

INCORPORAÇÃO DE HBIs EM CARGAS DE FORNO ELÉTRICO A ARCO

BERNARDO MANUEL BARROS VALENTE

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO
PORTO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

ORIENTADOR

PROFESSOR DOUTOR LUÍS FILIPE MALHEIROS DE FREITAS FERREIRA

<i>CANDIDATO</i>	Bernardo Manuel Barros Valente	<i>Código</i>	201108028
<i>TÍTULO</i>	Incorporação de HBIs em cargas de forno elétrico a arco		
<i>DATA</i>	21 de fevereiro de 2017		
<i>LOCAL</i>	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala F106 - 14:30h		
<i>JÚRI</i>	<i>Presidente</i>	Professora Doutora Laura Maria de Melo Ribeiro	DEMM/FEUP
	<i>Arguente</i>	Professor Doutor Fernando António Portela Sousa Castro	DEM/EEUM
	<i>Orientador</i>	Professor Doutor Luís Filipe Malheiros de Freitas Ferreira	DEMM/FEUP

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo principal o estudo da influência da incorporação de HBIs (*Hot Briquetted Iron*) nas cargas de forno elétrico a arco para produção de aço. O trabalho foi desenvolvido em ambiente industrial na Siderurgia Nacional da Maia (SN Maia), grupo *Megasa*. A produção de aço nestes equipamentos está tradicionalmente associada à utilização de sucatas ferrosas como matéria-prima principal do processo. Os pré-reduzidos de ferro, como é o caso dos HBIs, surgem como uma alternativa à utilização de sucatas apresentando diversas características e propriedades indiscutivelmente distintas.

Em primeiro lugar, o desenvolvimento deste trabalho implicou o estudo aprofundado da produção de aço em forno elétrico a arco. Isso foi alcançado recorrendo, inicialmente, ao acompanhamento dos trabalhos de produção nas instalações da aciaria da SN Maia e ao estudo detalhado do tema a partir de uma revisão bibliográfica. Posteriormente a esta primeira fase, procedeu-se à análise do estado da arte de modo a compreender a ciência e detalhes de utilização, bem como previsões de influência de incorporação de HBIs em cargas de forno elétrico na produção de aço. De modo a compreender as consequências da utilização de pré-reduzidos em campanhas produtivas na SN Maia, foi realizada uma análise comparativa a registos de produção que procuraram abordar épocas com características semelhantes, com e sem incorporação de HBIs. A partir deste estudo conclui-se que a utilização de HBIs acarreta sobretudo influências negativas com especial relevância na redução da produtividade global da produção de aço, aumento dos consumos específicos de energia e aumento da incorporação de adições ao longo do processo. Foi ainda desenvolvida uma ferramenta de cálculo que tem como objetivo estimar o caudal de alimentação de um determinado lote de HBI. O modelo desenvolvido utiliza dados de composição química dos briquetes e outros índices de produção de modo a atingir o seu objetivo. Esta ferramenta permitiu estimar o consumo específico de energia, duração da introdução de HBIs e outros detalhes importantes para a unidade industrial. Verificou-se que quanto maior o grau de metalização, e, portanto, menor o teor de óxidos de ferro da matéria-prima, menor será o consumo de energia por parte da mesma. Assim, um lote de briquetes de grau de metalização superior podem ser introduzidos no forno com um caudal de alimentação mais elevado reduzindo a duração desta fase e aumentando a produtividade do processo.

PALAVRAS-CHAVE: produção de aço; aciaria elétrica; pré-reduzidos de ferro; HBI.

ABSTRACT

The following work has as main objective the detailed study of the influence of HBI (Hot Briquetted Iron) incorporation in electric arc furnace loads in steel production. The work was developed in an industrial environment at *Siderurgia Nacional da Maia*, Portugal (*Megasa*). The production of steel in an electric furnace is traditionally associated with the use of ferrous scrap as the fundamental raw material of the process. The pre-reduced iron, as is the case of HBI, appears as an alternative to the use of scraps presenting several characteristics and properties indisputably different from ferrous scraps.

To start with, it was necessary for the development of this thesis to study steel production in electric arc furnaces. In the beginning, this was carried out following up the production routine at the SN Maia steel mill and doing a bibliographic research about the matter. After completing this first objective, a study on HBI science and its use as well as its influences on the process was carried out. To better understand HBI use details and influences, an analysis on SN Maia steel production records, covering two different periods of similar conditions, except the use of pre-reduced briquettes, was made. Following this analysis, it was possible to conclude that HBI usage carries mainly negative results, especially on the lowering of the process global productivity, the increasing of specific energy consumptions and the increasing of additives throughout the process. The development of a spreadsheet was also carried out, the main objective of this was to determine the balanced feeding of HBI. This model uses data from the HBI chemical compositions as well of the steel mill equipment. It was also possible to determine the specific energy consumption of the HBI, the elongation of the feeding process as well as other important information. It was possible to conclude that as the degree of metallization of the briquettes grows, the lower the energy consumption of this material will be. So, the process productivity will be increased by the reduction of the feeding time which is due to the higher metallization of the HBI briquettes introduced in the furnace.

KEY WORDS: electro steelmaking; steel mill; pre-reduced iron; HBI.

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento desta dissertação deve-se também ao esforço, disponibilidade e cooperação com várias pessoas às quais apresento aqui os meus agradecimentos.

Em primeiro lugar ao orientador da presente dissertação, Professor Luís Filipe Malheiros, por ter desde início demonstrado toda a dedicação em possibilitar a realização deste trabalho com a empresa onde foi desenvolvido e pelo acompanhamento, esforço e disponibilidade que sempre estiveram presentes ao longo de todo o trabalho.

Ao Eng.º Miguel Alves Pereira, diretor de produção da aciaria na Siderurgia Nacional da Maia, por toda a disponibilidade e tempo dedicado e pelo conhecimento transmitido, os quais nunca faltaram.

Ao Eng.º Óscar Fernandes, diretor-adjunto de produção da aciaria, pelo espírito de companheirismo, tempo dedicado, disponibilidade e conhecimento transmitido.

Aos vários colaboradores da SN Maia, entres os quais os engenheiros chefes de turno da aciaria, os operadores do forno, os fundidores, entre outros, que, durante algum ou vários momentos, me transmitiram conhecimentos ou ajudaram em alguma questão no decorrer deste trabalho.

Gostaria ainda de apresentar um agradecimento especial à empresa, como instituição, e ao grupo *Megasa* pela possibilidade de realizar este trabalho nas suas instalações e recorrer à ajuda dos seus colaboradores.

Apresento ainda um último, mas não menos importante, agradecimento à minha família e amigos, que por vários motivos se figuraram imprescindíveis ao longo do tempo em que este trabalho foi desenvolvido.

ÍNDICE GERAL

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
AGRADECIMENTOS	iii
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS	viii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Contextualização	1
1.1.1 Enquadramento histórico	1
1.1.2 Produção mundial de aço	2
1.1.3 Grupo Megasa e a unidade da Maia	4
1.2 Produção de aço em forno elétrico a arco	7
1.2.1 Equipamento e breve descrição do processo	7
1.2.2 Matérias-primas	9
1.2.2.1 Sucatas de aço	9
1.2.2.1.1 Características e propriedades das sucatas de aço	9
1.2.2.2 Pré-reduzidos de ferro	10
1.2.2.2.1 Características e propriedades dos pré-reduzidos de ferro	10
1.2.2.2.2 Produção e mercado dos pré-reduzidos de ferro	11
1.2.3 Materiais refratários na estrutura do forno elétrico a arco	12
1.2.3.1 Cadinho.....	12
1.2.3.2 Abóboda.....	13

2. ACIARIA	14
2.1 <i>Parque de sucatas</i>	14
2.2 <i>Forno elétrico a arco</i>	14
2.2.1 Equipamentos e sua operação	14
2.2.2 Sistema elétrico.....	17
2.2.3 Fusão	18
2.2.4 Injetores.....	20
2.2.5 Formação de escória espumosa	21
2.2.6 Balanço energético de um forno elétrico a arco	24
2.2.7 Vazamento	26
2.3 <i>Forno panela</i>	27
2.3.1 Equipamento e funcionamento	27
2.3.2 Dessulfuração.....	27
2.3.3 Desoxigenação.....	29
2.4 <i>Vazamento contínuo</i>	30
3. PRÉ-REDUZIDOS	31
3.1 <i>Incorporação de HBIs na carga</i>	31
4. ANÁLISE DE REGISTOS DE PRODUÇÃO	37
4.1 <i>Introdução e objetivo</i>	37
4.2 <i>Análise de registos de produção</i>	39
4.2.1 Períodos 1 e 2	39
4.2.2 Período 3.....	46
4.3 <i>Análise do rendimento de carga</i>	47

5. INCORPORAÇÃO DE HBIs	49
<i>5.1 Caudal de alimentação de HBIs no forno</i>	<i>49</i>
5.1.1 Introdução e objetivo	49
5.1.2 Modelo de cálculo.....	50
5.1.3 Cálculos e resultados.....	55
5.1.3.1 Lote A	55
5.1.3.2 Lote B.....	57
5.1.4 Discussão de resultados	59
6. CONCLUSÕES	61
<i>6.1 Conclusões gerais</i>	<i>61</i>
<i>6.2 Desenvolvimentos futuros</i>	<i>63</i>
BIBLIOGRAFIA	64
ANEXOS	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Repartição da produção de aço em várias regiões do Mundo. Figura adaptada a partir do original [7].	3
Figura 2 - Esquema representativo da valorização de produto na Siderurgia Nacional. Figura adaptada a partir do original [11].	6
Figura 3 - Vista em corte de um forno elétrico a arco, comumente utilizado em aciaria elétrica. Figura adaptada a partir do original [13].	8
Figura 4 - Esquema simplificado do sistema de fornecimento de energia elétrica ao forno elétrico. Figura adaptada a partir do original [13].	17
Figura 5 - Variação da potência elétrica de um forno elétrico a arco ao longo de um ciclo de fusão, envolvendo o carregamento de dois cestos [13].	19
Figura 6 - Vista de topo do interior do forno durante a fusão, com localização dos pontos quentes e dos injetores (queimadores). Figura adaptada a partir do original [13]. ...	20
Figura 7 - Aplicação de queimadores num ciclo de produção envolvendo o carregamento de dois cestos [13].	21
Figura 8 - Esquema representativo da ocorrência das reações promotoras da formação de escória espumosa. Figura adaptada a partir do original [13].	23
Figura 9 - Curvas de isoviscosidade (Pa.s) de escórias do sistema ternário SiO_2 -“FeO”-CaO, a temperaturas próximas dos 1400°C. Figura adaptada a partir do original [16].	24
Figura 10 - Efeito da massa e composição da ganga dos pré-reduzidos no consumo específico de energia. Figura adaptada a partir do original [19].	33
Figura 11 - Variação do consumo específico de energia elétrica ao longo dos períodos analisados.	41
Figura 12 - Variação da duração dos ciclos de produção ao longo dos períodos analisados.	42
Figura 13 - Variação da produtividade ao longo dos períodos analisados.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais grupos produtores de aço e respetivos valores de produção no ano de 2015 (em milhões de toneladas) [7].	3
Tabela 2 - Principais países europeus produtores de aço e respetivos valores de produção no ano de 2015 (em milhões de toneladas) [7].	4
Tabela 3 - Composição química típica de pré-reduzidos [15].....	10
Tabela 4 - Composição química de uma escória de produção de aço em forno elétrico. Fonte [13].	21
Tabela 5 - Composição química de uma escória eficaz na dessulfuração em forno panela [18].	28
Tabela 6 - Composição química (valores médios) dum pré-reduzido e de sucatas ferrosas [20].	35
Tabela 7 - Composição química (valores médios) do lote de HBI utilizado no período 1.	38
Tabela 8 - Valores médios dos índices de produção relativos aos períodos 1 e 2.	39
Tabela 9 - Composição química (média) do aço no final da fusão nos períodos 1 e 2.	43
Tabela 10 - Adições efetuadas no forno elétrico nos períodos 1 e 2.	44
Tabela 11 - Adições efetuadas no vazamento do aço para a panela nos períodos 1 e 2.	44
Tabela 12 - Adições efetuadas no forno panela nos períodos 1 e 2.	45
Tabela 13 - Valores médios dos índices de produção relativos aos períodos 1 e 3. ...	46
Tabela 14 - Composição química e grau de metalização dos HBIs do lote A.	55
Tabela 15 - Consumo de energia associado ao carregamento de 25 ton. de HBIs do lote A.	56
Tabela 16 - Impacto do carregamento dos HBIs do lote A.....	56
Tabela 17 - Dados utilizados para estimar o consumo específico de energia para uma carga mista (sucata + HBIs do lote A) e resultado obtido.	56

Tabela 18 - Grau de metalização e composição química dos HBIs do lote B.	57
Tabela 19 - Consumo de energia associado ao carregamento de 25 ton. de HBIs do lote B.	57
Tabela 20 - Impacto do carregamento dos HBIs do lote B.....	58
Tabela 21 - Dados utilizados para estimar o consumo específico de energia para uma carga mista (sucata + HBIs do lote B) e resultado obtido.	58
Tabela 22 - Resumo de resultados relativos aos Lotes A e B.....	59

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

1.1.1 Enquadramento histórico

A utilização de metais ferrosos data da era pré-histórica. Estima-se que os artefactos arqueológicos mais antigos, compostos por este tipo de materiais, tenham sido utilizados antes do ano 3000 a.C., no Egito [1]. Não existem dados arqueológicos suficientes para identificar o período em que alguma civilização iniciou a produção de ligas ferrosas a partir de minérios de ferro, muito embora existam provas que comprovam que, por volta do final do segundo milénio a.C., vários povos, desde a China até ao norte do continente africano, produziam peças em ligas ferrosas para vários tipos de aplicações [2]. Ao longo de vários séculos, a produção de ligas ferrosas foi ganhando maior destaque em várias partes dos continentes europeu, africano e asiático. A idade do bronze deu lugar à idade do ferro, substituindo o material utilizado no fabrico de grande parte das peças metálicas, com especial relevância as armas de combate.

Apenas no ano de 1856 d.C., em plena revolução industrial na Europa, foi possível alcançar uma forma simples e rentável para produzir aço. Este método, desenvolvido pelo metalúrgico britânico *Sir Henry Bessemer*, consistia na utilização de um convertidor onde a gusa fundida, proveniente do alto-forno, era carregada e, recorrendo à insuflação de ar, promovia-se a redução dos teores de silício, manganês e carbono da liga [3]. O grande fator impulsionador do mercado do aço no final do séc. XIX consistiu no facto dos carris das linhas férreas existentes até então serem construídos a partir de uma liga ferrosa de baixo teor em carbono, e por isso sofrerem elevado desgaste e deformação ao longo do período da sua utilização. Assim que o aço de composição afinada passou a ser produzido em larga escala, rapidamente se tornou viável construir os novos percursos ferroviários com este novo material que, apresentava propriedades mecânicas indubitavelmente superiores às do material até então utilizado [4].

Em 1878, William Siemens registou patentes relativas a planos e *designs* de fornos que utilizavam a eletricidade como fonte energética principal para a produção de aço através de descargas de arco elétrico. Já em 1907, o francês Paul Héroult instalou um forno elétrico para produção de aço na *The Sanderson Brothers Steel Co.* em Nova Iorque, EUA [5]. A Figura A.1 (Anexo A) apresenta um plano do forno projetado por Paul Héroult onde se podem registar algumas semelhanças com os fornos elétricos modernos, como a presença de um eléctrodo suspenso e a utilização de materiais cerâmicos no revestimento interior do equipamento, entre outros detalhes.

Ao longo do séc. XX, a produção de aço em forno elétrico teve sempre uma trajetória ascendente, mas foi especialmente durante a segunda guerra mundial que a utilização destes equipamentos sofreu grande impulso, assumindo assim uma posição de destaque, especialmente no fabrico de produtos longos. Estes equipamentos destacam-se do alto-forno uma vez que podem produzir aço a partir de cargas compostas unicamente por sucata, reduzindo a necessidade de matérias-primas primárias [6].

1.1.2 Produção mundial de aço

Dados relativos a 2015, publicados em 2016 pela *World Steel Association* [7], indicam que foram produzidas a nível mundial cerca de 1620 milhões de toneladas de aço, o que representa um decréscimo relativamente a 2014 de aproximadamente 50 milhões de toneladas. Estima-se que, do volume total de aço produzido em 2015, cerca de 25% provenha de aciaria elétrica.

Constata-se que, enquanto a Europa produz cerca de 40% e o grupo de nações da NAFTA acima dos 62% do seu aço a partir de fornos elétricos, os países asiáticos apresentam uma quota de produção a partir de processos convencionais, que utilizam maioritariamente minério de ferro, de 84%, promovendo assim a delapidação de recursos naturais. Para tornar este facto ainda mais relevante, é importante mencionar que a região da Ásia contribui com cerca de 70% do aço fabricado a nível mundial, com especial destaque para a China, a representar 50% dessa produção, conforme se pode observar na Figura 1.

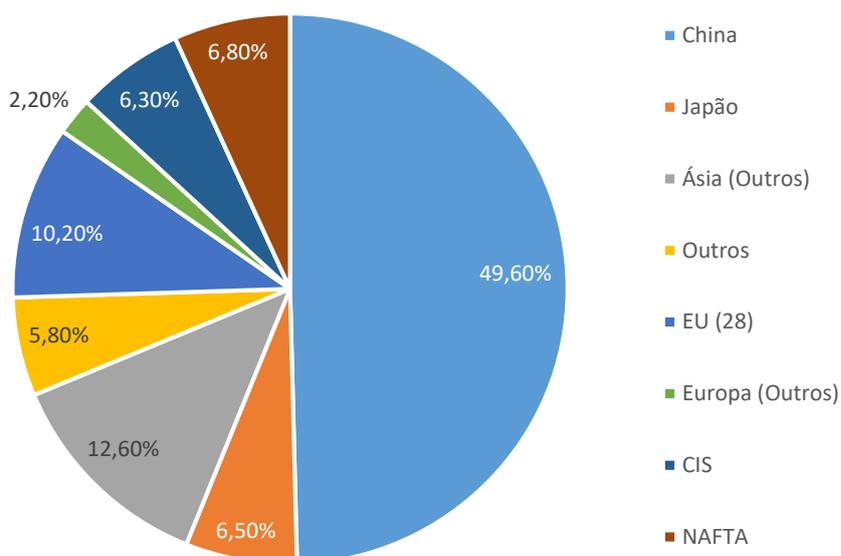


Figura 1 - Repartição da produção de aço em várias regiões do Mundo. Figura adaptada a partir do original [7].

Numa análise relativa aos maiores grupos produtores de aço, verifica-se que o grupo *ArcelorMittal* lidera a lista, tendo produzido cerca de $97,1 \times 10^6$ ton. em 2015. Em segundo lugar surge o grupo *Hesteel*, com $47,8 \times 10^6$ ton., e, em terceiro o grupo *NSSMC* (*Nippon Steel & Sumitomo Metal*) com $46,4 \times 10^6$ ton. de aço produzidas [7]. Uma listagem mais extensa dos principais grupos produtores de aço a nível mundial pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais grupos produtores de aço e respetivos valores de produção no ano de 2015 (em milhões de toneladas) [7].

<i>Arcelor Mittal</i>	<i>Hesteel Group</i>	<i>NSSMC</i>	<i>POSCO</i>	<i>Baosteel Group</i>	<i>Shagang Group</i>	<i>Ansteel Group</i>	<i>JFE</i>	<i>Shougang Group</i>	<i>Tata Steel</i>
97,14	47,75	46,37	41,97	34,94	34,21	32,50	29,83	28,55	26,31

Em relação ao continente europeu, verifica-se que, em 2015, a Alemanha foi o principal produtor de aço ($42,7 \times 10^6$ ton.), seguido pela Turquia ($31,5 \times 10^6$ ton.), Itália ($22,0 \times 10^6$ ton.) e França (15×10^6 ton.). Uma lista mais extensa dos principais países produtores de aço na Europa é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Principais países europeus produtores de aço e respetivos valores de produção no ano de 2015 (em milhões de toneladas) [7].

Alemanha	Turquia	Itália	França	Espanha	Reino Unido	Polónia	Áustria	Bélgica	Holanda
42,7	31,5	22,0	15,0	14,8	10,9	9,2	7,7	7,3	7,0

Portugal surge na 43^a posição a nível mundial, e 18^a a nível europeu, com cerca de 2×10^6 ton. de aço produzidas em 2015 [7]. Em Portugal, todo o aço produzido provém das duas siderurgias existentes no país, SN Maia e SN Seixal, ambas do grupo siderúrgico espanhol *Megasa*. A totalidade da produção em território nacional é proveniente de fornos elétricos de arco, que utilizam maioritariamente sucatas ferrosas como matéria-prima principal, embora se registe também a utilização de pré-reduzidos, nomeadamente HBIs, tudo dependendo da época e condições de mercado.

Segundo Franz Holy [8], diretor de operações da *Evrz Highveld Steel & Vanadium*, existe uma clara tendência para uma crescente utilização de sucatas ferrosas na produção de aços dado que a sua disponibilidade tende a aumentar pois tem-se vindo a produzir maior quantidade de produtos e componentes em aço ou ferro fundido. Nesta perspetiva, a quota parte dos fornos elétricos na produção de aço a nível mundial deverá ter tendência a aumentar nas próximas décadas. No entanto, devido à necessidade crescente de produtos de aço bem como ao facto de cerca 40% deste material não ser reutilizado como sucata (como é o caso de grande parte do aço utilizado em construção civil), não será de esperar que, a produção de aço a partir de minérios de ferro em altos-fornos seja totalmente substituída, embora venha a ter tendência a sua diminuição.

1.1.3 Grupo *Megasa* e a unidade da Maia

O grupo *Megasa* é uma empresa familiar espanhola de capital privado, fundada em 1953 na Corunha, Galiza. O foco das várias fábricas que integram o universo do grupo consiste na produção e distribuição de produtos siderúrgicos longos. O grupo *Megasa*

emprega mais de mil funcionários diretos e promove a criação e manutenção de vários milhares de postos de trabalho indiretos e de empresas subcontratadas [9].

Atualmente todas as instalações do grupo situam-se na Península Ibérica [9]:

- **Megasa Siderúrgica S.L.** - Narón, Corunha (Espanha). Produção de varão de aço nervurado em barra e bobines de diferentes dimensões e qualidades. (Unidade de produção);
- **Megamalla S.L.** - Narón, Corunha (Espanha). Produção de rede eletrosoldada de aço e treliças. (Unidade de transformação);
- **JAP2 Recuperaciones S.L.** - Silla, Valencia (Espanha). Unidade dedicada ao tratamento e fornecimento de sucata fragmentada. (Unidade de reciclagem);
- **Megasider Zaragoza S.A.U.** - Saragoça (Espanha). Produção de produtos siderúrgicos longos. (Unidade de produção anteriormente do grupo *ArcelorMittal* e adquirida pelo grupo *Megasa* em julho de 2016) [10];
- **SN Seixal - Siderurgia Nacional S.A.** - Seixal (Portugal). Produção de fio-máquina e varão de aço nervurado de diferentes morfologias e qualidades. (Unidade de produção);
- **SN Maia - Siderurgia Nacional S.A.** - Maia (Portugal). Produção de varão de aço nervurado de diferentes morfologias e qualidades. (Unidade de produção);
- **Ecometais S.A.** - Seixal (Portugal). Produção de sucata de aço fragmentada resultante de sucatas leves provenientes de veículos fora de uso. (Unidade de reciclagem).

Em Portugal, o grupo *Megasa* mantém cerca de 750 postos de trabalho diretos e mais de 2000 indiretos, tornando-se assim numa iniciativa muito importante para o País e localidades onde se integra. Fruto da conjuntura económica que afetou em particular o setor da construção civil português em 2008, o grupo *Megasa* procurou alterar a sua estratégia de mercado, passando a procurar mais clientes fora do País, tornando-se assim uma das dez principais empresas exportadoras em Portugal, exportando mais de 85% da sua produção. O resumo da criação de valor acrescentado na produção de aço na Siderurgia Nacional pode ser observado no esquema da Figura 2.



Figura 2 - Esquema representativo da valorização de produto na Siderurgia Nacional. Figura adaptada a partir do original [11].

As duas instalações da Siderurgia Nacional (Seixal e Maia) integradas no Grupo *Megasa* desde a década de 90 do século XX, possuem uma capacidade produtiva superior a 2×10^6 ton. de aço por ano, com um volume de negócios de aproximadamente mil milhões de euros, no ano de 2014 [11].

A SN Maia foi projetada em 1973 e os trabalhos de produção de aço nesta unidade arrancaram em 1976, numa fase em que a Siderurgia Nacional havia sido nacionalizada após a revolução de 25 de Abril de 1974. A Siderurgia Nacional era, até essa data, propriedade do grupo português Champalimaud.

Hoje em dia, as instalações técnicas da SN Maia encontram-se repartidas por dois grandes setores: aciaria e laminagem. É função vital da aciaria fundir as sucatas, produzindo aço de diferentes qualidades e à posterior produção de biletetes em vazamento contínuo. Este subproduto é então encaminhado para o segundo setor da unidade, a laminagem, onde é alvo de tratamentos e de conformação mecânica que tem como objetivo a produção de varão de aço nervurado de diferentes morfologias e qualidades.

O setor da aciaria da SN Maia está dividido em quatro subsectores: o parque de sucatas, que recebe, organiza, armazena e fornece à aciaria as matérias-primas requeridas; o forno elétrico, equipamento com uma capacidade nominal de 120 toneladas, considerado o coração da unidade produtiva no qual a sucata é transformada em aço novo; o forno panela, equipamento dedicado ao tratamento do aço produzido de modo a alcançar as características químicas e físicas requeridas; e o vazamento contínuo,

subsetor destinado ao vazamento do aço e produção de biletas, compreendendo seis linhas de vazamento.

1.2 Produção de aço em forno elétrico a arco

1.2.1 Equipamento e breve descrição do processo

Um forno elétrico a arco, forno de arco elétrico ou simplesmente forno elétrico, é um equipamento da indústria metalúrgica essencialmente dedicado à produção de várias classes de aço. Para atingir o seu fim, este equipamento requer matérias-primas adequadas. Na vasta maioria dos casos são utilizadas sucatas ferrosas. Existem ainda outros tipos de matérias-primas que serão abordadas com detalhe mais à frente no presente trabalho [12].

Para além das várias matérias-primas, este equipamento consome igualmente elevada quantidade de energia. Existem dois tipos fundamentais de fontes de energia: energia elétrica, resultante do arco elétrico, e energia química, proveniente das reações de oxidação, que ocorrem no interior do forno entre o oxigénio, o carbono e gás natural injetados, bem como alguns elementos de carga. Essas reações de oxidação são fortemente exotérmicas, contribuindo assim para o balanço térmico do sistema [12].

Nas últimas décadas, os fornos elétricos têm sido objeto de uma constante evolução no que diz respeito ao seu *design* e capacidade de produção. As principais mudanças que se verificaram nestes equipamentos estão relacionadas com a sua dimensão e capacidade de operarem a potências elétricas mais elevadas, promovendo assim um aumento da produtividade do processo [12].

A estrutura de um forno elétrico compreende basicamente três componentes principais: cadinho, cuba e abóboda (Figura 3). O cadinho, zona inferior do forno que armazena o banho de aço entretanto fundido, é composto por uma soleira e paredes laterais revestidas por materiais refratários que visam a proteção do equipamento do contacto direto com o banho, das altas temperaturas inerentes ao processo e da radiação do arco elétrico. A cuba é revestida por painéis arrefecidos a água. A abóboda possui também painéis de arrefecimento. A zona central da abóboda é composta por

um cerâmico refratário rico em Al_2O_3 (denominada de “delta” no caso da SN Maia). É neste componente da abóboda que se localizam os orifícios através dos quais passam os elétrodos de grafite que conduzem a corrente elétrica para o interior do forno. Para além destes três componentes deve ser também destacado todo o conjunto de equipamentos mecânicos e hidráulicos que permitem realizar os vários movimentos do forno desde o basculamento, abertura e fecho da abóboda, movimento dos elétrodos, entre outros [13].

A porta através da qual se processa a remoção de escória tem duas funções. Em primeiro lugar, é por esta abertura do forno que a escória é removida ao longo da etapa de aquecimento pós-fusão. Para além disso, esta porta permite a introdução de lanças de injeção de oxigénio e carbono [13].

O furo de vazamento é o canal através do qual é vazado o aço no final da etapa de fusão. Durante o carregamento e fusão da carga, este orifício encontra-se tapado com uma massa refratária (tradicionalmente rica em magnesite). Uma vez terminada a fusão da carga, o furo é aberto, dando-se início ao vazamento do aço para a panela de vazamento. Por sua vez, a panela atua como recipiente de transporte para a fase seguinte do processo de produção de aço, ou seja, carrega o aço para o forno panela onde será tratado e afinado [13].

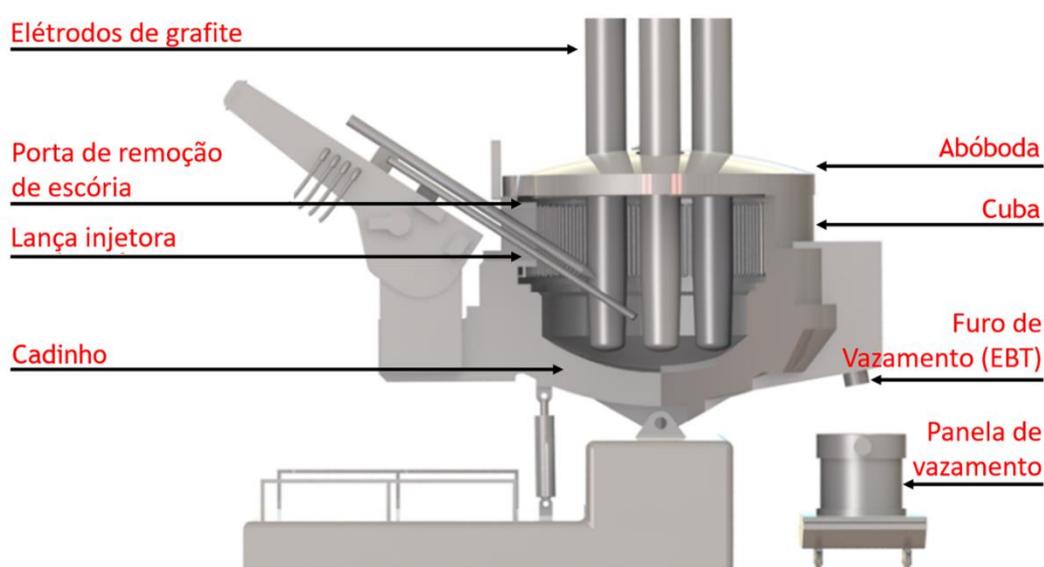


Figura 3 - Vista em corte de um forno elétrico a arco, comumente utilizado em aciaria elétrica. Figura adaptada a partir do original [13].

Os fornos elétricos podem apresentar diferentes configurações e operar em corrente contínua, compreendendo tradicionalmente dois elétrodos, ou em corrente alternada, com três elétrodos. A SN Maia opera em corrente alternada.

Em termos de furo de vazamento, este poderá localizar-se na parede lateral do forno ou, de modo descentrado, na sua base. A principal vantagem dos fornos com furo de vazamento na base assenta numa menor mistura entre a escória e o aço vazado. O forno da SN Maia possui um furo EBT (*Eccentric Bottom Tapping*).

1.2.2 Matérias-primas

1.2.2.1 Sucatas de aço

1.2.2.1.1 Características e propriedades das sucatas de aço

A principal matéria-prima utilizada na produção de aço em forno elétrico a arco é a sucata ferrosa. Este material pode apresentar diversos tipos de proveniências uma vez que a vasta maioria das atividades industriais e produtos contém como materiais mais abundantes o aço e o ferro fundido. Para além de se diferenciarem em relação à sua origem, as sucatas distinguem-se pela sua morfologia e dimensão e também tipo de mercado onde são adquiridas, isto é, se são sucatas de produção nacional ou importadas (esta distinção é realizada na SN Maia).

Em 2007, a *European Ferrous Recovery and Recycling Federation* (EFR) publicou um documento, denominado de *EU-27 Steel Scrap Specification*, que procura classificar e distinguir as várias classes de sucatas ferrosas e estabelecer algumas regras e limites para cada tipo desta matéria-prima [14]. Na Tabela B.1 (Anexo B), são apresentadas as várias categorias de sucatas de acordo com a nomenclatura e categorização da EFR. A classificação de sucatas baseia-se na distinção a partir de limites de elementos residuais, origem do produto, dimensões e morfologia, densidades a granel, entre outras variáveis.

1.2.2.2 Pré-reduzidos de ferro

1.2.2.2.1 Características e propriedades dos pré-reduzidos de ferro

Os pré-reduzidos de ferro são produtos resultantes da redução parcial de óxidos de ferro. Os DRIs e os HBIs são alguns desses produtos que apresentam, na sua composição, ferro metálico, óxidos de ferro, carbono, e outros elementos residuais. Os DRIs e os HBIs são produzidos a partir de finos de minérios de ferro sem ocorrência de fusão [15].

Uma das principais diferenças entre os DRIs e os HBIs é assenta na etapa final da sua produção; na qual os DRIs apresentam-se sob a forma de péletes de pequenas dimensões, enquanto os HBIs sob a forma de briquetes de maiores dimensões [15].

Algumas características físicas dos HBIs [15]:

- Peso específico aparente médio: 5 t/m^3 ;
- Peso específico a granel médio: $2,8 \text{ t/m}^3$;
- Massa média de cada briquete: 0,5 a 1,5 kg;
- Dimensões aproximadas dos briquetes: 110x90x40 mm.

Na Tabela 3 pode observar-se uma composição química típica de um pré-reduzido (HBI ou DRI).

Tabela 3 - Composição química típica de pré-reduzidos [15].

%Fe (total)	%Fe (metálico)	%C	%P	%S	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%CaO	%MgO	%Residuais
89,2-94	79-89	0,3- 0,4	0,005- 0,09	0,001- 0,03	1-5	0,5-3	0,1-2	0,1-1	-

Este tipo de matéria-prima apresenta uma composição química mais regular, relativamente à de sucatas ferrosas, tornando-se assim viável a sua utilização na produção, em aciaria elétrica, de uma grande gama de classes de aços, mormente de aços que anteriormente eram produzidos pela via tradicional em alto-forno, pois são de esperar concentrações muito reduzidas ou mesmo nulas de vários elementos residuais [15].

As propriedades físicas dos HBIs permitem o transporte desta matéria-prima a grandes distâncias, por via ferroviária, marítima e rodoviária [15].

Das várias vantagens da utilização de HBIs existem algumas que esta matéria-prima partilha com os DRIs devido à semelhança da sua natureza [15]:

- Composição química mais uniforme e controlada em comparação com a sucata de aço;
- Baixos teores de elementos residuais (*Cu, Ni, Cr, Sn, Pb, V, etc.*);
- Permitem ser adicionados a cargas de sucata de modo a otimizar a produção;
- Possibilidade de produção de uma grande gama de famílias de aços;
- Permitem carregamentos contínuos dos fornos, maximizando a rentabilidade energética da operação por redução das perdas térmicas;
- Potenciam a formação de escórias espumosas e a obtenção de baixos teores de azoto no banho metálico;
- Utilizáveis em fornos que operam com corrente contínua ou alternada;
- Preços competitivos relativamente à sucata em vários países produtores de aço;
- Compatíveis com a injeção de combustíveis orgânicos e de oxigénio.

Para além das vantagens que os HBIs e os DRIs partilham, comparativamente a outras matérias-primas como a sucata, existem razões exclusivas que fundamentam a preferência de utilização dos HBIs face aos DRIs [15]:

- Densidade elevada, permitindo maior rendimento da carga do forno uma vez que ocupa menor volume para uma mesma massa de metal. Para além disso, o elevado peso específico desta matéria-prima facilita a descida no forno e uma chegada rápida às zonas mais quentes, acelerando normalmente o processo de fusão;
- Apresentam condutividade térmica e elétrica superiores, potenciando a fusão;
- Produção de menores quantidades de finos;
- Menor reatividade, tornando-se assim mais seguro o seu transporte, armazenamento e manipulação.

1.2.2.2.2 Produção e mercado dos pré-reduzidos de ferro

Atualmente, no mundo ocidental, apenas a Venezuela produz HBIs em grandes quantidades, abastecendo primariamente a América do Norte e a Europa Ocidental.

Por sua vez, a Rússia, devido aos baixos custos de exploração e utilização de gás natural, bem como às suas reservas de minérios de ferro, revela-se como um grande exportador de pré-reduzidos de ferro para a Europa e Médio Oriente. Ainda na Ásia, os países da região do Médio Oriente produzem e exportam uma quantidade considerável desta matéria-prima, mas é a Índia que se revela o maior produtor, vendendo HBIs para as nações do sudeste asiático, China e Japão [15].

1.2.3 Materiais refratários na estrutura do forno elétrico a arco

Um aspeto fundamental no funcionamento de qualquer forno elétrico é a utilização de revestimentos de materiais refratários no seu interior. Estes materiais são capazes de suportar temperaturas muito elevadas sem sofrerem alterações químicas ou físicas mesmo quando expostos a ambiente altamente agressivos, como é o caso do interior do forno elétrico sobretudo no período de fusão da carga. Assim, estes materiais funcionam como base onde o banho de aço fundido irá ser depositado, bem como atuam como revestimento protetor dos equipamentos do forno.

A manutenção do refratário de cada zona do forno deverá depender dos níveis de desgaste que apresente bem como respeitar uma determinada periodicidade de ações de manutenção. Os operadores do forno devem ter atenção à oscilação das temperaturas registadas em diferentes zonas do equipamento de modo a identificar as zonas do forno que deverão sofrer prioritariamente uma intervenção de manutenção do refratário. Na fase de reparação, a inspeção visual é a forma mais rápida e eficaz de perceber onde reforçar o equipamento com material refratário novo.

1.2.3.1 Cadinho

Esta zona do forno elétrico é a que estará sujeita a uma maior solicitação ao desgaste dado que é nesta área que se acumula o banho de aço durante a fusão a temperaturas na ordem dos 1600°C. Para além disso, a soleira e paredes do cadinho devem ser capazes de suportar o impacto provocado pela queda de sucata durante o

carregamento do forno. O desgaste e ataque químico por parte da escória que sobrenada o banho, bem como a radiação pelo arco elétrico, são fatores a ter em consideração quando se aplica o material refratário de proteção nesta zona [12].

O material refratário aplicado no cadinho compreende normalmente uma camada de tijolos magnésíticos (90 a 97% MgO), com mais de 20 *cm* de espessura, e uma camada de argamassa de magnesite (60 a 95% MgO) com espessura variável entre os 30 e os 60 *cm* [12].

1.2.3.2 Abóboda

Embora a estrutura da abóboda seja protegida por painéis arrefecidos a água, na parte central junto das aberturas dos eletrodos de grafite, existe uma estrutura construída com materiais refratários. Esta zona do forno está extremamente exposta ao desgaste imposto pela radiação do arco elétrico e a fortes choques térmicos durante a abertura do equipamento.

Os materiais refratários que constituem a zona central da abóboda são ricos em alumina (70 a 90% Al_2O_3) face à sua elevada resistência mecânica, refratariedade e baixa expansão térmica, que constitui um fator determinante uma vez que ocorrem fortes choques térmicos nesta estrutura [12].

2. ACIARIA

2.1 Parque de sucatas

O parque de sucatas é o ponto de partida de toda a operação de produção de aço na aciaria. Este setor da siderurgia é responsável pelo armazenamento, organização e logística de carregamento das sucatas ferrosas utilizadas. Assim, as sucatas são organizadas de acordo com a sua proveniência, ou seja, se são produtos nacionais ou produtos importados (no caso da SN Maia) e também de acordo com a sua morfologia, isto é, se são sucatas fragmentadas, médias ou na forma de limalha.

De acordo com as necessidades do forno elétrico, procede-se ao carregamento dos cestos de sucata no parque de sucatas, com base numa “receita” otimizada, em que se têm em consideração os níveis de *stock* e os preços de compra do produto, bem como a carga mais correta que facilite a fusão da sucata no forno. O carregamento é realizado por gruas ou pontes rolantes que carregam o cesto de carga que é posteriormente encaminhado para o forno elétrico.

2.2 Forno elétrico a arco

2.2.1 Equipamentos e sua operação

O arranque das operações de fusão da carga e a produção de aço no forno elétrico implicam uma série de atividades paralelas que devem ser realizadas previamente. Em primeiro lugar, é fundamental garantir que todas as medidas de segurança relativas aos operadores e equipamentos são cumpridas ao longo de todo o processo de modo a minimizar o risco de acidentes. Posteriormente, é necessário realizar algumas verificações técnicas no que diz respeito ao fornecimento de energia elétrica, equipamentos mecânicos, integridade do material refratário do forno, sistema de abastecimento de água e de adições, entre outros. Uma vez concluídas estas operações, pode ser iniciada a montagem de eléctrodos, garantindo o seu correto posicionamento e aperto nos braços de suporte.

Ainda antes do arranque do forno, procede-se ao carregamento do primeiro cesto de sucata. Este carregamento é executado em primeira instância no parque de sucatas, onde o cesto é carregado com uma mistura de diferentes classes de sucatas, seguindo uma lógica de empilhamento otimizada de modo a promover uma rápida, eficaz e segura fusão da carga [13]. De seguida, o cesto é transportado para a aciaria e descarregado no topo do forno, previamente aberto devido à rotação da sua abóbada. Uma vez concluído o carregamento, procede-se ao fecho do equipamento.

Nesta fase, o carregamento do forno e a colocação dos elétrodos deverão estar concluídas. É normal existirem hoje em dia *check lists* automáticas que informam o operador se todas as condições para o arranque do forno estão a ser cumpridas. Caso exista algum problema em determinado setor, os sistemas de segurança deverão bloquear o arranque do forno. Uma vez que tudo esteja dentro dos parâmetros definidos, pode dar-se início à alimentação de corrente elétrica aos elétrodos e, conseqüentemente, à etapa de fusão.

No início da fusão, a distância do arco elétrico à carga varia continuamente em função do controlo definido para o transformador, isto é, são definidos os valores de tensão e intensidade de corrente de modo a atingir a potência desejada. Os elétrodos aproximam-se ou afastam-se do material no interior do forno de modo a balancear estas variáveis, permitindo assim alcançar uma potência de trabalho o mais regular possível. Nesta fase, os elétrodos fundem a sucata mais próxima de modo a atingirem rapidamente uma posição o mais baixa possível dentro do forno. Após esta fase inicial, o movimento vertical dos elétrodos ajusta-se aos parâmetros elétricos previamente definidos. No início da fusão, o arco elétrico é extremamente instável, mas, à medida que se vai formando o banho metálico, torna-se mais estável, permitindo o aumento de potência. Quando se atinge um determinado nível de fusão da carga, e o forno apresenta volume livre suficiente, procede-se ao carregamento do segundo cesto. Nesta fase, o fornecimento de energia é temporariamente cortado e a abóbada é novamente rodada para permitir a descarga do cesto. Posteriormente, a abóbada é novamente fechada e o fornecimento de energia restabelecido [13].

Uma vez concluída a etapa de fusão a que, no caso da SN Maia, está associado o carregamento de três cestos de sucata, e realizado o controlo de temperatura e da composição química do aço, procede-se ao seu vazamento. O vazamento é realizado,

através do furo de sangria, diretamente para a panela de vazamento. Nesta etapa, é muito importante garantir o correto enchimento da panela, minimizar a passagem de escória, evitar a potencial obstrução do furo de sangria por alguma peça de sucata e controlar a quantidade de aço vazado de modo a garantir um pé de banho no interior do forno o mais regular possível, e de acordo com o planeado. Segue-se a operação no forno panela, em que o aço irá ser alvo de tratamentos de afinação da composição química, controlo de temperatura e outros processos de modo a garantir que o material está em condições para ser enviado para o vazamento contínuo [13].

O intervalo entre vazamentos do forno elétrico (*tap-to-tap*) está dividido em duas principais parcelas [13]:

- Tempo ON (forno ligado);
- Tempo OFF (forno desligado).

Um dos objetivos fundamentais na produção de aço em forno elétrico é o encurtamento dos ciclos produtivos, *i.e.*, reduzir tanto o tempo ON como o tempo OFF, visando o aumento da produtividade (Expressão 2.1), ou seja, a massa de aço vazado reportada à unidade de tempo despendido [13]. A produtividade é indiscutivelmente um índice de capital importância na gestão da produção.

$$Produtividade (t_{aço}/h) = \frac{\text{aço vazado } (t_{aço})}{\text{tempo } (h)} \quad (2.1)$$

O tempo ON só pode ser reduzido elevando a velocidade de fusão da carga. Para alcançar este objetivo, é necessário aumentar o *input* de energia no forno, recorrendo a duas vias distintas [13]:

- Aumentar a energia fornecida, sem comprometer a integridade física do equipamento;
- Elevar a eficiência térmica do forno minimizando as perdas de calor.

O tempo OFF compreende todos os períodos do ciclo de produção durante os quais é cortada a alimentação elétrica ao forno. De um modo geral, o tempo OFF corresponde ao somatório das durações dos períodos de carregamento, de abertura e fecho da abóboda, de vazamento, de ocorrência de eventuais incidentes, e de manutenção. O

encurtamento deste ciclo produtivo está intrinsecamente relacionado com o decorrer dos trabalhos durante a produção, ficando assim em parte dependente da agilidade dos operadores, e dos equipamentos [13].

2.2.2 Sistema elétrico

O sistema de fornecimento de energia elétrica compreende duas secções principais: secção primária e secção secundária (Figura 4) [13].

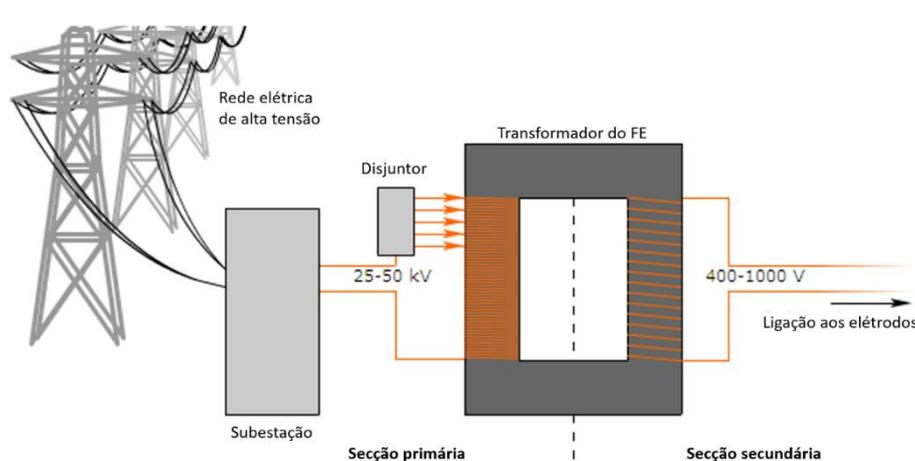


Figura 4 - Esquema simplificado do sistema de fornecimento de energia elétrica ao forno elétrico. Figura adaptada a partir do original [13].

A secção primária, responsável pelo fornecimento de energia entre a subestação e o transformador do forno, opera habitualmente com tensões na gama 25-50 kV (30 kV, no caso da SN Maia). No transformador do forno, a tensão elétrica é reduzida para valores na ordem dos 0,4 a 1 kV. Nos fornos de corrente alternada, como é o caso da SN Maia, existem três fases, cada uma delas ligada a um dos três eletrodos. Por sua vez, os eletrodos são responsáveis pela última fase do transporte de corrente, fechando o circuito com a formação do arco elétrico. Os eletrodos são de grafite pois, para além da sua elevada condutibilidade elétrica, é um material que resiste a temperaturas extremamente elevadas [13].

A condução das operações no forno elétrico exige um controlo apertado dos parâmetros elétricos. O ajuste de potência, ou seja, a regulação da intensidade de corrente e da

tensão elétrica, permite promover o ajuste ideal para serem obtidas as condições ótimas de trabalho, conforme se pode deduzir da lei da potência ativa de corrente alternada:

$$P = \sqrt{3}.U.I.\cos\varphi \quad (2.2)$$

onde P é a potência elétrica, U a tensão, I a intensidade de corrente e φ o ângulo entre fases dos sinais de corrente e tensão [13].

Nota: ocasionalmente poderá ocorrer a fratura de um ou mais elétrodos do forno. Esta situação é extremamente indesejável uma vez que acarreta elevados custos, não só pela perda e substituição do equipamento, como também pelo abaixamento de produtividade [13].

A fratura de um eletrodo está normalmente associada a sobreintensidades de corrente e choques mecânicos com a sucata no interior do forno. Este impacto pode ter origens em desmoronamentos de sucata que ocorrem à medida que a sucata da zona inferior do forno funde e a superior perde sustentação sua base de apoio. Pode também ocorrer o choque direto entre o eletrodo e o material no interior do forno quando existem peças de sucata compostas por material não condutor [13].

2.2.3 Fusão

A etapa de fusão no forno elétrico tem o seu início no momento em que o forno é ligado, ou seja, no momento em que se dá início à passagem de corrente elétrica nos elétrodos de grafite. A fusão é dada por concluída quando, idealmente, toda a carga está fundida e o banho atinge uma temperatura desejada, na ordem dos 1600°C [13].

O controlo de potência (*tap*) permite aumentar ou diminuir a taxa de fusão da carga, procurando-se atingir um equilíbrio otimizado entre a energia fornecida e o impacto nefasto sobre o equipamento, sobretudo no que diz respeito à integridade do material refratário do forno. O *tap* mais elevado é normalmente utilizado durante a fusão da carga, exceção feita no arranque do forno após cada carregamento, e sempre que a ponta dos elétrodos se aproxima do delta da abóboda. Consoante o *tap* selecionado, o comprimento do arco elétrico é manipulado uma vez que uma alteração de tensão influencia a potência de trabalho [13].

No decorrer da fusão da carga, a potência aplicada varia aproximadamente de acordo com o que está esquematizado no gráfico da Figura 5. No início da fusão dos cestos verifica-se a aplicação de um *tap* inferior de modo a não colocar em risco a integridade do equipamento. A partir do momento em que parte da carga já se encontra fundida, é acionado o *tap* mais elevado de modo a acelerar a fusão da sucata. No final da fusão do último cesto, a potência, é reduzida uma vez que nesta fase toda a carga deverá estar fundida e a energia é apenas necessária para elevar a temperatura do banho até o valor desejado [13].

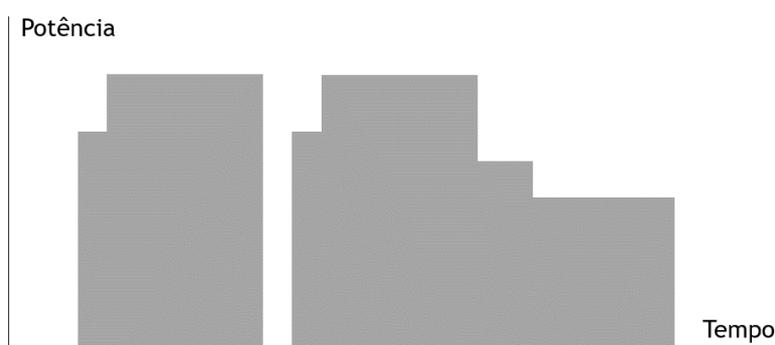


Figura 5 - Variação da potência elétrica de um forno elétrico a arco ao longo de um ciclo de fusão, envolvendo o carregamento de dois cestos [13].

Ao longo da etapa de fusão ocorrem reações de oxidação de elementos de liga presentes na sucata, passando os óxidos então formados para a escória. Para estas reações ocorrerem é fundamental a presença de oxigênio no sistema. O oxigênio pode provir de três fontes [13]:

1. Atmosfera ambiente;
2. Matérias-primas introduzidas;
3. Injetores e lanças injetoras consumíveis.

2.2.4 Injetores

Num forno elétrico de corrente alternada, os eléctrodos dispõem-se, de forma centrada, segundo um triângulo equilátero. A esta disposição estão associadas variações de distância entre as paredes do forno e os eléctrodos, originando uma distribuição térmica assimétrica, essencialmente durante a etapa de fusão. Para além disso, as forças eletromagnéticas geradas pelos arcos promovem um desvio dos arcos relativamente ao centro do forno, provocando o aparecimento de zonas mais expostas à radiação, denominadas de pontos quentes (ver Figura 6) [13].

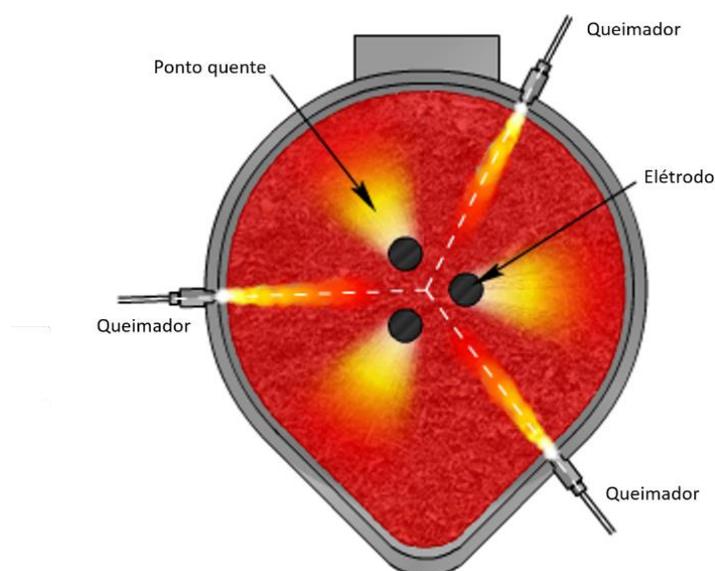


Figura 6 - Vista de topo do interior do forno durante a fusão, com localização dos pontos quentes e dos injetores (queimadores). Figura adaptada a partir do original [13].

De modo a minimizar o desequilíbrio térmico no interior do forno, são frequentemente introduzidos injetores nas zonas mais frias. Estes equipamentos consistem em lanças de oxigénio, ou até mesmo queimadores, em que se opera a combustão de um gás natural no seio de oxigénio, procurando assim atenuar o efeito do tal gradiente térmico, bem como, fornecer energia suplementar na etapa de fusão. A Figura 7 apresenta um gráfico ilustrativo da utilização de queimadores ao longo de um ciclo de produção envolvendo o carregamento de dois cestos [13].

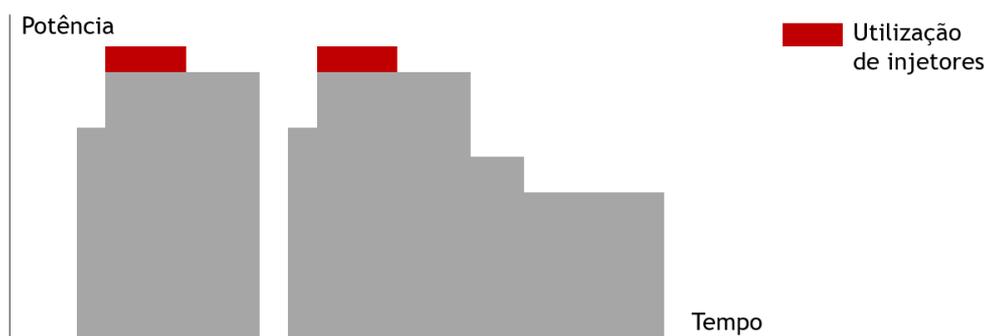


Figura 7 - Aplicação de queimadores num ciclo de produção envolvendo o carregamento de dois cestos [13].

2.2.5 Formação de escória espumosa

A formação de escória afigura-se de capital importância para o processo, sobretudo na etapa de fusão da carga. A sua formação provém não só da introdução de algumas adições na carga e à presença de constituintes não metálicos na sucata carregada, bem como à adição de cal com o objetivo de promover a formação de escória espumosa. Assim, compostos como o CaO , P_2O_5 , SiO_2 , FeO , entre outros óxidos e elementos residuais, compõem a escória que sobrenada o banho metálico devido à diferença de densidades.

A Tabela 4 apresenta uma composição química típica de uma escória obtida na produção de aço em aciaria elétrica.

Tabela 4 - Composição química de uma escória de produção de aço em forno elétrico. Fonte [13].

%CaO	%SiO ₂	%FeO	%MgO	%CaF ₂	%MnO	%CaS	%P ₂ O ₅
40,0-60,0	5,0-15,0	10,0-30,0	3,0-8,0	Variável	2,0-5,0	Variável	Variável

A formação, de forma controlada, de uma escória é um fator fundamental na produção do aço em aciaria elétrica uma vez que irá promover a proteção dos refratários do revestimento do forno das radiações emanadas do arco elétrico formado, bem como um aumento da eficiência térmica do forno devido à redução das perdas térmicas por radiação. A criação de uma escória espumosa é especialmente importante na fase designada de banho plano, em que as paredes e a abóbada do forno estão mais expostas

às radiações do arco elétrico. Na presença desse tipo de escória, o arco elétrico ficará “submerso”, minimizando a sua agressividade para com o meio envolvente. Para além de garantir a integridade física do forno, o facto de a operação ser realizada em *taps* mais elevados permite velocidades de fusão maiores e, conseqüentemente, produtividades mais elevadas [13].

A obtenção de escória espumosa está dependente da formação de CO a partir da reação entre o oxigénio e o carbono injetados. A introdução de oxigénio no banho metálico tem como objetivo oxidar o ferro a FeO , de acordo com a reação [13]:



Nota: nos equilíbrios onde se representem constituintes na forma \underline{x} ou $((x))$, estes representam elementos em solução no aço, no caso de surgirem sublinhados, ou, no caso de se encontrarem em parêntesis duplos e curvos, constituintes da escória.

O FeO passa à escória, onde reage com o carbono entretanto injetado, assistindo-se à sua redução a ferro metálico e à formação de CO , segundo a reação [13]:



Observa-se ainda a combustão do carbono do banho, segundo a reação:



A Figura 8 representa, de forma esquemática, a injeção de oxigénio e de carbono visando a formação da escória espumosa [13].

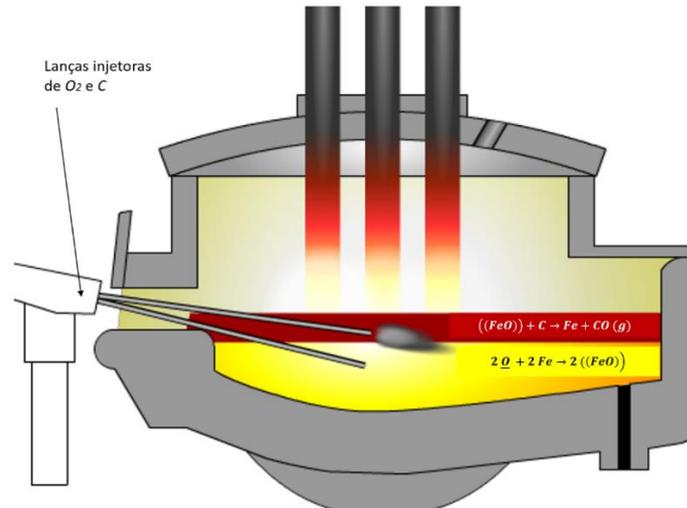


Figura 8 - Esquema representativo da ocorrência das reações promotoras da formação de escória espumosa. Figura adaptada a partir do original [13].

A formação da escória espumosa depende fortemente de uma série de propriedades físicas, nomeadamente: densidade, viscosidade, tensão superficial, temperatura de fusão, entre outras [13].

Estas propriedades variam com a temperatura e a composição química da escória. De realçar que, na presença de fortes gradientes térmicos no interior do forno, poder-se-á observar o aparecimento de massas de cal que ainda se encontram no estado sólido, o que poderá comprometer a espumação da escória devido à variação da sua viscosidade [13].

A viscosidade aparente de uma escória é calculada a partir da expressão [13]:

$$\eta = \eta_0 \cdot (1 - a \cdot f)^n \quad (2.6)$$

onde η representa a viscosidade aparente (Pa.s), η_0 a viscosidade na ausência de fase sólida (Pa.s) e f a fração volúmica da fase sólida na escória.

Existe também uma relação obtida por meio empíricos que relaciona o potencial de espumação de uma escória com a sua viscosidade, tensão superficial e densidade [13]:

$$\Sigma = c \cdot \frac{\eta}{\sqrt{\sigma \cdot \rho}} \quad (2.7)$$

em que Σ representa o potencial de espumação, η a viscosidade aparente (Pa.s), σ a tensão superficial (J/m²) e ρ o peso específico da escória (kg/m³).

Assim, o potencial de espumação aumenta quando a viscosidade aparente é mais elevada e a tensão superficial e densidade são mais baixas.

A Figura 9 apresenta as curvas de isoviscosidade, a uma temperatura da ordem dos 1400°C, de escórias do sistema ternário SiO_2 -“ FeO ”- CaO . Uma breve análise do diagrama permite concluir que o aumento do teor de SiO_2 promove indubitavelmente um aumento da viscosidade. Já em relação a CaO e FeO , e de acordo com os estudos de Chen e Zhao [16], verifica-se que, para um mesmo teor de SiO_2 , a gradual substituição do FeO por CaO promove um aumento da viscosidade das escórias.

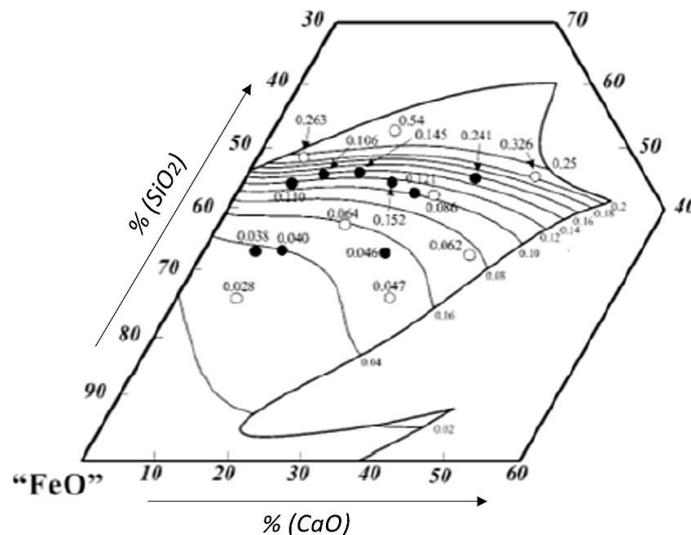


Figura 9 - Curvas de isoviscosidade ($Pa \cdot s$) de escórias do sistema ternário SiO_2 -“ FeO ”- CaO , a temperaturas próximas dos 1400°C. Figura adaptada a partir do original [16].

2.2.6 Balanço energético de um forno elétrico a arco

Conforme já foi previamente referido, existem duas fontes de energia:

- Energia elétrica;
- Energia térmica resultante das várias reações exotérmicas que ocorrem durante a operação do forno.

Para além destas duas fontes energéticas principais, recorre-se ainda à injeção de oxigénio e carbono, bem como de gás natural, visando um aumento do *input* energético ao forno, um equilíbrio da distribuição de calor prevenindo o aparecimento de pontos

frios e acelerar a fusão da carga de modo a elevar a produtividade quando, por exemplo, o transformador do forno já se encontra a operar próximo da sua potência nominal.

O balanço energético de um forno elétrico a arco depende de uma série de fatores, nomeadamente da composição química da carga, da qualidade do aço a produzir, entre outros. Devem ainda ser tomadas em consideração as perdas energéticas que ocorrem por diversas razões ao longo de todo o processo. Segundo Kirschen [17], o balanço energético pode ser resumido, de forma simplista, em três expressões:

$$E_{in} = E_{out} \quad (2.8)$$

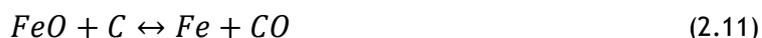
$$E_{in} = \int_{\text{carregamento}}^{\text{vazamento}} P_{elétrica} dt + \Delta H_{injetores} + \Delta H_{queimadores} \quad (2.9)$$

$$E_{out} = \Delta H_{aço} + \Delta H_{escória} + \int_{\text{carr.}}^{\text{vaz.}} \Delta H_{gases} dt + \int_{\text{carr.}}^{\text{vaz.}} \Delta Q_{arrefecedores} dt + \int_{\text{carr.}}^{\text{vaz.}} \Delta Q_{perdas} dt \quad (2.10)$$

em que E_{in} representa a energia total fornecida ao sistema, E_{out} a energia resultante da operação, $P_{elétrica}$ a energia elétrica fornecida desde o carregamento do forno até ao vazamento do aço, $\Delta H_{injetores}$ a variação de entalpia promovida pela reação de oxidação com o oxigénio insuflado, $\Delta H_{queimadores}$ o calor fornecido pelos queimadores de gás natural, $\Delta H_{aço}$ a energia térmica despendida na fusão e aquecimento do aço, $\Delta H_{escória}$ a energia térmica despendida na fusão e aquecimento da escória, ΔH_{gases} o calor perdido no aquecimento dos gases de exaustão, $\Delta Q_{arrefecedores}$ o calor perdido pelo sistema de arrefecimento do equipamento, ΔQ_{perdas} o calor perdido por radiação e outras perdas térmicas.

O calor fornecido pelas reações entre os vários elementos da carga, que sofrem oxidação durante o processo produtivo, e o oxigénio insuflado depende da composição química das sucatas da carga bem como de outras matérias-primas utilizadas. A Tabela (Anexo C) apresenta as variações de energia associadas às várias reações de oxidação, tanto reportadas à massa do elemento oxidado bem como ao volume de oxigénio insuflado.

De realçar ainda a ocorrência de uma reação, fortemente endotérmica, relativa à redução do FeO pelo carbono, a que está associado um consumo específico de energia da ordem dos $3,59 \text{ kWh/kg C}$ [17]:



2.2.7 Vazamento

O vazamento do aço ocorre logo após o fim da fusão, quando a temperatura do banho atinge o valor previamente estipulado. Esta temperatura tem necessariamente de ter em conta as perdas térmicas associadas ao transporte do metal entre o forno elétrico e o forno panela. O vazamento deve ser realizado o mais rapidamente possível a fim de não comprometer em demasia a produtividade da instalação [13]. O vazamento pode ser influenciado pela presença de peças de sucata de elevado volume, que não fundiram completamente e que poderão bloquear de certa forma o furo de sangria. Nestes casos, será necessário proceder à limpeza do furo, o que implica desperdício de tempo.

A forma e dimensões do furo influenciam igualmente o vazamento. Quando o furo é novo, *i.e.*, quando foi colocado recentemente o material refratário que o constitui, as cotas da abertura do furo (Anexo C.2) são inferiores, promovendo o alongamento do período de vazamento. Com o decorrer da sua utilização, a abertura vai-se tornando cada vez maior devido ao desgaste resultante da passagem do aço.

O caudal de vazamento pode ser estimado a partir da expressão:

$$C = v \cdot S \quad (2.12)$$

onde C é o caudal, em m^3/s , v a velocidade de vazamento do aço, em m/s , S a área da secção reta do furo, em m^2 .

A viscosidade do aço, que influencia diretamente a velocidade do escoamento, é determinada pela temperatura e a composição química do banho. Uma vez que, no decorrer de um determinado vazamento, a temperatura, a composição química e a pressão metalostática são consideradas constantes, pode-se afirmar que a viscosidade

também o será. Assim, considera-se que a velocidade de vazamento é constante e apenas dependente da área da secção reta do furo.

A abertura do furo de vazamento após a fusão da carga é conseguida recorrendo ao deslizamento de uma estrutura de suporte que sustenta o material refratário utilizado para a sua obturação.

2.3 Forno panela

2.3.1 Equipamento e funcionamento

O forno panela é normalmente constituído por uma panela de vazamento, abóboda e eléctrodos de grafite, sendo as suas dimensões consideravelmente inferiores às de um forno elétrico a arco. Numa perspetiva de sequência de operações, as operações no forno panela situam-se imediatamente após o vazamento do aço do forno elétrico, e anteriormente ao vazamento contínuo.

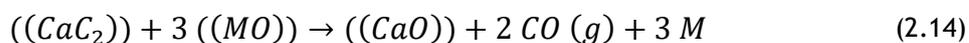
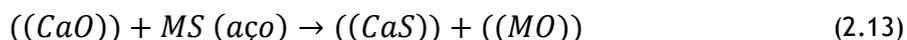
Os principais objetivos deste equipamento centram-se no controlo da temperatura e da composição química do banho, e respetiva homogeneização através da injeção de um gás inerte, bem como na formação de uma escória redutora e eliminação do enxofre do banho.

2.3.2 Dessulfuração

O enxofre apresenta-se no aço sólido sob a forma de inclusões de sulfuretos metálicos. O volume, forma, quantidade e dispersão destas inclusões dependem de vários fatores como a temperatura, teor de enxofre e de oxigénio, velocidade de arrefecimento e conformação mecânica a que o produto foi sujeito. Estas inclusões afetam em grande escala algumas propriedades do material, sobretudo no que diz respeito à sua conformabilidade. Durante a conformação do aço, estas inclusões atuam como focos de tensões, promovendo o aparecimento e propagação de fissuras e, conseqüentemente, uma redução da sua ductilidade e tenacidade; a soldabilidade e a resistência à corrosão do aço são igualmente afetadas. Por todas estas razões é muito importante proceder à sua eliminação na etapa de afinação no forno panela [18].

Dependendo do tipo de aço que está a ser produzido, o teor de enxofre admitido varia uma vez que a sua influência nas propriedades do material podem ser mais ou menos relevantes. O teor de enxofre no aço, após fusão no forno elétrico, situa-se normalmente na gama 0,01-0,02%. Para algumas classes de aço, o teor máximo de enxofre admissível ronda os 0,001% [18].

A eliminação do enxofre do banho processa-se segundo reações químicas (equilíbrios 2.13 e 2.14) entre o aço e a escória, onde *M* representa um determinado elemento metálico que inicialmente se encontra sob a forma de sulfureto, sofrendo uma reação de oxidação e posteriormente uma redução, regressando assim ao banho [18].



Ao contrário do que se verifica no forno elétrico, a escória ideal no forno panela deve apresentar um caráter redutor e elevada basicidade.

O índice de basicidade da escória no forno panela é calculado com base na seguinte expressão [18]:

$$\text{índice de basicidade (B) da escória} = \frac{(\%CaO + 1,4. \%MgO)}{(\%SiO_2 + 0,84. \%P_2O_5)} \tag{2.15}$$

A Tabela 5 apresenta a composição química de uma escória eficaz para a eliminação do enxofre em forno panela [18].

Tabela 5 - Composição química de uma escória eficaz na dessulfuração em forno panela [18].

%CaO	%SiO ₂	%FeO	%MgO	%CaF ₂	%MnO	%Al ₂ O ₃
56,0	8,0	1,0	7,0	1,0	1,0	26,0

Por razões óbvias, dever-se-á procurar minimizar a transferência de escória do forno elétrico para a panela de vazamento. No forno panela procede-se à adição de cal, espato flúor, alumina e aluminatos ou aluminatos de cálcio, visando a regulação da temperatura de fusão da escória, o seu índice de basicidade e viscosidade [18].

2.3.3 Desoxigenação

O aço produzido em forno elétrico pode apresentar um elevado teor de oxigénio, na ordem dos 400 a 1000 *ppm*. A solubilidade do oxigénio no aço no estado líquido ronda os 1600 *ppm*; contudo, no estado sólido, o ponto de saturação é atingido para teores de aproximadamente 30 *ppm*. De modo a minimizar o aparecimento de poros e a precipitação de óxidos no produto final, é muito importante promover a desoxigenação do banho [18].

O oxigénio pode ter origens distintas [18]:

- Oxigénio injetado durante a etapa de fusão;
- Atmosfera envolvente;
- Dissociação de moléculas de água;
- Óxidos presentes nas matérias-primas;
- Óxidos provenientes da escória;
- Refratários.

O método mais comum ao qual se recorre para desoxigenar o banho consiste na adição de elementos com elevada afinidade para o oxigénio, e superior à do ferro. O *Al*, *Si* e *Mn* são os elementos desoxigenantes mais comumente utilizados; os óxidos entretanto formados são decantados, passando para a escória [18].

Conforme se pode verificar da análise do diagrama de Ellingham (Anexo D.1), estes elementos apresentam uma afinidade para o oxigénio superior à do ferro pelo que é de esperar que promovam a redução do *FeO* a ferro, que regressa ao banho metálico.

As reações de oxidação relativas a esta fase são as seguintes [18]:



2.4 Vazamento contínuo

Uma vez concluída a etapa de afinação no forno panela, o aço é encaminhado para a plataforma de vazamento contínuo. Aqui, o aço é vazado, de forma contínua, para um recipiente distribuidor, o *tundish*, que apresenta, no seu fundo, uma série de orifícios (seis na linha da SN Maia) através dos quais é alimentada cada uma das lingoteiras que encimam os trens de vazamento contínuo. Essas estruturas, em cobre eletrolítico, são intensamente arrefecidas por água, dando forma ao produto vazado que deverá apresentar, nesta fase, uma parede com espessura suficiente para suportar a pressão metaloestática do aço que se ainda se encontra no estado líquido no seu interior. Após a saída das lingoteiras, prossegue a solidificação e arrefecimento do produto através da projeção de água a pressão elevada. Segue-se o endireitamento do produto, através da sua passagem por rolos de laminagem, e, finalmente o seu corte de acordo com comprimento projetado para a laminagem subsequente.

3. PRÉ-REDUZIDOS

3.1 Incorporação de HBIs na carga

Tradicionalmente, a maioria dos fornos elétricos de arco utiliza cargas essencialmente à base de sucata. A utilização de pré-reduzidos de ferro surge como uma alternativa, podendo em certos casos substituí-la por completo. A incorporação deste tipo de matéria-prima em cargas de forno elétrico implica uma alteração da filosofia de produção e uma análise profunda das suas implicações no processo e no produto final [19].

Um aspeto que deve ser considerado desde o início do estudo sobre a viabilidade da utilização de pré-reduzidos é a sua densidade que nunca poderá ser inferior à densidade média da escória produzida. Para além disso é importante ter em consideração que, no caso de carregamento contínuo de HBIs utilizando telas transportadores, é fulcral que o ponto de queda dos mesmos seja alto o suficiente para garantir que os briquetes possuam energia cinética elevada que os permita penetrar na escória e banho metálico. Caso não se cumpra com este requisito, poderá ocorrer a falha ou a diminuição acentuada de penetração dos briquetes de HBIs no aço. É possível, que na utilização de DRIs, se incorporem péletes cujo peso específico, variável entre 3,4 e 3,6 t/m^3 , possa ser inferior ao da escória formada, que habitualmente desse situa entre 2,6 e 3,5 t/m^3 . Já com os HBIs, este problema é menos provável uma vez que os briquetes utilizados apresentam um peso específico mais elevado, na ordem das 5 t/m^3 . A densidade a granel dos pré-reduzidos deve ser a mais elevada possível de modo a reduzir o volume dedicado ao seu armazenamento bem como o tempo do seu carregamento no forno [19].

A composição química é igualmente um parâmetro de extrema importância a ter em consideração face ao seu impacto no rendimento, no balanço de massas e de energia, no volume de oxigénio injetado e na adição de outras matérias-primas, como a grafite [19].

Os pré-reduzidos são produtos com elevado grau de metalização pelo que apresentam elevada suscetibilidade à oxidação. É importante para o controlo do processo conhecer o grau de metalização do pré-reduzido no momento da sua incorporação no forno [19]. Uma vez conhecidos o teor de ferro e o grau de metalização, é fácil calcular a quantidade de óxidos de ferro dos pré-reduzidos [19]:

$$(Fe_{total} - Fe_{metal.}) \cdot \frac{72}{56} = FeO \quad (3.1)$$

Uma vez conhecida a massa de FeO , é possível obter a quantidade de oxigénio associado aos óxidos de ferro dos pré-reduzidos.

Se o rácio entre as massas de carbono e oxigénio presente nos óxidos de ferro for aproximadamente de 0,75, verifica-se que a formação de CO se processa de segundo a estequiometria da reação. Se o rácio assume outros valores, será necessário adicionar carbono, caso a quantidade de oxigénio seja superior, ou injetar mais oxigénio, se o carbono estiver em excesso. Normalmente, prefere-se operar com um ligeiro excesso de carbono [19].

Na planificação do processo é de extrema importância definir a quantidade de pré-reduzidos a incorporar na carga no forno elétrico. O carregamento deste produto pode ser realizado de forma descontínua, introduzindo os briquetes nos cestos de carga, ou então de forma contínua através de sistemas de carregamento apropriados, normalmente telas transportadoras [19].

Neste último caso, é essencial que a alimentação se processe de modo a maximizar o rendimento energético da operação. A alimentação de pré-reduzidos é normalmente efetuada no final da fusão da sucata, na fase designada de banho plano e estável. Normalmente o caudal de pré-reduzidos a introduzir no forno varia entre os 5 e os 35 $kg/min/MW$ [19].

No cálculo do caudal de alimentação de pré-reduzidos, deve ser tido em conta o consumo específico de energia para o seu aquecimento e fusão.

Conforme se pode constatar da análise da Figura 10, quanto mais elevado é o grau de metalização dos pré-reduzidos, menor será o consumo específico de energia. Por outro lado, esse consumo aumentará com a diminuição do rácio CaO/SiO_2 na ganga face à

necessidade de carregamento adicional de cal de modo a obter-se o índice de basicidade da escória adequado ao processo.

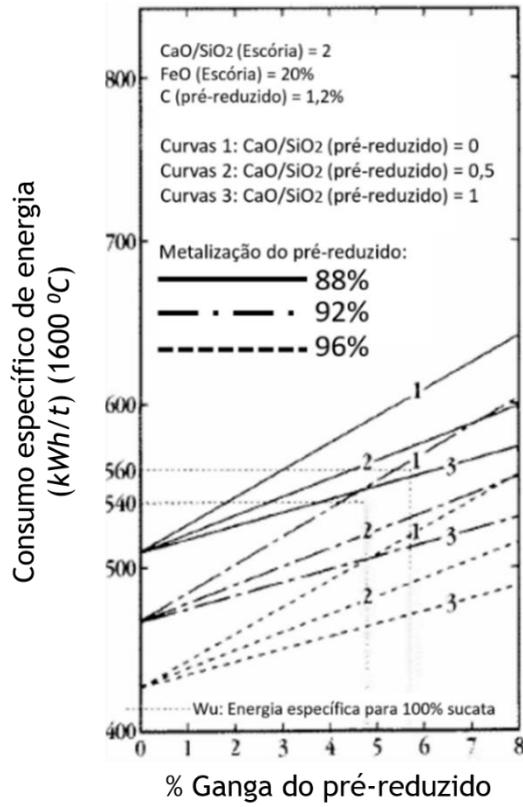


Figura 10 - Efeito da massa e composição da ganga dos pré-reduzidos no consumo específico de energia. Figura adaptada a partir do original [19].

Conforme analisado anteriormente, a reação de oxidação entre o carbono e o oxigênio promove uma redução do consumo específico de energia do processo uma vez que é uma reação fortemente exotérmica; em condições ideais, esse consumo pode baixar entre 2 e 4 kWh/m³ O₂ injetado.

A utilização de pré-reduzidos sempre esteve associada à produção de aços com especificações em termos de composição química altamente restritivas, com gamas de teores de elementos perniciosos muito apertadas. Para além disso, numa vasta maioria dos casos, a incorporação de pré-reduzidos está altamente dependente das oscilações do preço desta matéria-prima bem como da sua disponibilidade no mercado. A distância entre a unidade de produção de pré-reduzidos e a aciaria que pretende utilizar este produto é também um fator determinante na viabilidade económica da sua utilização dado que os preços do transporte e manuseamento podem ser muito relevantes.

Segundo Anderson [20], alguns aciaristas argumentam que a utilização de pré-reduzidos induz um aumento do consumo específico de energia elétrica, da duração de cada ciclo *tap-to-tap*, da quantidade de adições para a correta execução do processo, do teor de FeO na escória, do desgaste dos materiais refratários e eletrodos, bem como um abaixamento do rendimento da carga, entre outros aspetos negativos.

De acordo com este investigador, que advoga que a adoção de boas práticas de utilização de pré-reduzidos e o domínio do processo por parte dos operadores permite a utilização de pré-reduzidos e um aumento do rendimento global do processo, é estritamente fundamental que cada aciaria que pretenda incorporar esta matéria-prima nas suas cargas cumpra alguns requisitos. Em primeiro lugar, o conhecimento global do processo deve ser de tal forma profundo que permita quantificar as eficiências e rendimentos relativos a cada uma das suas etapas, visando a otimização de vários parâmetros.

É importante que a instalação realize um estudo relativo à quantidade de pré-reduzidos a utilizar e modo de carregamento uma vez que esses aspetos serão determinantes para o balanço final da utilização deste produto. Conhecer o nível de investimento associado à utilização de pré-reduzidos é também importante dado que poderá ser necessário proceder à instalação de silos de armazenamento, sistemas automáticos de alimentação, entre outros equipamentos. De um ponto de vista menos quantificável, é também fulcral que todos os operadores envolvidos na produção bem como as chefias da instalação conheçam os detalhes associados à segurança e boas práticas de utilização de pré-reduzidos.

Um fator altamente importante a ter em conta no estudo da viabilidade da utilização de pré-reduzidos prende-se com rendimento de carbono do processo (% do rendimento teórico da combustão do carbono). Ainda segundo Anderson [20], é frequente que as aciarias não conheçam com precisão o rendimento de carbono, sendo normal que o seu valor oscile entre os 25 e os 75%. Em relação ao rendimento do carbono, introduzido diretamente pelos pré-reduzidos, o seu valor poderá atingir os 95%. Assim, é muito importante para uma instalação conhecer, mesmo que de forma aproximada, este índice de modo a poder perceber, com algum rigor, se o carbono dos pré-reduzidos induzirá um aumento significativo do seu rendimento de adição, que estará

intimamente associado ao fornecimento de energia suplementar ao sistema e à produção de escória espumosa

Os principais parâmetros que influenciam os requisitos energéticos associados ao carregamento de pré-reduzidos no forno elétrico a arco são os seguintes [20]:

1. Matérias-primas: Análise qualitativa e quantitativa dos HBIs, e seu grau de metalização;
2. Condições operativas: Modo de carregamento dos HBIs, potência de trabalho, injeção de oxigénio, carbono, e de gás natural, utilização de escória espumosa, taxa de fusão, e volume de pé de banho;
3. Forno: Alimentação da corrente elétrica.

No que diz respeito aos constituintes da ganga, será de esperar que os pré-reduzidos apresentem teores mais elevados relativamente aos valores médios das sucatas ferrosas, sendo esse fator visto como um grande aspeto negativo da incorporação de pré-reduzidos. No entanto, em sucatas de baixa qualidade, armazenadas a céu aberto e que apresentem vestígios de produtos não metálicos, essa diferença entre valores é atenuada. A Tabela 6 apresenta, a título comparativo, a composição química (valores médios) de pré-reduzidos de um determinado fornecedor e de uma mistura de sucatas ferrosas.

Tabela 6 - Composição química (valores médios) dum pré-reduzido e de sucatas ferrosas [20].

	%Fe Total	%FeO	%C	%Ganga
<i>Pré-reduzido</i>	90,80	6,77	2,08	4,47
<i>Sucata</i>	93,85	1,80	0,47	4,25

Para além de demonstrar que a utilização de pré-reduzidos promove o processo produtivo, desde que implementada corretamente, Anderson [20] defende ainda que a incorporação de pré-reduzidos na carga potencia a produção de um aço de qualidade superior.

Alguns dos problemas mais comuns que ocorrem na conformação do aço prendem-se com defeitos que podem conduzir a falhas críticas do material. Esses defeitos compreendem heterogeneidades em termos de composição química, presença de

inclusões de elementos perniciosos (*Cu, Sn, Ni, Cr, Mo, S, P, N e H*), propriedades mecânicas fora das especificações, entre outros. Este tipo de problemas pode originar deformações plásticas incorretas, aparecimento de fissuras, alteração das propriedades mecânicas do material, entre outros defeitos. A utilização de pré-reduzidos, devido aos reduzidos teores dos elementos anteriormente referidos, promove uma diminuição da probabilidade de incidência de problemas desta natureza, otimizando assim as etapas de conformação plástica subsequentes.

4. ANÁLISE DE REGISTOS DE PRODUÇÃO

4.1 Introdução e objetivo

A incorporação de HBIs nas cargas de forno elétrico a arco para produção de aço pode apresentar, tal como anteriormente analisado, influências e alterações profundas em vários aspetos do processo.

Neste capítulo procura-se estabelecer uma análise comparativa entre dados recolhidos dos registos de produção da aciaria da SN Maia (*Grupo Megasa*) relativos a dois períodos em que se procedeu à incorporação de HBIs nas cargas, e um outro em que as cargas compreendiam unicamente sucatas ferrosas.

A análise detalhada e representativa desses registos, visando a obtenção de resultados e conclusões o mais válidos possível, incidiu sobre os seguintes índices de produção:

- Toneladas por vazamento ($t_{aço}/vazamento$);
- Rendimento da carga (sob a forma de % de *perdas de carga*);
- Consumo específico de energia elétrica (kWh/t);
- Consumo específico de oxigénio, injetado através dos queimadores e lanças consumíveis (Nm^3/t);
- Consumo específico de gás natural (Nm^3/t);
- Consumo específico de energia total (kWh/t);
- Produtividade ($t_{aço}/h$);
- Duração dos ciclos produtivos “*tap-to-tap*” (min);
- Duração dos tempos ON e OFF por ciclo (min);
- Taxa de fusão (t_{sucata}/h).

Para além dos vários índices supramencionados, foram ainda analisadas as composições químicas de amostras de aço recolhidas após a fusão bem como os dados relativos às adições efetuadas no forno elétrico, na fase de vazamento para a panela e durante a afinação do aço no forno panela.

Numa primeira fase, a análise incidiu sobre registos relativos a dois períodos do ano muito semelhantes em termos de calendário; os períodos selecionados foram os seguintes:

- i. Período 1: 30 dias, entre os meses de agosto e setembro de 2015 - período onde se procedeu à incorporação de HBIs nas cargas;
- ii. Período 2: 30 dias, entre os meses de agosto e setembro de 2016 - período em que as cargas eram exclusivamente de sucata.

Numa segunda fase, efetuou-se uma análise relativa a um período do ano em que as condições atmosféricas teriam sido muito diferentes das observadas nos períodos anteriormente identificados, já que seria expectável que a temperatura ambiente, o grau de humidade, a pluviosidade e outros fatores climatéricos tivessem uma forte incidência sobre os índices de produção selecionados. É importante mencionar que estes fatores externos ao processo são de difícil quantificação e registo de forma sistematizada pelo que o período escolhido procura ser aquele em que, com elevado grau de probabilidade, estas condições terão sido mais adversas ao processo produtivo. Assim, foi selecionado o período seguinte:

- i. Período 3: 30 dias entre os meses de janeiro e fevereiro de 2016 - período onde foram incorporados HBIs nas cargas.

Durante o período 1, só foram utilizados HBIs dum mesmo lote; a Tabela 7 apresenta a composição química (valores médios) relativa a esse lote.

Tabela 7 - Composição química (valores médios) do lote de HBI utilizado no período 1.

$\%Fe_{total}$	$\%Fe_{metal.}$	$\%Grau\ metalização$	$\%C$	$\%S$	$\%P$	$\%MgO$	$\%CaO$	$\%Al_2O_3$	$\%SiO_2$	$\%FeO$
90	85,8	95,3	0,85	0,005	0,13	0,53	0,77	1,0	3,01	5,4

A análise dos dados da Tabela 7 indicia que foram utilizados HBIs que apresentam um défice de carbono dado que a relação C/O do mesmo é de 0,71, portanto abaixo dos 0,75 apontados pela literatura para que a de formação de CO se processe segundo a estequiometria da reação. Em média, ao longo do período 1 foram incorporadas 25

toneladas de HBIs por carga, numa marcha envolvendo o carregamento de dois cestos de sucata por partida.

4.2 Análise de registos de produção

4.2.1 Períodos 1 e 2

Procedeu-se à análise dos vários índices de produção selecionados das tabelas de controlo semanal, relativas aos períodos 1 e 2, disponibilizadas pela SN Maia.

A Tabela 8 apresenta os valores médios dos índices de produção analisados; por cada índice, foi calculada a taxa da sua variação entre o período em que as cargas incorporavam HBIs e o período em que se carregou exclusivamente sucata.

Tabela 8 - Valores médios dos índices de produção relativos aos períodos 1 e 2.

Período	% HBIs na carga	$t_{\text{aço}}/\text{vaz.}$	% Perdas	Cons. espec. en. elétrica (kWh/t)	Cons. espec. O ₂ total (Nm ³ /t)	Cons. espec. gás nat. (Nm ³ /t)
1 (c/HBIs)	15,63	121,91	10,39	406,77	23,23	0,39
2 (s/HBIs)	-	122,71	8,95	378,43	23,56	0,53
%Δ (1/2)	-	-0,7%	+13,9%	+7,0%	-1,4%	-35,4%
Período	Cons. espec. en. total (kWh/t)	Produtividade ($t_{\text{aço}}/\text{h}$)	Duração de ciclo (min)	Tempo ON (min)	Tempo OFF (min)	Taxa de fusão ($t_{\text{sucata}}/\text{h}$)
1 (c/HBIs)	489,53	175,06	41,81	35,16	6,64	232,17
2 (s/HBIs)	462,67	180,36	40,86	33,33	7,53	242,81
%Δ (1/2)	+5,5%	-3,0%	+2,3%	+5,2%	-13,3%	-4,6%

Previamente à análise dos resultados, há que destacar que a composição química das sucatas utilizadas bem como a sua qualidade, no que diz respeito à sua contaminação

com produtos orgânicos, terra, entre outros materiais, variam muitíssimo de lote para lote, sendo de quantificação extremamente difícil. Assim, considerou-se toda a sucata como pertencente a um único lote, com a mesma origem e com características médias idênticas.

Em relação ao primeiro índice analisado, que quantifica as toneladas de aço vazadas por carga, regista-se uma variação, considerada pouco relevante, de 0,7%.

O segundo índice analisado representa o inverso do rendimento de metal da carga, *i.e.*, as perdas de metal. Tal como seria de esperar, a utilização de HBIs promoveu um aumento (13,9%) considerável desse valor. Este aumento deve-se primariamente ao facto dos HBIs apresentarem um grau de metalização inferior ao das sucatas, produtos onde a oxidação só resulta da sua exposição ao meio ambiente. Assim, é correto afirmar que uma fração considerável da massa dos pré-reduzidos não contribui para a produção de aço, reduzindo assim o rendimento de metal global do processo. De realçar ainda que, em função das condições de armazenamento e de transporte, se possa registar um decréscimo do grau de metalização dos HBIs, face ao contratualizado. Efetivamente, a água, da humidade do ar ou da chuva, no caso de armazenamento ao ar livre, irá contribuir para a oxidação do ferro dos HBIs. Para além disso, o transporte e manuseamento dos briquetes promove uma certa desagregação, produzindo finos que, ao absorverem água, dão origem à formação de lamas, que também contribuirão para o aumento das perdas de metal.

Conforme anteriormente referido, a eletricidade é a principal fonte de energia do forno elétrico a arco. Assim, o consumo específico de energia elétrica do forno é um dos índices mais importantes do processo. Conforme se pode verificar da análise dos valores obtidos, a incorporação de HBIs na carga originou um aumento desse consumo em 7%, devido a múltiplos fatores. Em primeiro lugar, é importante destacar que o FeO dos pré-reduzidos será reduzido pelo carbono a Fe metálico, segundo uma reação fortemente endotérmica. Para além disso, há que ter em conta as adições de cal viva e de cal dolomítica para acerto do índice de basicidade da escória face à introdução pelos HBIs de elevadas quantidades de constituintes ácidos. Assim, as necessidades térmicas serão superiores às das cargas compostas unicamente por sucata, e daí o aumento do consumo específico de energia elétrica. Conforme se pode observar na

Figura 11, o consumo específico de energia elétrica é manifestamente mais elevado quando foram carregados HBIs.

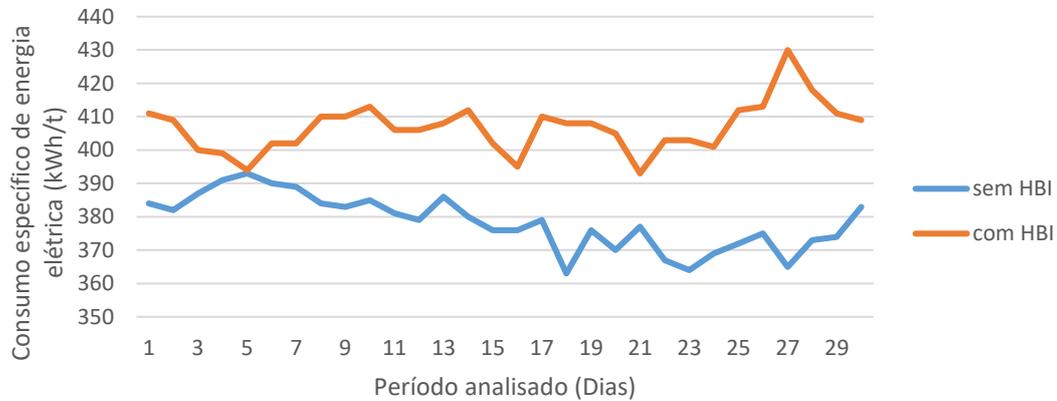


Figura 11 - Variação do consumo específico de energia elétrica ao longo dos períodos analisados.

A duração de cada ciclo de fusão, correspondente ao tempo (em minutos) que medeia a abertura do furo de vazamento entre a fusão de duas cargas sucessivas, é também afetada pela utilização de HBIs. A duração *tap-to-tap* deve ser dividida em duas parcelas: o tempo ON e o tempo OFF do forno. Verifica-se um decréscimo do tempo OFF em cerca de 13% (ver Tabela 8), o que por si só é francamente positivo. Esta redução de tempo prende-se sobretudo com o facto de, no decorrer da campanha de utilização de HBIs, o carregamento do forno ter envolvido a descarga de dois cestos de sucata, contrariamente aos três cestos que são descarregados quando a carga compreende unicamente sucata. Assim, por cada ciclo produtivo, é eliminada uma operação de abertura do forno e, conseqüentemente, o corte de energia, e daí a diminuição em 13% do tempo OFF., no entanto, de acordo com os dados analisados (Tabela 8), observa-se um aumento em cerca de 2,3% da duração global do ciclo de produção devido à dilatação do tempo ON. Esta parcela do ciclo sofre um aumento considerável devido ao facto dos HBIs apresentarem um consumo específico de energia para fundir superior face ao mesmo indicador das sucatas ferrosas, e, por isso, necessitarem de mais tempo para completarem a sua fusão para uma mesma potência. A Figura 12 patenteia uma clara tendência para o aumento da duração dos ciclos de produção quando são carregados HBIs no forno, comprometendo assim a produtividade, *i.e.*, o número de toneladas de aço vazadas por unidade de tempo.

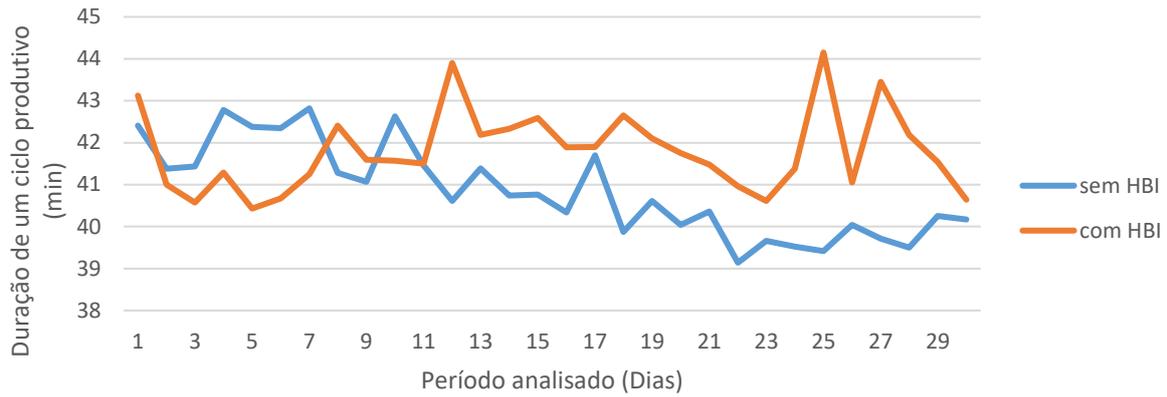


Figura 12 - Variação da duração dos ciclos de produção ao longo dos períodos analisados.

Verifica-se efetivamente uma redução em cerca de 3% deste índice quando se procedeu ao carregamento de HBIs. Esta redução é essencialmente devida a dois fatores já analisados: a redução do rendimento metálico da carga, e o aumento da duração do ciclo de produção. Ao longo dos períodos analisados observa-se (Figura 13) uma clara tendência para o decréscimo de produtividade na campanha de utilização de pré-reduzidos.

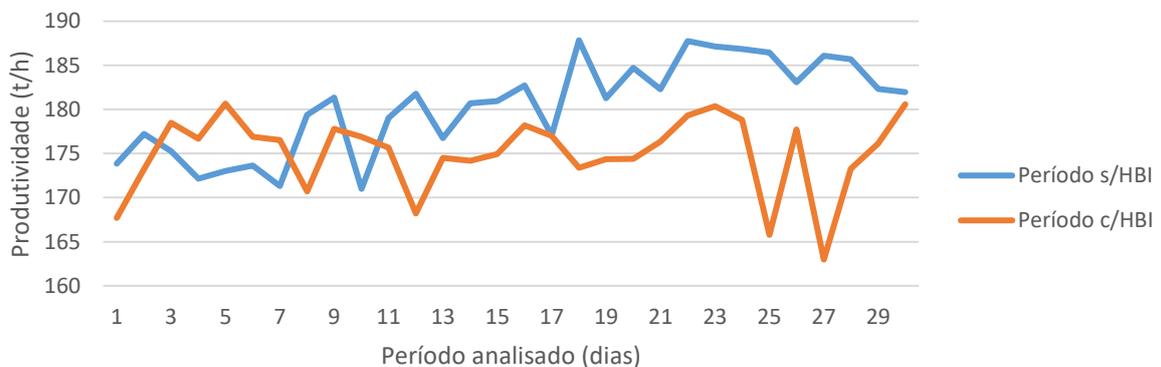


Figura 13 - Variação da produtividade ao longo dos períodos analisados.

De registar ainda uma ligeira redução do volume de oxigénio injetado no forno no período 1, perfeitamente justificável pela quantidade de oxigénio introduzido pelos próprios HBIs.

Em relação à composição química do aço durante os períodos em análise, são apresentados na Tabela 9 os valores médios relativos às análises obtidas por espectrometria de emissão em amostras de aço recolhidas no final da fusão.

Tabela 9 - Composição química (média) do aço no final da fusão nos períodos 1 e 2.

Período	%C	%P	%S	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Sn	%Mo	%V	%Pb	%Zn
1 (c/HBIs)	0,07	0,02	0,08	0,05	0,09	0,09	0,13	0,02	0,03	-	-	0,01
2 (s/HBIs)	0,10	0,01	0,07	0,02	0,09	0,11	0,15	0,02	0,04	-	-	0,01

Regista-se um abaixamento do teor de carbono quando se incorporam HBIs no forno, o que poderá ser perfeitamente explicado pela redução parcial do FeO segundo o equilíbrio:



Em relação ao fósforo, a insuflação de oxigénio promove a sua oxidação. Contudo, atendendo a que, no período 1, observou-se uma diminuição do volume de oxigénio injetado, será de admitir que o carregamento de HBIs possa ter promovido uma certa diluição deste elemento no banho metálico. Este efeito diluidor pode estender-se igualmente aos elementos Cr , Ni e Mo .

Por sua vez, o teor de Si nas amostras de aço respeitantes ao período 1 apresenta um valor médio superior ao das amostras do período 2, o que, de certa forma, se aceita face aos teores de Si que as sucatas de aço normalmente apresentam. Atendendo à elevada afinidade deste elemento para o oxigénio, é de crer que o silício seja oxidado na sua totalidade, passando para a escória sob a forma de SiO_2 .

No que respeita ao enxofre, os teores são muito idênticos, não revelando assim que a utilização de HBIs tenha grande influência sobre o teor daquele elemento no banho metálico.

O teor de Al no aço é considerado desprezável dado que é extremamente reduzido. Considera-se assim que todo o conteúdo deste elemento no sistema encontra-se na sua forma oxidada na fase de escória do banho.

Em relação aos dados relativos às adições, para os períodos 1 e 2, os valores médios e respetivas variações encontrados são apresentados nas Tabelas 10, 11 e 12.

Tabela 10 - Adições efetuadas no forno elétrico nos períodos 1 e 2.

Período	Antracite (kg)	Cal dolomítica (kg)	Cal viva (kg)	Agente espumante (kg)	Cal injetada (kg)
1(c/HBIs)	500	1800	1500	473	580
2(s/HBIs)	-	1548	1260	341	447
%Δ (1/2)	-	+14%	+16%	+28%	+23%

Durante o período 1 foi realizada uma adição média de 500 kg de carbono, sob a forma de antracite, no primeiro cesto de sucata. Esta adição deve-se ao facto dos pré-reduzidos utilizados apresentarem uma relação C/O_2 inferior a 0,75. O carbono adicionado deverá ser suficiente para satisfazer, do ponto de vista teórico, a estequiometria da sua reação com o oxigénio, não sendo considerado o rendimento de carbono. Esta adição de carbono no primeiro cesto da carga não se verifica no período 2, em que não é incorporado qualquer pré-reduzido.

A adição de cal é mais elevada no período em que são carregados no forno HBIs, aumentando em cerca de 14% a adição de cal dolomítica e de 16% de cal viva face ao período em que não são utilizados pré-reduzidos. Este aumento deve-se, tal como anteriormente visto, à necessidade de compensar o excesso de constituintes ácidos dos HBIs de modo a obter uma escória com o índice de basicidade estipulado ($CaO/SiO_2=2$).

No que diz respeito às adições efetuadas no vazamento do aço após a sua fusão (Tabela 11), bem como na afinação do aço no forno panela (Tabela 12), verificou-se um aumento generalizado das massas adicionadas no período em que foram utilizados HBIs relativamente ao período em que as cargas compreendiam unicamente sucata.

Tabela 11 - Adições efetuadas no vazamento do aço para a panela nos períodos 1 e 2.

Período	SiMn (kg)	FeSi (kg)	Cal viva (kg)
1 (c/HBIs)	763	191	632
2 (s/HBIs)	629	133	399
%Δ (1/2)	+18%	+30%	+37%

Tabela 12 - Adições efetuadas no forno panela nos períodos 1 e 2.

<i>Período</i>	<i>Grafite (kg)</i>	<i>SiMn (kg)</i>	<i>FeSi (kg)</i>	<i>Cal viva (kg)</i>	<i>Espato flúor (kg)</i>
<i>1 (c/HBIs)</i>	174	227	71	588	319
<i>2 (s/HBIs)</i>	134	109	35	299	181
%Δ (1/2)	+23%	+52%	+51%	+49%	+43%

É de salientar o notável incremento da adição de ligas desoxigenantes (*FeSi* e *SiMn*) e de grafite, o que vem comprovar que a utilização de pré-reduzidos promove um aumento considerável do grau de oxidação do aço.

4.2.2 Período 3

A exemplo do estudo desenvolvido no capítulo anterior, procedeu-se à análise dos vários índices de produção relativos ao período 3.

A Tabela 13 apresenta os valores médios dos índices de produção analisados; por cada indicador, foi calculada a taxa da sua variação entre os períodos 3 e 1, em que ocorreu o carregamento de HBIs. Procurou-se deste modo estabelecer uma comparação entre a utilização de pré-reduzidos em diferentes estações do ano para assim tentar compreender melhor o efeito de condições alheias à produção nos resultados obtidos.

Tabela 13 - Valores médios dos índices de produção relativos aos períodos 1 e 3.

Período	% HBIs na carga	$t_{\text{aço}}/\text{vaz.}$	% Perdas	Cons. espec. en. elétrica (kWh/t)	Cons. espec. O ₂ total (Nm ³ /t)	Cons. espec. gás nat. (Nm ³ /t)
1 (c/HBIs)	15,63	121,91	10,39	406,77	23,23	0,39
3 (c/HBIs)	13,69	120,83	12,48	436,05	22,83	0,39
%Δ (1/3)	-	-0,9%	+16,8%	+6,7%	-1,8%	0,0%
Período	Cons. espec. en. total (kWh/t)	Produtividade ($t_{\text{aço}}/\text{h}$)	Duração de ciclo (min)	Tempo ON (min)	Tempo OFF (min)	Taxa de fusão ($t_{\text{sucata}}/\text{h}$)
1 (c/HBIs)	489,53	175,06	41,81	35,16	6,64	232,17
3 (c/HBIs)	519,33	162,62	44,91	33,33	7,22	220,74
%Δ (1/3)	+5,7%	-7,6%	+6,9%	+6,7%	+8,0%	-5,2%

Conforme se pode observar na Tabela 13, os índices de produção relativos ao período 3 são manifestamente inferiores aos do período 1. De entre os vários indicadores destaca-se a perda de carga, que aumentou em aproximadamente 17%. Este aumento pode dever-se a diversos fatores, nomeadamente a utilização de pré-reduzidos que apresentam menor grau de metalização, e às condições climatéricas associadas ao seu

armazenamento. Relativamente a este último aspeto, será de esperar que um lote de HBIs armazenados durante um período mais extenso apresente um grau de metalização inferior devido à oxidação promovida pela sua exposição ao ar atmosférico; para além disso, há que ter em consideração as condições atmosféricas que imperaram durante o seu armazenamento. No caso do período 3, que abrangue basicamente os meses de inverno, esta última questão torna-se ainda mais relevante dado que a pluviosidade terá sido seguramente superior à do período 1. De realçar que o contacto dos HBIs com a água das chuvas terá potenciado a sua oxidação bem como a formação de lamas. Todos estes fatores contribuem para uma degradação dos índices de produção.

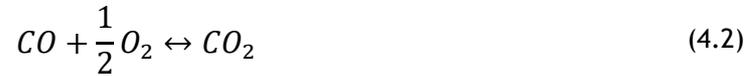
4.3 Análise do rendimento de carga

Conforme seria de esperar, o rendimento de carga do período 3 revelou-se inferior aos períodos 1 e 2. No entanto, a diferença registada entre os valores médios de perdas de metal nas duas campanhas em que ocorreu a incorporação de HBIs é notoriamente inferior ao expectável caso se, para uma taxa de redução dos óxidos de ferro constante, apenas se tivesse em conta o grau de metalização dos HBIs. Assim, a obtenção dos valores de rendimento de carga registados nos períodos 1 e 3 só poderá ser justificada caso se tenha observado uma variação da taxa de redução do FeO presente nos HBIs.

A análise dos dados relativos à temperatura dos gases de exaustão, na câmara de sedimentação do sistema de aspiração, permitiu evidenciar um aumento muito considerável do seu valor após o carregamento dos HBIs, o que não se registou no caso das cargas constituídas unicamente por sucata. As Figuras E.1 e E.2 (Anexos E.1 e E.2) apresentam registos de temperatura dos gases de exaustão do forno relativos a um período em que só foi carregada sucata e a outro em que foram também carregados HBIs.

Conforme se observa na Figura E.1 (Anexo E.1), regista-se um máximo a cerca de $700^{\circ}C$, não ocorrendo qualquer subida de temperatura após a fusão da carga e aquecimento do banho metálico. Em contrapartida, na Figura E.2 (Anexo E.2), verifica-se que, após se atingir a fase de banho plano e proceder ao carregamento dos HBIs, a temperatura dos gases sobe rapidamente para valores superiores a $960^{\circ}C$.

Dado que ao longo da operação, sobretudo durante a fase de formação da escória espumosa, se libertam elevadas quantidades de CO , considera-se que o aumento de temperatura registado pode ter a sua origem na oxidação daquele gás, segundo o equilíbrio:



a que está associado uma libertação de calor da ordem dos $7,01 \text{ kWh/m}^3 O_2$ [17]. Assim, poder-se-á explicar o aumento de temperatura registado, e que está associado à libertação de um maior volume de CO . Este aumento de volume resulta obviamente da subida da taxa de redução do FeO presente nos HBIs, e daí o aumento do consumo específico de energia e rendimento de carga superior ao expectável registados.

5. INCORPORAÇÃO DE HBIs

5.1 Caudal de alimentação de HBIs no forno

5.1.1 Introdução e objetivo

Tomando por base os trabalhos desenvolvidos por Alameddine e Bowman [21], que abordaram o cálculo do caudal de alimentação de pré-reduzidos em fornos elétricos de arco para produção de aço, considera-se que os requisitos energéticos de um determinado HBI podem ser analisados em função da quantidade de ganga, relação SiO_2/CaO na ganga, grau de metalização, teor de carbono do pré-reduzido e temperaturas de carregamento e vazamento. Os requisitos energéticos bem como a eficiência térmica do processo permitem estimar o caudal de alimentação de briquetes no banho de metal de modo a otimizar o rendimento energético do processo.

Grande parte das instalações siderúrgicas que recorrem à incorporação de pré-reduzidos no processo produtivo, procuram estabelecer um balanço entre o fluxo de entrada desta matéria-prima e a potência elétrica disponível de modo a manter a temperatura do banho aproximadamente constante (1530-1560°C). O sucesso deste balanço é fortemente dependente do conhecimento da composição química dos HBIs em utilização [21].

O modelo de cálculo desenvolvido no âmbito deste trabalho, com base no trabalho de Alameddine e Bowman [21], é apresentado de forma esquemática no fluxograma em anexo deste documento (Figura F.1; Anexo F.1).

5.1.2 Modelo de cálculo

Para o cálculo do caudal de alimentação de HBIs no forno, foi criada uma folha *Excel* que, com base numa série de *inputs* selecionados pelo utilizador, de dados termodinâmicos relativos aos diferentes componentes do sistema, e de fórmulas de cálculo pré-programadas, permite de forma expedita determinar o valor otimizado desse caudal (*kg/min/MW*).

Os dados que o utilizador deve selecionar ao iniciar a utilização da folha de cálculo são os seguintes:

- Massa total de HBIs na carga (*kg*);
- Grau de metalização dos HBIs (%);
- Composição química dos HBIs (%);
- Temperatura de carregamento dos HBIs (*K*);
- Temperatura de vazamento do aço (*K*);
- Taxa de redução do *FeO* (%);
- Fator de eficiência energética;
- Potência média de trabalho (*MW*).

Tendo-se adotado como base para o desenvolvimento dos cálculos o nível entálpico de 298 *K*, a folha de cálculo toma esse facto em consideração e procede ao respetivo ajuste (Expressão 5.1) caso os HBIs sejam carregados a uma temperatura diferente. Em relação às adições de cal e de carbono, considerou-se, face ao seu menor impacto nos cálculos, que se processam à temperatura de 298 *K*.

O cálculo do caudal de alimentação de HBIs foi então repartido por quatro etapas:

1. Variação de entalpia associada à eventual necessidade de reportar a temperatura de carregamento dos HBIs ao nível entálpico de 298 *K*;
2. Variação de entalpia do sistema entre 298 *K* e 1173 *K*, temperatura assumida para a ocorrência da redução do *FeO* [22];
3. Variação de entalpia associada à redução do *FeO*, a 1173 *K* [22];
4. Variação de entalpia do sistema entre 1173 *K* e a temperatura de vazamento previamente estipulada.

Neste capítulo, irá ser apresentado como exemplo, única e simplesmente, o desenvolvimento dos cálculos relativamente ao *Fe* dos HBIs; os cálculos relativos aos restantes constituintes são apresentados em anexo (Anexos F.2 a F.10). São igualmente apresentadas em anexo (Anexo F.11) algumas capturas de ecrã da folha *Excel* desenvolvida de modo a compreender melhor a sua configuração.

Atendendo a que a temperatura de carregamento dos HBIs é relativamente próxima dos 298 K, não há que contabilizar, no cálculo da variação de entalpia relativa à 1ª etapa, o calor latente associado a qualquer uma das transformações alotrópicas do *Fe*, pelo que:

$$\Delta H = n \cdot \int_{Ti}^{298} C_p (Fe-\alpha) dT \quad (5.1)$$

onde ΔH representa a variação de entalpia (*kcal*), n o número de *kmoles* de ferro, Ti a temperatura de carregamento dos pré-reduzidos, $C_p (Fe-\alpha)$ a capacidade calorífica do ferro.

No desenvolvimento dos cálculos, foi utilizada a seguinte expressão para a capacidade calorífica do *Fe* [23]:

$$C_p (Fe-\alpha) = 8,873 + 1,474 \cdot T \cdot 10^{-3} \text{ (kcal/ } ^\circ\text{kmol)} \quad (5.2)$$

A integração da expressão 5.1 conduziu à obtenção da expressão 5.3, posteriormente introduzida na folha de cálculo *Excel*:

$$\Delta H = n \cdot [2,71 \cdot 10^3 - (0,737 \cdot Ti^2 \cdot 10^{-3} + 8,873 \cdot Ti)] \quad (5.3)$$

O número de *kmoles* (n) de ferro dos HBIs é obtido a partir da expressão 5.4, onde m_{HBI} representa a massa (*kg*) de HBIs da carga, $\%Fe_{metálico}$ o teor de ferro metálico nos HBIs, e M_{Fe} a massa molar do ferro:

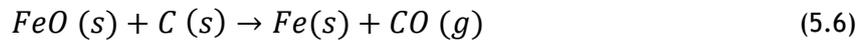
$$n = \frac{m_{HBI} \cdot \%Fe_{metálico}}{M_{Fe}} \quad (5.4)$$

A fase seguinte do cálculo tem como objetivo determinar a variação de entalpia do ferro entre 298 K e 1173 K, temperatura à qual se admite que ocorra a reação de redução do *FeO* [22].

O desenvolvimento dos cálculos processou-se de uma forma muito semelhante ao da 1ª fase, com inclusão do calor latente ($1,22 \cdot 10^3 \text{ kcal/}^\circ\text{kmol}$ [23]) associado à mudança de direção do momento magnético que se observa no ferro, à temperatura de 1043 K (ponto de Curie). Assim, a variação de entalpia relativa a esta 2ª etapa será calculada a partir da seguinte expressão:

$$\Delta H = n \cdot \int_{298}^{1173} Cp(Fe-\alpha) + 1,22 \cdot 10^3 dT \quad (5.5)$$

À temperatura de 1173 K ocorre, tal como anteriormente referido, a redução do FeO pelo que é necessário contabilizar a variação de entalpia associada a essa reação, representada pelo equilíbrio:



A variação de entalpia, a 1173 K , associada àquele equilíbrio será calculada a partir da expressão seguinte:

$$\begin{aligned} \Delta H_{1173}^0 - \Delta H_{298}^0 = & \left[n_{Fe} \cdot \left(\int_{298}^{1173} Cp(Fe-\alpha) + 1,22 \cdot 10^3 dT \right) + n_{CO} \cdot \left(\int_{298}^{1173} Cp(CO) dT \right) \right] \\ & - \left[n_{FeO} \cdot \left(\int_{298}^{1173} Cp(FeO) dT \right) + n_C \cdot \left(\int_{298}^{1173} Cp(C) dT \right) \right] \end{aligned} \quad (5.7)$$

Uma vez conhecido o número de *kmoles* de FeO , a sua taxa de redução e o valor de ΔH_{298}^0 , é possível obter o valor de ΔH_{1173}^0 respeitante à redução daquele constituinte.

Por último, na 4ª etapa, procede-se ao cálculo da variação de entalpia do ferro entre 1173 K e a temperatura de vazamento previamente estipulada. De realçar que, para o cálculo desta parcela, foi adicionada à massa de ferro metálico dos HBIs o ferro resultante da redução do FeO anteriormente mencionada.

A expressão 5.8 permite assim calcular a variação de entalpia associada a esta etapa, em que T_f representa a temperatura de vazamento do aço. De realçar que nesta expressão foram contabilizados os calores latentes das transformações alotrópicas $Fe-\alpha \Leftrightarrow Fe-\gamma$, $Fe-\gamma \Leftrightarrow Fe-\delta$ e de fusão do ferro, tendo sido considerados os valores de 160, 200 e $3,29 \cdot 10^3 \text{ kcal/kmol}$ [23], respetivamente.

$$\Delta H = n_{Fe\ inicial+Fe\ reduzido} \cdot \left[\int_{1173}^{1183} Cp(Fe-\alpha) dT + 160 + \int_{1187}^{1664} Cp(Fe-\gamma) dT + 200 + \int_{1664}^{1809} Cp(Fe-\delta) dT + 3,29 \cdot 10^3 + \int_{1809}^{Tf} Cp(Fe\ liq.) dT \right] \quad (5.8)$$

Para além da variação de entalpia do sistema associada à adição dos HBIs, correspondente ao somatório de cada uma das parcelas calculadas para cada etapa, há que contabilizar ainda a incidência das adições de carbono e/ou de oxigénio de modo a obter uma relação (ponderal) $C/O_2=0,75$, bem como de cal de modo a obter uma escória com um índice de basicidade $CaO/SiO_2=2$.

Uma vez conhecido o somatório energético final realizaram-se cálculos de conversão de unidades e considerou-se um fator de eficiência energética de 1,25, valor esse baseado na experiência vivenciada na empresa.

Uma vez obtido o consumo específico real de energia e sendo já conhecida a potência média de trabalho do forno foi possível calcular o valor do caudal de alimentação de HBIs. Dividindo o valor do caudal pela potência de trabalho (MW) obteve-se o valor do fluxo. Estas operações podem ser resumidas na seguinte fórmula:

$$\text{caudal de alimentação de HBIs (kg/min/MW)} = \frac{\left(\frac{P_{disponível} (kWh/min)}{C_{específico} (kWh/t)} \right) \cdot 10^3}{P_{forno} (MW)} \quad (5.9)$$

em que $P_{disponível} (kWh/min)$ é a energia elétrica que o equipamento é capaz de fornecer ao sistema por unidade de tempo, $C_{específico} (kWh/t)$ é a o consumo específico de energia dos HBIs, $P_{forno} (MW)$ é a potencia média de trabalho do forno.

Uma vez desenvolvidos os cálculos acima demonstrados, e determinado o consumo específico de energia total relativo a um determinado lote de HBIs de composição química e grau de metalização conhecidos, foi possível acrescentar ao modelo já desenvolvido uma nova parcela de cálculo que tem como objetivo prever o consumo específico de energia total de uma determinada carga com mistura de sucatas ferrosas e HBIs. Este novo objetivo do modelo de cálculo permite também validar os resultados do mesmo colocando os mesmo em comparação face aos resultados da análise de registos de produção abordada no capítulo anterior do presente trabalho.

É importante tomar em consideração que tais previsões de consumos de energia apenas são possíveis se já for conhecido um determinado valor para o consumo específico de energia relativo a cargas unicamente compostas por sucata.

O cálculo relativo à previsão de consumo específico de energia total para uma determinada carga mista de sucata e HBIs é resumido na seguinte expressão:

$$\begin{aligned} \text{consumo específico de energia da carga (kWh/t)} &= \\ &= \frac{(A \cdot C \cdot \%_{\text{Suc. na carga}}) + (B \cdot C \cdot \%_{\text{HBIs na carga}})}{C} \end{aligned} \quad (5.10)$$

onde A representa o consumo específico de energia relativo ao lote de sucata (kWh/t; dado conhecido recorrendo a registos de produção de cargas compostas apenas por sucata e de características idênticas ou valor médio de consumo de energia de várias cargas com variados lotes de sucatas), B o consumo específico de energia do lote de HBIs (kWh/t) determinado pelo modelo de cálculo previamente desenvolvido), C a massa total da carga introduzida no forno (ton.).

5.1.3 Cálculos e resultados

A utilização da folha de cálculo desenvolvida permitiu determinar, de forma expedita, dados relativos ao impacto da incorporação de HBIs de dois lotes sobre o consumo de energia, bem como o caudal de carregamento reportado à unidade de potência média de trabalho do forno.

5.1.3.1 Lote A

A composição química dos HBIs do primeiro lote analisado, lote A, é apresentada na Tabela 14.

Tabela 14 - Composição química e grau de metalização dos HBIs do lote A.

%Grau metal.	%Fe _{total}	%C	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%CaO	%MgO
95,30	90,00	0,85	3,01	1,00	0,77	0,53

A análise química do lote foi realizada logo na receção do produto nas instalações fabris. Assim, estes valores incidem sobre um produto que não sofreu grande deterioração devido ao seu armazenamento em parque aberto. Por outro lado, devido ao facto deste lote ter chegado (e sido utilizado) no período do Verão, os HBIs não sofreram grande oxidação promovida pela água da chuva.

Para efeitos de cálculo, consideraram-se os seguintes valores:

- Massa de HBIs incorporados por carga (média): 25 toneladas;
- Temperatura de carregamento dos HBIs: 25°C;
- Temperatura de vazamento do aço: 1577°C;
- Taxa de redução do FeO: 90%;
- Fator de eficiência energética: 1,25;
- Potência média de trabalho: 85 MW.

Considerou-se ainda como indicador o índice de basicidade de trabalho $V=CaO/SiO_2=2$.

Os resultados dos cálculos desenvolvidos são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Consumo de energia associado ao carregamento de 25 ton. de HBIs do lote A.

<i>Aquecimento a 1173 K (kcal)</i>	<i>Varição de entalpia a 1173 K (kcal)</i>	<i>Aquecimento a 1850 K (kcal)</i>
4,38x10 ⁶	7,76x10 ⁵	4,40x10 ⁶

Para além de contabilizar as quatro etapas do processo previamente definidas calculou-se ainda a massa de *CaO* a incorporar de modo a atingir $V=2$. O valor obtido corresponde a aproximadamente 1505 kg, o que representa um consumo energético de 5,31x10⁵ kcal. Assim, o consumo energético total calculado é de 1,01x10⁷ kcal.

Na Tabela 16 podem ser consultados os resultados relativos ao cálculo do consumo de energia associado ao carregamento dos HBIs do lote A e de *CaO*, para acerto do índice de basicidade da escória, bem como do caudal de alimentação reportado à unidade de potência disponível.

Tabela 16 - Impacto do carregamento dos HBIs do lote A.

<i>Consumo de energia total (kWh)</i>	<i>Consumo específico de energia (kWh/t_{HBIs})</i>	<i>Caudal de alimentação de HBIs (kg/min/MW)</i>	<i>Duração da alimentação contínua de HBIs (min)</i>
11739,10	586,95	28,40	10,36

Tendo por base os dados apresentados na Tabela 17, relativos aos consumos específicos de energia associados ao carregamento de HBIs (valor calculado) e de sucata (histórico da empresa), bem como a percentagem de HBIs na carga, foi possível estimar o consumo específico de energia para uma carga mista (sucata + HBIs do lote A), tendo-se obtido o valor de 482,30 kWh/t.

Tabela 17 - Dados utilizados para estimar o consumo específico de energia para uma carga mista (sucata + HBIs do lote A) e resultado obtido.

<i>Consumo espec. en. total com HBIs (kWh/t)</i>	<i>Consumo espec. en. total com sucata (kWh/t)</i>	<i>%HBIs na carga</i>	<i>Consumo espec. en. total para carga mista (kWh/t)</i>
588,33	462,67	15,63	482,30

De acordo com a análise dos registos de produção (Capítulo 4), os consumos específicos de energia registados no período 1 (cargas de sucata + HBIs lote A) conduziram a um valor médio de 489,53 kWh/t, valor muito próximo do estimado.

5.1.3.2 Lote B

O lote B corresponde a HBIs cuja composição química (Tabela 18) só foi determinada ao fim de um período de armazenamento considerável, que ocorreu no período de Inverno, propício à deterioração do produto.

Tabela 18 - Grau de metalização e composição química dos HBIs do lote B.

<i>%Grau metal.</i>	<i>%Fe_{total}</i>	<i>%C</i>	<i>%SiO₂</i>	<i>%Al₂O₃</i>	<i>%CaO</i>	<i>%MgO</i>
71,00	86,00	0,73	3,04	1,05	0,66	0,48

Nos cálculos desenvolvidos para os HBIs deste lote foram adotados os anteriormente utilizados relativamente ao lote A, à exceção da temperatura de carregamento, que foi considerada de 17°C. Os resultados dos cálculos desenvolvidos são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Consumo de energia associado ao carregamento de 25 ton. de HBIs do lote B.

<i>Aquecimento a 1173 K (kcal)</i>	<i>Varição de entalpia a 1173 K (kcal)</i>	<i>Aquecimento a 1850 K (kcal)</i>
4,32x10 ⁶	4,58x10 ⁶	4,44x10 ⁶

Calculou-se ainda a massa de CaO a adicionar de modo a obter-se uma escória com um índice de basicidade $CaO/SiO_2=2$, tendo-se obtido o valor de 1520 kg, a que corresponde um consumo adicional de energia de $5,53 \times 10^5$ kcal. Assim, o consumo de energia total associado ao carregamento de 25 ton. de HBIs deste lote e de 1520 kg de CaO é de $1,39 \times 10^7$ kcal.

Na Tabela 20 podem ser consultados os resultados relativos ao cálculo do consumo de energia associado ao carregamento dos HBIs do lote B e de CaO, para acerto do índice de basicidade da escória, bem como do caudal de alimentação reportado à unidade de potência disponível.

Tabela 20 - Impacto do carregamento dos HBIs do lote B.

<i>Consumo de energia total (kWh)</i>	<i>Consumo específico de energia (kWh/t_{HBIs})</i>	<i>Caudal de alimentação de HBIs (kg/min/MW)</i>	<i>Duração da alimentação contínua de HBIs (min)</i>
16194,76	809,74	20,60	14,29

Os dados apresentados na Tabela 21, relativos aos consumos específicos de energia associados ao carregamento de HBIs (valor calculado) e de sucata (histórico da empresa), bem como a percentagem de HBIs na carga, permitiram estimar o consumo específico de energia para uma carga mista (sucata + HBIs do lote B), tendo-se obtido o valor de 510,22 kWh/t.

Tabela 21 - Dados utilizados para estimar o consumo específico de energia para uma carga mista (sucata + HBIs do lote B) e resultado obtido.

<i>Consumo espec. en. total com HBIs (kWh/t)</i>	<i>Consumo espec. en. total com sucata (kWh/t)</i>	<i>%HBIs na carga</i>	<i>Consumo espec. en. total para carga mista (kWh/t)</i>
809,74	462,67	13,69	510,22

De acordo com a análise dos registos de produção (Capítulo 4), os consumos específicos de energia registados no período 3 (cargas de sucata + HBIs lote B) conduziram a um valor médio de 519,33 kWh/t, valor próximo do estimado.

Os resultados obtidos levam-nos a considerar que o modelo de cálculo desenvolvido permite prever, com elevado grau de precisão, o consumo específico de energia total associado a uma carga mista de sucata e HBIs. A discrepância entre resultados, da ordem dos 1,5% (lote A) e 1,8% (lote B), poderá ser perfeitamente justificada pelas diferenças inevitáveis entre as condições reais de produção e as consideradas nos cálculos e ao fator de eficiência energética utilizado, cujo valor precisa de ser mais apurado a partir de um maior número de ensaios, em campanhas mais extensas.

5.1.4 Discussão de resultados

Na Tabela 22 pode-se observar o resumo de resultados obtidos para os lotes A e B na etapa anteriormente descrita.

Tabela 22 - Resumo de resultados relativos aos Lotes A e B.

Lote	Aquecimento/ arrefecimento a 298 K (kcal)	Aquecimento a 1173 K (kcal)	Varição entalpia a 1173 K (kcal)	Aquecimento a 1850 K (kcal)	Cons. espec. de en. (kWh/t HBI)	Caudal de alimentação de HBI (kg/min/MW)
A	0,00	4,38x10 ⁶	4,76x10 ⁵	4,40x10 ⁶	586,95	28,40
B	3,31x10 ⁴	4,32x10 ⁶	4,58x10 ⁶	4,44x10 ⁶	809,74	20,60

Conforme foi possível verificar, os cálculos demonstraram que à semelhança do previsto a partir da teoria, os resultados relativos ao lote B revelaram-se drasticamente menos favoráveis de um ponto de vista de eficiência energética do processo e de custos associados ao fornecimento de energia. O resultado final do consumo específico de energia dos briquetes do lote B revelam que estes necessitam de aproximadamente mais 38% de energia de modo a alcançarem as mesmas temperaturas que os briquetes do lote A. De modo a balancear os requisitos térmicos dos pré-reduzidos com a energia do sistema, o caudal calculado revela-se consideravelmente inferior para os briquetes do lote B. Assim, caso a massa de briquetes seja igual para ambas as situações, a duração da fase de carregamento de HBI será forçosamente mais longa no cenário estudado do lote B prejudicando índices do processo como a produtividade do mesmo.

Se observarmos os consumos de energia de cada uma das quatro fases distintas de aquecimento e excluindo a diferença de temperatura inicial da carga, verifica-se que a principal desigualdade ocorre na terceira, isto é, no cálculo relativo à variação de entalpia provocada pela ocorrência de reações de redução dos óxidos de ferro. De acordo com os dados utilizados, o teor de *FeO* nos briquetes de HBI do Lote B é muito superior face ao mesmo índice do Lote A, implicando assim que a energia gasta para promover as reações de redução deste composto seja naturalmente superior.

De acordo com os valores determinados que demonstram o consumo parcial relativo de cada constituinte químico do HBI constata-se que no caso do lote A, a parcela afeta ao ferro metálico é incomparavelmente superior, 77,48%, e o valor relativo ao FeO é de 10,15%, demonstrando uma predominância do ferro metálico no consumo de energia. Já nos resultados do lote B estes valores são aproximadamente iguais comprovando assim que a elevada presença de óxidos de ferro e consequente inferior metalização do produto pré-reduzido promovem em larga escala o aumento do consumo de energia. Comparando a energia extra requerida pela adição de cal no forno observa-se que os valores calculados para os lotes A e B são relativamente próximos uma vez que o principal fator influenciador desta adição se resume à riqueza de constituintes acidificantes da escória, mais precisamente o SiO_2 , os quais não estão sujeitos às condições físicas e de oxidação dos briquetes de HBI.

Os resultados obtidos nesta etapa do trabalho são ainda corroborantes com as conclusões da análise de registos de produção, previamente abordadas no capítulo 4, onde se verificou que uma grande maioria dos índices de produção analisados revelavam piores resultados num período de utilização de HBIs no qual os briquetes estiveram armazenados durante um período mais longo e em condições atmosféricas desfavoráveis à qualidade de composição química. Nessa análise é sobretudo notório que o consumo específico de energia das cargas era efetivamente superior, em 6,7%, face a um período de utilização de HBI no qual este produto não foi afetado em tão larga escala pelo armazenamento e condições envolventes.

6. CONCLUSÕES

6.1 Conclusões gerais

A produção de aço representa, a nível mundial, uma das principais áreas de negócio do séc. XXI. Existem unidades de produção espalhadas pelos vários continentes, apresentando-se a Ásia, e muito particularmente a China, como o maior produtor mundial de aço.

Nas últimas décadas, tem-se vindo a assistir a um aumento da utilização do forno elétrico a arco na produção de aço, sobretudo nos países mais industrializados, dada a sua versatilidade e a possibilidade de refundir os grandes volumes de sucatas ferrosas geradas, bem o seu impacte ambiental. Será de esperar que, num futuro não muito longínquo, a quota de produção de aço em aciaria elétrica venha a crescer, muito embora não se vislumbre o total desaparecimento das unidades siderúrgicas convencionais.

A utilização de pré-reduzidos de ferro como complemento ou alternativa às sucatas ferrosas é já uma realidade para uma grande parte das aciarias elétricas mundiais. Esta matéria-prima apresenta especificidades únicas bem como vantagens e inconvenientes relativamente à sua utilização, o que exige um estudo aprofundado por parte de cada unidade que utiliza ou venha a utilizar este produto.

De um modo geral, verifica-se que a utilização de HBIs implica, entre outros inconvenientes, um aumento do consumo de energia elétrica; no entanto, alguns autores contra-argumentam que o estudo aprofundado e detalhado do processo produtivo permite justificar as vantagens, em termos económicos e de qualidade do produto final, a incorporação destes produtos.

No âmbito desta dissertação foi efetuada uma análise pormenorizada dos registos de produção da aciaria da SN Maia (*Grupo Megasa*) relativos a duas campanhas em que foram incorporados HBIs nas cargas do forno. Os índices de produção selecionados foram comparados com os de uma campanha em que as cargas eram constituídas exclusivamente por sucata.

A análise comparativa dos índices de produção relativos a cada uma das campanhas que serviram de base para este estudo permitiu concluir que, entre outros inconvenientes, o carregamento de HBIs induz um decréscimo de produtividade devido essencialmente ao aumento da duração de cada ciclo de produção, e um aumento dos consumos específicos de energia elétrica e de adições. Para além disso, chegou-se à conclusão de que o grau de metalização dos HBIs é um parâmetro fulcral a ter em consideração no estudo da viabilidade económica da utilização de HBIs.

Procedeu-se ainda ao desenvolvimento de uma folha *Excel* que, de forma expedita, permite otimizar o caudal de alimentação dos HBIs no forno.

Finalmente, de referir que o modelo de cálculo desenvolvido permite estimar, com elevado grau de precisão, o consumo específico de energia quando se utilizam cargas mistas de sucata e HBIs e, conseqüentemente, permite ao utilizador prever e otimizar algumas características do processo produtivo.

6.2 Desenvolvimentos futuros

Em termos de trabalhos futuros, sugerem-se os seguintes tópicos que permitirão complementar o estudo realizado:

- Realização de um estudo mais aprofundado, nesta unidade fabril ou em qualquer outra do grupo, sobre campanhas de incorporação de HBIs mais extensas, de modo a poder avaliar de forma mais exaustiva o seu impacto em todo o processo produtivo;
- Desenvolvimento de estudos que permitam avaliar o efeito da utilização de HBIs com composições distintas, e diferentes proporções na carga, bem como do sistema de carregamento (contínuo ou descontínuo) e do seu pré-aquecimento;
- Desenvolvimento de um sistema de classificação qualitativa e quantitativa de sucatas que sirva de base para a realização de um estudo comparativo entre a incorporação de HBIs e a utilização de sucatas de diferentes qualidades;
- Realização de um estudo, idêntico ao efetuado no âmbito desta dissertação, que permita aquilatar mais aprofundadamente a influência do grau de metalização dos HBIs sobre os índices de produção e a temperatura dos gases nas câmaras de sedimentação do sistema de aspiração;
- Prosseguir com o desenvolvimento da folha de cálculo que permita melhorar ainda mais o grau de precisão dos valores estimados, com base num fator de eficiência energética determinado em campanhas mais prolongadas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] T. Rehren, T. Belgya e A. Jambon, “5,000 years old Egyptian iron beads made from hammered meteoritic iron,” vol. 40, nº 12, 2013.
- [2] D. Miller e N. Merwe, “Early Metal Working in Sub-Saharan Africa: A Review of Recent Research,” vol. 35, nº 1, 1994.
- [3] J. Spoerl, *A Brief History of Iron and Steel Production*, 1995.
- [4] D. Brooke, “The advent of the steel rail, 1857-1914,” *Journal of transport history*, vol. 7, 1986.
- [5] “Our History - Pioneering Research and Technology,” [Online]. Available: <http://www.crucibleservice.com/history>. [Acedido em 10 2016].
- [6] “Steel History From Iron Age to Electric Arc Furnaces,” [Online]. Available: <https://www.thebalance.com/steel-history-2340172>. [Acedido em 11 2016].
- [7] World Steel Association, “World Steel in Figures,” 2016.
- [8] F. Holy, *Scrap generation will never replace iron-ore and coking coal - steel major*. [Entrevista]. 27 07 2012.
- [9] Grupo Megasa, “Grupo Megasa,” [Online]. Available: <http://www.megasa.com/grupoMegasa.php>. [Acedido em 10 2016].
- [10] Arcelor Mittal, “Arcelor Mittal España acuerda la venta de su planta de productos largos en Zaragoza,” [Online]. Available: www.arcellormittal.com/news-and-media. [Acedido em 12 2016].
- [11] Grupo Megasa, “Resposta Pública AdC - Setor Portuário,” 2015.
- [12] J. Jones, “Electric Furnace Steelmaking,” em *Steelmaking and Refining*, 1998.
- [13] World Steel Association, “Electric Arc Furnace Course,” [Online]. Available: <https://steeluniversity.org/>. [Acedido em 10 2016].
- [14] EFR, *EU-27 Steel Scrap Specification*, 2007.
- [15] A. Hassan, “The Growth of Hot Briquetted Iron Production,” *Iron and Steel Today*, 2008.
- [16] M. Chen e B. Zhao, “Viscosity Measurements of SiO₂-“FeO”-CaO System in Equilibrium with Metallic Fe,” *Metallurgical and Materials Transactions*, vol. 45, nº 1, pp. 58-65, 2014.

- [17] M. Kirschen, K. Badr e H. Pfeifer, “Influence of direct reduced iron on the energy balance of the electric arc furnace in steel industry,” *Energy*, vol. 36, nº 10, p. 6146-6155, 2010.
- [18] World Steel Association, “Thermodynamics and Kinetics Course,” [Online]. [Acedido em 10 2016].
- [19] G. Dressel, “Use of DRI in EAFs,” 1998.
- [20] S. H. Anderson, “Educated use of DRI/HBI improves EAF energy efficiency and yield and downstream operating results,” em *7th European Electric Steelmaking Conference & Expo*, Venice, 2002.
- [21] B. Bowman e S. Allamedine, “Particularities of melting DRI in AC and DC furnaces,” em *European Electric Steelmaking Conference*, Cracóvia, 2008.
- [22] B. Abolpour e M. M. Afsahi, “Reduction kinetics of magnetite concentrate particles by carbon monoxide,” *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, pp. 1-11, 2016.
- [23] O. Kubaschewski e C. B. Alcock, *Metallurgical thermochemistry*, Oxford: Pergamon Press, 1979.
- [24] B. Stoughton, *The metallurgy of iron and steel*, 1873.
- [25] S. R. Summerfelt, “Sacrificial oxygen sources to prevent reduction of oxygen containing materials”. Estados Unidos da América Patente US5909043 A, 1 Junho 1999.

ANEXOS

Anexo A - Forno elétrico de Paul Hérout

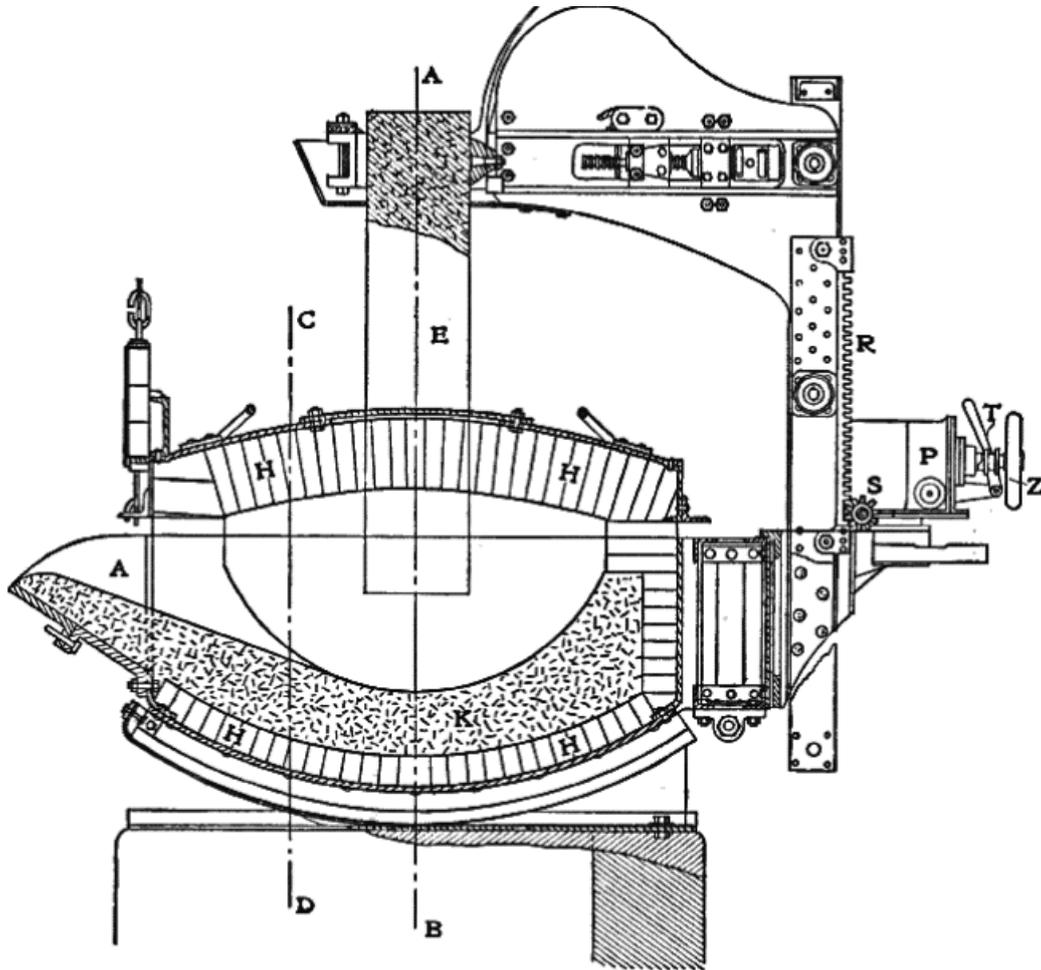


Figura A.1 - Plano do forno elétrico de Paul Hérout [24].

Anexo B - Classificação de sucatas (EFR)

Tabela B.1 -Classificação de sucatas ferrosas segundo o documento EU-27 *Steel Scrap Specification* (EFR). Tabela adaptada do original [14].

<i>Categoria</i>	<i>Especificação</i>	<i>Descrição</i>	<i>Dimensões</i>	<i>Densidade</i>
Sucata velha	E3	Sucatas de componentes obsoletos de elevada espessura. Podem incluir tubagens e componentes ocios. Exclui sucatas de automóveis ligeiros.	<u>Espessura:</u> >6 mm <1,5x0,5x0,5 m	>0,6
	E1	Sucatas de componentes obsoletos de reduzida espessura. Podem incluir tubagens e componentes ocios. Pode incluir alguns componentes de automóveis ligeiros.	<u>Espessura:</u> <6 mm <1,5x0,5x0,5 m	>0,5
Sucata nova	E2	Sucatas de componentes novos de elevada espessura. Isenta de revestimentos, cobre, latão e chumbo.	<u>Espessura:</u> >3 mm <1,5x0,5x0,5 m	>0,6
	E8	Sucatas de componentes novos de reduzida espessura. Isenta de revestimentos, cobre, latão e chumbo.	<u>Espessura:</u> <3 mm <1,5x0,5x0,5 m	>0,4
	E6	Sucatas de componentes novos de reduzida espessura, compactadas de modo a permitir carregamento direto. Isenta de revestimentos, cobre, latão e chumbo.	-	>1
Sucata fragmentada	E40	Sucata ferrosa obsoleta triturada até dimensões máximas de 200 mm. Preparada para permitir carregamento direto. Isenta de revestimentos, cobre, latão e chumbo.	-	>0,9
Limalhas	E5H	Lotes homogéneos de limalhas de aço. Preparação para carregamento direto. Cargas isentas de metais não-ferrosos, produtos orgânicos, pós, produtos químicos e outros contaminantes.	-	-

	E5M	Lotes heterogêneos de limalhas de aço. Preparação para carregamento direto. Cargas isentas de metais não-ferrosos, produtos orgânicos, pós, produtos químicos e outros contaminantes.	-	-
Sucata com elevado teor de residuais	EHRB	Sucatas obsoletas e novas, essencialmente aços de construção, com elevado teor de elementos residuais. Preparação para carregamento direto.	Máx. 1,5x0,5x0,5 m	>0,5
	EHRM	Sucatas obsoletas e novas provenientes do desmantelamento de componentes mecânicos. Pode incluir componentes em ferro fundido. Preparação para carregamento direto.	Máx. 1,5x0,5x0,5 m	>0,6
Sucata fragmentada de incineradores	E46	Sucata fragmentada proveniente de incineradores, separação magnética, com dimensões máximas de 200 mm. Pode conter vestígios de outras ligas metálicas como o latão. Preparação para carregamento direto.	-	>0,8

Anexo C

Anexo C.1 - Energia térmica das reações de oxidação.

Tabela C.1 - Variação de entalpia de algumas reações de oxidação, reportada à massa do elemento oxidado bem como ao volume de oxigénio insuflado [17].

<i>Reação</i>	<i>kWh/kg elemento oxidado</i>	<i>kWh/m³ O₂</i>
$Si + O_2 \leftrightarrow SiO_2$	8,94	11,2
$Mn + \frac{1}{2}O_2 \leftrightarrow MnO$	1,93	9,48
$2Cr + \frac{3}{2}O_2 \leftrightarrow Cr_2O_3$	3,05	9,42
$2Fe + \frac{3}{2}O_2 \leftrightarrow Fe_2O_3$	2,05	6,80
$Fe + \frac{1}{2}O_2 \leftrightarrow FeO$	1,32	6,58
$C + \frac{1}{2}O_2 \leftrightarrow CO$	2,55	2,73
$2Al + \frac{3}{2}O_2 \leftrightarrow Al_2O_3$	5,29	13,84
$Mo + O_2 \leftrightarrow MoO_2$	1,70	7,29
$2P + \frac{5}{2}O_2 \leftrightarrow P_2O_5$	5,54	8,58
$C + O_2 \leftrightarrow CO_2$	9,10	4,88
$CO + \frac{1}{2}O_2 \leftrightarrow CO_2$	-	7,01
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \leftrightarrow H_2O$	-	5,99

Anexo C.2 - Furo de vazamento do furo EBT

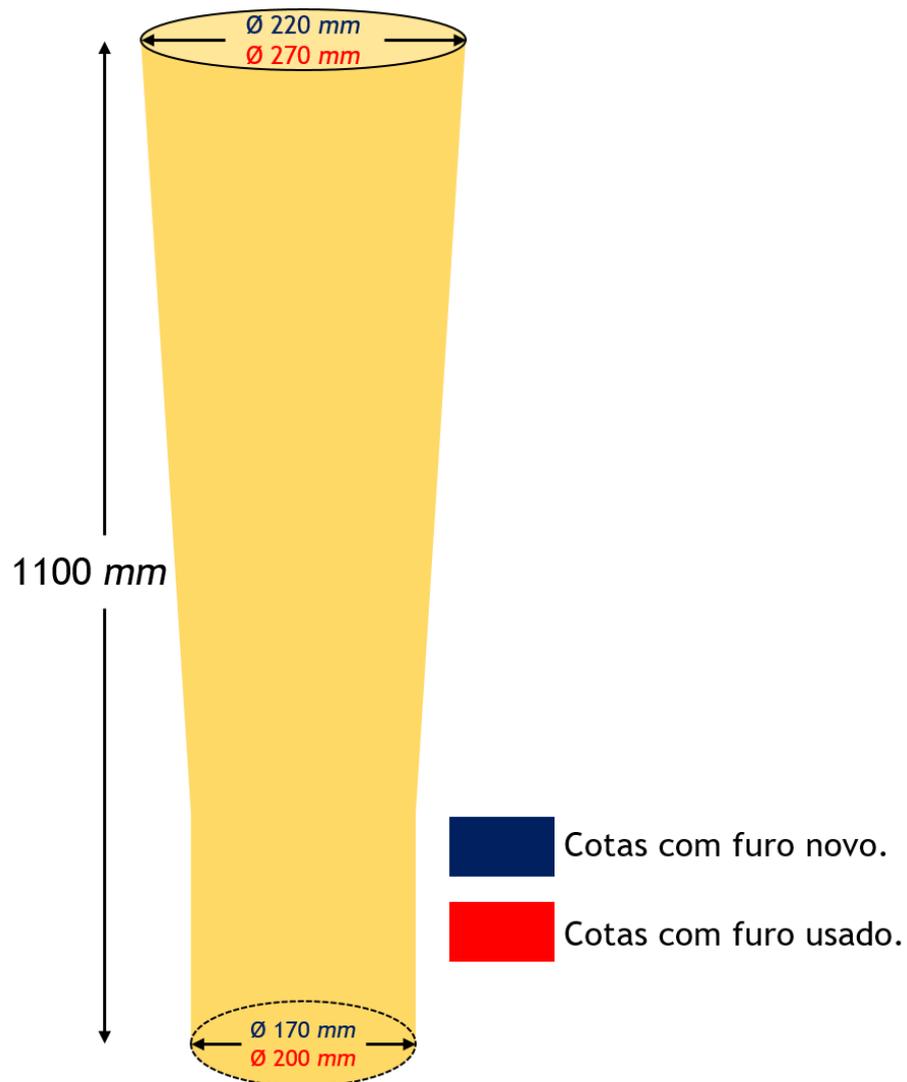


Figura C.1 - Esquema representativo e respetivas cotas do furo de vazamento do forno elétrico a arco da SN Maia.

Anexo D - Diagrama de Ellingham

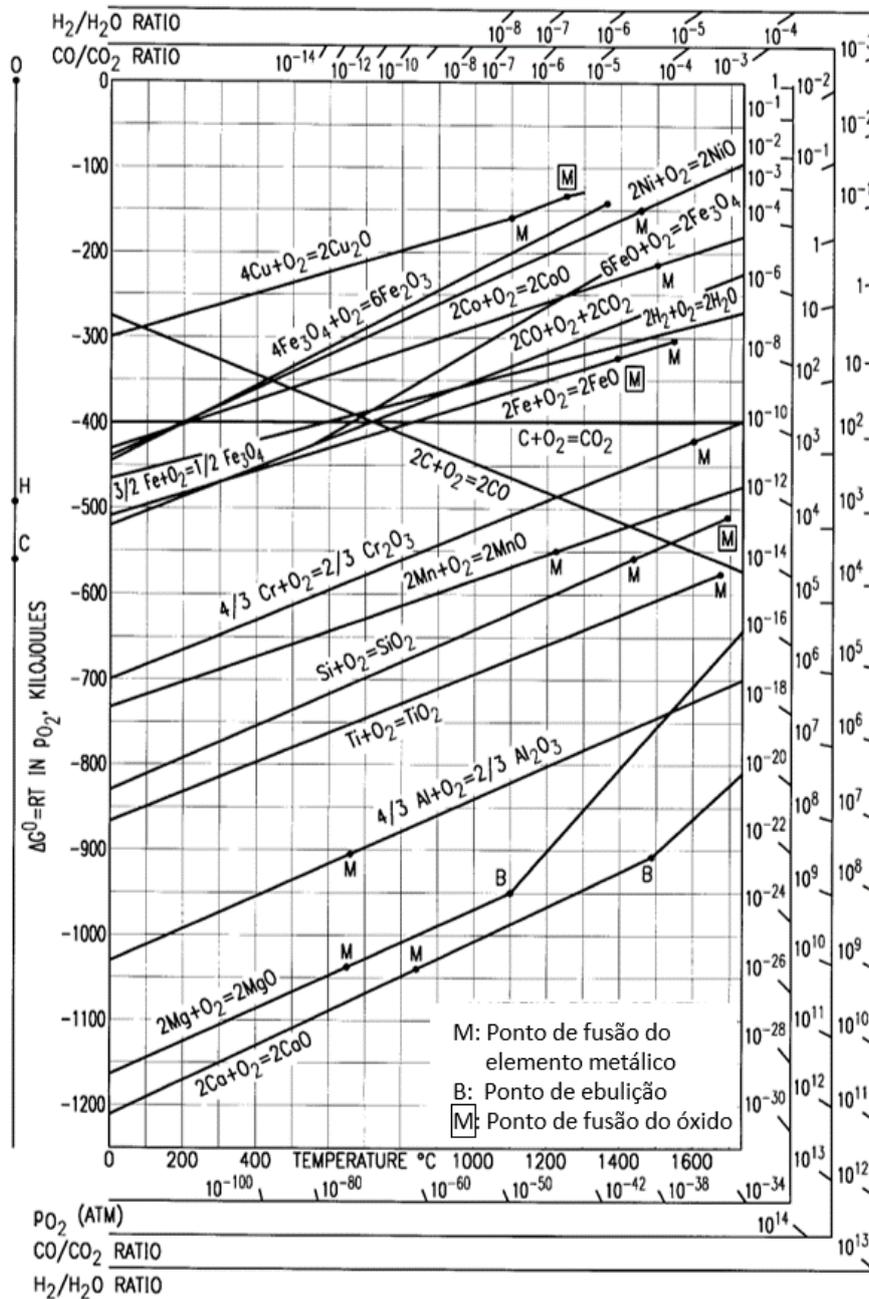


Figura D.1 - Diagrama de Ellingham. Figura adaptada a partir do original [25].

Anexo E

Anexo E.1

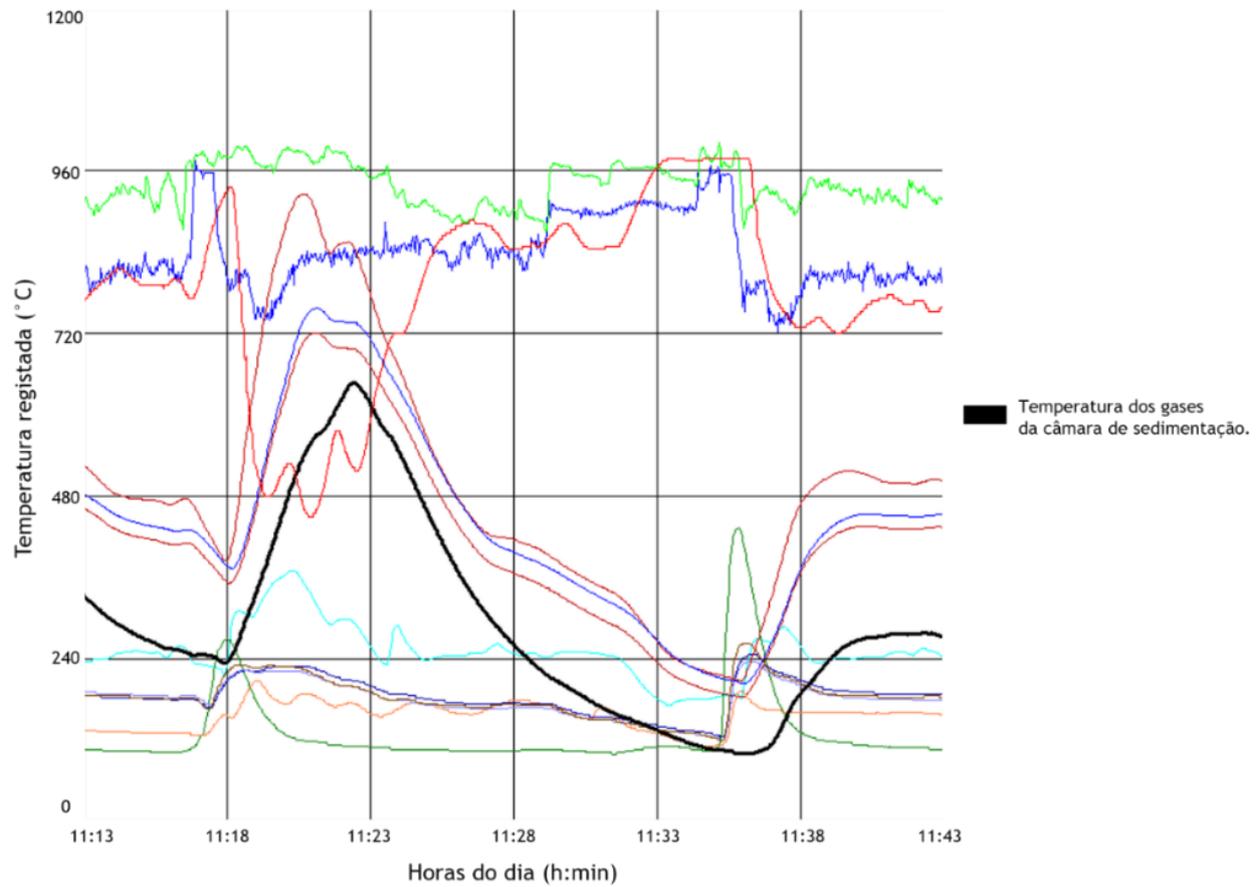


Figura E.1 - Registo de temperatura dos gases de exaustão do forno relativo a um período em que não foram carregados HBIs.

Nota: as linhas das mais variadas tonalidades, à exceção a linha de cor preta, não são relevantes para a discussão do tema em questão.

Anexo E.2

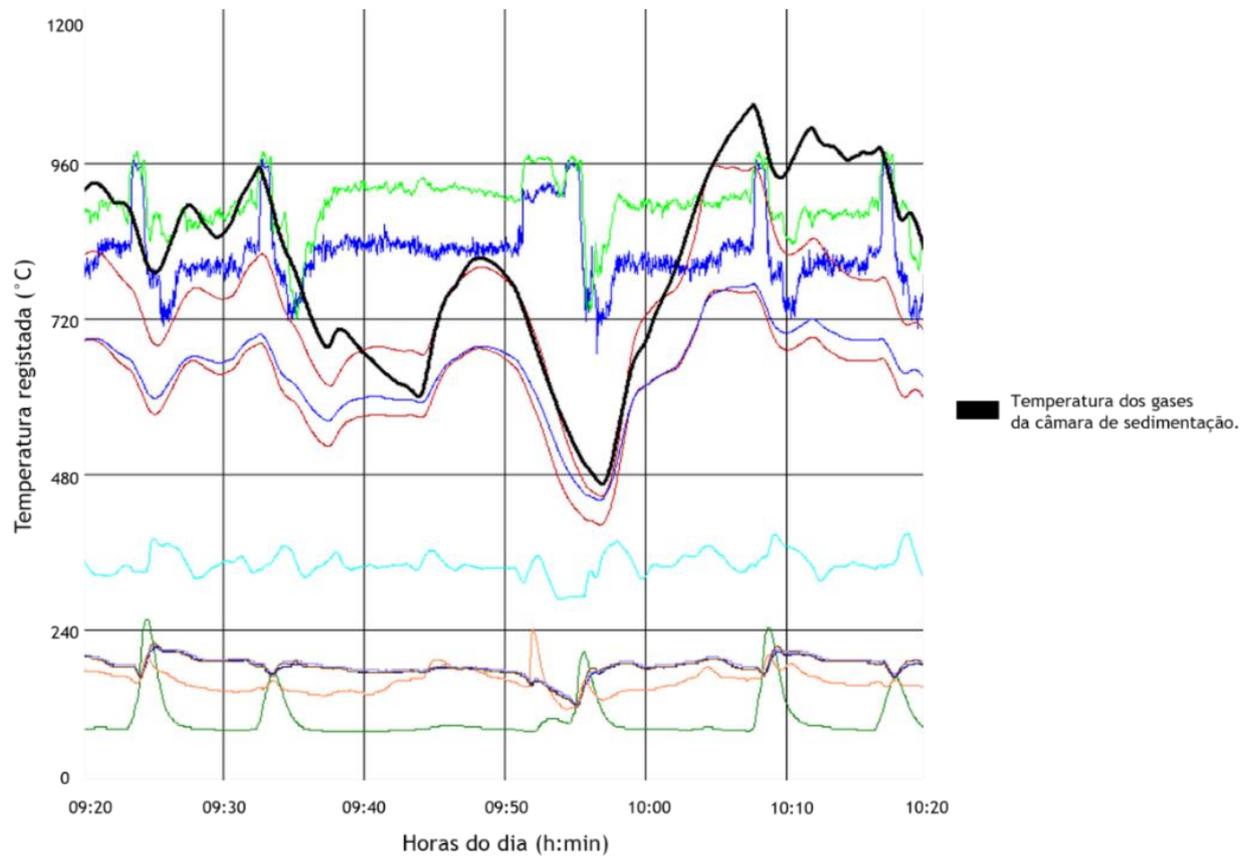


Figura E.2 - Registo de temperatura dos gases de exaustão do forno relativo a um período em que foram carregados HBIs.

Nota: as linhas das mais variadas tonalidades, à exceção a linha de cor preta, não são relevantes para a discussão do tema em questão.

Anexo F

No capítulo 5.1.2, é apresentado, de forma mais detalhada, o desenvolvimento dos cálculos relativamente ao constituinte *Fe*; expõem-se de seguida os restantes cálculos que incorporam a folha *Excel* desenvolvida.

Anexo F.1 - Fluxograma do modelo de cálculo

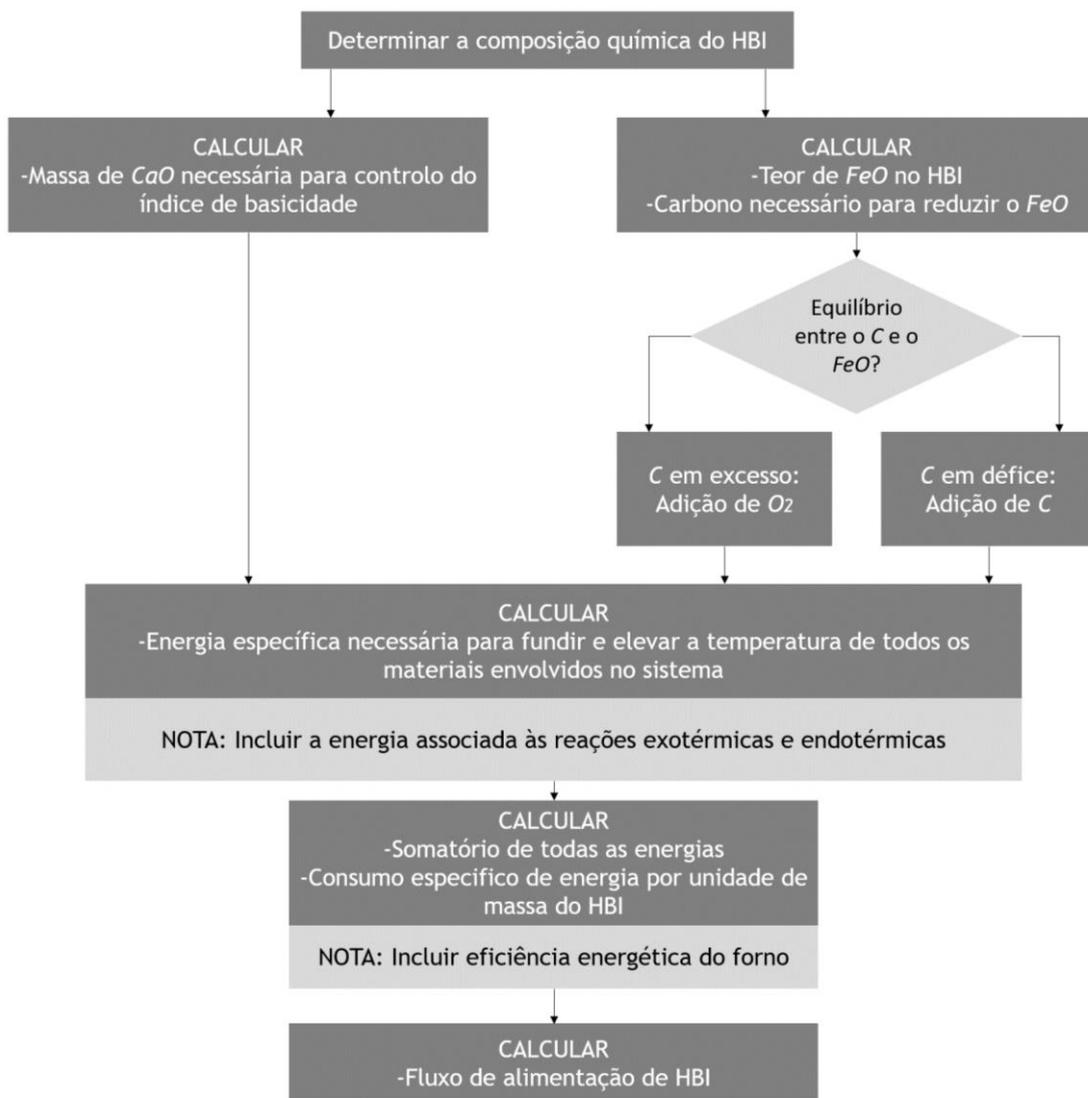


Figura F.1 - Fluxograma do modelo de cálculo do fluxo de HBIs. Figura adaptada a partir do original [21].

Anexo F.2 - Variação de entalpia associada ao FeO

No desenvolvimento dos cálculos, foram utilizadas as seguintes expressões para a capacidade calorífica do FeO [23]:

$$C_p (FeO) = 12,38 + 1,62 \cdot 10^{-3} \cdot T - 0,38 \cdot 10^5 \cdot T^{-2} \text{ (kcal/}^\circ\text{kmol)} \quad (\text{F.1})$$

$$C_p (FeO \text{ líq.}) = 16,30 \text{ (kcal/}^\circ\text{kmol)} \quad (\text{F.2})$$

- 1ª Etapa:

$$\Delta H = n \cdot \int_{T_i}^{298} C_p (FeO) dT \Leftrightarrow \Delta H = n \cdot \left[0,001 \cdot T^2 + 11,66 \cdot T + \frac{67000}{T} \right]_{T_i}^{298} \quad (\text{F.3})$$

- 2ª Etapa:

$$\Delta H = n \cdot \int_{298}^{1173} C_p (FeO) dT \Leftrightarrow \Delta H = n \cdot \left[0,001 \cdot T^2 + 11,66 \cdot T + \frac{67000}{T} \right]_{298}^{1173} \quad (\text{F.4})$$

- 3ª Etapa:

Nota: esta parcela é apresentada detalhadamente capítulo 5.1.2.

- 4ª Etapa:

Nota: é necessário ter em consideração a fusão do FeO, o que implica uma mudança da expressão do $C_p (FeO)$ e a adição do calor latente de fusão (L_f) daquele composto. A variação de entalpia nesta etapa corresponderá ao somatório das expressões F.5 e F.6.

Para este cálculo, foi ainda necessário contabilizar a massa de FeO que, na 3ª etapa, foi reduzido a Fe metálico, e que assim não foi tida em consideração para o cálculo da variação de entalpia para temperaturas superiores a 1173 K.

Estado sólido:

$$\Delta H = n \cdot \int_{1173}^{1651} C_p (FeO) dT \Leftrightarrow \Delta H = n \cdot \left[0,001 \cdot T^2 + 11,66 \cdot T + \frac{67000}{T} \right]_{1173}^{1651} \quad (\text{F.5})$$

Estado líquido:

$$\Delta H = n \cdot \int_{1651}^{T_f} C_p (FeO \text{ líq.}) dT + L_f \Leftrightarrow \Delta H = n \cdot [16,3 \cdot T]_{1651}^{T_f} + 7400 \quad (\text{F.6})$$

com L_f , calor latente de fusão do FeO, a assumir o valor de 7400 kcal/kmol, à temperatura de 1651 K [23].

Anexo F.3 - Variação de entalpia associada ao C

No desenvolvimento dos cálculos, foram utilizadas as seguintes expressões para a capacidade calorífica do C [23]:

$$\begin{aligned} C_p (C \text{ grafite A}) &= \\ &= 0,026 + 9,307 \cdot 10^{-3} \cdot T - 0,354 \cdot 10^5 \cdot T^{-2} - 4,155 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \text{ (kcal/}^\circ\text{kmol)} \end{aligned} \quad (\text{F.7})$$

$$\begin{aligned} C_p (C \text{ grafite B}) &= \\ &= 5,841 + 0,104 \cdot 10^{-3} \cdot T - 7,559 \cdot 10^5 \cdot T^{-2} \text{ (kcal/}^\circ\text{kmol)} \end{aligned} \quad (\text{F.8})$$

- 1ª Etapa:

$$\begin{aligned} \Delta H &= n \cdot \int_{T_i}^{298} C_p (C \text{ grafite A}) dT \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \Delta H &= n \cdot \left[-0,0000014 \cdot T^3 + 0,0047 \cdot T^2 + 0,026 \cdot T + \frac{35400}{T} \right]_{T_i}^{298} \end{aligned} \quad (\text{F.9})$$

- 2ª Etapa:

Nota: embora o carbono não sofra qualquer transformação alotrópica, são utilizadas duas expressões para a sua capacidade calorífica: uma válida na gama de temperaturas 298-1100 K, e a outra para a gama 1100-4000 K.

$$\begin{aligned} \Delta H &= n \cdot \int_{298}^{1100} C_p (C \text{ grafite A}) dT \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \Delta H &= n \cdot \left[-0,0000014 \cdot T^3 + 0,0047 \cdot T^2 + 0,026 \cdot T + \frac{35400}{T} \right]_{298}^{1100} \end{aligned} \quad (\text{F.10})$$

$$\begin{aligned} \Delta H &= n \cdot \int_{1100}^{1173} C_p (C \text{ grafite B}) dT \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \Delta H &= n \cdot \left[-0,000052 \cdot T^2 + 5,841 \cdot T + 0,026 \cdot T + \frac{755900}{T} \right]_{1100}^{1173} \end{aligned} \quad (\text{F.11})$$

- 3ª Etapa:

Nota: esta parcela é apresentada detalhadamente no capítulo 5.1.2.

- 4ª Etapa:

Nota: foi contabilizada a massa de C que, nesta etapa, reagiu com o FeO, formando CO, e que assim não foi tida em consideração para o cálculo da variação de entalpia para temperaturas superiores a 1173 K.

$$\Delta H = n. \int_{1173}^{Tf} Cp (C \text{ grafite } B) dT \Leftrightarrow \quad (F.12)$$

$$\Leftrightarrow \Delta H = n. \left[-0,000052. T^2 + 5,841. T + 0,026. T + \frac{755900}{T} \right]_{1173}^{Tf}$$

Anexo F.4 - Variação de entalpia associada à SiO₂

No desenvolvimento dos cálculos, foi utilizada a seguinte expressão para a capacidade calorífica da SiO₂ [23]:

$$Cp (SiO_2) = 13,4 + 3,68. 10^{-3}. T \text{ (kcal/ } ^\circ\text{kmol)} \quad (F.13)$$

Nota: a utilização desta expressão simplifica os cálculos já que dispensa a inclusão dos calores latentes de transformação associados às transformações alotrópicas deste constituinte.

- 1ª Etapa:

$$\Delta H = n. \int_{Ti}^{298} Cp (SiO_2) dT \Leftrightarrow \Delta H = n. [-0,00184. T^2 + 13,4. T]_{Ti}^{298} \quad (F.14)$$

- 2ª Etapa:

$$\Delta H = n. \int_{298}^{1173} Cp (SiO_2) dT \Leftrightarrow \Delta H = n. [-0,00184. T^2 + 13,4. T]_{298}^{1173} \quad (F.15)$$

- 3ª Etapa:

Nota: valor nulo pois a SiO₂ não tem qualquer envolvimento na reação em questão.

- 4ª Etapa:

$$\Delta H = n. \int_{1173}^{Tf} Cp (SiO_2) dT \Leftrightarrow \Delta H = n. [-0,00184. T^2 + 13,4. T]_{1173}^{Tf} \quad (F.16)$$

Anexo F.5 - Variação de entalpia associada ao CaO

No desenvolvimento dos cálculos, foi utilizada a seguinte expressão para a capacidade calorífica do CaO [23]:

$$C_p (\text{CaO}) = 11,86 + 1,08 \cdot 10^{-3} \cdot T \text{ (kcal/}^\circ\text{kmol)} \quad (\text{F.17})$$

- 1ª Etapa:

$$\Delta H = n \cdot \int_{T_i}^{298} C_p (\text{CaO}) \, dT \Leftrightarrow \Delta H = n \cdot \left[-0,00054 \cdot T^2 + 11,86 \cdot T + \frac{166000}{T} \right]_{T_i}^{298} \quad (\text{F.18})$$

- 2ª Etapa:

$$\Delta H = n \cdot \int_{298}^{1173} C_p (\text{CaO}) \, dT \Leftrightarrow \Delta H = n \cdot \left[-0,00054 \cdot T^2 + 11,86 \cdot T + \frac{166000}{T} \right]_{298}^{1173} \quad (\text{F.19})$$

- 3ª Etapa:

Nota: valor nulo pois o CaO não tem qualquer envolvimento na reação em questão.

- 4ª Etapa:

$$\Delta H = n \cdot \int_{1173}^{T_f} C_p (\text{CaO}) \, dT \Leftrightarrow \Delta H = n \cdot \left[-0,00054 \cdot T^2 + 11,86 \cdot T + \frac{166000}{T} \right]_{1173}^{T_f} \quad (\text{F.20})$$

Anexo F.6 - Variação de entalpia associada à Al_2O_3

No desenvolvimento dos cálculos, foi utilizada a seguinte expressão para a capacidade calorífica da Al_2O_3 [23]:

$$C_p (\text{Al}_2\text{O}_3) = 25,48 + 4,25 \cdot 10^{-3} \cdot T - 6,82 \cdot 10^5 \cdot T^{-2} \text{ (kcal/}^\circ\text{kmol)} \quad (\text{F.21})$$

- 1ª Etapa:

$$\Delta H = n \cdot \int_{T_i}^{298} C_p (\text{Al}_2\text{O}_3) \, dT \Leftrightarrow \Delta H = n \cdot \left[-0,002125 \cdot T^2 + 25,48 \cdot T + \frac{682000}{T} \right]_{T_i}^{298} \quad (\text{F.22})$$

- 2ª Etapa:

$$\Delta H = n. \int_{298}^{1173} C_p (Al_2O_3) dT \Leftrightarrow \quad (F.23)$$

$$\Leftrightarrow \Delta H = n. \left[-0,002125. T^2 + 25,48. T + \frac{682000}{T} \right]_{298}^{1173}$$

- 3ª Etapa:

Nota: valor nulo pois a Al_2O_3 não tem qualquer envolvimento na reação em questão.

- 4ª Etapa:

$$\Delta H = n. \int_{1173}^{Tf} C_p (Al_2O_3) dT \Leftrightarrow \Delta H = n. \left[-0,002125. T^2 + 25,48. T + \frac{682000}{T} \right]_{1173}^{Tf} \quad (F.24)$$

Anexo F.7 - Variação de entalpia associada ao MgO

No desenvolvimento dos cálculos, foi utilizada a seguinte expressão para a capacidade calorífica do MgO [23]:

$$C_p (MgO) = 11,71 + 0,75. 10^{-3}. T - 2,80. 10^5. T^{-2} \text{ (kcal/ } ^\circ\text{kmol)} \quad (F.25)$$

- 1ª Etapa:

$$\Delta H = n. \int_{Ti}^{298} C_p (MgO) dT \Leftrightarrow \Delta H = n. \left[-0,000375. T^2 + 11,71. T + \frac{280000}{T} \right]_{Ti}^{298} \quad (F.26)$$

- 2ª Etapa:

$$\Delta H = n. \int_{298}^{1173} C_p (MgO) dT \Leftrightarrow \Delta H = n. \left[-0,000375. T^2 + 11,71. T + \frac{280000}{T} \right]_{298}^{1173} \quad (F.27)$$

- 3ª Etapa:

Nota: valor nulo pois o MgO não tem qualquer envolvimento na reação em questão.

- 4ª Etapa:

$$\Delta H = n. \int_{1173}^{Tf} Cp (MgO) dT \Leftrightarrow \Delta H = n. \left[-0,000375. T^2 + 11,71. T + \frac{280000}{T} \right]_{1173}^{Tf} \quad (F.28)$$

Anexo F.8 - Variação de entalpia associada ao CO

No desenvolvimento dos cálculos, foi utilizada a seguinte expressão para a capacidade calorífica do CO [23]:

$$Cp (CO) = 6,79 + 0,98.10^{-3}.T - 0,11.10^5.T^{-2} \text{ (kcal/}^\circ\text{kmol)} \quad (F.29)$$

- 4ª Etapa:

$$\Delta H = n. \int_{1173}^{Tf} Cp (CO) dT \Leftrightarrow \Delta H = n. \left[0,00049. T^2 + 6,79. T + \frac{11000}{T} \right]_{1173}^{Tf} \quad (F.30)$$

Nota: nos cálculos associados ao CO, só foi contabilizado o volume resultante da redução parcial do FeO, a 1173K.

Anexo F.9 - Cálculo das adições de O₂ e/ou de C

Nota: para a realização do cálculo das adições de O₂ e/ou de C considerou-se como objetivo a obtenção de uma relação (ponderal) C/O₂=0,75. Uma vez conhecidas as massas de FeO e de C dos HBIs, determina-se a massa de O₂ associado ao óxido de ferro (FeO) de modo a poder calcular o fator de correção (f) que permita atingir o valor C/O₂=0,75.

$$\frac{m_C}{m_{O_2}} \cdot f = 0,75 \quad (F.31)$$

$$\text{massa de C a adicionar (kg)} = m_{C \text{ inicial}} \cdot f - m_{C \text{ inicial}} \quad (F.32)$$

$$\text{volume de O}_2 \text{ a adicionar (m}^3\text{)} = \frac{\frac{m_{O_2}}{f} - m_{O_2 \text{ inicial}}}{M_{O_2}} \cdot 22,41 \quad (F.33)$$

Nota: uma vez concluído o cálculo, obter-se-á um valor positivo e outro negativo. Como é óbvio, será considerado o valor de adição positivo uma vez que não se procede à remoção de nenhum dos elementos do sistema.

Anexo F.10 - Cálculo das adições de CaO

Nota: para a realização do cálculo das adições de CaO considerou-se como objetivo a obtenção de um índice de basicidade $V = \%CaO / \%SiO_2 = 2$. Uma vez conhecidos os teores de CaO e de SiO_2 nos HBIs, determina-se a massa de CaO a adicionar que permita obter uma escória com um índice de basicidade $V=2$.

$$\frac{\%CaO}{\%SiO_2} \cdot f = 2 \quad (F.34)$$

$$\% CaO \text{ objetivo} = \% CaO \text{ inicial} \cdot f \quad (F.35)$$

$$\text{massa de CaO a adicionar (kg)} = m_{CaO \text{ inicial}} \cdot f - m_{CaO \text{ inicial}} \quad (F.36)$$

Nota: após a determinação das adições de CaO, calcula-se a variação de entalpia associada a essas adições nos mesmos moldes que os apresentados no Anexo F.5.

Anexo F.11 - Capturas de ecrã da folha de cálculo

Nesta secção são expostas algumas capturas de ecrã relativas à folha de cálculo desenvolvida em Excel, que procuram exemplificar a sua utilização.

CÁLCULO CONSUMO ENERGIA HBI

NOTA: Apenas editar células amarelas.

HBI Carregado (kg)	25000
Grau Metal. (%)	71%

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	%	m (kg)
Fe TOTAL	86,00%	21500
Fe METAL	61,06%	15265
C	0,73%	182,5
SiO ₂	3,04%	760
CaO	0,66%	165
Al ₂ O ₃	1,05%	262,5
MgO	0,48%	120
SUB-TOTAL		99,09%
FeO	32,07%	8016

Temperatura de Carregamento (K):	290
Temperatura Final (K):	1850
Temperatura de Redução FeO (K):	1173
Taxa de redução do FeO (%):	90,00%

Figura F.2 - Captura de ecrã da folha de cálculo desenvolvida para estimar o caudal de alimentação de HBIs: células de início de utilização da folha onde são inseridos vários dados pelo utilizador (apenas nas células sombreadas a amarelo). Os valores apresentados são meramente ilustrativos.

1. Aquecimento/Arrefecimento a 298K:			
	int Cp (Kcal/Kmol)	Kmol	Total Parcial (kcal)
Fe	74,45	272,59	20294,50
FeO	91,78	111,34	10218,91
C	15,95	15,21	242,54
SiO ₂	115,86	12,67	1467,50
CaO	82,05	2,95	241,76
Al ₂ O ₃	150,70	2,57	387,84
MgO	69,52	3,00	208,57
TOTAL			33061,63

Figura F.3 - Captura de ecrã da folha de cálculo desenvolvida para estimar o caudal de alimentação de HBIs: células de cálculo para reportar a temperatura de carregamento ao nível entálpico de 298 K. Os valores apresentados são meramente ilustrativos.

2. Aquecimento a 1173K:			
	int Cp (Kcal/Kmol)	Kmol	Total Parcial (kcal)
Fe	9932,49	272,59	2707489,30
FeO	11321,91	111,34	1260573,52
C	3737,76	15,21	56845,11
SiO ₂	14093,31	12,67	178515,26
CaO	10657,02	2,95	31400,14
Al ₂ O ₃	23322,97	2,57	60022,34
MgO	10028,03	3,00	30084,09
TOTAL			4324929,75

Figura F.4 - Captura de ecrã da folha de cálculo desenvolvida para estimar o caudal de alimentação de HBIs: células de cálculo da variação de entalpia global entre 298 K e 1173 K (1ª etapa). Os valores apresentados são meramente ilustrativos.

3. Variação entalpia a 1173K:			
	int Cp (Kcal/Kmol)	Kmol	Total Parcial (kcal)
Fe	9932,49	100,21	995288,32
CO	6544,41	100,21	655784,56
FeO	11321,91	100,21	1134516,16
C	3737,76	100,21	374543,64
TOTAL (FeO+C - Fe+CO)			891100,35
$\Delta H^{\circ}1173 = \Delta H^{\circ}298 + \text{TOTAL}$			
$\Delta H^{\circ}298 = 36,78$			36780
$\Delta H^{\circ}1173$			4576653,39

Figura F.5 - Captura de ecrã da folha de cálculo desenvolvida para estimar o caudal de alimentação de HBIs: células de cálculo da variação de entalpia associada à reação de redução do FeO (2ª etapa). Os valores apresentados são meramente ilustrativos.

4. Aquecimento entre a Temperatura de Redução do FeO e a Temperatura Final:			
	int Cp (Kcal/Kmol)	Kmol	Total Parcial (kcal)
Fe α	148,57	372,79	55387,02
Fe γ	4323,98	372,79	1611955,19
Fe δ	1857,73	372,79	692550,73
Fe Liq.	3700,00	372,79	1379340,18
FeO	6906,81	11,13	76899,98
FeO Liq.	10643,70	11,13	118506,20
SiO2	12837,49	12,67	162608,21
Al2O3	21386,16	2,57	55037,90
CaO	9082,58	2,95	26761,17
MgO	8607,78	3,00	25823,34
C	3824,96	-85,00	-325109,98
CO	5596,22	100,21	560771,03
TOTAL			4440530,98

Figura F.6 - Captura de ecrã da folha de cálculo desenvolvida para estimar o caudal de alimentação de HBIs: células de cálculo da variação de entalpia global entre 1173 K e a temperatura de vazamento previamente estipulada (3ª etapa). Os valores apresentados são meramente ilustrativos.

CALOR CONSUMIDO TOTAL PELO HBI (kcal)	13913192,02	kWh/min DISPONIVEL
Consumo total calculado (J)	58254534981,63	1416,666667
Consumo total calculado (kwh)	16194,76	
Consumo calculado por tonelada de HBI (kwh/ton)	647,79	DISPONIVEL / CONSUMO TON
Fator de eficiência energética	1,25	1,749537015
Consumo real (kwh/ton)	809,74	
Potência (MW)	85	CAUDAL (kg/min)
		1749,537015
FLUXO HBI (kg/min/MW)		20,6
tempo (min) 14,29		

Figura F.7 - Captura de ecrã da folha de cálculo desenvolvida para estimar o caudal de alimentação de HBIs: células de introdução do fator de eficiência energética, e da potência do forno e de apresentação de resultados. Os valores apresentados são meramente ilustrativos.