

## AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO SISTEMA CONSTEEL®\*

Marice Aparecida Ferreira de Castro<sup>1</sup>  
Willbrynnner Pereira Marques<sup>2</sup>

### Resumo

*A indústria siderúrgica é um setor altamente intensivo em energia e recursos, tendo que lidar com os desafios de aumentar a eficiência energética. O aço é a liga metálica mais utilizada atualmente, sendo utilizado em construção civil, na infraestrutura de transporte, na manufatura de automóveis, bem como no uso militar. Portanto, novas tecnologias mais eficientes, que impactam menos o meio ambiente e reutilizam resíduos industriais, são importantes para o mercado. O presente trabalho sugere uma adaptação do sistema Consteel® em usinas siderúrgicas integradas, buscando, sobretudo, um ganho na eficiência energética. Alguns problemas nessa tecnologia como baixa temperatura e vazão do gás de pré-aquecimento acabam limitando a taxa de fusão da sucata. Assim sendo, foi proposto um método para utilização dos gases de exaustão do alto forno como fonte complementar de fornecimento de energia, aquecendo a sucata por meio de queimadores de chama.*

**Palavras-chave:** Consteel®; Forno elétrico a arco; Eficiência energética.

### INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF THE CONSTEEL® SYSTEM

#### Abstract

*The steel industry is a high energy and resource-intensive sector, having to deal with the challenges of increasing energy efficiency. Steel is the most widely used metal alloy currently, It has being used in civil construction, transport infrastructure, in the manufacture of automobiles, as well as military use. Therefore, innovative technologies more efficient, less environmental impact and reuse industrial waste, are important to the market. This paper suggests an adaptation of the Consteel ® system in integrated steel mills, seeking a gain in energy efficiency. Some problems with this technology as low temperature and flow preheating gas end up limiting the rate of melting of scrap. Thus, it was proposed a method for utilization of exhaust gas of blast furnace as a complementary source of supply of energy, heating the scrap through flame burners.*

**Keywords:** Consteel®; Electric arc furnace; Energy efficiency.

<sup>1</sup> Engenharia Metalúrgica, Mestranda em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, ES, Brasil.

<sup>2</sup> Engenharia Química, Mestrando em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, ES, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Na sociedade moderna, o aço é um importante material para construção civil, na infraestrutura de transporte, na manufatura de equipamentos e automóveis, bem como no uso militar [1]. De acordo com o Instituto Aço Brasil [2], observou-se um aumento na produção de aço bruto no Brasil, sendo que nos 3 meses de 2018 houve um acréscimo de 4,9% em relação ao mesmo período de 2017.

Esta crescente produção está atrelada a um intenso consumo de energia [3], representando o segundo maior custo em siderúrgicas integradas [4]. A indústria siderúrgica é um setor altamente intensivo em energia e recursos, tendo que lidar com os desafios de aumentar a eficiência energética e da diminuição na emissão de CO<sub>2</sub> [5]. Este setor industrial responde por 15 a 20% do consumo total de energia industrial e 5 a 10% do consumo total global de energia primária [6]. Além disso, a quantidade de energia demandada para produção de aço depende do tipo de processo utilizado [7]. Ainda [7], cita que para fornos elétricos a arco (FEA) a demanda energética varia entre 8,3 e 9,8 GJ/tab (tab = tonelada de aço bruto), enquanto que para um forno de conversão a oxigênio (BOF) a demanda é de 17,4 a 18,6 GJ/tab.

Embora os FEAs apresentem uma vantagem em consumo sobre os BOFs, cerca de 20% da energia alimentada para fundir o metal é perdida na forma de gases de exaustão [8]. Visando uma maior eficiência energética e o cumprimento de exigências ambientais, tecnologias que utilizam os gases de exaustão do forno para pré-aquecimento da sucata de alimentação tem despertado grande interesse [9].

A fim de aumentar o desempenho e reduzir o consumo de energia elétrica dos FEAs, novas técnicas vêm sendo introduzidas [4]. O pré-aquecimento da sucata realizada pelos gases quentes produzidos no FEA apresenta a oportunidade mais favorável para reduzir o consumo de energia.

Nesse caso, o sistema Consteel® foi desenvolvido e implementado por J. A. Vollomy em 1990 como uma tecnologia de alimentação contínua de sucata a qual é pré-aquecida pelo gás de exaustão do forno [10]. Entretanto, conforme [11] a temperatura média do ar não excede os 250 °C para fornos de capacidade média e é ainda menor para fornos maiores devido à espessura da camada de sucata que chega a alcançar 900 mm, gerando alguns problemas no pré-aquecimento da sucata.

Este trabalho visa avaliar um método de melhoria no processo de pré-aquecimento da sucata realizado pelo sistema Consteel® em usinas siderúrgicas integradas, buscando, sobretudo, um ganho na eficiência energética. A proposta é utilizar os gases de exaustão do alto forno como fonte suplementar de fornecimento de energia no pré-aquecimento da sucata, visando diminuir os problemas relacionados a dioxinas e aumentar a capacidade de produção no FEA.

## 2 O SISTEMA CONSTEEL®

O sistema Consteel® (Figura 1) foi desenvolvido na intenção de reduzir o consumo de energia e os custos de produção, sendo instalado pela primeira vez em 1998. Nesse sistema, a carga de sucata é continuamente alimentada no FEA, por meio de um sistema de transporte que é conectado ao forno [12].

A sucata é transportada do local de armazenamento até a seção de carregamento do transportador. O movimento oscilante de transporte da esteira faz com que o material se mova de forma homogênea em direção ao forno, garantindo que a

camada de sucata no transportador não exceda um valor específico. Com a carga nivelada, o transporte é realizado uniformemente por meio da seção fechada de pré-aquecimento, sendo pré-aquecida pelos gases de exaustão do forno [13].

No forno elétrico, a sucata funde por imersão no banho que se faz através do arco elétrico, trabalhando em uma camada plana coberta por uma escória espumosa que radia energia na interface aço escória. Nestas condições, o arco é estável e não é afetado pela presença de sucata sólida.

O material de construção do FEA foi projetado para suportar impactos, da sucata e do arco elétrico, durante seu processo, minimizando riscos. Tudo isso contribui para criar um ambiente de trabalho mais seguro e confortável em comparação com os padrões típicos da indústria siderúrgica [14].

O sistema de controle FEA ajusta automaticamente a velocidade da esteira controlando a quantidade de sucata de modo a manter o banho na temperatura desejada, controlando também a injeção de oxigênio e carbono para manter a escória espumosa adequada, permitindo uma recuperação de energia no refugo [15] [12]

Esta escória tem como função a proteção do arco elétrico, aumentando a eficiência na transferência de energia para o banho metálico. A economia de energia está associada na boa espumação da escória e no pré-aquecimento da sucata, aumentando a eficiência de fusão [14].

Assumindo uma temperatura média de pré-aquecimento entre 300 e 400°C, a economia de energia varia de 80 a 120 kWh/ton de aço líquido [15] [16].

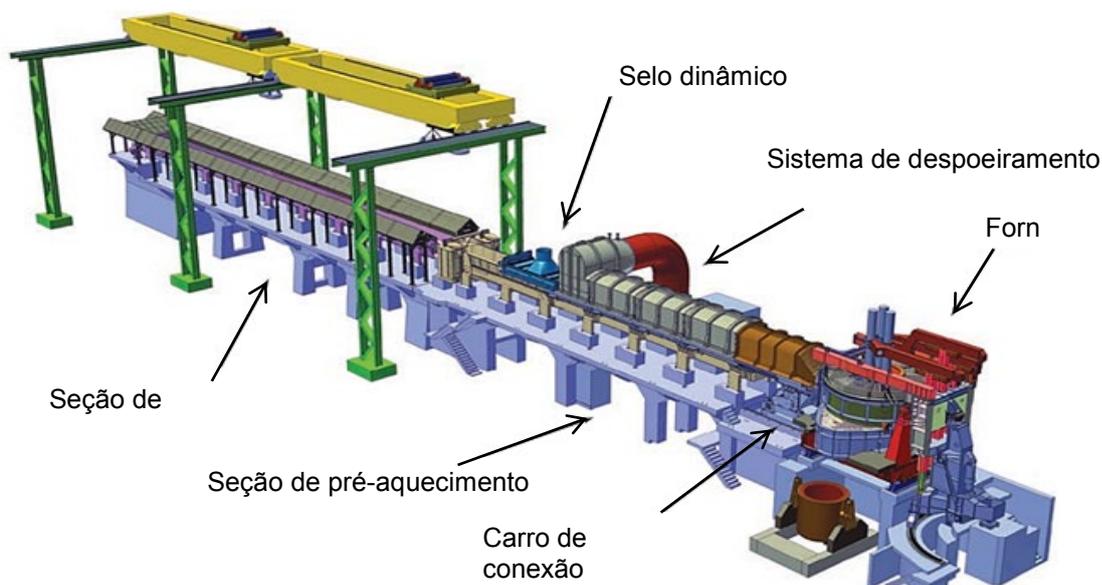


Figura 1 – TENOVA Consteel Technology®: os gases de saída pré-aquecem a sucata continuamente carregada ao longo do túnel de carregamento.

Fonte: Adaptado de [12].

As características principais que diferenciam o sistema Consteel® da maioria das outras tecnologias é a combinação de pré-aquecimento e o carregamento contínuo. O pré-aquecimento é importante para economizar energia, mas o carregamento contínuo tem mostrado benefícios ainda maiores, como: baixos custos de produção, flexibilidade, redução do impacto ambiental e maior segurança [17]. A Tabela 1 apresenta uma comparação entre um FEA convencional e outro que utiliza o sistema Consteel®.

Tabela 1 – Características dos FEAs

Características	FEA Convencional	FEA Consteel
Power off	Cesto 12-14 min	Alimentação contínua 6-8 min
Pré-aquecimento	Não possui	Baixa eficiência
Consumo de energia	400 kWh/ton	360 kWh/ton
Consumo de gás	6 Nm <sup>3</sup> /ton	3 Nm <sup>3</sup> /ton
Limitação de sucata	Sim	Sim
Mettalic yield	0	0,50 %
Queimadores requeridos	Sim	Não
Sistema de remoção de poeira	100 %	100 %

Fonte: Adaptado de [18].

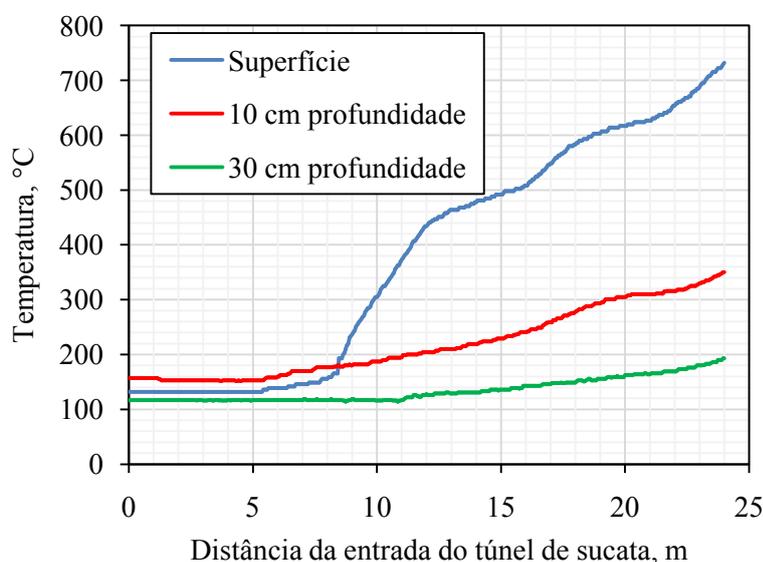


Figura 2 – Temperatura da camada de sucata x distância da entrada do túnel  
Fonte: Adaptado de [10].

Entretanto, [19] ressalta que a principal desvantagem do sistema Consteel® é a taxa de fusão limitada, devido à transferência de calor insuficiente para a sucata. [11] e [19] explicam que esse fato ocorre porque os gases de exaustão passam em baixa velocidade pela superfície da sucata, sem penetrar as camadas mais internas. Conforme se pode ver na Figura 2, a temperatura diminui drasticamente quanto mais profunda for à camada de sucata. Os autores ainda pontuam que o sistema Consteel® também possui baixa produtividade quando comparado com FEAs modernos de capacidade idêntica.

[20] relata que devido ao suprimento ineficiente de oxigênio durante o pré-aquecimento da sucata, compostos orgânicos voláteis podem ser emitidos junto com os gases de exaustão. Os componentes do gás de exaustão são ideais para formação de dioxinas, uma espécie tóxica formada a 500°C durante o resfriamento do gás de exaustão. Outra forma de solucionar o problema de emissão de CO e dioxinas contidas no gás de exaustão é a passagem desse gás por uma câmara de combustão por pelo menos 2 segundos, a fim de completar a incineração térmica desses compostos tóxicos [21] [22].

Segundo [8], durante o pré-aquecimento, alguns fatores podem favorecer o aumento da temperatura da sucata como: ao invés de injetar ar distribuído ao longo do túnel, fazê-lo ao lado do forno; manter um nível de oxigênio mínimo no gás de exaustão do túnel; aumentar o fluxo de gás que entra no túnel; aumentar a concentração de CO no gás de exaustão até uma relação  $CO_2/(CO+CO_2)$  de 0,25.

## 2.1 Eficiência Energética em Siderúrgicas

As siderurgias buscam continuamente alternativas tecnológicas e operacionais para aumentar sua eficiência energética. Por sua vez, mais de 80% das emissões de gases de efeito estufa (GEE), na siderurgia, provêm do consumo de insumos energéticos [2]. Portanto, ao seguir um movimento semelhante ao do consumo de energia, reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> dependerá, cada vez mais, do desenvolvimento e da introdução de novas tecnologias na produção de aço.

[2] afirma que algumas usinas integradas já utilizam gases provenientes dos processos siderúrgicos em outras etapas na planta, sendo em forma de energia elétrica ou de vapor. Entre esses gases, destacam-se o gás de coqueria (GCO), o gás de alto-forno (GAF) e o gás de aciaria (GAC). Está virando uma tendência mundial o reaproveitamento dos gases e resíduos de indústrias.

No Brasil, o gás de coqueria apresenta alto índice de reaproveitamento, tendo alcançado cerca de 99% em 2013. A siderurgia brasileira ainda tem a possibilidade de melhorar o aproveitamento dos gases de alto-forno, faixa de 90%, e de aciaria, faixa de 70% [2]. É importante destacar que, quanto maior for o reaproveitamento dos gases, menor será o consumo de insumos não renováveis no processo, além de permitir a cogeração de energia elétrica.

No caso específico do metano (CH<sub>4</sub>), este tem um elevado poder calorífico (750 a 900 kcal.Nm<sup>-3</sup>), sendo assim normalmente tratado e enviado a um gasômetro para ser misturado a outros gases combustíveis gerados na usina e utilizado na produção de energia elétrica ou em outros processos de uma siderurgia [23].

Conforme citado por [24], os gases de alto forno não aproveitados nos processos do mesmo são queimados em tochas, que funcionam como reguladoras da pressão do sistema, além de serem instaladas com objetivo de reduzir a emissão de poluentes.

### 2.2.1 Reutilizando o Gás de Alto-Forno

Usualmente utilizada pelas indústrias siderúrgicas integradas no processo de laminação. Os recuperadores de calor foram desenvolvidos para redução na emissão de poluentes, economia de energia e garantia de qualidade do produto em relação à taxa de produção [25]. Estes recuperadores encontram-se no canal de saída dos gases de emissão do forno, a uma distância de aproximadamente 30m.

No processo de laminação a reutilização do GAF é feito na zona de aquecimento por meio de queimadores, que seguem a relação estequiométrica de combustão para as vazões de combustível (GAF) e a vazão do comburente (ar atmosférico). Estas vazões são controladas para manter a temperatura de queima desejada, sem prejudicar a produção [26].

Conforme apresentado por [27], a Figura mostra as temperaturas do ar e do GAF após o processo dos recuperadores.

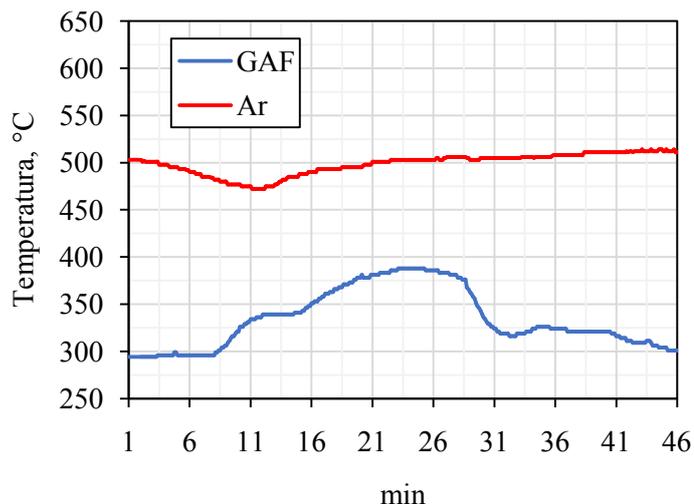


Figura 3 – Temperatura do ar e do GAF após recuperador de calor do ar e do GAF, respectivamente.

Fonte: Adaptado de [27]

Desta forma, considera-se uma temperatura após a passagem pelos regeneradores de aproximadamente 300 a 400°C para o GAF e de 450 a 500°C para o ar atmosférico. Portanto, para atingir uma temperatura adequada para o processo de queima, a vazão destes deverá ser controlada.

### 3 PROPOSTA PARA O FEA CONSTEEL®

Semelhante ao processo de laminação, a reutilização do gás de alto forno (GAF) será feita por meio de um trocador de calor do tipo correntes cruzadas, denominado recuperador de calor de GAF, aquecendo a sucata por meio de queimadores de chama, montados na parte superior da parede da zona de pré-aquecimento da sucata. O desenho esquemático da Figura representa a reutilização dos GAF.

Normalmente quando há escassez do GAF o gás natural é utilizado, ou como complementação energética em função do ritmo de operação. Como comburente, é utilizado o ar atmosférico que, assim como no caso do GAF, é pré-aquecido por meio de outro trocador de calor do tipo correntes cruzadas, denominado recuperador de calor de ar [27]. O oxigênio gasoso pode ser utilizado também, com pureza mínima de 95%, misturado e pré-aquecido junto ao ar de combustão. Porém, o uso de oxigênio é limitado, para a segurança do processo, na faixa de 30% na composição final do ar de combustão.

[28], aponta que o enriquecimento do ar atmosférico de combustão traz inúmeros benefícios como por exemplo: aumento da eficiência térmica, da produtividade e da temperatura adiabática de chama; melhoria das características e estabilidade da chama; redução do volume de gases de exaustão e custos com combustíveis; maior eficiência da transferência de calor e flexibilidade do sistema de aquecimento, dentre outros.

Conforme abordado por [27], a variação da composição química do GAF com relação ao ar, leva em consideração as características do combustível, podendo ser uma relação fixa ou variada, refeita através de cálculos da relação do volume equivalente de ar em função da vazão de oxigênio.

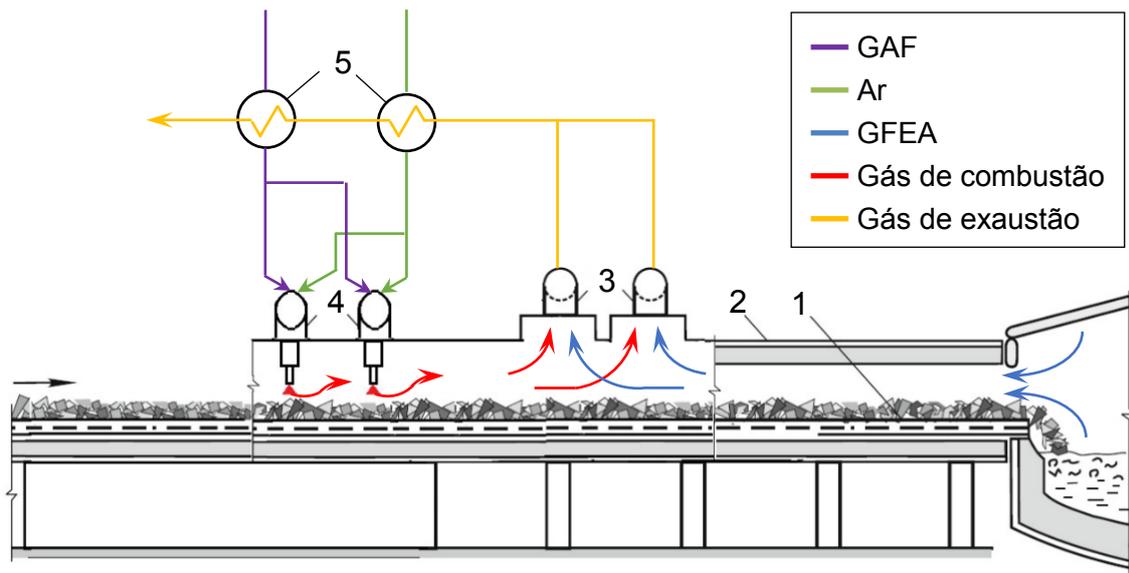


Figura 4 – Esquema de reutilização do GAF, sendo que (1) é o transportador vibratório (esteiras), (2) é o túnel revestido por refratário, (3) são os tubos exaustores de gases, (4) é o ponto de injeção de calor através de queimadores e (5) recuperador de calor.

Fonte: Figura adaptada de [11].

Levando em consideração a pressão da rede interna de distribuição do GAF da indústria a temperatura ambiente, a sucata poderá ser pré-aquecida pelos queimadores em conjunto com os gases de exaustão do FEA a temperaturas que podem variar de 600 a 800°C, levando em consideração o controle da vazão do combustível e comburente, composição de sucata e controle de temperatura de queima. Em síntese, ao implantar o sistema sugerido, acontecerá modificação nos parâmetros de fusão da sucata dentro do banho, reduzindo tempo de fusão e conseqüentemente variando a eficiência energética total do processo.

#### 4 CONCLUSÃO

Para a implementação do sistema sugerido pelo trabalho, o túnel de pré-aquecimento deverá ter uma maior extensão para garantia de uma alta flexibilidade operacional e alta segurança. Junto com sistema de sucção de gás (tubos exaustores), que devem estar posicionado onde consiga atender os gases provenientes tanto dos queimadores quanto os do FEA. Instalando filtros para a redução de emissões de mercúrio e dioxinas nos mesmos.

Portanto se faz necessário uma análise técnica, com balanços térmicos e de massa, baseados em dados operacionais do sistema Consteel® para apresentar a veracidade da instalação sugerida pelo trabalho e se o mesmo influenciaria na transferência de calor na profundidade da sucata na esteira.

Entretanto, pode-se dizer que o sistema sugerido conseguiria reduzir os custos operacionais, aumentar a eficiência do sistema, de forma a se obter um significativo ganho energético e uma redução no tempo de processo.

Por fim, atualmente novos sistemas surgem para ocupar o espaço dos antigos, porém deve-se atentar a uma nova rota de produção buscando melhoria no sistema já implantado. Pois com a crescente disponibilidade de sucata e demandas

ambientais se faz necessário o desenvolvimento de pesquisas e aprimoramento de tecnologias.

## REFERÊNCIAS

- [1] AISI – American Iron and Steel Institute. **2017 AISI Profile Book**, 2017. Disponível em: <<https://www.steel.org/~media/Files/AISI/Reports/2017-AISI-Profile-Book.pdf>>. Acessado em: Maio/2018
- [2] IABr – Instituto Aço Brasil. **Importações crescem 10 vezes mais do que vendas internas em 2017**, 2018. Disponível em: <[http://www.acobrasil.org.br/site2015/noticia\\_interna.asp?id=13834](http://www.acobrasil.org.br/site2015/noticia_interna.asp?id=13834)>. Acessado em: Maio/2018.
- [3] WSA - World Steel Association. **Energy use in the steel industry**, 2014. Disponível em: <[https://www.iea.org/media/workshops/2014/industryreviewworkshopoct8\\_Session2\\_B\\_WorldSteel\\_231014.pdf](https://www.iea.org/media/workshops/2014/industryreviewworkshopoct8_Session2_B_WorldSteel_231014.pdf)>. Acessado em: Maio/2018
- [4] HAJIDAVALLOO, Ebrahim; ALAGHEBAND, Ali. **Thermal analysis of sponge iron preheating using waste energy of FEA**. Journal of materials processing technology, v. 208, n. 1-3, p. 336-341, 2008.
- [5] DESHMUKH, Ranjitsinh et al. **Future Technologies for Energy-Efficient Iron and Steel Making Industry**. Imperial Journal of Interdisciplinary Research, v. 3, n. 9, 2017.
- [6] QUADER, M. Abdul et al. **A comprehensive review on energy efficient CO2 breakthrough technologies for sustainable green iron and steel manufacturing**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 50, p. 594-614, 2015.
- [7] LUND, Peter. **Impacts of EU carbon emission trade directive on energy-intensive industries—Indicative micro-economic analyses**. Ecological Economics, v. 63, n. 4, p. 799-806, 2007.
- [8] MADIAS, Jorge. **Electric Arc Furnace**. In: Ironmaking and Steelmaking Processes. Springer, Cham, 2016. p. 267-281.
- [9] BARELLA, S. et al. **New perspective in steelmaking activity to increase competitiveness and reduce environmental impact**. La Metallurgia Italiana, n. 11-12, p. 31-40, 2014.
- [10] SEETHARAMAN, Seshadri. **Treatise on process metallurgy, volume 3: industrial processes**. Newnes, 2013.
- [11] TOULOUEVSKI, Yuri N.; ZINUROV, Ilyaz Y. **Fuel Arc Furnace (FAF) for Effective Scrap Melting: From FEA to FAF**. Springer Singapore, 2017.
- [12] MEMOLI, Francesco; GIAVANI, Cesare; GRASSELLI, Andrea. **Consteel EAF and conventional EAF: a comparison in maintenance practice**. stahl und eisen, v. 129, n. 12, p. 51-57, 2009.
- [13] FANUTTI, Giuliano; POZZI, Marcello. **Environmental control and the Consteel process**. Millennium Steel, p. 105-10, 2004.
- [14] LEE, Y. H.; GANDIN, F.; PIVOTTI, R. **Improving EAF performance at Dongbu Steel**. Millennium Steel, 2012
- [15] ARGENTA, P.; FERRI, M. Bianchi. **Hot metal charging to an EAF at Shaoguan using Consteel®**. Steel Times International, v. 28, n. 2, p. 14, 2004.
- [16] GIAVANI, C. **CONSTEEL® EVOLUTION: THE PROVEN TECHNOLOGY FOR MAXIMUM FEA CHARGING FLEXIBILITY**. 19th Middle East Iron & Steel Conference. 2012.

- [17] OLIVEIRA, Tiago Luís et al. **Study of biomass applied to a cogeneration system: A steelmaking industry case**. Applied Thermal Engineering, v. 80, p. 269-278, 2015.
- [18] RUMMLER, Knut; TUNABOYLU, Akif; ERTAS, Dogan. **New Generation in preheating technology for electric arc furnace steelmaking**. Iron Steel Technol January, v. 9, 2013.
- [19] TOULOUEVSKI, Yuri N.; ZINUROV, I. Yu; SHVER, V. G. **New possibilities of Consteel furnaces**. Russian Metallurgy (Metally), v. 2012, n. 6, p. 449-453, 2012.
- [20] MANDAL, Kamalesh. **Modeling of Scrap Heating by Burners**. Doctoral Thesis, McMster University, 2010.
- [21] CHATTERJEE, Amit; PANDEY, Banshidhar. **Metallics for Steelmaking: Production and Use**. Allied Publishers, 2001.
- [22] DAL MAGRO, Fabio et al. **Enhancing energy recovery in the steel industry: Matching continuous charge with off-gas variability smoothing**. Energy Conversion and Management, v. 104, p. 78-89, 2015.
- [23] RIZZO, E.M.S. **Introdução aos processos siderúrgicos**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005. 150p. Série: Capacitação Técnica em Processos Siderúrgicos: conhecimentos básicos.
- [24] BATISTA, A.A.M., FIGUEIREDO, D.V., **As Emissões Atmosféricas – Minas Ambiente. Pesquisa Tecnológica para Controle Ambiental em Unidades Independentes de Produção de Ferro-Gusa: V.1 - Diagnóstico**. 104p. Belo Horizonte: CDTN / CETEC / FEAM / UFMG, 1998.
- [25] ZHANG, Shaohui et al. **Co-benefits of energy efficiency improvement and air pollution abatement in the Chinese iron and steel industry**. Energy, v. 78, p. 333-345, 2014.
- [26] SANTOS, Harley Sânio Oliveira dos. **Minimização do custo energético de um forno de reaquecimento de tarugos utilizando algoritmos genéticos**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2013
- [27] GONÇALVES, S. S. Eduardo. **Modelo de Simulação em tempo real de um forno de reaquecimento de tarugos para laminação**. Belo Horizonte. UFMG, 2011.
- [28] BAUKAL JR, Charles E. **Industrial Burners Handbook**, CRC Press LLC, 2003.