



Faculdade de Pindamonhangaba



Mariana Sales de Paula

**MÉTODO DE CARREGAMENTO DE FORNO ELÉTRICO
A ARCO: Consteel[®] versus processo convencional**

Pindamonhangaba – SP

2017



Faculdade de Pindamonhangaba



Mariana Sales de Paula

**MÉTODO DE CARREGAMENTO DE FORNO ELÉTRICO
A ARCO: Consteel[®] versus processo convencional**

Monografia apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Diploma de Bacharel pelo Curso Engenharia de Produção da Faculdade de Pindamonhangaba

Orientador: Prof. Me. Weliton dos Santos Abreu

Pindamonhangaba – SP

2017

Paula, Mariana Sales de

Método de carregamento de forno elétrico a arco: Consteel® versus processo convencional / Mariana Sales de Paula / Pindamonhangaba-SP : FUNVIC Faculdade de Pindamonhangaba, 2017.

36f. : il.

Monografia (Bacharelado em Engenharia de Produção) FUNVIC-SP.

Orientador: Prof. Me. Weliton dos Santos Abreu.

1 Carregamento Contínuo. 2 Aciaria elétrica. 3 Inovação. 4 Fusão contínua. 5 Consteel®.

I Método de carregamento de forno elétrico a arco: Consteel® versus processo convencional II Mariana Sales de Paula



Faculdade de Pindamonhangaba



MARIANA SALES DE PAULA

MÉTODO DE CARREGAMENTO DE FORNO ELÉTRICO A ARCO: Consteel® versus processo convencional

Monografia apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Diploma de Bacharel pelo Curso Engenharia de Produção da FUNVIC - Faculdade de Pindamonhangaba

DATA: _____

RESULTADO: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Weliton dos Santos Abreu – FUNVIC Faculdade de Pindamonhangaba

Assinatura _____

Prof. Dr. Cláudio Augusto Kelly – FUNVIC Faculdade de Pindamonhangaba

Assinatura _____

Prof. Me. Marcelo Pinheiro Werneck – FUNVIC Faculdade de Pindamonhangaba

Assinatura _____

Dedico este trabalho aos meus avós João e Lúcia
que muito me inspiram a ser uma pessoa correta
e levar meu melhor para o mundo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por toda saúde e força para enfrentar todas as atribuições, sem Ele nada sou.

Agradeço a meus pais, Brígida e João, por todo o carinho e dedicação em minha formação, pessoal e técnica, tornando possível meu caminho até aqui.

Agradeço também a meus irmãos, Isabela, que me incentivou a reingressar nos estudos após a primeira formação, e Luiz Mateus, que com toda sua criatividade e alegria me faz sempre seguir em frente.

Agradeço a toda minha família que sempre manteve a calma nas mais difíceis situações e sempre me apoiaram em tudo, amo todos vocês.

Aos colegas de todas as classes as quais frequentei, todos puderam me ensinar algo além do técnico e atenuaram a pressão do dia a dia.

Aos colegas de trabalho, que muito me ensinaram e me impulsionaram a aplicar meus conhecimentos.

Agradeço, enfim, a todos os professores que estavam comigo nessa jornada, em especial aos principais impulsionadores deste trabalho, Prof. Me. Weliton dos Santos Abreu, meu orientador e responsável por manter meu foco no resultado esperado e Prof. Dr. Cláudio Augusto Kelly, que muito me motivou em todos os anos desta jornada.

O único lugar onde o sucesso vem
antes do trabalho é no
dicionário.

Albert Einstein

RESUMO

O aço é uma das ligas mais utilizadas nos dias de hoje, chegando a se produzir mais de 2 bilhões de toneladas ao ano em todo o mundo. Com uma vasta gama de aplicações, desde aços para construção civil, indústria automotiva, até aplicações médicas, o aço tem grande presença na vida cotidiana. A partir disto a necessidade de novos métodos, mais eficazes produtivamente e menos impactantes ao ambiente, mostra-se importante para a competitividade no mercado das empresas produtoras de aço. O presente trabalho expõe o processo convencional de carregamento de fornos elétricos a arco para a produção de aço em aciarias elétricas e as melhorias provenientes da implementação do processo de carregamento contínuo Consteel®. A partir deste pode-se quantificar e analisar o método inovador apresentado e questionar sua utilização, com suas aplicações ao redor do mundo, a perspectiva de mercado e aplicação na siderurgia brasileira, o método de pré-aquecimento da carga e suas vantagens ao meio ambiente.

Palavras chave: Sucata. Aciaria elétrica. Fusão contínua. Carregamento contínuo. Inovação.

ABSTRACT

Steel is one of the most widely used alloys nowadays, producing more than 2 billion tons around the world per year. With a wide range of applications, from steel for civil construction, automotive or medical applications, steel has great presence in everyday life. From this the need for new methods, more effective productively and less impact to the environment, appears to be important for the market competitiveness of steel companies. This paper presents the conventional process of loading electric arc furnaces for steel production in electric steel mills and the improvements resulting from the implementation of the Consteel® continuous loading process. From this one can quantify and analyze the innovative method and its use question, with its applications around the world, the perspective of market and application in the Brazilian steel industry, the method of preheating the load and its advantages to the environment.

Keywords: Scrap. Electric steelworks. Continuous melting. Continuous charge. Innovation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Foto de Alto-Forno 1 da Usina Ipatinga - Usiminas	14
Figura 2 – Foto de Conversor Bessemer desativado	15
Figura 3 - Construção esquemática de um forno elétrico a arco	16
Figura 4 – Foto de máquina de Lingotamento Contínuo de aço	17
Figura 5 – Fluxograma do processo de aciaria elétrica	18
Figura 6 – Ilustração do Fluxo de Produção do Aço.	19
Figura 7 – Foto ilustrativa do cesto de carregamento.....	19
Figura 8 – Figura esquemática descritiva do Sistema Consteel®	21
Figura 9 - Figura esquemática ilustrativa do Sistema Consteel®	22
Figura 10 – Figura ilustrativa do processamento do sistema.....	22
Figura 11 - Instalações do sistema Consteel® na VSB em Jeceaba-MG.....	26
Figura 12 – Comparação entre a potência do transformador em cada processo	27
Figura 13 – Foto do sistema de carregamento de sucata da empresa Tenova®	27
Figura 14 – Carregamento de metal líquido na usina de Wheeling-Pittsburgh – EUA	29
Figura 15 – Fluxograma ilustrativo para comparação entre as linhas de tratamento de gás	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação de custos da fabricação de aço convencional e Consteel®	30
Tabela 2 – Comparativo ambiental entre processo convencional e sistema Consteel®	30
Tabela 3 – Comparação de custos FEA convencional e Consteel®	33

LISTA DE ABREVIACOES

kWh/t	Quilowatt-hora por tonelada
t/h	Tonelada por hora
MW	Megawatt
€/t	Euro por tonelada
US\$/t	Dólar por tonelada
FEA	Forno elétrico a arco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1	A Fabricação do Aço	14
2.2	Sistema convencional de carregamento e fusão	18
2.3	O sistema Consteel®	20
3	MÉTODO	24
4	RESULTADOS	26
4.1	O desempenho produtivo e econômico do sistema Consteel®	26
4.2	Impacto ambiental do sistema Consteel®	30
5	DISCUSSÃO	33
6	CONCLUSÃO	35

1 INTRODUÇÃO

A busca por processos de fabricação menos impactantes, a flexibilidade nos tipos de carga e o aumento na produtividade nos Fornos Elétricos a Arco (FEA) são os principais agentes responsáveis pelo sucesso do sistema Consteel[®] de carregamento contínuo. Concebido com os objetivos de reduzir o consumo de energia elétrica e os custos de produção, equilibrado às necessidades ambientais, coma redução de emissões e ruído (Fanutti e Pozzi, 2004), hoje são mais de trinta instalações ao redor do mundo em quinze países diferentes.

Atualmente, todas as unidades Consteel[®] ao redor do mundo estão em operação, em comissionamento ou em fase de construção, dentre elas a primeira que iniciou o processamento em 1989. Para Fanutti e Pozzi (2004) não há outra tecnologia de fusão inovadora tão bem documentada e com histórico tão positivo quanto ao do processo Consteel[®].

Segundo Memoli, Giavani e Grasselli (2010) a comparação entre sistema Consteel[®] e o processo convencional de carregamento do FEA deve considerar a performance dos processos, bem como as diferenças tecnológicas implementadas, a eficiência energética, os modais logísticos, os custos com manutenção e, obviamente, e a relevante redução de custo no processo de manufatura do aço.

Os dados apontam 2,7% de crescimento de produção total do aço entre os anos 1994 – 2005 no mundo, sendo de 4,1% ao ano o aumento pela rota de forno elétrico a arco, como apresentados por Argenta e Ferri (2005), o que eleva a importância do processo apresentado, enfatizando os baixos custos de investimento, alta flexibilidade na produção e menores impactos ambientais, sendo de suma importância para a competitividade das empresas.

O presente trabalho visa apresentar o sistema Consteel[®], com a segunda seção apresentando a evolução dos processos de fabricação do aço, o sistema Consteel[®] e sua aplicação, a terceira seção traz o modo com que os dados foram trabalhados, a quarta seção apresenta os resultados, a quinta seção expõe as vantagens e oportunidades de melhoria do processo e a sexta seção as conclusões sobre a aplicabilidade do processo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 A Fabricação do Aço

O aço é um material com intensa aplicação nas atividades humanas. Conforme Chiaverini (2005), trata-se de uma liga de ferro com carbono e outros metais em proporções variadas, conforme o tipo e a finalidade de sua utilização.

Apenas em meados do século XIX, segundo Araújo (1997), houve um avanço significativo no processo de fabricação do aço. Com o aperfeiçoamento e o aumento da capacidade dos alto-forno, no qual é possível realizar a redução de grandes quantidades de minério de ferro. Isso tornou o processo mais viável, se comparado a outros processos mais antigos. A figura 1 ilustra um conjunto de alto-forno.



Figura 1 – Foto de Alto-Forno 1 da Usina Ipatinga - Usiminas

Fonte: USIMINAS, 2017

Araújo (1997) cita ainda que o metal produzido pelo alto-forno é o ferro-gusa e não o aço, pois contém maior teor de carbono que o solicitado ao aço, assim como demais impurezas,

tais como silício, enxofre e fósforo, provenientes da redução do minério juntamente ao coque nas condições termodinâmicas resultantes do processo.

Buzin (2009) descreve que em 1856 o processo desenvolvido por Bessemer permitiu converter ferro gusa fundido em aço líquido, por meio da oxidação do carbono e do silício, utilizando ar comprimido injetado ao banho metálico. A partir disso, a produção de aço teve grande desenvolvimento, sendo o processo Bessemer, ilustrado na figura abaixo, aperfeiçoado por Thomas, objetivando a redução do teor de fósforo e consequente melhoria na qualidade dos aços. Com a implementação de outros processos, como o Siemens-Martin, e mais consideravelmente após a segunda grande guerra, o refino de gusa passou a utilizar-se de convertedores à oxigênio, conhecidos como Linz-Donawitz ou apenas como LD, por impetrarem melhor eficiência e maior produtividade.



Figura 2 – Foto de Conversor Bessemer desativado

Fonte: ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA, [s. d.]

Com a queda dos processos Siemens-Martin durante o século passado, houve a necessidade de um novo processo. Este novo processo consiste na produção do aço em forno

elétrico a arco, com uma carga essencialmente composta por sucata ferrosa, a qual é introduzida em um forno com três eletrodos verticais de grafite que descem por sobre a carga. A tensão elétrica estabelecida entre os eletrodos e a carga permite o surgimento de um arco voltaico, que fornece a energia térmica necessária à fusão da carga, podendo variar em temperaturas de trabalho entre 1590 a 1700 °C. A injeção de oxigênio durante o processo de fusão tem o objetivo de reagir com o excesso de carbono do banho, provocando mais calor e favorecendo a fusão, ilustrado na figura 3.

Oliveira (2015) define o Forno Elétrico a Arco como um equipamento utilizado na siderurgia para a fusão de cargas metálicas constituídas de ferro gusa, sucatas de geração industrial e por sucatas de obsolescência, dentre outros constituintes como carburantes e cales.

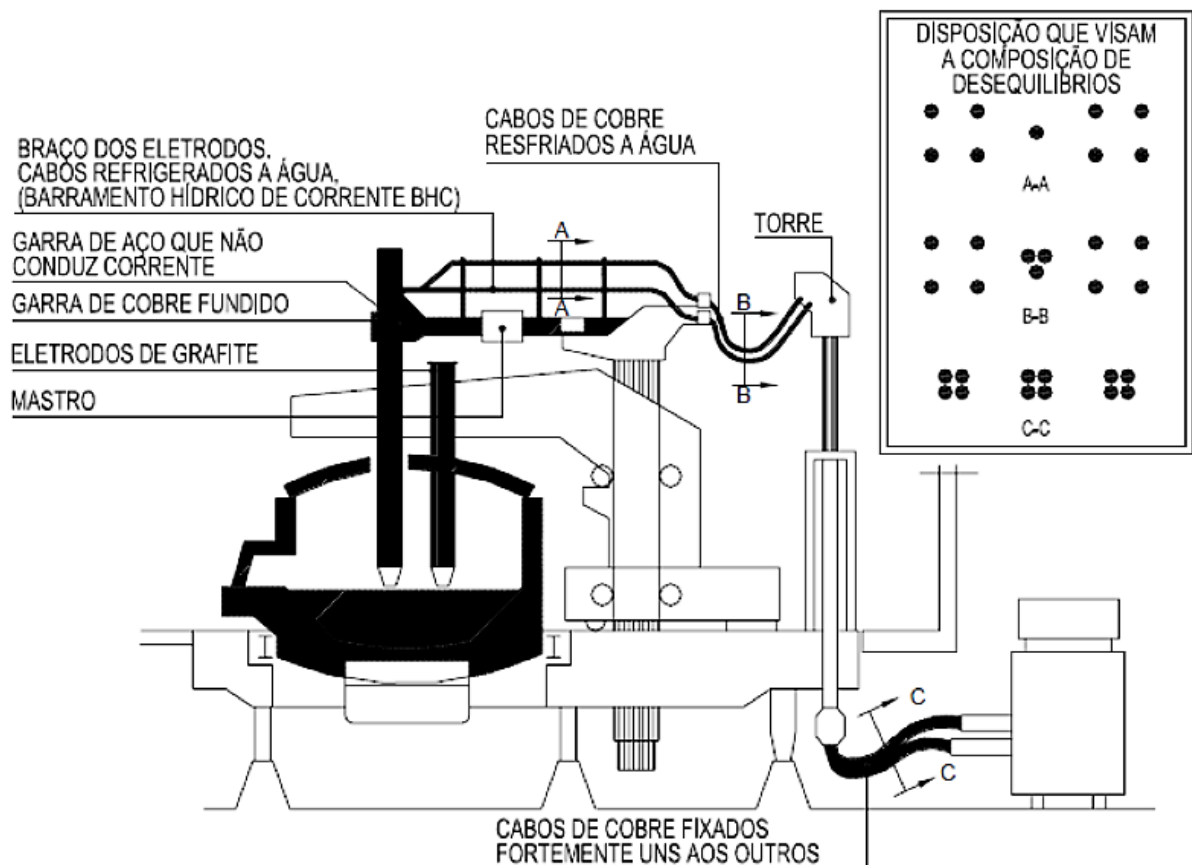


Figura 3 - Construção esquemática de um forno elétrico a arco

Fonte: GOMES, 2012

Segundo Buzin (2009), as usinas para produção de aço podem ser divididas em dois tipos, integradas e semi-integradas. As integradas operam três etapas básicas: redução do minério em ferro-gusa, refino do ferro-gusa em aço e a transformação do aço em produtos siderúrgicos, já as semi-integradas operam somente as fases de refino e conformação mecânica. A matéria

prima no processo semi-integrado é basicamente sucata ferrosa, aço e ferro-gusa, em forma sólida, juntamente a escorificantes. Após o processo de refino, o aço passa pela solidificação em lingotamento contínuo ou convencional, formando lingotes ou tarugos que serão processados nos laminadores.

Para elucidar o processo, Franzao (2011) cita que a produção do aço se inicia com o recebimento e preparação da matéria prima e sucatas, após, os cestos são montados de forma a compor as cargas para a corrida. Estes cestos são movimentados até acima do forno elétrico, onde o conteúdo é despejado no interior do forno, para que se faça a fundição do material e ajustes de composição. Em seguida o material fundido é vazado em uma panela, quando necessário, é feita a retirada de escória flutuante, então esta panela com aço vai para o Forno Panela. Nesta etapa é feito o refino secundário, ajuste de temperatura de lingotamento e acerto de ligas e composição química. Em seguida é feita uma desgaseificação a vácuo para a retirada hidrogênio, nitrogênio e oxigênio, então o material é transportado para o lingotamento contínuo, conforme representado pelas figuras 4 e 5.

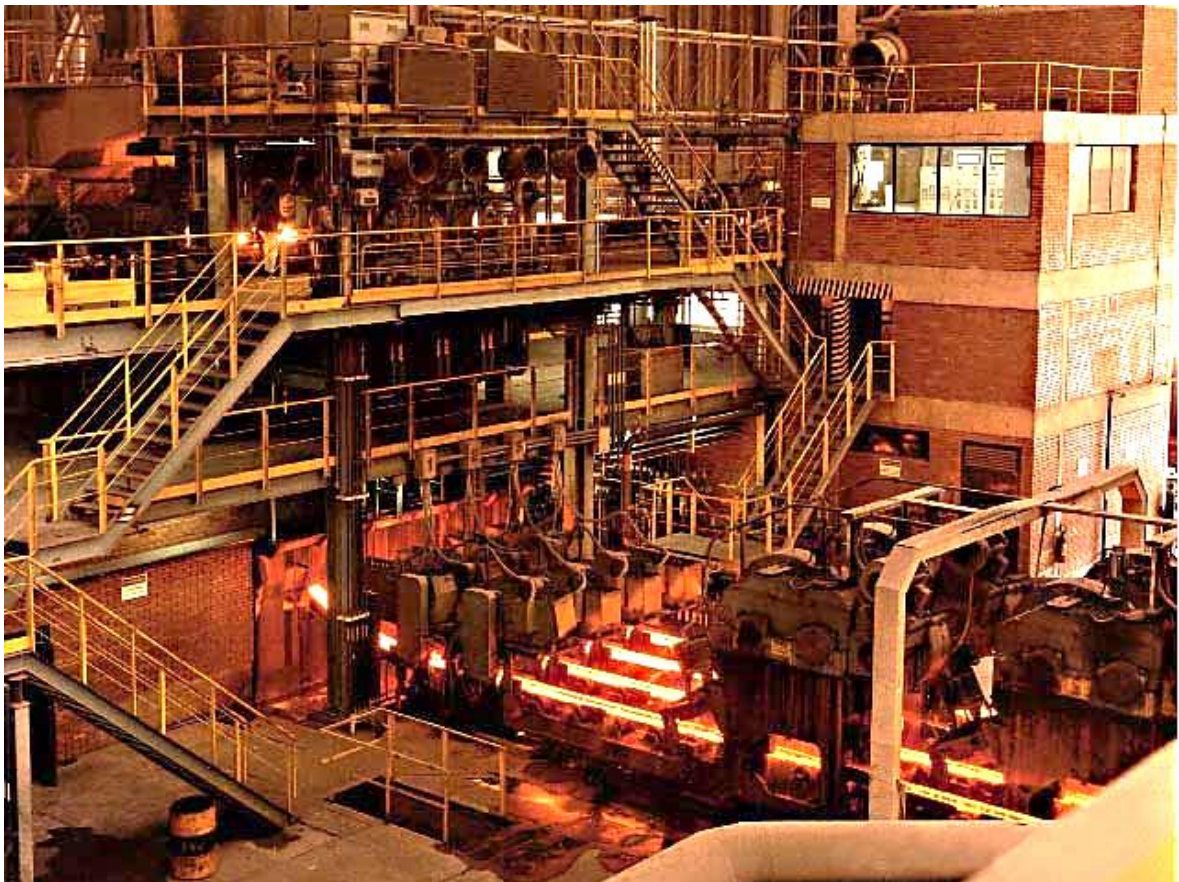


Figura 4 – Foto de máquina de Lingotamento Contínuo de aço

Fonte: LINGOTAMENTO CONTÍNUO, [s. d.]

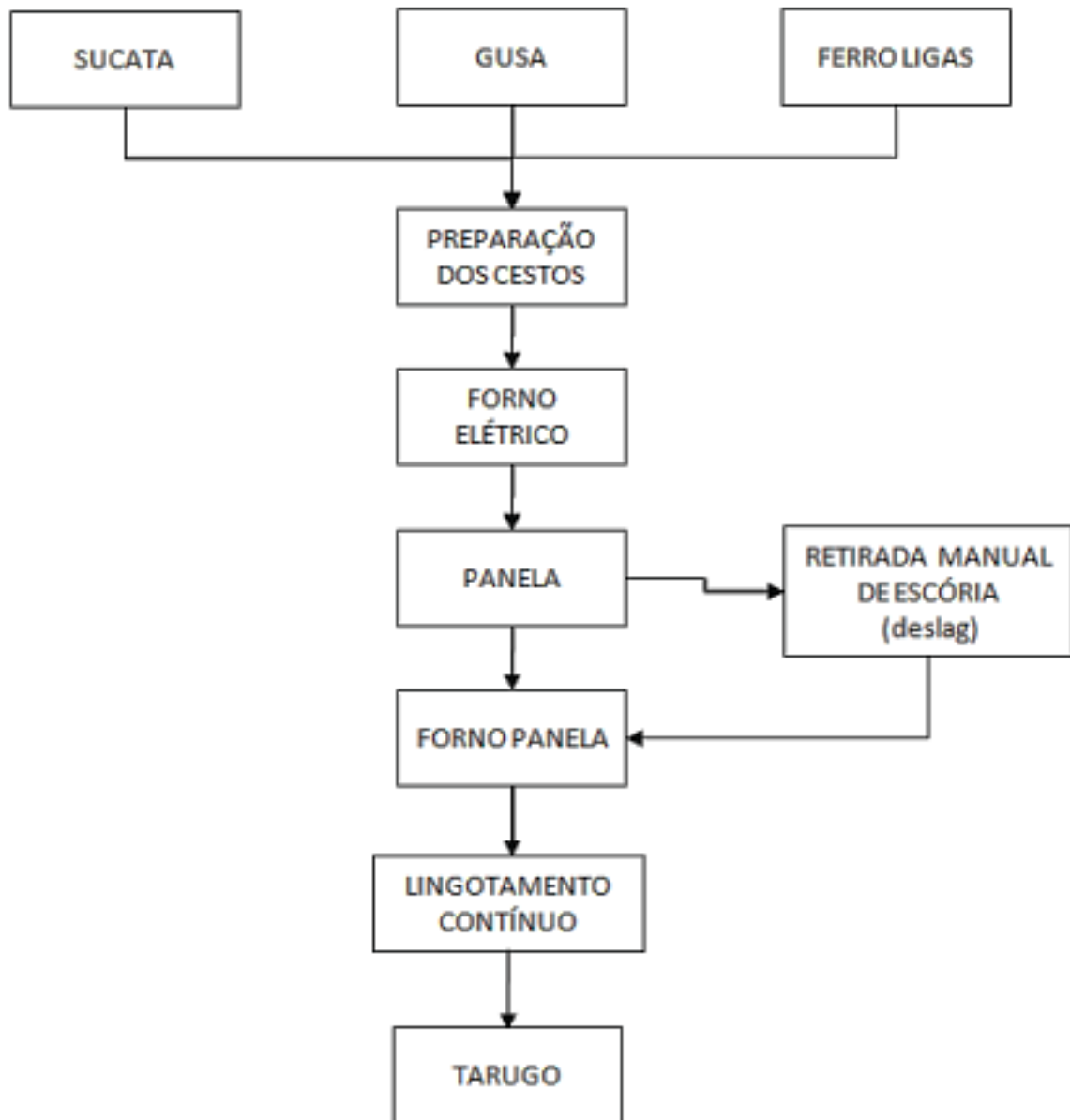


Figura 5 – Fluxograma do processo de aciaria elétrica

Fonte: FRANZAO, 2011

2.2 Sistema convencional de carregamento e fusão

A correta composição de cada cesto é de extrema importância para o processo, pois para cada cesto de sucata carregado no forno é gerado um programa de fusão próprio em função do tipo e composição da carga, possibilitando prever com maior precisão o montante de energia requerida, evitando falta ou excesso, e resultando em perdas (GOMES, 2012).

Gomes (2012) descreve o carregamento do forno da seguinte forma: sucata, gusa e outras matérias-primas são alocadas em cestões, que são grandes recipientes, geralmente com fundo falso. Para cada tipo de aço a ser fabricado haverá uma proporção de materiais que serão carregados conforme indicado no processo de fabricação. O carregamento é realizado através da abertura da abóboda do forno, horizontalmente, do posicionamento do cestão sobre o forno e da abertura inferior do cestão, conforme figuras 6 e 7.

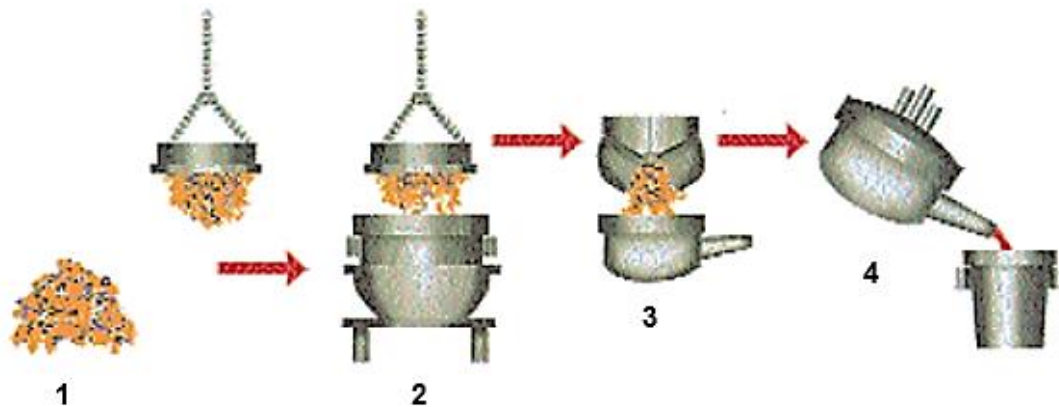


Figura 6 – Ilustração do Fluxo de Produção do Aço.

1 Sucata; 2 Colocação no cesto e pesagem; 3 Carregamento do forno; 4 Vazamento de aço

Fonte: Adaptado de BELGO, [s. d.]



Figura 7 – Foto ilustrativa do cestão de carregamento.

1 Cestão na posição fechada para carregamento; 2 Cestão na posição aberta de carregamento

Fonte: Adaptado de SPUMECA, [s. d.]

Após a operação de carregamento, a abóboda é fechada e o forno ligado. Os eletrodos de grafite, ligados à energia elétrica, são abaixados e se aproximam da sucata, a passagem de corrente elétrica forma um arco elétrico, que gera energia térmica e funde a sucata e os outros materiais do carregamento. A temperatura de banho do aço líquido atinge o valor aproximado

de 1.600 °C. Com fins de rastreabilidade, nesta etapa é gerado o número da corrida que acompanhará o produto até o término de fabricação.

Vieira (2017) acrescenta que o número de carregamentos necessários para se produzir uma corrida pode variar e consiste no número de cestões que serão adicionados no FEA. Este número depende grandemente da densidade aparente da sucata. Para sucatas de alta densidade aparente costuma-se utilizar 2 cestões e para baixa densidade aparente, 3 cestões. Este número pode variar ainda de acordo com a capacidade energética do forno.

2.3 O sistema Consteel®

Memoli, Ferri e Freitas (2009) comparam os fornos convencionais de carga pelo topo e fornos Consteel®, e citam que principal diferença entre os processos é a logística no método de carregamento, ou o gerenciamento do fluxo de sucata do pátio até o forno elétrico. A taxa de alimentação e a autonomia nos tipos de sucata irão definir o tamanho do pátio de sucata e a quantidade de pontes rolantes necessárias, para que não haja falhas. No processo convencional de carga pelo topo, o número de ponte rolantes será em função da quantidade e tamanho de cestões a serem preparados em um dado tempo, para que seja atendida a massa de sucata necessária ao tamanho da corrida do forno.

Segundo Memoli, Ferri e Freitas (2009), o sistema Consteel® adota uma organização diferente do pátio de sucata, com a matéria prima normalmente estocada lateralmente às esteiras do transportador, com a capacidade e o número de pontes de carregamento necessários neste processo dependendo da taxa máxima de alimentação de sucata requerida.

O sistema Consteel® é composto basicamente de duas seções: uma de carregamento e outra de pré-aquecimento, esboçado nas figuras 8 e 9. A sucata é transferida das pilhas do pátio ou diretamente dos vagões ferroviários por pontes rolantes até a seção de carregamento do transportador. O movimento de arraste e escorregamento faz com que o material se mova em direção ao forno até uma barra de contenção, instalada antes da seção de pré-aquecimento para garantir que a altura da camada de sucata no transportador não exceda um valor específico. Com a carga nivelada, o transporte é realizado uniformemente por meio da seção de pré-aquecimento, sendo pré-aquecida pelos gases de exaustão do forno.

A esteira transportadora do pré-aquecimento é fechada, fazendo com que o monóxido de carbono (CO) gerado no forno a partir da injeção de oxigênio seja queimado progressivamente,

controlando a quantidade de entrada de ar. A pós-combustão do CO, juntamente com o calor sensível dos gases de combustão, pré-aquece a carga metálica que é continuamente transportada para o FEA. Os fumos deixam o pré-aquecedor a alta temperatura e entram em uma câmara secundária, onde o gás é mantido a alta temperatura por mais de dois segundos, para garantir a combustão completa de poluentes e a incineração térmica de emissões nocivas como furanos e dioxinas. Em seguida, os gases são rapidamente resfriados, evitando o risco de nova formação da dioxina a baixa temperatura e, após, ser armazenado em um dispositivo próprio para controle de poluição do ar. (FANUTTI e POZZI, 2004).

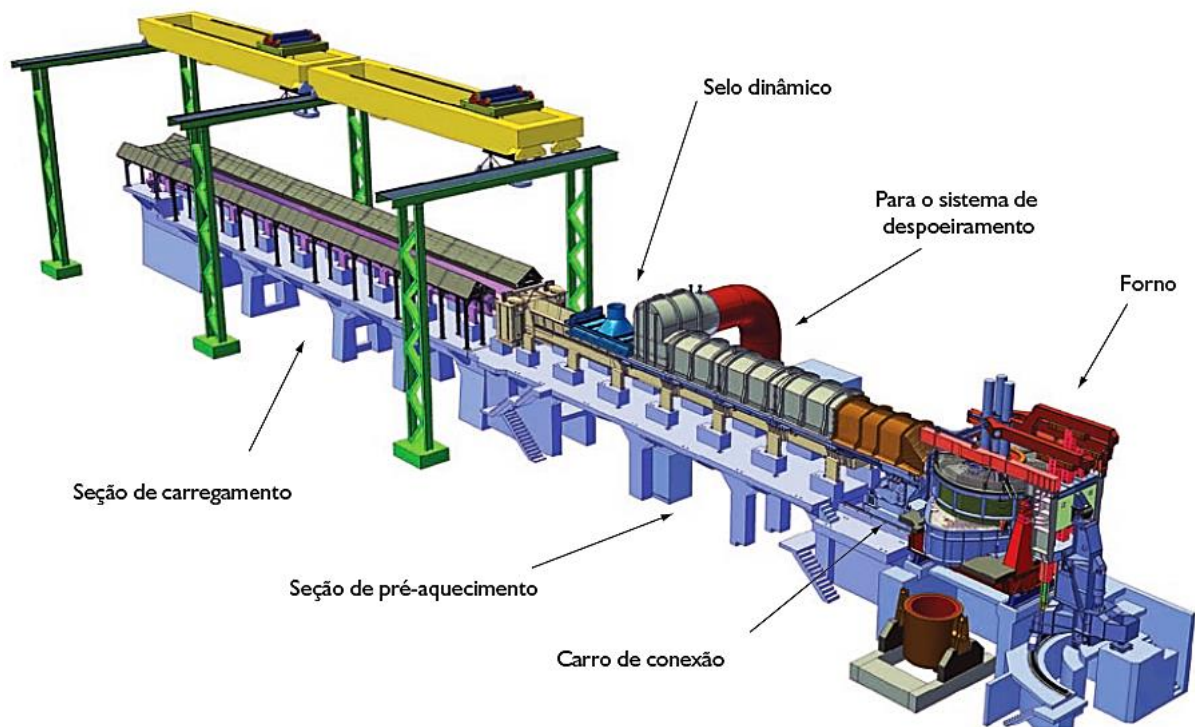


Figura 8 – Figura esquemática descritiva do Sistema Consteel®

Fonte: MEMOLI, FERRI e FREITAS, 2009

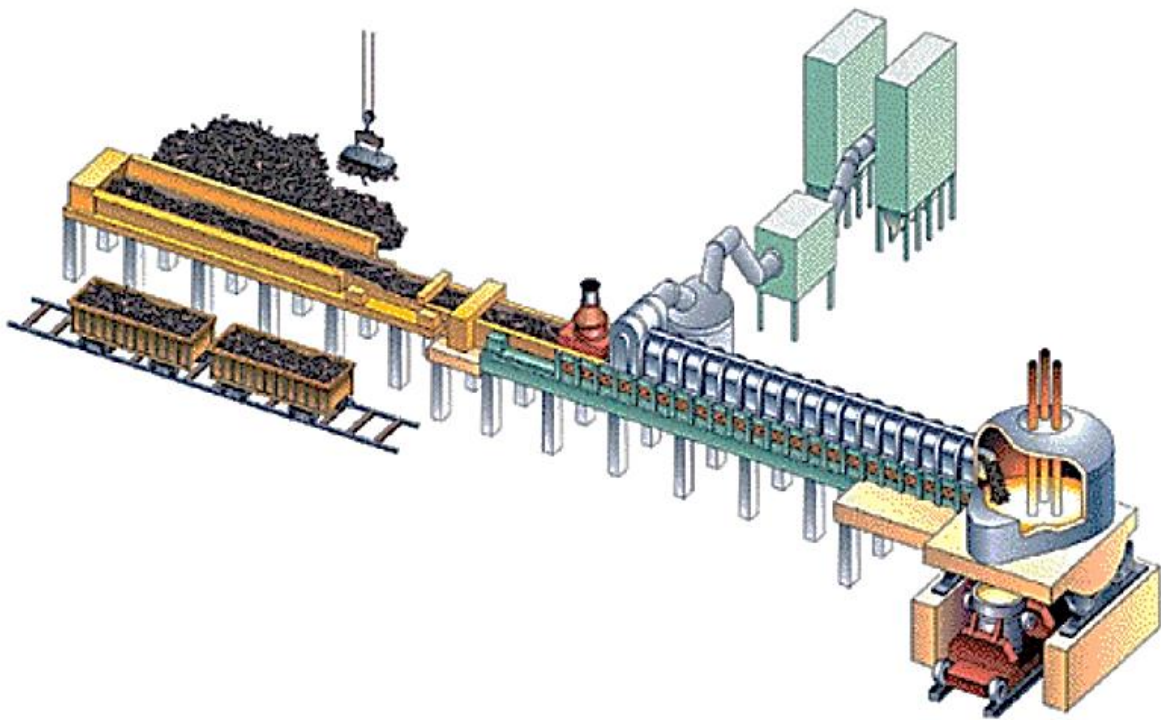


Figura 9 - Figura esquemática ilustrativa do Sistema Consteel®

Fonte: FANUTTI e POZZI, 2009

Memoli, Ferri e Freitas (2009) descreve um transportador de conexão, que é curto e retrátil, denominado carro de conexão, que transfere a sucata pré-aquecida para o interior do forno, conforme a figura 10. Há um selo dinâmico, que é utilizado para reduzir ao mínimo o volume de ar acolhido na seção de transição do pré-aquecedor. O peso de corrida dos fornos Consteel® varia entre 35 t a 300 t.

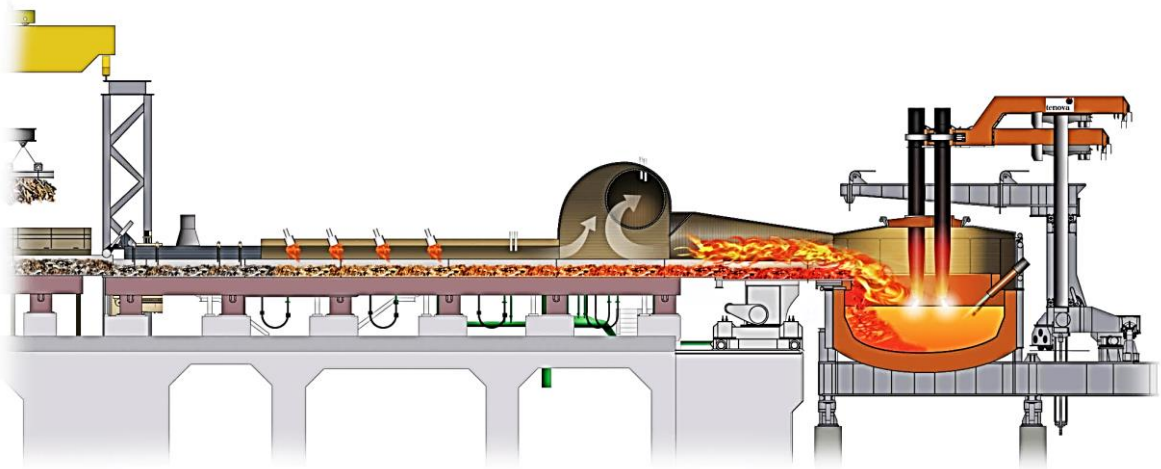


Figura 10 – Figura ilustrativa do processamento do sistema

Fonte: MEMOLI, FERRI e FREITAS, 2009

O único processo tecnológica e comercialmente capaz de realizar um carregamento contínuo e o pré-aquecimento da carga metálica em fornos elétricos a arco, mantendo um controle rígido das emissões e sem necessidade de maior consumo de energia elétrica é o Consteel®. Com tecnologia de controle de poluição aprovados por rigorosos regulamentos ambientais na Europa, Japão e Estados Unidos (FANUTTI e POZZI, 2004).

3 MÉTODO

O presente trabalho apresenta o método de pesquisa descritiva, com objetivo de retratar o objeto do estudo, realizando uma abordagem quantitativa e qualitativa entre o processo convencional e o novo desenvolvimento, através da combinação dos métodos de pesquisa bibliográfica e pesquisa de campo para levantamento dos dados a serem confrontados. Os termos utilizados na pesquisa bibliográfica foram: *Consteel*, Fusão de aço, FEA, Forno elétrico a arco, *EAF technology*, *EAF evolution* e carregamento de sucata.

Foram apresentados dados comparativos encontrados em literatura sobre capacidade produtiva e retorno energético entre os processos de fabricação, com foco nos aspectos de desempenho produtivo, retorno econômico e desempenho ambiental, bem como a análise de seu custo x benefício, considerando apenas os custos do processo, são apresentados nos resultados. O custo de implantação do sistema não foi disponibilizado pela única empresa brasileira que o possui atualmente, não permitindo assim uma análise de viabilidade financeira, considerando os custos de instalação e depreciação do maquinário.

Quanto aos dados de desempenho produtivo e custeio do processo, foi realizada a coleta de dados em literatura referente ao sistema *Consteel*[®] e dados reais de uma usina siderúrgica que se utiliza do sistema de carregamento convencional situada no Vale do Paraíba, no interior do estado de São Paulo.

Os dados coletados em dólares, foram organizados em uma tabela e somados ao final, sendo estes relativos aos custos de processo, com o consumo de energia elétrica, carga metálica, gás natural, oxigênio e outros insumo, custos de manuseio, com a contratação e utilização de pontes rolantes, operação de equipamentos, manuseio de carga metálica, e custos de manutenção, onde foram considerados consumo de eletrodos e refratários, manutenção em geral e custeio de tratamento de pós e gases.

Os dados tabelados da empresa em questão são comparados aos dados coletados na literatura de uma usina siderúrgica situada na Europa, com valores convertidos de euro para dólar, e analisado o percentual de redução de custo apresentado, disposto este no capítulo de discussões.

Os dados ambientais levantados analisaram as diferenças encontradas nas instalações de cada um dos processos e suas necessidades para atendimento as legislações ambientais vigentes, assim como a possibilidade de redução de custos proveniente da instalação *Consteel*[®] no

sistema de coleta, controle e tratamento de gases e particulado sólido suspenso proveniente da fusão da carga metálica.

O escopo deste projeto finda na comparação dos processos, sem, no entanto, inferir qual o melhor processo ou sobre qual dos processos deve ser implementado em instalações novas ou já existentes, uma vez que diversos outros fatores devem ser levados em consideração além dos apresentados.

4 RESULTADOS

4.1 O desempenho produtivo e econômico do sistema Consteel®

O consumo elétrico médio em FEAs é tipicamente 400 kWh/t, conforme descrito por Memoli, Ferri e Freitas (2009), porém se utilizado o processo Consteel®, este número pode cair para aproximadamente 335 kWh/t – 355 kWh/t, resultando em uma redução entre 11 a 16% no consumo. Isso se dá pelo efeito do pré-aquecimento que gera uma inércia térmica com o intuito de auxiliar a fusão da sucata, sem a necessidade de queimadores oxicom bustíveis. Para locais onde a energia elétrica é escassa a utilização do Consteel® é particularmente benéfica, pois reduz o transformador a um terço do necessário a um FEA convencional. A figura 11 explana uma instalação do sistema Consteel® no Brasil.



Figura 11 - Instalações do sistema Consteel® na VSB em Jeceaba-MG

Fonte: MEMOLI, FERRI e FREITAS, 2009

Memoli, Ferri e Freitas (2009) dizem que o Consteel® pode produzir até 2,5 t/h de aço líquido a 1620°C, com 1 MW de potência ativa. Comparando os processos, um FEA convencional de 100 t/h exigiria um transformador de cerca de 60 MW, enquanto um forno Consteel® de 100 t/h requer aproximadamente 40 MW, reduzindo em aproximadamente 30% a demanda contratada.

Além do pré-aquecimento reduzir o consumo de energia elétrica, se tem entre 30 a 50% de lastro de aço líquido empregado no Consteel®, em comparação com os 10 a 15% habituais

em processos convencionais, o que proporciona maior inércia térmica que auxilia a fusão da sucata sem a necessidade de queimadores de oxcombustível.

Em áreas do mundo onde a energia elétrica é problemática, o Consteel® é particularmente benéfico porque o transformador pode ser um terço menor do que com um EAF convencional. Na figura 12 são comparados os dados do mesmo forno com e sem Consteel®. Nota-se no sistema Consteel® um perfil de energia elétrica mais uniforme, reduzindo assim os custos associados à demanda de carga.

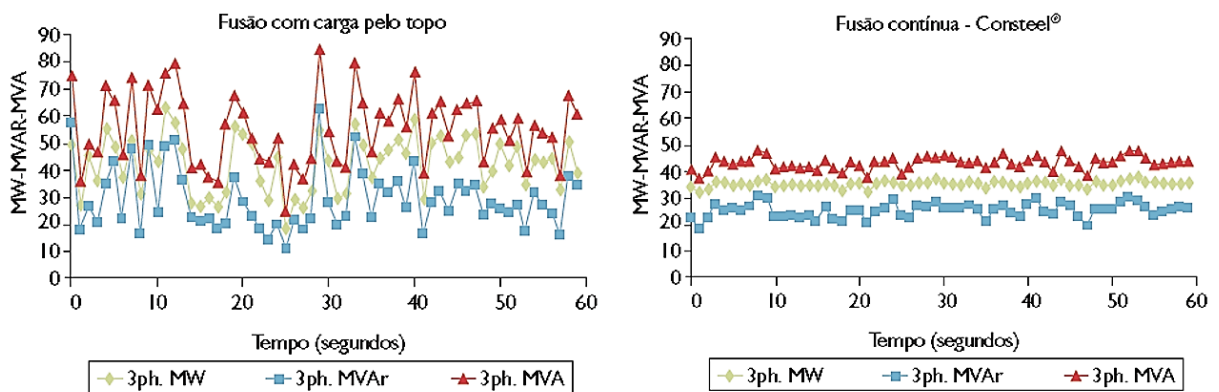


Figura 12 – Comparação entre a potência do transformador em cada processo

Fonte: MEMOLI, FERRI e FREITAS, 2009

Com carregamento de sucata contínuo, demonstrado na figura 13, o arco é mais estável e, estando coberto por escória espumosa, o que reduz consideravelmente os distúrbios elétricos *flicker* (cintilação), harmônicas e ruídos para a rede com um custo de capital mínimo. O nível de ruído é um item muito importante a se resolver, às vezes, até mais importante que o *flicker*.



Figura 13 – Foto do sistema de carregamento de sucata da empresa Tenova®

Fonte: TENOVA, [s. d.]

A redução do *flicker* e harmônicos são duas das principais motivações para a implementação do Consteel® em instalações onde a rede de energia elétrica é um problema. Esta é uma preocupação particular para as plantas localizadas em bairros povoados. Os operadores do FEA precisam limitar os distúrbios elétricos à rede e, em muitos casos, é necessário um investimento adicional em equipamentos elétricos para reduzir as flutuações da tensão cintilante (MEMOLI e FERRI, 2008).

Outro ponto importante no consumo de energia elétrica e insumos do forno elétrico é a densidade e tipo de sucata utilizada. Memoli e Ferri (2008) descrevem que esta é uma grande preocupação para as siderúrgicas chinesas, uma vez que a qualidade, disponibilidade, seleção e preparação de sucata são um problema sempre encontrado.

Com o uso do sistema Consteel® puderam perceber que poderiam utilizar qualquer tipo de sucata, partindo desde 100% de sucata pesada até o uso de 100% de sucata processada, com sucata leve, como rolos de arame, para compor o fundo do forno, proporcionando vasta flexibilidade da operação, uma vez que as siderúrgicas, via de regra, dispõem de uma ampla variedade de sucatas.

Assim como a diversidade de carga fria, também as siderúrgicas chinesas foram as primeiras a adicionar cargas de ferro gusa líquido ao banho. A utilização de metal quente reduz em cerca de 80 kWh/t de consumo de energia elétrica, com um adicional de 30% da carga com metal líquido, além da grande quantidade de CO disponível no banho, auxiliando a espumação da escória.

A experiência com este processo tem ajudado a projetar melhorias, que podem substituir o uso de altos-fornos existentes em algumas plantas integradas, assim como suas baterias de coque de apoio. Wheeling-Pittsburgh, ilustrada na figura 14, é a maior unidade da Consteel® em operação no mundo e a primeira unidade construída nos Estados Unidos, projetada para ser alimentada continuamente com metal líquido juntamente com sucata em um novo FEA. O forno tem uma capacidade nominal de 250 t/h, que pode ser aumentado para 300 t/h quando alimentado com 40% de metal quente e 60% de mistura de sucata.



Figura 14 – Carregamento de metal líquido na usina de Wheeling-Pittsburgh – EUA

Fonte: MEMOLI e FERRI, 2008

Além da comparação entre os processos de carregamento e fusão separadamente, onde analisou-se os valores de desempenho e foi levado principalmente em consideração as diferenças tecnológicas e de energia do sistema de carga e pré-aquecimento contínuo, Memoli, Giavani e Grasselli (2010) abordam a comparação de forma mais ampliada, incluindo a logística, o custo de descarte de resíduos e manutenção geral dos equipamentos.

O estudo foi realizado considerando um FEA de alta carga, depois determinando o que aconteceria aplicando o sistema Consteel® às mesmas condições de processo. Entendendo que diferentes processos de fusão podem ser comparados apenas quando se considera a mesma mistura de carga e condições de *tapping*, é necessária uma normalização do balanço massa-energia para comparar tecnologias, evitando o efeito de diferentes taxas e utilização de energia com processos desiguais, pois o objetivo da produção é, portanto, a combinação da carga, tendo uma grande influência na fusão. Assim se buscou destacar os possíveis benefícios provenientes de uma tecnologia, com as mesmas restrições operacionais e o mesmo nível de produtividade. A tabela 1 sintetiza os resultados atingidos no estudo.

		Convencional [€/t]	Consteel® [€/t]	Delta [€/t]
Processo	Energia elétrica, oxigênio, gás natural, aditivos da escória, carburantes, carga metálica	281,8	274,4	-7,5%
Manuseio	Ponte rolante, transporte e preparação de sucata, operação de equipamentos	11,0	7,3	-3,7%
Manutenção	Equipamentos de manutenção, consumo e manutenção refratária, consumo de eletrodos, tratamento da escória e pós de aciaria	9,3	7,1	-2,2%
Total		302,0	288,8	-13,3%

Tabela 1 – Comparação de custos da fabricação de aço convencional e Consteel®

Fonte: Adaptado de MEMOLI, GIAVANI e GRASSELLI, 2010

4.2 Impacto ambiental do sistema Consteel®

De forma sucinta as principais diferenças ambientais de um FEA e o sistema Consteel® relativas à sucção de gases são apresentadas na tabela 2.

Parâmetro	Carregamento convencional	Consteel®
Sucção dos fumos geradas pela sucata	Circuito primário durante a fusão/refino. Abóbada (sucção secundária) durante o carregamento.	Sempre no circuito primário pois a abóbada não abre durante o processo.
Controle de temperatura e oxidação na sucção secundária	Não possui.	Não possui (desnecessário por conta da condição anterior).
Controle de temperatura e oxidação na sucção primária	Não possui.	Possui.
Controle de pós combustão	Sim - resfriado a água (realizado em uma câmara de sedimentação, sem queimadores).	Sim - utiliza refratário para manter a alta temperatura, sem necessidade de queimadores.
Controle de pressão no FEA	Geralmente não possui.	Possui.

Tabela 2 – Comparativo ambiental entre processo convencional e sistema Consteel®

Fonte: Adaptado de FANUTTI e POZZI, 2004

Com Consteel[®], o gás de exaustão do forno é continuamente aspirado através do pré-aquecedor, que é a primeira parte do circuito primário. Desta forma, mesmo quando o forno é inclinado, seja desligado por alguma necessidade ou para retirada de escória resultante do processo, as aberturas no forno e o pré-aquecedor se mantêm alinhadas, assim a sucção no circuito primário é constante.

No caso de um carregamento convencional do FEA, com cargas realizadas por lote, a sucção do circuito secundário, realizado pela abóbada do forno, deve ser usada durante o vazamento e o carregamento de carga metálica, pois a sucção primária tem de ser interrompida. Uma grande quantidade de gás deve ser processada devido ao ar ambiente que é coletado, juntamente com o gás do forno. Ao mesmo tempo, o uso do circuito de sucção primário reduz a quantidade de poeira que é liberada na área ao redor do forno.

Existem estudos onde se evidencia que a maioria dos compostos poluentes orgânicos são liberados quando a sucção é realizada pelo coletor na abóbada do FEA, causando diversos danos ao ambiente e aos trabalhadores (FANUTTI e POZZI, 2004).

Além disso, Fanutti e Pozzi (2004) salientam que como o carregamento por cesto não é necessário, as dimensões do sistema de despoejamento podem ser reduzidas, diminuindo assim o custo do equipamento de tratamento dos gases ou evitando despesas adicionais em caso de aumento da capacidade em plantas existentes. Como o túnel de pré-aquecimento tem uma seção transversal maior do que um canal coletor normal, a velocidade dos fumos na seção do túnel é muito menor, isto significa que as partículas de poeira maiores depositam no fundo do túnel e são reaproveitadas junto da sucata transportada para o forno.

Desta forma, estima-se que 20 a 30% do total de pó de FEA produzido seja reciclado, resultando em uma redução considerável dos custos ambientais e um pequeno, mas importante, ganho econômico ao longo do tempo. A figura 15 faz a devida comparação entre os processos de tratamento dos gases.

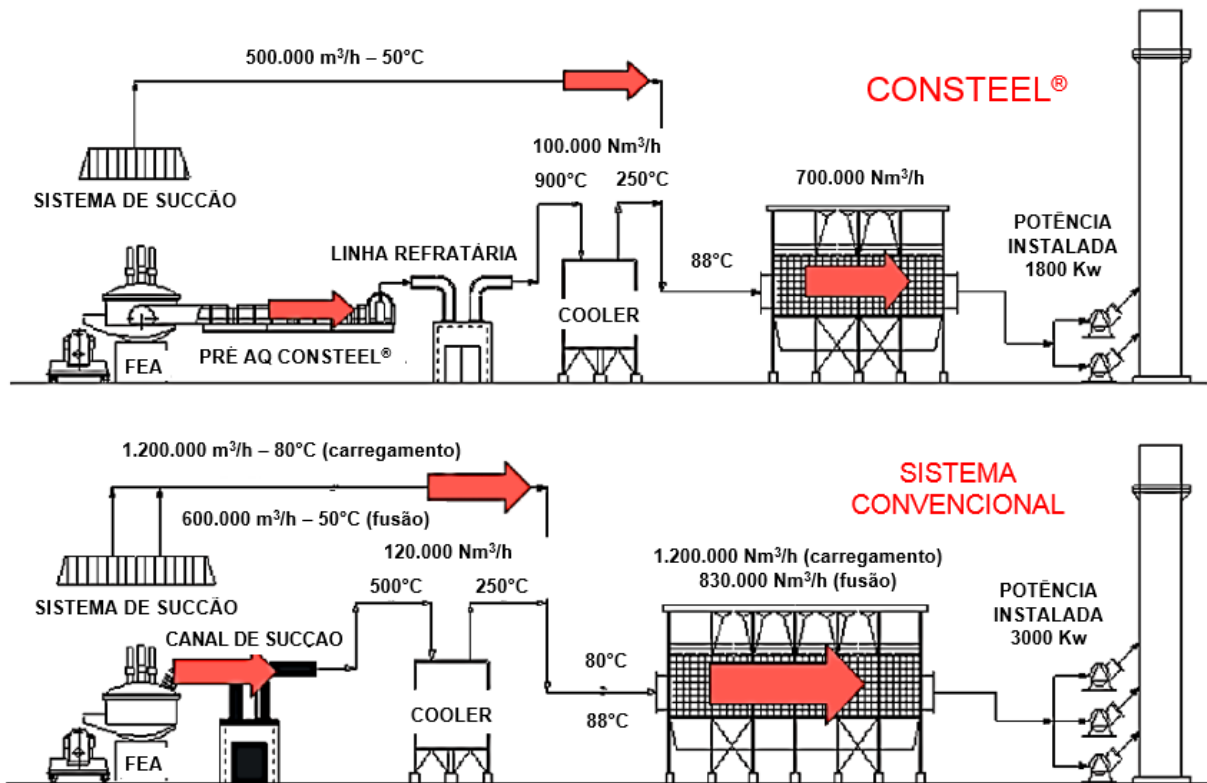


Figura 15 – Fluxograma ilustrativo para comparação entre as linhas de tratamento de gás

Fonte: MEMOLI e FERRI, 2008

5 DISCUSSÃO

A avaliação dos resultados quanto ao desempenho produtivo e econômico de qualquer processo é essencial para decisões gerenciais, tais como investimentos de implementação e melhoria, porém apenas esta avaliação pode trazer análises e, conseqüentemente, decisões falhas e pautadas em poucos dados. A falta de dados sobre os custos do maquinário e de instalação impediram a avaliação global e o cálculo de retorno do investimento, para que fosse possível julgar a viabilidade de implementação em uma usina siderúrgica brasileira que hoje se utilize do processo convencional de carregamento e fusão. Assim são apresentados dados que se atém apenas aos custos produtivos, de forma comparativa entre os processos.

Considerando os dados coletados de uma empresa siderúrgica brasileira que utiliza um forno elétrico a arco com carregamento convencional e os dados encontrados em literatura de um forno com sistema Consteel[®], tem-se o resultado disposto abaixo.

		Convencional [US\$/t]	Consteel[®] [US\$/t]	Delta
Processo	Energia elétrica, oxigênio, gás natural, aditivos da escória, carburantes, carga metálica	358,84	327,45	-8,75%
Manuseio	Ponte rolante, transporte e preparação de sucata, operação de equipamentos	11,18	8,71	-22,1%
Manutenção	Equipamentos de manutenção, consumo e manutenção refratária, consumo de eletrodos, tratamento da escória e pós de aciaria	13,38	8,47	-36,7%
Total		598,44	344,63	-42,4%

Tabela 3 – Comparação de custos FEA convencional e Consteel[®]

Com estes dados se constata o quão econômico em quesito de processo o sistema Consteel[®] se apresenta, com dados de custeio referentes aos processos envolvidos no sistema, que temos em plantas siderúrgicas conhecidos como pátio de sucata e fusão, sem interferência dos processos posteriores de processamento, solidificação e laminação do aço.

O maior delta encontrado, no quesito de manutenção, tem influência da idade dos equipamentos comparados, sendo os custos do Consteel[®] advindos de literatura recente e o processo convencional com equipamentos em utilização por mais de 30 anos, sem grandes

intervenções de atualização ou modernização, conhecido como *retrofit*, que possam ser consideradas. Este quesito considera ainda contratos de manutenção terceirizada.

Os dados pertinentes ao quesito manuseio consideram custos de contratos de equipamentos terceirizados, podendo estes contemplarem ou não sua manutenção, porém avaliados de forma a não influenciar os custos apresentados, invalidando os custos de manutenção.

O melhor desempenho e redução de custos na questão ambiental se dá por conta da redução de gases lançados ao ambiente, bem como menor custo com sistema de sucção, armazenamento e tratamento dos gases e sólidos em suspensão, resultante da reutilização destes em processo de queima e fusão.

Não foram encontrados em literatura dados comparativos ao custo de implementação e quadro de pessoal necessário para operação dos sistemas apresentados.

6 CONCLUSÃO

Analisando o apresentado, pode-se concluir que a utilização do sistema de carregamento e pré-aquecimento Consteel[®] é de grande valia para a redução de custos na manufatura do aço. O sistema é ecologicamente correto o que se considera um salto no quesito redução de poluentes no processamento de sucatas, gases poluentes e fumos gerados no processo de fusão e refino siderúrgico.

O sistema Consteel[®] não é apenas a solução mais eficiente para pequenas usinas e *mini-mills*, mas também é uma alternativa notável para plantas siderúrgicas de grande produtividade, os sistemas Consteel[®] estão entre as maiores unidades de fusão de arco elétrico na Europa, China, Japão, Brasil, Coréia do Sul, Sudeste Asiático e Vietnã. O uso da prática do lastro é muito importante para um bom resultado de um Consteel[®], reduzindo cerca de 55 a 60% do tempo de fusão, maximizando a produtividade e melhorar a eficiência energética.

Há necessidade de análises mais profundas quanto ao custeio de implementação do sistema, porém, quanto aos pontos indicados, pode-se concluir que o sistema é eficaz, eficiente e trata de uma inovação consolidada para as indústrias siderúrgicas.

Quanto a sugestões para trabalhos futuros, há o forno Quantum, inovação no ramo siderúrgico, com menos de 10 anos de mercado e utilização, que já se utiliza de uma fusão primária de sucata por meio de um eixo contínuo de carregamento, podendo ser estudada uma forma de se unir as duas tecnologias, buscando a maior eficiência energética no conjunto.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, L.A. **Manual de Siderurgia**, v. 1 – produção. São Paulo: Arte & Ciência, 1997.

ARGENTA, P.; FERRI, M. B. **The EAF technology evolution and the Consteel® system**. La Metallurgia Italiana, [S. l.], n. 7-8, p. 9 - 13, 2010.

BELGO. Grupo ArcelorMittal. **Processo de Fabricação Belgo 50 e Belgo 60**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: https://www.belgo.com.br/solucoes/artigos/pdf/belgo_50_60.pdf>. Acesso em 11 Set. 2017.

BUZIN, P.J.W.K. **Desenvolvimento de briquetes autorredutores a partir de carepas de processamento siderúrgico para utilização em Fornos Elétricos a Arco**. Porto Alegre, 2009.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**, 7. ed. São Paulo: ABM, 2005.

ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA. **Bessemer process**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <<https://www.britannica.com/technology/Bessemer-process>>. Acesso em 22 Ago. 2017.

FANUTTI, G.; POZZI, M. **Environmental control and the Consteel process**. Millennium Steel, Londres, v. 1, n. 1, p.105-110, 2004.

FRANZAO, D. A. **Redução de empeno em barras treiladas do aço SAE 9254**. 2011. 50 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2011.

GOMES, R. L. **Análise energética de um forno elétrico a arco de 40T utilizando gusa líquido**. 2012. 50 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Marabá, Faculdade de Engenharia de Materiais, Marabá, 2012.

LINGOTAMENTO CONTÍNUO. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <<http://www.asminasgerais.com.br/Zona%20da%20Mata/TeCer/Industria/bmp/grande012.htm>>. Acesso em 10 Jul. 2017.

MEMOLI, F.; FERRI, M.B. **2007 – A record year for Consteel®**. Millenium Steel Internacional Edition, Londres, v. 1, n. 1, p. 83 - 88, 2008.

MEMOLI, F.; FERRI, M.B.; FREITAS, J.V. **Aumento das plantas Consteel® no mundo:** flexibilidade para a carga contínua de gusa líquido e sucata no Forno Elétrico a Arco agora na siderurgia brasileira. *Tecnologia Metalúrgica Materiais e Minerais*, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 54 - 60, Jul. - Set. 2009.

MEMOLI, F.; GIAVANI, C.; GRASSELLI, A. **Consteel® EAF and conventional EAF:** a comparison in maintenance practices. *La Metallurgia Italiana*, [S. l.], n. 7-8, p. 9 - 13, 2010.

OLIVEIRA, J. S. **Redução do consumo de cal em escória de forno elétrico a arco.** 2015. 55 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Faculdade de Pindamonhangaba, Fundação Universitária Vida Cristã, Pindamonhangaba, 2015.

SPUMECA. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <<http://www.spumeca.com.br/servicos/fundicao/cestos-de-carregamento>> Acesso em 04 Dez. 2017.

TENOVA. **Consteel continuous charging system.** [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <<http://www.tenova.com/product/consteel-continuous-charging-system/>>. Acesso em 10 Jul. 2017.

USIMINAS. **Usiminas irá religar Alto-Forno 1 da Usina de Ipatinga.** [S. l.], 2015. Disponível em: < <http://www.usiminas.com/blog/usiminas-ira-religar-alto-forno-1-da-usina-de-ipatinga/>>. Acesso em 25 Mai. 2017.

VIEIRA, D. **Análise comparativa da composição química de aço e escória e rendimento metálico de um FEA entre parâmetros de carregamento e injeções distintos.** 2017. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

Autorizo cópia total ou parcial desta obra, apenas para fins de estudo e pesquisa, sendo expressamente vedado qualquer tipo de reprodução para fins comerciais sem prévia autorização específica do autor. Autorizo também a divulgação do arquivo no formato PDF no banco de monografias da Biblioteca institucional.

Mariana Sales de Paula

Pindamonhangaba, Dezembro de 2017.