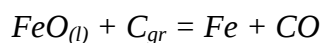


Figura 10. Desenho esquemático dos possíveis casos de reações do óxido de ferro com fontes de carbono. [11]

A Wustita $FeO_{1,076}$ é denotada como FeO por conveniência. A redução do óxido de ferro pelo carbono dissolvido no banho metálico é o mecanismo esperado para descarburização e a reação global pode ser expressa por:



Além da descarburização, a redução do óxido de ferro ocorre muito frequentemente por meio da injeção de uma carga de grafite sólido tanto no cestão quanto ao longo do processo. A reação global pode ser expressa por:



Entretanto, considera-se que estas reações ocorrem em duas etapas, reações gasosas na interface metal-gás e escória-gás.

O mecanismo de redução do FeO pelo carbono dissolvido na forma de Fe-C e pelo carbono sólido são apresentados na Figura 11. As etapas são a transferência de massa do FeO na escória e a formação dos gases CO e CO_2 imediatamente quando FeO entra em contato com a fonte de carbono. As principais diferenças

residem na transferência de massa do carbono no banho (Fe-C) e da natureza da reação química na interface metal-gás ou carbono-gás.

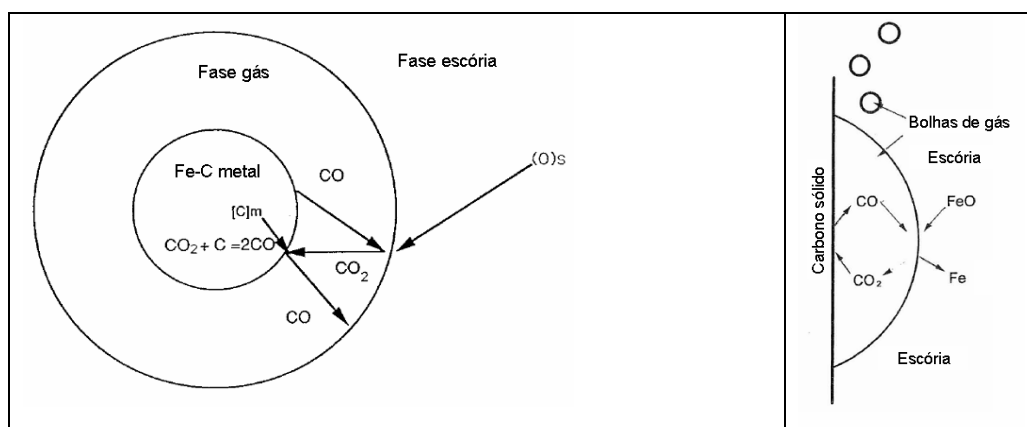


Figura 11. Diagrama esquemático da redução do FeO contido na escória pelo carbono dissolvido no banho Fe-C e pelo carbono sólido. [12]

Possíveis etapas controladoras da taxa de redução do FeO da escória são: A transferência de massa de CO_2 produzido na interface escória-gás até a interface metal-gás. Dissociação do CO_2 resultando em CO e a reação de um átomo de oxigênio com o carbono do Fe-C ou este átomo de oxigênio reage diretamente com a partícula de carbono sólido. Na temperatura de processo, CO_2 é instável na interface metal-gás e carbono-gás na presença de grafite, tendendo ser completamente consumido. Conseqüentemente, um gradiente de concentração de CO_2 ocorre, dirigindo a difusão através da fase gasosa na direção da fonte de carbono, até a fonte de oxigênio na interface escória-metal se aproximar do estado de equilíbrio ou até a fonte de carbono ser consumida. A fonte de oxigênio na interface escória-gás é simplificada para ser proporcional a concentração de FeO na escória. Assim, pode-se dividir a reação de redução do FeO nas seguintes etapas:

- 1- Transferência de FeO (íons Fe^{2+} e O^{2-}) através da interface gás-escória;
- 2- Reação química na interface escória-gás $\text{FeO}_{(l)} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$
- 3- Difusão da espécie gasosa CO_2 na auréola gasosa em direção a gota de Fe-C ou da partícula de carbono.
- 4- Transferência de massa do carbono no banho (Fe-C)
- 5- Reação química na interface metal-gás ou na interface carbono-gás.
Adsorção e dissociação do $\text{CO}_{2(g)}$

Interface metal-gás $CO_{2(g)} + \underline{C} = 2CO_{(g)}$

Interface carbono-gás $C_{gr} + CO_{2(g)} = 2CO_{(g)}$

- 6- Transporte de CO da interface gás-metal ou gás-carbono para a interface gás-escória.

Com isso, ao mesmo tempo em que, durante o processo, ocorrem reações de oxidação devido à injeção de oxigênio, também ocorrem reações de redução do FeO devido ao carbono presente no banho.

Como ao longo de todo o processo no FEA há a saída de escória pela porta do forno, ao final de cada batelada (corrida) tem-se a possibilidade de quantificar a escória gerada e, conseqüentemente, o teor de ferro metálico e ferro total contido.

2.3 Beneficiamento da Escória

Toda a escória gerada ao longo do processo no FEA é recolhida e processada em uma planta de beneficiamento. Este processamento tem o objetivo de desagregar a parte metálica dos outros óxidos para futuro reemprego no forno como sucata recuperada. Este processo ocorre através de um fluxo de britagem seguido de separadores magnéticos. Podem ocorrer pequenas variações no fluxograma de processamento entre as plantas de beneficiamento de escória. Assim, serão apresentados dois modelos de rota de processamento que irão fornecer amostras para esta dissertação.

O primeiro modelo de fluxograma de processamento consiste inicialmente pela deposição e resfriamento do material com água. Em seguida tem-se a passagem da escória **IN NATURA** por uma peneira vibratória com abertura de 5” (12,7cm). O material que não consegue passar por esta peneira (Recuperada d>5” não boleada) é retirado da planta e se tiver comprimento inferior a 80cm e for imantado, será considerado como **RECUPERADA D>5”**. As porções que não imantarem, serão levados para a etapa de processamento conhecida como boleamento, onde um guindaste eleva uma bola de aproximadamente 3 toneladas a uma altura de 15 metros e a solta. Com o impacto, a parte na forma de óxido se fragmenta e a parte metálica se deforma, fazendo com que a concentração de ferro metálico para elevadas granulometrias aumente e a granulometria média diminua.

Este material é então novamente levado para a planta de processamento. A Figura 12 demonstra a etapa de boleamento.

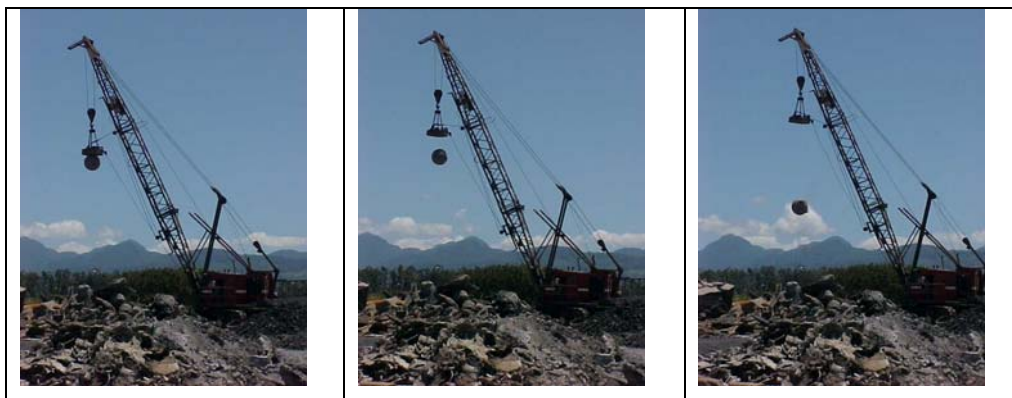


Figura 12. Processo de boleamento da escória na planta de recuperação.

O material que passar por esta peneira de 5" é levado através de uma correia transportadora para a próxima peneira de 2,5" (6,35cm). O que não passar e for imantado, é considerado como **RECUPERADA 2,5" < d < 5"**, caso não seja imantado, será direcionado para o britador de mandíbula e retornará para a correia inicial. Abaixo da peneira de 2,5" há uma de 0,5" (1,27cm), se o material ficar retido entre estas duas peneiras e imantar, será considerada **RECUPERADA 0,5" < d < 2,5"**, caso não imante será chamado de **AGREGADO 0,5" < d < 2,5"**. Em seguida, se o material passar pelas três peneiras, granulometrias inferiores a 0,5", o mesmo será considerado como **AGREGADO d < 0,5"**. Vale lembrar que este material não passou por nenhuma etapa de separação magnética. Na Figura 13 é apresentado o fluxograma da planta de processamento de escória baseado no Modelo 1.

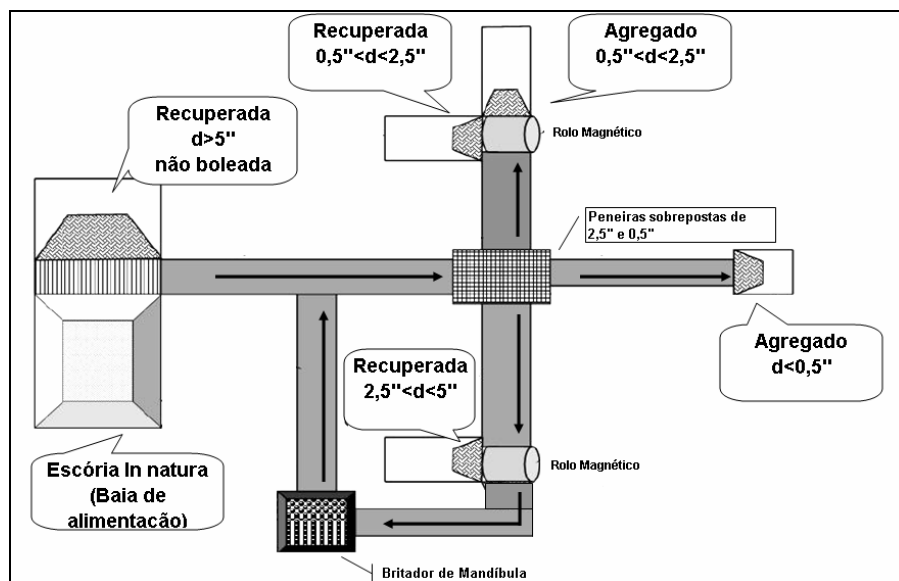


Figura 13. Desenho esquemático da Planta de beneficiamento de escória para a recuperação de ferro metálico no Modelo 1.

O segundo modelo de fluxograma de processamento inicia, como no modelo 1, pela deposição e resfriamento da escória com água. Em seguida a mesma é inserida no alimentador que possui uma tela de 5", materiais com granulometria acima deste valor são removidos e encaminhados para a etapa de boleamento. Após esta etapa, é realizada uma separação magnética com auxílio do imã do guindaste que realiza o boleamento, se o material imantar é considerado Recuperada $d > 5''$, caso não, será boleado ou encaminhado novamente para a planta. O material que passa pela tela de 5" cai na correia principal sendo transportado ao separador magnético. Se o material imantar será direcionado para o lado direito da planta, caso não imante é direcionado para o lado esquerdo.

No lado direito, após o separador magnético, o material é transportado através de uma correia que ao seu final tem uma peneira de 1", ficando retido será considerado Recuperada $1'' < d < 5''$. Tendo granulometria inferior será encaminhado para a próxima peneira de 0,5". Os materiais que ficarem retidos ($0,5'' < d < 1''$) são encaminhados para o outro separador magnético, se imantar é considerado Recuperada $0,5'' < d < 1''$, caso não imante é denominado Agregado $d < 1''$ que é somado com o que passou inicialmente pela peneira de 0,5". A sucata Recuperada $0,5'' < d < 1''$ é de baixa geração sendo contabilizada como Recuperada $1'' < d < 5''$.

No lado esquerdo da planta o material que não sofreu imantação é encaminhado por uma correia para o conjunto de peneiras sobrepostas de 2 e 1

polegada, se o material possuir granulometria superior à abertura da peneira de 2” o mesmo é encaminhado ao britador de mandíbula. O produto gerado após o britador é encaminhado à correia principal para reiniciar o processo. Se o material passar pela peneira de 2” e ficar retido na peneira de 1” é considerado Agregado $1'' < d < 2''$, se passar é denominado Agregado $d < 1''$. Na Figura 14 um desenho esquemático da planta de beneficiamento da escória do modelo 2.

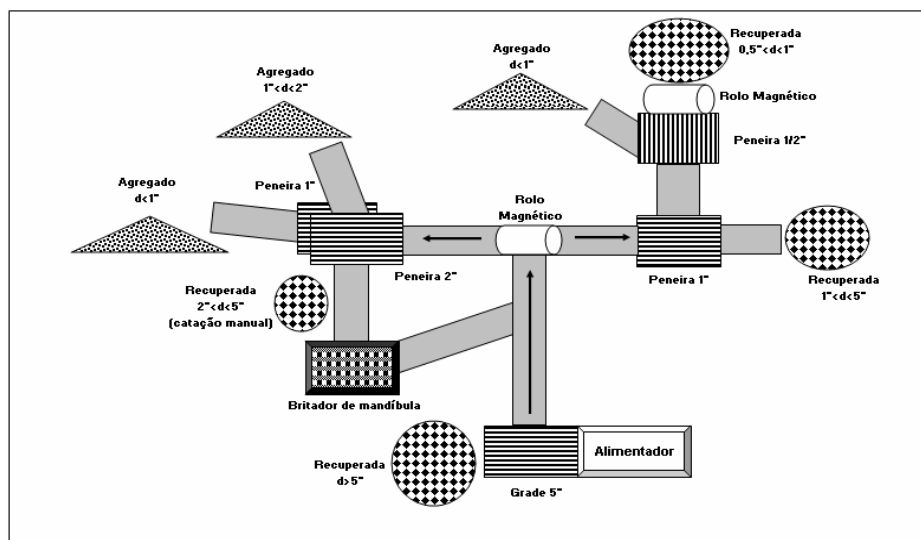


Figura 14. Desenho esquemático da planta de beneficiamento de escória para a recuperação de ferro metálico Modelo 2.

As sucatas recuperadas na planta de beneficiamento de escória retornam para serem reempregadas no forno como tendo elevados teores de ferro na forma metálica. Para comprovar estes teores de ferro metálico é realizado um teste conhecido como teste de metalização.

O teste de metalização estima a quantidade de ferro metálico presente numa sucata recuperada a partir de uma medida da sua massa específica pelo método de Arquimedes. No anexo I, o formulário utilizado para a realização do teste.

Uma das premissas utilizadas é que a sucata recuperada obtida do beneficiamento de escória é formada por um conjunto de partículas nas quais se acham fisicamente associadas partes metálicas e de escória. A pureza metálica desta sucata será tanto maior quanto mais predominar, nessas partículas, a fração metálica.

O método empregado industrialmente para mensurar o teor de ferro metálico leva em conta a massa específica da amostra correlacionando com a

massa específica da escória e a massa específica do aço. No anexo IV o desenvolvimento da equação 1 .

É de se presumir que quanto maior a massa específica da amostra, maior será o seu conteúdo de ferro metálico.

Sabendo que:

$$\rho_T = \text{densidade Total da amostra}$$

$$\rho_{Aço} = \text{densidade do Aço}$$

$$\rho_{Esc} = \text{densidade da Escória}$$

E, admitindo:

$$\rho_{Esc} \leq \rho_T \leq \rho_{Aço}$$

Tem – se :

$$\text{Teor de Fe (\%)} = A - B \times \frac{1}{\rho_T} \quad \text{Equação 1}$$

Sendo :

$$A = \frac{\frac{1}{\rho_{Esc}}}{\frac{1}{\rho_{Esc}} - \frac{1}{\rho_{Aço}}} \times 100 \quad e \quad B = \frac{100}{\frac{1}{\rho_{Esc}} - \frac{1}{\rho_{Aço}}}$$

Com isso, o teor de ferro metálico contido na amostra irá depender de três variáveis: densidade específica do aço, densidade específica da escória e densidade específica da amostra. Sendo a densidade do aço de 7,85 g/cm³ e a densidade da escória variando em função da concentração de FeO e MnO na escória.

A Figura 15 apresenta os dados de densidade da escória compilados por Mills e Keene [9] para amostras complexas contendo FeO, CaO, MgO, SiO₂ e P₂O₅. Sabendo que as densidades de FeO-SiO₂ e MnO-SiO₂ são essencialmente as mesmas é possível calcular a densidade da escória pela seguinte equação em termos de (%FeO + %MnO).

$$\text{Densidade da escória (g/cm}^3\text{)} = 2,46 + 0,018 \times (\%FeO + \%MnO) \quad \text{Equação 2}$$

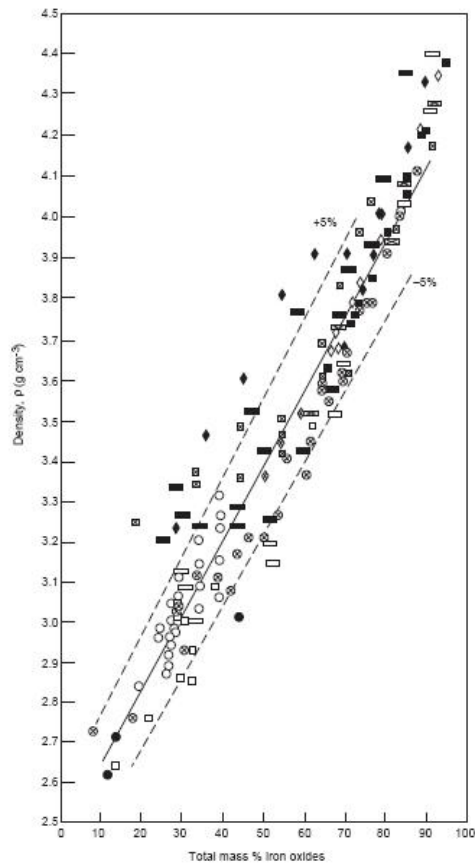


Figura 15. Gráfico que correlaciona densidade da escória com o percentual em massa do Óxido de Ferro.[13]

Ainda no gráfico da Figura 15 mostra que o teor de óxido de ferro e de manganês tem grande influência na densidade da escória. Para facilitar esta compreensão realizou-se simulações variando o somatório $\text{FeO} + \text{MnO}$ da escória com a densidade do aço sendo mantida constante. Assim é possível verificar o impacto na densidade da escória.

A densidade específica, como vista anteriormente, será obtida pelo método de deslocamento de água. Assim, todas as variáveis para o cálculo do teor de ferro metálico são possíveis de serem obtidas.