

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Departamento de Metalurgia

ESTUDO DO REAPROVEITAMENTO DE AÇO E ESCÓRIA DE AÇOS ESPECIAIS
REMANESCENTES DA PANELA SIDERÚRGICA NO FORNO ELÉTRICO A ARCO

Lucas Ribeiro Pereira

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Wagner Viana Bielefeldt

Porto Alegre

2018

Dedico este trabalho aos meus familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

A Gerdau Charquedas pela estrutura fornecida;

A toda equipe da aciaria da Gerdau Charquedas pela oportunidade, confiança e ensinamentos transmitidos durante meu período de estágio;

Ao meu orientador Prof. Dr. Wagner Viana Bielefeldt pela orientação ao longo desse trabalho;

A todos os meus amigos que com certeza tornaram essa caminhada mais alegre e branda;

Por fim, agradeço aos meus familiares, principalmente aos meus pais e meu irmão, pela compreensão e ajuda sempre que foi preciso.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	IX
RESUMO	XI
ABSTRACT.....	XII
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo Geral	3
2.2. Objetivos Específicos	3
3. REVISÃO DA LITERATURA	4
3.1. Rotas para Produção do Aço	4
3.2. Aciaria Elétrica de Aços Especiais	5
3.2.1. Pátio de Sucatas - PSUC	6
3.2.2. Forno Elétrico a Arco - FEA.....	9
3.2.3. Forno-Panela - FP.....	15
3.2.4. Desgaseificador a Vácuo - VD/VOD.....	17
3.2.5. Lingotamento Contínuo - LC	18
3.3. Escórias de Aciaria Elétrica	22
3.3.1. Conceito	22
3.3.2. Geração da Escória na Aciaria Elétrica	24
3.3.3. Propriedades físico-químicas das escórias de aciaria.....	27
3.4. Balanço de Massa de Aço no FEA.....	29
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
4.1. Equipamentos Utilizados	32
4.2. Materiais Utilizados	38
4.3. Método Utilizado.....	38
4.3.1. Seleção dos Elementos Críticos	39
4.3.2. Obtenção das Amostras de Aço e Escória	41
4.3.3. Obtenção da Massa e da Composição Química do Lastro do FEA	42
4.3.4. Estimativa da Massa e da Composição Química do Aço gerado a partir da Carga Fria do FEA	43
4.3.5. Obtenção da Massa de Aço e Escória Remanescentes na Panela Siderúrgica	45
4.3.6. Obtenção da Composição Química de Aço e Escória Remanescentes na Panela Siderúrgica	45
4.4. Calculadora de Retorno de Painelas para o FEA e Balanço de Massa.....	47

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1. Resultados dos "INPUTS" da Calculadora de Retorno de Painelas	50
5.1.1. Lastro do FEA	50
5.1.2. Carga Fria	50
5.1.3. Aço e Escória Remanescentes da Painela Siderúrgica	52
5.2. Resultados da Calculadora de Retorno de Painelas	53
5.2.1. Aumento do Retorno de Painelas Siderúrgicas para o FEA	53
5.2.2. Motivos de não haver Retorno de Painelas Siderúrgicas para o FEA	55
5.2.3. Aumento de Painelas Siderúrgicas Retornadas para o FEA por Cr, Ni e Mo	58
5.3. Ganhos e Perdas da Calculadora de Retorno de Painelas	59
5.3.1. Ganhos com o Reaproveitamento de Aço e Escória no FEA	59
5.3.2. Ganho de Rendimento Metálico do FEA	61
5.3.3. Ganho Energético do FEA	63
5.3.4. Ganho por Consumo de Eletrodo do FEA	66
5.3.5. Perdas por <i>Power Off</i> do FEA	67
5.3.6. Relação entre as Perdas e Ganhos da Calculadora de Retorno de Painelas	68
6. CONCLUSÕES	70
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
8. REFERÊNCIAS	73
APÊNDICE A	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Etapas de redução e refino do processo siderúrgico.	5
Figura 2. Fluxograma típico de uma aciaria elétrica de aços especiais para a produção de produtos longos.	6
Figura 3. Estimativa de custos na produção de aço via FEA.	7
Figura 4. Ilustração dos equipamentos de um FEA.	10
Figura 5. Modelo de estratificação da carga do cestão para carregamento no FEA.	11
Figura 6. Desenho esquemático das etapas de fusão da carga em um FEA onde: a perfuração é indicada pelos números 1 ao 4 a etapa de fusão indicado pelos números 5 ao 10 e os números 11 e 12 podem ser considerados como o final da fusão da carga.	13
Figura 7. Exemplos de FEA com bica de vazamento convencional e com canal EBT.	14
Figura 8. Ilustração esquemática de um forno-panela.	16
Figura 9. Esquema de um desgaseificador a vácuo do tipo tanque.	18
Figura 10. Representação esquemática de uma máquina de lingotamento contínuo.	19
Figura 11. Representação esquemática das formas típicas da seção transversal dos produtos comuns do processo de lingotamento contínuo de aços.	22
Figura 12. Ilustração do processo de geração de escória na produção de aço via aciaria elétrica.	24
Figura 13. Influência da temperatura na tensão superficial e no índice de espumação.	29
Figura 14. Balanço de massa médio de 31 corridas para um forno elétrico com capacidade para 100 toneladas.	30
Figura 15. Fluxograma geral da metodologia utilizada no presente trabalho.	32
Figura 16. FEA da Gerdau Charqueadas.	33
Figura 17. Lingotamento contínuo da Gerdau Charqueadas.	34
Figura 18. Comparação entre os ciclos da panela siderúrgica antes e depois da implementação do presente trabalho e representação esquemática da movimentação das panelas siderúrgicas na aciaria da Gerdau Charqueadas.	35

Figura 19. Ponte rolante, CD2, da aciaria da Gerdau Charqueadas.	36
Figura 20. Espectrômetro de emissão ótica Thermo modelo ARL4460.	37
Figura 21. Espectrômetro de emissão de Raio-X Philips modelo PW-2600.	38
Figura 22. Fluxo de <i>inputs</i> e <i>outputs</i> da calculadora de retorno de panela para o FEA.....	39
Figura 23: Diagrama de Ellingham para Óxidos.	40
Figura 24. Esquema da sequência de obtenção das amostras de aço e escória na Aciaria da Gerdau Charqueadas.	41
Figura 25. Amostra de aço retirada do FEA.	42
Figura 26. Amostras processadas de escória retiradas de: (a) FEA, (b) FP, (c) VD.	42
Figura 27. Representação esquemática de um <i>boxplot</i>	44
Figura 28. Sistema STP para verificação da composição química das amostras de aço.	46
Figura 29. Sistema STP para verificação da composição química das amostras de escória.	46
Figura 30. Interface da Calculadora do Retorno de Painéis para o FEA.	47
Figura 31. Resultados do retorno de painéis siderúrgicas para o FEA.	54
Figura 32. Comparação dos períodos de retorno de painéis siderúrgicas para o FEA.	54
Figura 33. Comparação mensal dos retornos de painéis siderúrgicas para o FEA.	55
Figura 34. Motivos de não haver painéis siderúrgicas retornados para o FEA durante o período de utilização da CRP.	56
Figura 35. Diagrama de Pareto do período da CRP, das painéis siderúrgicas não retornados para o FEA por composição química.	57
Figura 36. Comparação entre períodos do retorno de painéis siderúrgicas para o FEA por Cr, Ni e Mo.	58
Figura 37. Quantidade de aço líquido retornado para o FEA durante o período de utilização da CRP.	59
Figura 38. Relação entre a quantidade de aço líquido retornado para o FEA e a quantidade equivalente de corridas ganhas durante o período de utilização da CRP.	60
Figura 39. Quantidade de escória líquida retornada para o FEA durante o período de utilização da CRP.	60
Figura 40. Relação entre a quantidade de aço líquido remanescente de panela	

siderúrgica para o FEA e o aumento de rendimento metálico do FEA durante o período de utilização da CRP.62

Figura 41. Tempo de Poff do FEA devido ao retorno de panelas siderúrgicas para o FEA durante o período de utilização da CRP.67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição química de escórias de diferentes processos siderúrgicos. Percentual em massa.	25
Tabela 2. Origem dos óxidos e fluoretos formados durante o refino primário e secundário.	26
Tabela 3. Porcentagem dos elementos críticos nos compostos da escória.	49
Tabela 4. Resultados da porcentagem dos elementos críticos das cargas frias do FEA para o mês de agosto.	51
Tabela 5. Principais variações de elementos críticos nas cargas frias do FEA durante o período de utilização da CRP.	52
Tabela 6. Resultados dos testes 1 e 2 da determinação de aço e escória remanescentes da panela siderúrgica após lingotamento.	52
Tabela 7. Valores dos <i>inputs</i> de aço e escória remanescentes da panela siderúrgica na calculadora de retorno de panelas.	53
Tabela 8. Média mensal da quantidade aço e escória remanescentes da panela siderúrgica reaproveitados no FEA, após lingotamento, no período da CRP.	61
Tabela 9. Energia média mensal fornecida pelo reaproveitamento de escória e aço líquidos das panelas siderúrgica no FEA durante o período de utilização da CRP.	64
Tabela 10. Energia média mensal perdida pelo FEA, por radiação, durante o período de utilização da CRP.	65
Tabela 11. Balanço energético médio mensal durante o período de utilização da CRP.	65
Tabela 12. Quantidade mensal de corridas que poderiam ter sido produzidas durante o período da CRP.	68
Tabela 13. Relação média mensal entre as perdas e ganhos do reaproveitamento de aço e escória remanescentes da panela siderúrgica no FEA durante o período de utilização da CRP.	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

As	Arsênio
B ₂ O ₃	Trióxido de Boro
Bi	Bismuto
CaF ₂	Fluorita
CaO	Oxido de Cálcio / Cal Calcítica
CaS	Sulfeto de Cálcio
CO	Monóxido de Carbono
Cr ₂ O ₃	Óxido de Cromo (III)
CRP	Calculadora de Retorno de Panela
DRI	<i>Direct Reduced Iron</i>
E1	Amostra de Escória do Forno Elétrico a Arco
E11	Amostra de Escória do <i>Vacuum Degassing</i>
E6	Amostra de Escória da Chegada no Forno-Panela
E7	Amostra de Escória da Saída no Forno-Panela
EBT	<i>Eccentric Bottom Tap-hole</i>
FEA	Forno Elétrico a Arco
FeO	Óxido de Ferro
FP	Forno Panela
FRX	Espectroscopia por Fluorescência de raios-X
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
K	Temperatura absoluta Kelvin
K ₂ O	Óxido de Potássio
kg	Quilograma
kJ	Quilojoule
kVA	Quilovolt-ampere
kWh	Quilowatt-hora
LC	Lingotamento Contínuo
LCV	Lingotamento Convencional
LD/BOF	Conversor a Oxigênio
m	metro

m ³	metro cúbico
mm	milímetro
mm ²	milímetro quadrado
MnO	Óxido de Manganês
Na ₂ O	Óxido de Sódio
Nb	Nióbio
P1	Amostra de Aço do Forno Elétrico a Arco
P6	Amostra de Aço da Chegada no Forno-Panela
P7	Amostra de Aço da Saída no Forno-Panela
P ₂ O ₅	Pentóxido de Fósforo
PF	Amostra de Aço do Distribuidor do Lingotamento Contínuo
Poff	<i>Power Off</i>
PSUC	Pátio de Sucatas
S	Enxofre
Sb	Antimônio
Se	Selênio
SiO ₂	Sílica
Sn	Estanho
t	Tonelada
Te	Telúrio
TiO ₂	Dióxido de Titânio
V ₂ O ₅	Pentóxido de Vanádio
VD	<i>Vacuum Degassing</i>
VOD	<i>Vacuum Oxygen Decarburization</i>
W	Watt
Zn	Zinco
Zr	Zircônio
σ	Tensão Superficial
()	Espécies dissolvidas na escória
[]	Espécies dissolvidas no aço

RESUMO

Siderúrgicas são responsáveis pela geração de significativo volume de emissões gasosas, efluentes líquidos e resíduos sólidos. Os crescentes custos variáveis de produção e mão de obra juntamente com os custos adicionais relacionados ao descarte de resíduos estão reduzindo o lucro final do produto. Isso induz a indústria siderúrgica a buscar processos mais eficientes e a reciclar produtos e subprodutos gerados durante o processo, para que não se torne inviável a manutenção da operação. O objetivo desse trabalho foi o desenvolvimento de uma metodologia que visa o aumento da reutilização de aço e escória remanescente de panela siderúrgica em forno elétrico a arco, a fim de reduzir custos com processamento e destinação desse co-produto e também elevar o rendimento metálico do FEA sem que ocorram prejuízos à composição química do aço a ser fabricado. A metodologia consistiu na criação de uma calculadora de retorno de panelas para o FEA que realiza um balanço de massa dos elementos químicos definidos como críticos à composição química final do aço no FEA indicando se é possível ou não retornar a quantidade de aço e escória remanescentes da panela siderúrgica após lingotamento para o FEA. Durante o período de utilização da calculadora de retorno de panelas obteve-se um aumento de reaproveitamento de aço e escória remanescentes da panela siderúrgica no forno elétrico a arco resultando em um aumento médio mensal de 0,25% no rendimento metálico do FEA, uma média mensal de 98,8 toneladas de aço e 440,8 toneladas de escória não destinados para processamentos e destinação de co-produtos de aciaria, uma redução média mensal de 1,272% MWh de energia do FEA e uma redução média mensal de 1,298% kg de consumo de eletrodo de grafita do FEA. Constatou-se que a prática de retornar panelas siderúrgicas para o FEA gerou um *power off* médio mensal de 2,533% min durante o período de utilização da calculadora de retorno de panelas. Conseguiu-se construir uma metodologia para o reaproveitamento de aço e escória remanescentes de panela siderúrgica para o FEA gerando uma redução de 0,261% no custo médio final de produção do aço da aciaria da Gerdau Charqueadas. Essa metodologia pode ser aplicada, com adaptações, para outras aciarias.

Palavras-chave: Forno Elétrico a Arco. reaproveitamento de co-produtos de aciaria. rendimento metálico. balanço de massa.

ABSTRACT

Steelmakers are responsible for generating significant volumes of gaseous emissions, liquid effluents and solid waste. The increasing variable costs of production and labor along with the additional costs related to waste disposal are reducing the final profit of the product, inducing the steel industry to seek more efficient processes and to recycle products and by-products generated during the process, in order that it isn't impracticable to keep the operation. The objective of this work was the development of a methodology that aims to increase the reuse of steel and slag remaining of ladle in an electric arc furnace in order to reduce costs with processing and destination of this co-product and also to increase EAF metallic yield without any damage to the chemical composition of the steel to be manufactured. The methodology consisted in the creation of a ladle return calculator to the EAF that performs a mass balance of the chemical elements defined as critical to the final chemical composition of the steel in the EAF indicating if the ladle can be returned or not with the quantity of steel and slag remaining after continuous casting to the EAF without any damage to the chemical composition of the steel to be manufactured. During the period of use of the ladle return calculator, an increase of reuse of steel and slag remaining from the ladle was obtained in the electric arc furnace, resulting in a monthly average increase of 0,25% in the metallic yield of the EAF, an average 98,8 tonnes of steel and 440,8 tonnes of slag not destined for processing and destination of by-products from the meltshop, an average monthly reduction of 1,272% MWh of energy from the EAF and an average monthly reduction of 1,298% kg of EAF graphite electrode consumption. It was found that the practice of returning ladles to the EAF generated an average monthly Poff of 2,533% min during the period of use of the ladle return calculator. It was possible to construct a methodology for the reuse of steel and slag remaining from the ladle to the FEA, generating a reduction of 0,261% in the final average cost of steel production at the Gerdau Charqueadas steelmaker. This methodology can be applied, with adaptations, to others meltshops.

Keywords: Electric arc furnace. reuse of meltshop by-products. metallic yield. mass balance.

1. INTRODUÇÃO

Fabricar aços de alta qualidade com preços competitivos no mercado tem sido uma tarefa cada vez mais árdua para as siderúrgicas. Segundo MEMOLI et al (2007), além do grande consumo de energia e de materiais, a indústria siderúrgica também é responsável por significativo volume de emissões gasosas, efluentes líquidos e resíduos sólidos. MEMOLI et al (2007) também afirmam que em áreas específicas onde os crescentes custos variáveis de produção e mão de obra estão reduzindo o lucro final, o custo adicional relacionado com o descarte de resíduos pode tornar inviável a manutenção da operação.

A venda da escória de aciaria, para empresas que conseguem agregar valor a esse material, é uma das formas mais utilizadas de conseguir um retorno econômico para as indústrias siderúrgicas. Alguns exemplos de reutilização das escórias de aciaria elétrica, segundo POLISSENI (2005), são: pavimentação de estradas, lastro de ferrovias e usos agrônômicos como corretivos de solos ou produção de fertilizantes fosfatados. Existem inúmeras pesquisas relacionadas à caracterização e aplicação de escórias do refino primário do aço na aciaria elétrica, entretanto trabalhos focados no refino secundário, mais especificamente em relação ao forno-panela, são em menor número. A maior parte da escória oriunda do forno-panela da usina Gerdau Charqueadas, atualmente, é classificada como resíduo e vem sendo disposta em aterros sanitários terceirizados, que possuem um custo superior a uma centena de reais por tonelada de escória descartada, envolvendo destinação adequada e transporte desse material. A fração metálica, recuperada por empresa terceira, é revendida para a Gerdau Charqueadas para ser utilizada como sucata recuperada no FEA.

A fim de reduzir a geração de co-produtos da aciaria, a Gerdau Charqueadas adotou a prática de retornar o aço e escória das panelas siderúrgicas, após lingotamento, para o FEA. Porém, passados quase dois anos, o indicador de retorno de panela siderúrgica para o FEA estava, constantemente, abaixo do esperado, gerando assim a necessidade de levantar quais eram os reais benefícios dessa prática que poderiam estar implicando diretamente no custo final do aço.

A partir desse contexto, torna-se interessante o desenvolvimento do presente trabalho que visa o aumento da reutilização de aço e escória remanescente de panela

siderúrgica em forno elétrico a arco, a fim de reduzir custos com o processamento e destinação desse co-produto e também elevar o rendimento metálico do FEA, que é responsável direto pelo aumento de rendimento global de uma aciaria elétrica, sem que ocorram prejuízos à composição química do aço a ser fabricado.

Os estudos do presente trabalho foram baseados em dados coletados na Gerdau Charqueadas, que é uma planta semi-integrada, *mini-mill*, composta por 1 forno elétrico a arco, capaz de produzir, aproximadamente, 70 toneladas de aço por corrida e 480.000 toneladas de aços especiais por ano. A usina de Charqueadas é uma das usinas do Grupo Gerdau, considerado o 18º maior produtor de aço no mundo (WORLD STEEL IN FIGURES 2018), localizada no município de Charqueadas, no estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Desenvolver uma metodologia para aumentar o reaproveitamento de aço e escória remanescentes da panela siderúrgica em forno elétrico a arco.

2.2. Objetivos Específicos

Especificar quais são os elementos químicos críticos contidos no aço e escória remanescentes da panela siderúrgica que podem ser prejudiciais à composição química final do aço no FEA.

Estabelecer a composição química dos elementos químicos críticos das cargas frias utilizadas no FEA.

Analisar, através de balanço de massa, como a quantidade de aço e escória remanescentes da panela siderúrgica podem afetar a composição química final do aço no FEA.

Avaliar se a prática de reaproveitamento do aço e da escória remanescentes da panela siderúrgica no forno elétrico a arco aumentará o rendimento metálico do FEA, consumo energético e consumo de eletrodo.

3. REVISÃO DA LITERATURA

Na revisão da literatura, inicialmente, descreve-se as possíveis rotas de produção do aço. Em um segundo momento, apresentam-se com maiores detalhes os processos de uma aciaria elétrica de aços especiais. Em um terceiro momento, abordam-se os conceitos e propriedades físico-químicas das escórias de aciaria elétrica. Para finalizar, descreve-se o balanço de massa de um FEA, através da apresentação de um estudo, que é de suma importância para o entendimento do presente estudo.

3.1. Rotas para Produção do Aço

As usinas siderúrgicas atuais podem ser divididas em três grandes grupos: usinas integradas, usinas semi-integradas e usinas não-integradas. Uma usina integrada é aquela cujo aço é obtido a partir da matéria-prima de minério de ferro, que é transformado em ferro primário, chamado de ferro-gusa ou ferro-esponja conforme o processo, que é transformado em aço através das operações de refino. Uma usina semi-integrada é aquela cujo aço é obtido a partir da matéria-prima de sucata de aço, não havendo necessidade da etapa de redução do minério de ferro, por meio do emprego de fornos elétricos de fusão e refino (MOURÃO, 2007). Há também as usinas não-integradas que se limitam a realizar apenas uma etapa do processo siderúrgico, sendo a etapa de redução ou a etapa de conformação mecânica.

O processo siderúrgico pode ser dividido em três principais etapas: redução, refino e conformação mecânica. Na etapa de redução, o óxido de ferro é reduzido a ferro metálico pelo processo de alto-forno ou por processos alternativos de produção de ferro primário, por exemplo, pelo processo de redução direta. O alto-forno produz ferro primário líquido, denominado ferro-gusa, que possui alto teor de carbono, enquanto que a redução direta produz ferro primário no estado sólido, denominado ferro-esponja. O ferro-gusa ou o ferro-esponja passam então para etapa de refino na aciaria.

As etapas do processo de produção de aços de redução e refino com seus principais equipamentos e matérias-primas estão ilustradas na Figura 1.

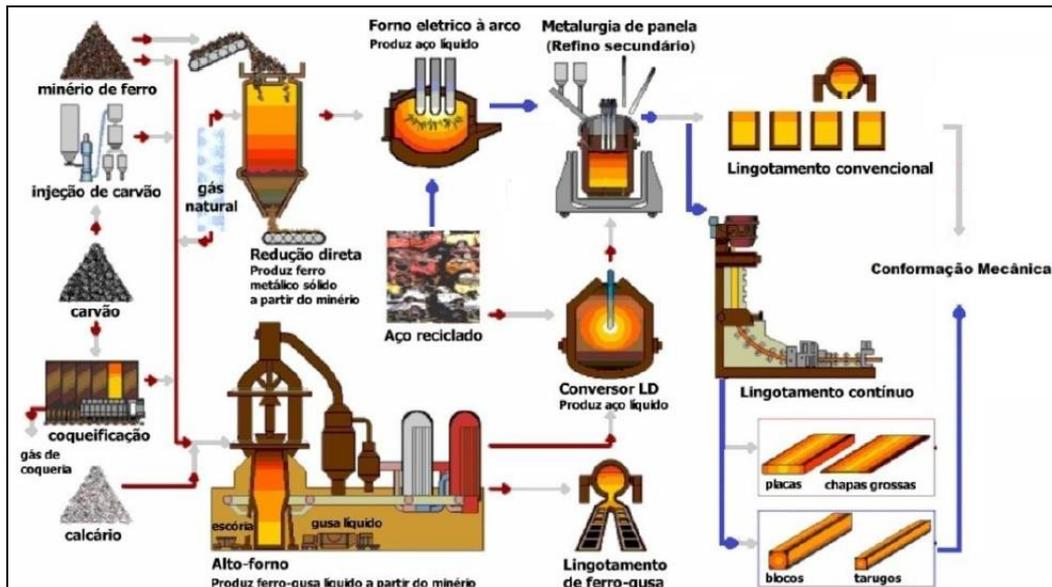


Figura 1. Etapas de redução e refino do processo siderúrgico. Fonte: Adaptado de MOREIRA, 2012.

O processo de produção de aços via aciaria elétrica, de modo geral, é composto por quatro etapas de produção: pátio de sucatas (PSUC), forno elétrico a arco (FEA), forno-panela (FP) e o lingotamento contínuo (LC) e/ou convencional (LCV). A produção de aços especiais via aciaria elétrica é normalmente composta por cinco etapas de produção e serão detalhadas a seguir.

3.2. Aciaria Elétrica de Aços Especiais

Uma aciaria elétrica de aços especiais é composta geralmente por: pátio de sucatas (PSUC), forno elétrico a arco (FEA), forno-panela (FP), desgaseificador a vácuo (VD/VOD) e o lingotamento contínuo (LC) e/ou convencional (LCV). A figura 2 mostra um fluxograma típico de uma aciaria elétrica de aços especiais longos.

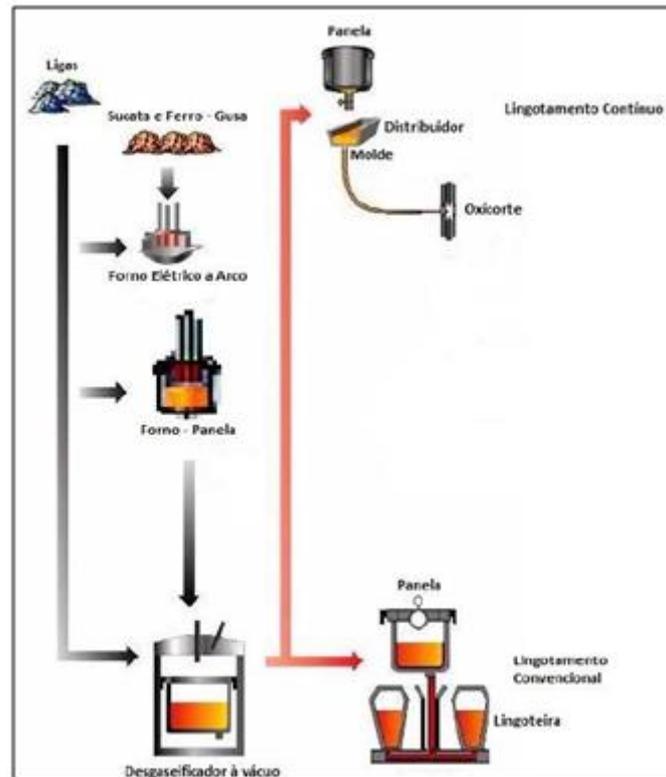


Figura 2. Fluxograma típico de uma aciaria elétrica de aços especiais para a produção de produtos longos. Fonte: Adaptado de DA ROCHA, 2014.

3.2.1. Pátio de Sucatas - PSUC

Os objetivos do pátio de sucata são: classificação e separação dos diferentes tipos de sucata, adequação do tamanho e limpeza, adequação do nível de elementos residuais (Cu, Sn, S, P). Esses objetivos visam o aumento de rendimento metálico do FEA, com menor custo. O tipo e tamanho da sucata são fatores importantes na produtividade dos fornos, assim objetiva-se utilizar sucatas mais limpas e mais densas (BIELEFELDT, 2005).

Segundo MALFA (2013), a sucata ferrosa é responsável por cerca de 60 a 80% do custo de produção do aço e também influencia nos parâmetros do FEA, a qualidade do aço líquido, emissão de gases e a composição química da escória. A figura 3 apresenta uma estimativa de custos na produção de aço via FEA.

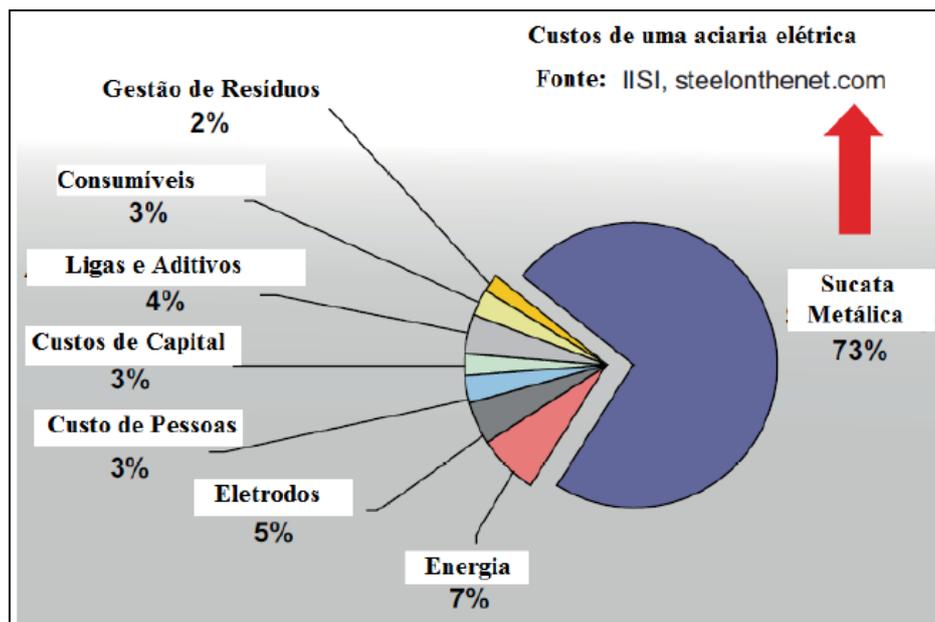


Figura 3. Estimativa de custos na produção de aço via FEA. Fonte: adaptado de ALVES, 2016.

Os diferentes tipos de sucata podem ser classificados, segundo CHEVRAND (2007), como sucata de retorno interno, sucata de indústria e sucata de obsolescência. Cada pátio de sucatas possui subclassificações que se adaptam às necessidades locais de disponibilidade, quantidade e qualidade de sucatas.

- Sucata de retorno interno: gerada pela própria usina, constituída de cascões de panela, lingotes, derramamentos de aço, aço sucitado na fabricação, recortes da linha de acabamento, etc.
- Sucata de indústria: proveniente da transformação do aço em produto acabado: restos de estamparia, retalhos de chapa, cavacos, etc.
- Sucata de obsolescência: comumente chamada de "ferro velho" que corresponde ao aço consumido em uma região 15 a 20 anos depois.

Os principais equipamentos e processos para processamento de sucatas de aço no FEA são:

- Prensa-tesoura: prensa a sucata para aumentar sua densidade e reduzir volume com posterior corte por uma guilhotina em tamanho determinado.
- Prensa-pacote: utilizada para formar pacotes de sucata com menor volume para o FEA.

- Tesoura Móvel: equipamento móvel utilizado para cortar sucata em diferentes pontos no pátio de sucatas.
- Oxicorte: utilizado para cortar sucatas de grandes dimensões. Pode ser corte manual ou automatizado.
- Shredder: equipamento composto por moinho de martelos e grelha que tritura a sucata e realiza separação magnética, promovendo a retirada de impurezas.
- Planta separadora: equipamento utilizado para separar magneticamente aço e escória de retorno do processo e a sucata de fundo de baía.
- Garimpo: processo manual para separar impurezas, motores de cobre, e selecionar materiais que possam ser utilizados diretamente no FEA.

Alguns exemplos de sucatas e seus processamentos são:

- Sucata Mista (SMST): sucata do tipo de obsolescência (fogões, geladeiras, automóveis) processada na prensa tesoura para reduzir as dimensões e aumentar a densidade da sucata para utilização no FEA. A SMST possui densidade variável.
- Sucata Especial (SESP): sucata do tipo industrial (chapas de estampagem, retalhos de corte a laser) podendo ser processada por prensa tesoura ou prensa pacote para aumento de densidade. A densidade mínima da SESP é de $0,4 \text{ t/m}^3$ e a dimensão da maior diagonal deve ter no máximo 1000 mm.
- Sucata Pesada (SPES): sucatas do tipo industrial (matrizes, braço de guingaste), obsolescência (panela siderúrgica, bloco de motor de navio) ou retorno interno (barras e tarugos) processadas via oxicorte, apresenta uma densidade média de $4,40 \text{ t/m}^3$, ou tesoura móvel, apresenta uma densidade em torno de $1,56 \text{ t/m}^3$, para redução de dimensões.
- Sucata *Shredder* (SHR): sucata do tipo de obsolescência triturada em um *Shredder* para reduzir as dimensões e aumentar a densidade da sucata e realizar a separação magnética da sucata ferrosa da não-ferrosa. A SHR possui uma densidade pouco variável, em torno de $0,81 \text{ t/m}^3$.

3.2.2. Forno Elétrico a Arco - FEA

Os principais componentes de um FEA são: carcaça, abóboda, painéis refrigerados, transformadores e eletrodos, que serão especificados a seguir, segundo MOURÃO (2007). A figura 4 mostra a ilustração dos equipamentos de um FEA.

- Carcaça: é uma estrutura cilíndrica com revestimento refratário interno e fundo abaulado. Possui duas aberturas principais: o canal de vazamento, por onde sairá o metal líquido de dentro do FEA, e a porta de escória, por onde realizam adições de matérias-primas, retira-se escória, injeta-se oxigênio e grafite, verifica-se temperatura e retiram-se amostras de aço e escória.
- Abóboda: situada na parte superior do FEA, sendo sua abertura necessária para permitir o carregamento do FEA. A abóboda pode ser revestida tanto de tijolos refratários quanto de painéis refrigerados. Segundo RIZZO (2005) para a instalação de equipamentos para absorção de pós e gases, deve ser feito um quarto furo na abóboda, no caso de fornos de corrente alternada, ou um segundo furo no caso de fornos de corrente contínua.
- Painéis refrigerados: são elementos refrigerados a água que promovem um revestimento capaz de suportar os severos efeitos da radiação sobre os refratários das paredes do FEA e sobre a abóboda. Os painéis podem cobrir mais de 70% da superfície lateral dos fornos e revestir 85% da área da abóboda.
- Transformadores: são projetados para operar em condições mais rigorosas do que aquelas utilizadas em outras aplicações, devido principalmente aos elevados esforços mecânicos decorrentes do início de fusão da carga metálica. A potência de operação do FEA é alterada através da comutação de *taps*. Esse sistema minimiza os tempos mortos, aumenta a produtividade do FEA e reduz o consumo específico de energia.
- Eletrodos: segundo RIZZO (2005), para fornos de corrente alternada há a utilização de três eletrodos enquanto que fornos de corrente contínua utilizam, na maioria das vezes, apenas um eletrodo. Os eletrodos começam a sofrer desgaste em direção a suas pontas, que estão mais próximas do banho metálico, onde as temperaturas são mais elevadas (MOURÃO, 2007).

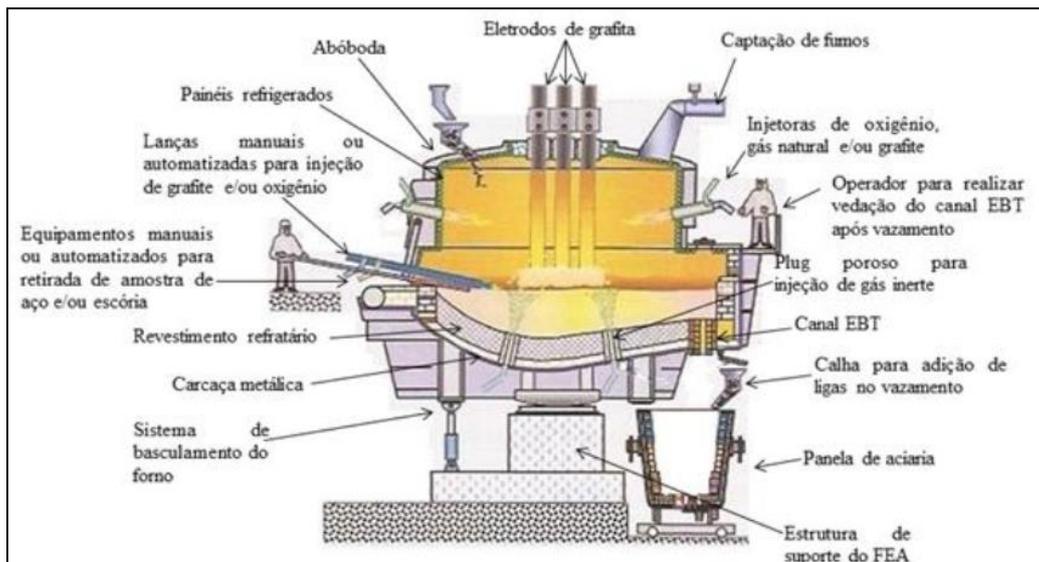


Figura 4. Ilustração dos equipamentos de um FEA. Fonte: adaptado de RIZZO, 2005.

O processo do FEA tem como objetivos a fusão da carga metálica, descarbonização, desfosforação e a elevação da temperatura do banho metálico. As etapas de processamento do aço via FEA podem ser divididas da seguinte maneira: carregamento, fusão, refino oxidante, vazamento e adição de ligas.

Carregamento

O carregamento do FEA é feito quando os eletrodos são posicionados na posição superior limite e então abre-se a abóboda para que o FEA seja carregado pelo cestão de sucatas. Segundo JOHN (2009), a densidade da sucata basicamente define a quantidade de carregamentos necessários no forno para uma corrida. CHEVRAND (2007) comenta que a sucata, dependendo de sua origem, apresenta densidade que pode variar entre $0,6 \text{ t/m}^3$ para sucatas leves não industrializadas e até $1,5 \text{ t/m}^3$ para sucatas mais pesadas que geralmente passaram por algum processamento. Segundo BRITO (2008), sucatas de densidade entre $0,8$ e $1,0 \text{ t/m}^3$ necessitam geralmente de dois carregamentos.

A forma como a sucata é estratificada no cestão, vide figura 5, interfere de forma significativa no desempenho do FEA, tanto na segurança como no custo da operação.

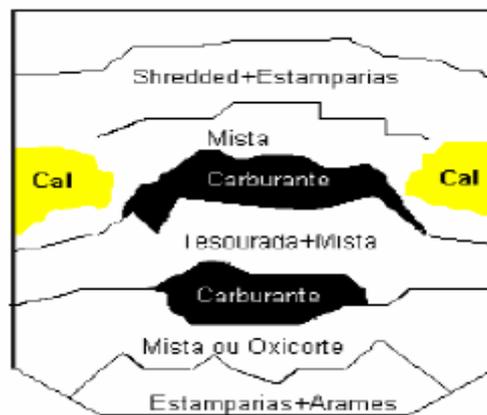


Figura 5. Modelo de estratificação da carga do cestão para carregamento no FEA.
 Fonte: adaptado de JOHN (2009).

JOHN (2009) sugere a seguinte forma de estratificação da carga do cestão:

- Base do cestão: utilizar sucata leve, isenta de umidade e de óleo, pois esta camada irá servir de amortecimento das camadas superiores e minimizar os danos ao refratário da soleira. Sucata úmida ou com óleo aumentam os riscos de explosão, já que esta é a primeira camada a entrar em contato com o aço líquido ou escória dentro do FEA. É recomendado um volume de até 10% do volume do cestão.
- Segunda camada: utilizar sucatas de alta densidade, pesada, para evitar quebra de eletrodo durante a etapa de fusão da carga. É recomendado um volume de até 15% da carga.
- Terceira camada: utilizar ferro-gusa e carburantes para favorecer a descida dos eletrodos e inibir a formação de cascões.
- Quarta camada: utilizar pacotes envolvidos por sucata de média densidade para evitar o deslocamento durante a fusão.
- Camada superior: utilizar sucata leve para possibilitar a rápida penetração dos eletrodos evitando ataque aos refratários do FEA.
- Contorno do cestão: utilizar o carregamento de fundentes para evitar o contato direto com os eletrodos evitando isolamentos.

Fusão

Depois de realizada a etapa de seleção e estratificação da sucata no cestão, o mesmo é encaminhado para o FEA que já possui uma quantidade de aço líquido remanescente da corrida anterior, chamado de lastro ou fundo úmido. A função do lastro é auxiliar na fusão da sucata, amortecer o impacto da sucata e minimizar a passagem de escória para a panela siderúrgica.

Logo após o carregamento do forno os eletrodos são baixados em direção à sucata e inicia-se o primeiro período de fusão, denominada perfuração. Durante a perfuração, o arco elétrico se forma muito próximo à abóbada do forno, podendo gerar um superaquecimento se não estiver operando com baixa potência. Normalmente, o tempo de perfuração não ultrapassa 2 minutos (JOHN, 2009).

No período seguinte, denominado fusão, utiliza-se a potência máxima permitida pelo forno. Nesta fase existe já uma pequena poça de aço fundido na soleira do forno, e a medida que os eletrodos forem aproximados dela, o arco ficará bem mais estável. Segundo GOMES (2012), a energia para que ocorra a fusão é proveniente de energia elétrica e energia química em um FEA. A energia elétrica é fornecida pelo arco elétrico formado entre os eletrodos e a sucata, já a energia química é obtida pela oxidação exotérmica, do carbono e de alguns metais (Fe, Si, Mn), pela injeção de oxigênio via lanças, e também pela injeção de GLP, através de queimadores, para reduzir o tempo de fusão da carga e atingir todos os pontos do forno.

O carregamento seguinte é feito com alguma sucata ainda não fundida. Neste caso, não é necessário reduzir a potência, uma vez que ainda há sucata sólida para proteger paredes e abóbada. Neste momento, o processo está preparado para receber o próximo carregamento de sucata. O final da fusão é verificado quando toda ou praticamente toda a sucata carregada se encontra fundida (JOHN, 2009).

A figura 6 apresenta o desenho esquemático das etapas de fusão da carga em um FEA. Sendo a etapa de perfuração indicadas pelos números 1 ao 4 e a etapa de fusão indicado pelos números 5 ao 10. Os números 11 e 12 podem ser considerados como o final da fusão da carga.

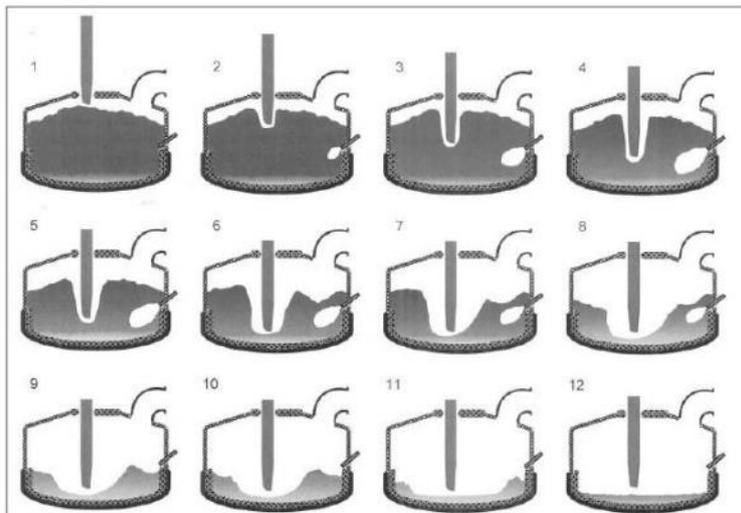


Figura 6. Desenho esquemático das etapas de fusão da carga em um FEA onde: a perfuração é indicada pelos números 1 ao 4 a etapa de fusão indicado pelos números 5 ao 10 e os números 11 e 12 podem ser considerados como o final da fusão da carga. Fonte: adaptado de BITTENCOURT, 2015.

Refino Oxidante

Os principais objetivos da etapa de refino oxidante são a adequação dos teores de fósforo e carbono de vazamento do tipo de aço a ser fabricado e o aquecimento do aço até sua temperatura de vazamento.

Após a etapa de fusão, teoricamente o banho já se encontra no estado líquido, com a possível exposição das paredes e abóbada as ações do arco. A prática até meados da década de 80 era diminuir o comprimento de arco e, conseqüentemente, a potência para elevar o banho até a temperatura de vazamento, gerando perda de eficiência e produtividade. Dessa forma, foi desenvolvida a prática de escória espumante, que consiste em aumentar o volume de escória para envolver o arco elétrico, absorvendo sua irradiação e funcionando como uma barreira de proteção para os painéis refrigerados e refratários (ROSSI, 2014).

A escória espumante, segundo JOHN (2009), é formada através da injeção de oxigênio no banho metálico onde ocorre a reação 1:



O FeO formado com a injeção de oxigênio é incorporado a escória juntamente com os demais elementos oxidados (SiO_2 , Al_2O_3 , etc) e o MgO e CaO adicionados. Nesta escória são injetados então um material carburante, por exemplo, finos de carvão,

cujos carbonos reage com o FeO produzindo CO segundo a reação 2 (JOHN, 2009).



Com a redução da tensão superficial e aumento da viscosidade efetiva da escória é possível reter mais CO no interior da mesma. Porém, a presença de partículas saturadas como o CaO e MgO, são decisivas para determinar a capacidade de espumação da escória. Estes fenômenos provocam um inchamento da escória, que gradativamente vai envolvendo os eletrodos e o arco elétrico, e desta maneira protegendo os painéis refrigerados (JOHN, 2009).

A desfosforação segue uma equação de equilíbrio mais complexa, reação 3, segundo KROTH et al (2015):



Para que ocorra a fixação do P_2O_5 , a escória deve ter uma porcentagem de 35 a 40% de CaO. O contato entre o aço líquido e escória deve ser o mais intenso possível, daí a importância da forte agitação do aço por meio de insuflação de gases, podendo ser mesmo o oxigênio, que trará o benefício adicional de aumentar o teor de FeO na escória (MOURÃO, 2007).

Durante a etapa de refino, pode ser retirado o excesso da escória através da porta de escória do FEA. Este procedimento minimiza a reversão de determinados elementos para o banho no final do processo, como por exemplo, o fósforo (JOHN, 2009).

Vazamento

Após a etapa de refino, ajuste da temperatura e ajuste do oxigênio do banho, tem início a etapa de vazamento do aço líquido para uma panela siderúrgica. O vazamento pode ser feito por canal do tipo EBT ou por bica de vazamento convencional (em desuso), conforme a figura 7.

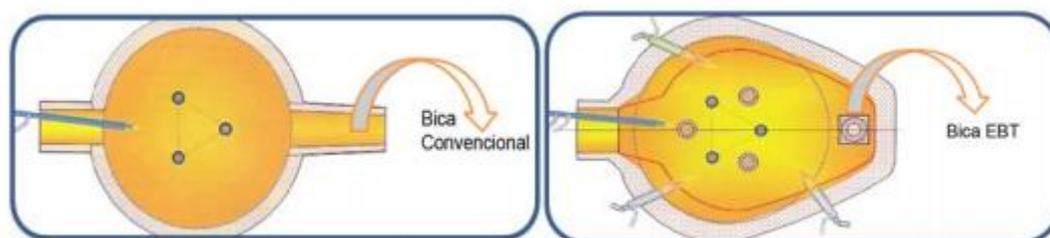


Figura 7. Exemplos de FEA com bica de vazamento convencional e com canal EBT.

Fonte: adaptado de MATTIELO, 2014.

Segundo JOHN (2009), os principais desafios da etapa de vazamento no FEA são os seguintes:

- Controle da passagem de escória do forno para a panela;
- O aço deve absorver o mínimo possível de gases;
- A perda de temperatura deve ser a menor possível;
- Manter a quantidade ideal de aço no forno para a próxima corrida.

Durante o processo de vazamento é muito importante que seja controlada a passagem de escória do forno para a panela, uma vez que esta, apesar de proteger o banho líquido da absorção de gases e da perda excessiva de temperatura, é rica em FeO e P₂O₅, podendo gerar reversão de fósforo para o banho, além de elevar o consumo de desoxidantes e do refratário da panela (ROSSI, 2014).

Durante o processo de vazamento, são adicionadas ligas com base na análise do banho metálico e do tipo de aço desejado. Desoxidantes são adicionados ao aço para reduzir o teor de oxigênio antes do fim do processamento. Os desoxidantes mais comuns são de alumínio ou silício sob a forma de ferro-silício, ferro-silício-manganês ou carbureto de silício (CONSTANTIN, 2013).

3.2.3. Forno-Panela - FP

O forno-panela, figura 8, é a mais popular instalação para refino secundário de aços. Seus principais processos, segundo MOURÃO (2007) são:

- Controle de temperatura do aço, através do aquecimento via arco elétrico;
- Acerto da composição química do aço, através da adição de ferroligas;
- Controle de morfologia de inclusões;
- Desoxidação;
- Dessulfuração.

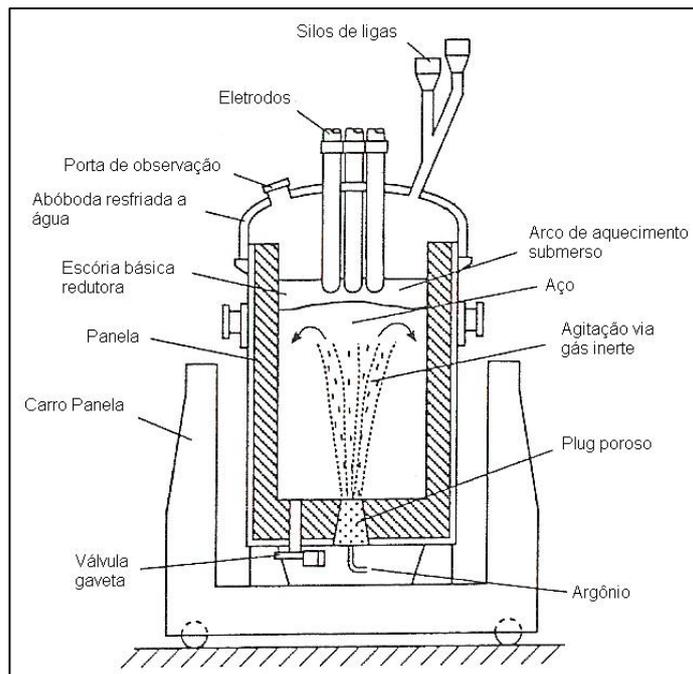
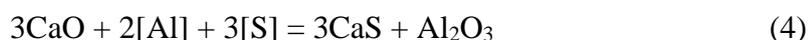


Figura 8. Ilustração esquemática de um forno-panela. Fonte: Adaptado de Turkdogan (1996).

A etapa de forno-panela também é conhecida como refino redutor, por ser aquela onde há a desoxidação do aço. O aquecimento do banho metálico é realizado por eletrodos de grafita similares aos utilizados no FEA, porém, normalmente de menor diâmetro. Para garantir boa homogeneização da temperatura e aceleração das reações que ocorrem no seio do banho, é feita a agitação do mesmo com a injeção de gases inertes, normalmente argônio, pelo fundo da panela (rinsagem) (ROSSI, 2014).

A desoxidação do aço é realizada pela adição dos elementos Al, Si e Mn, sempre em presença de uma escória com baixas quantidades de FeO, MnO e SiO₂. Importante ressaltar o fato de que o uso combinado de Si e Mn na desoxidação é mais eficiente do que o uso isolado do Si ou do Mn. A razão para maior eficiência é devido a desoxidação complexa, dada entre o Si e o Mn, com a formação do composto silicato de manganês, que também é líquido nas temperaturas usuais de aço líquido (MOURÃO, 2007).

A dessulfuração pode ser representada pela reação 4, segundo MOURÃO (2007):



A equação 4 mostra que [Al] e [S] encontram-se dissolvidos no aço líquido e CaO, CaS e Al₂O₃ encontram-se na escória. Como o enxofre ficará fixado na escória

como CaS, um contato intenso entre o aço líquido e a escória é essencial e pode-se utilizar do processo de rinsagem com gás inerte ou agitação eletromagnética para promover esse contato entre banho líquido e escória (MOURÃO, 2007).

3.2.4. Desgaseificador a Vácuo - VD/VOD

O processo VD (*Vacuum Degassing*) é realizado após o tratamento do aço líquido no forno-panela. A panela siderúrgica é então conduzida no processo VD a um tanque fechado hermeticamente por uma tampa, dando início ao processo de desgaseificação pelo acionamento do sistema de vácuo (RIZZO, 2006).

Os processos realizados em tanques de vácuo, figura 9, segundo MOURÃO (2007), são:

- Desgaseificação;
- Desoxidação;
- Dessulfuração;
- Descarburização (em condições específicas);
- Acerto de composição química (pequenas quantidades de adições de ligas).

O VD possui a função principal de reduzir os teores de gases dissolvidos no aço, principalmente hidrogênio e nitrogênio, que são prejudiciais às propriedades mecânicas do produto final. Através da diferença de pressão, os gases dissolvidos no metal líquido são transportados até a superfície da panela e removidos do banho. Durante a desgaseificação, ocorre a injeção de gás inerte pelo fundo da panela para promover agitação do banho e tornar a remoção homogênea e eficiente. Além da remoção de gases, a agitação do aço líquido auxilia na remoção de inclusões não metálicas ao passo que aumenta a interação dessas partículas com a escória. A adição de ligas metálicas na forma de fios e arames para um ajuste refinado da composição química ocorre nessa etapa (SILVA, 2006).

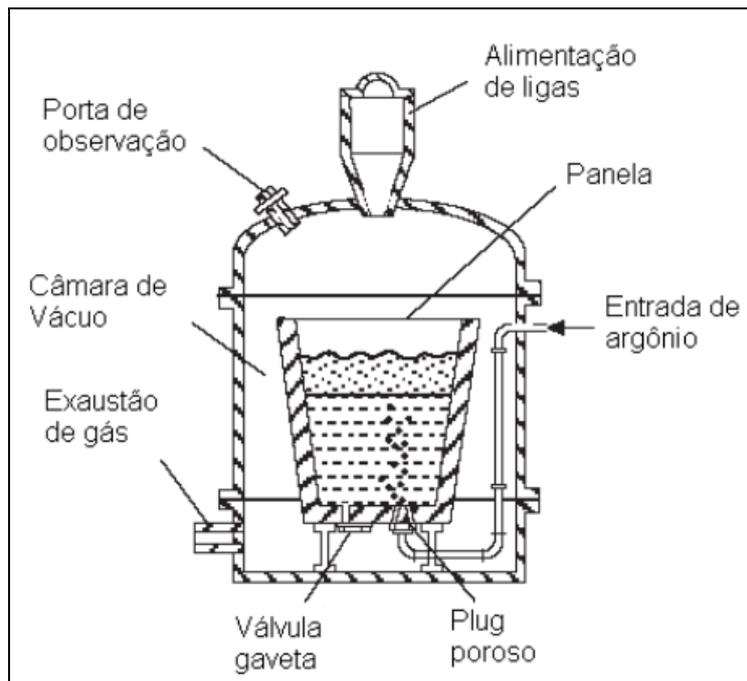


Figura 9. Esquema de um desgaseificador a vácuo do tipo tanque. Fonte: adaptado de TURKDOGAN (1996).

O processo VOD (*Vacuum Oxygen Decarburization*) é utilizado principalmente para a fabricação de aços inoxidáveis, pois traz a necessidade de uma descarburização sob vácuo, para se evitar a perda do cromo adicionado por oxidação. Trata-se de um tanque de vácuo com uma lança para injeção supersônica de oxigênio em presença de baixa pressão. A oxidação do carbono gera uma quantidade apreciável de calor durante o processo (MOURÃO, 2007).

3.2.5. Lingotamento Contínuo - LC

O processo de lingotamento contínuo de aços é o último estágio em uma aciaria onde se trabalha com o metal ainda no estado líquido. Tem como missão solidificar o aço, em forma desejável, de tal maneira que possa ser utilizado nas etapas seguintes da cadeia produtiva (MOURÃO, 2007).

O princípio básico do processo de solidificação do aço, utilizando uma máquina de lingotamento contínuo conforme a figura 10, compreende o vazamento do aço líquido verticalmente, a partir de uma panela que está depositada em uma torre de panela, em um distribuidor que distribui o aço líquido para dentro de um molde de cobre refrigerado por água. O calor é extraído do aço líquido pelas paredes do molde

solidificando imediatamente o aço em contato com o molde, formando uma pele solidificada. A pele solidificada deixa o molde, pelos movimentos de oscilação do molde, contendo em seu interior aço líquido, que será arrastado para o interior da máquina de lingotamento. Para que a solidificação avance, após o material deixar o molde, o resfriamento é feito por um conjunto de chuveiros de água (*sprays*), distribuídos uniformemente ao longo da extensão da máquina. O avanço da solidificação significa que ocorre um aumento gradativo da espessura da pele, até que se complete toda a solidificação do aço líquido existente no interior do invólucro (MOURÃO, 2007).

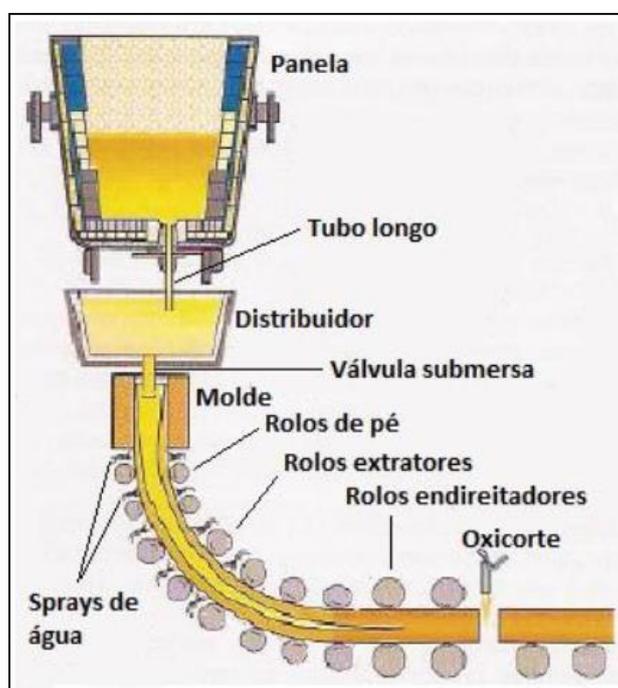


Figura 10. Representação esquemática de uma máquina de lingotamento contínuo.
Fonte: adaptado de RIZZO, 2005.

Os principais componentes que integram uma máquina de lingotamento contínuo para aços especiais são:

Torre de Panela: é uma grande estrutura metálica que permite a transferência da panela siderúrgica contendo o aço líquido proveniente da ala de refino secundário para a ala de lingotamento. A transferência se dá através do giro da torre em percurso de 180°. Algumas torres podem conter tampas para cobrir a panela a fim de evitar a perda de temperatura do aço líquido (MOURÃO, 2007).

Tubo Longo: é uma manilha refratária encaixada na parte externa do sistema de válvula gaveta de uma panela de aço. Tem a função principal de transportar o aço líquido da panela siderúrgica para o distribuidor, sem que o aço entre em contato com a atmosfera, evitando assim a reoxidação do aço e conseqüentemente reduzindo a formação de inclusões auxiliando no aumento da qualidade do aço produzido (RIZZO, 2006).

Distribuidor: é um recipiente metálico revestido internamente por material refratário para suportar elevadas temperaturas. Possui como principais funções, segundo MOURÃO (2007), funcionar como um reservatório de aço líquido entre a panela siderúrgica e o molde, para que seja permitida a troca da panela siderúrgica sem que haja a interrupção da operação da máquina, e permitir a flotação de inclusões capazes de afetar as propriedades mecânicas do aço. Já RIZZO (2006) complementa que o distribuidor evita a contaminação do aço pelo ar atmosférico utilizando meios como pó de cobertura ou com a purga do distribuidor com argônio e/ou selagem das tubulações refratárias.

Válvula submersa: possui como finalidade conduzir o aço líquido proveniente do distribuidor para o molde. No contato formado pela conexão do tubo longo e o distribuidor é utilizado gás argônio, a fim de formar uma selagem, evitando o contato do aço líquido com o ar atmosférico (MOURÃO, 2007).

Molde: é considerado a parte mais importante do processo de lingotamento contínuo. Nele ocorre o início da solidificação do aço líquido proveniente do distribuidor, segundo MOURÃO (2007). O molde é o principal dispositivo responsável pela forma e dimensões da região transversal final do produto. A espessura mínima da pele solidificada depende da altura de coluna de metal líquido acima da posição de saída do molde, da velocidade de lingotamento, do tipo de aço que está sendo lingotado, do tipo de resfriamento e do tamanho do molde. Normalmente essa espessura gira em torno de 10 a 20 mm. As paredes do molde são normalmente confeccionadas utilizando o metal cobre com elevado grau de pureza de forma a conservar a sua elevada condutividade térmica, essencial para uma rápida transferência de calor para a água de resfriamento que circula pela face oposta à face na qual o molde está em contato com o aço em processo de solidificação (RIZZO, 2006).

Sprays de água: a região da máquina que possui bicos de *spray* denomina-se zona de resfriamento secundário ou resfriamento direto, pois a água está em contato

direto com o veio no processo de solidificação do aço. Há dois tipos básicos de resfriamento secundário. O primeiro é o chamado de resfriamento hidráulico, ou seja, pelos bicos do *spray* passa somente água para refrigerar o veio. No segundo tipo, chamado *air-mist*, e largamente utilizado pelas máquinas de lingotamento, ar e água são misturados, provocando a atomização da água, diminuindo o tamanho da gota, tornando mais eficiente a troca de calor com o veio (MOURÃO, 2007).

Rolos: existem seis tipos diferentes de rolos em uma máquina de lingotamento contínuo que são: rolos de pé, rolos de suporte, rolos extratores, rolos de desdobramento, *pinch rolls* e rolos de saída. Os rolos de pé são rolos de pequenos diâmetros, situados na saída do molde, para que a distância entre os centros de rolos seja a menor possível para evitar a abaulamento excessivo ou ruptura da pele solidificada. Os rolos de suporte servem para guiar e suportar o produto lingotado e a barra falsa do molde até os rolos extratores. Os rolos extratores servem para extrair o veio e introduzir/extrair a barra falsa. Os rolos de desdobramento do veio são utilizados para desempenar o produto lingotado e desconectar a barra falsa. Os *pinch rolls* são rolos motrizes utilizados para retirar a cauda de um veio e conduzi-la para o sistema de corte. Os rolos de saída são utilizados para deslocar os produtos lingotados que já foram cortados direcionando-os para a mesa de transferência (RIZZO, 2006).

Oxicorte ou guilhotinas: o corte dos produtos lingotados em comprimentos programados pelo planejamento da fábrica, conforme necessidade da laminação ou dos clientes consumidores de produtos semi-acabados, pode ser realizado basicamente com guilhotinas ou maçaricos. A perda de material no corte por maçaricos é maior do que no corte por guilhotinas, porém os maçaricos apresentam maior confiabilidade em termos de manutenção e precisão. A máquina de corte fica situada logo após o último rolo da máquina, ou seja, após os rolos de saída da máquina (RIZZO, 2006).

Segundo RIZZO (2006), os produtos finais do LC, figura 11, podem ser divididos em produtos planos (placa, placa fina, tira ou chapa) e produtos não-planos ou longos (bloco, tarugo e pré-forma).

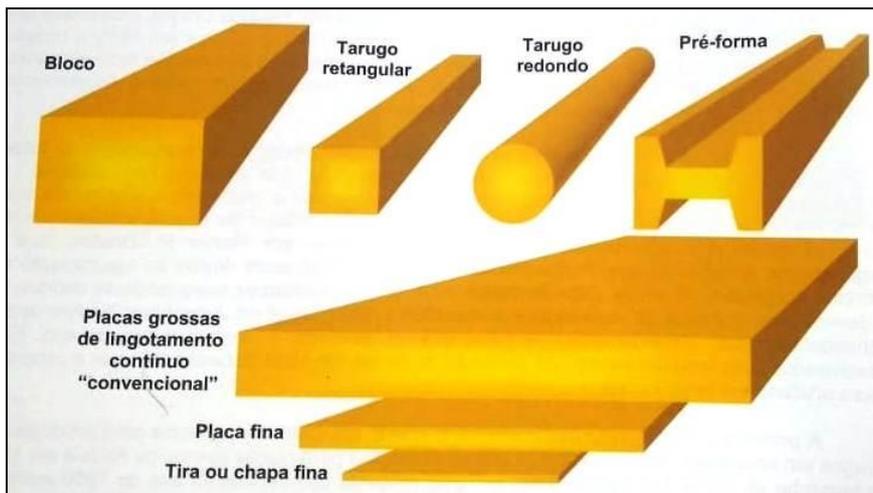


Figura 11. Representação esquemática das formas típicas da seção transversal dos produtos comuns do processo de lingotamento contínuo de aços. Fonte: adaptado de RIZZO, 2006.

RIZZO (2006) classifica alguns produtos planos e não-planos em termo de dimensões, conforme pode ser visto a seguir.

- Bloco: produto de seção quadrada com área acima de 22.500 mm^2 , correspondendo a um quadrado de 150 mm de aresta. A relação entre altura e espessura do bloco deve ser igual ou menor que 2;
- Tarugo: normalmente são lingotados até uma seção mínima de $75 \times 75 \text{ mm}$. O lingotamento de tarugos redondos é realizado em sua maior parte visando à laminação de tubos sem costura;
- Placas: lingotadas continuamente pelos processos convencionais, apresentam espessura na faixa de 200 a 400 mm e largura de 600 até 4000 mm;
- Placas finas: são lingotadas na faixa de 30 a 150 mm de espessura.

3.3. Escórias de Aciaria Elétrica

3.3.1. Conceito

As escórias são formadas durante o processo siderúrgico, onde separam-se do metal líquido por diferença de densidade. As escórias possuem diversas definições, como:

- Resíduo da fusão da carga metálica – sucata – e, posteriormente, do refino secundário do banho metálico, sendo formada por uma solução de mistura de óxidos, silicatos e, eventualmente, aluminatos, fosfatos e boratos, de menor densidade que o aço e imiscíveis (GEYER, 2002).
- Escórias são soluções iônicas consistindo de óxidos metálicos e fluoretos que flutam sobre a superfície do aço líquido, completa ou parcialmente líquidas (ABM- Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais, 2007).
- Escórias fundidas são de natureza iônica, consistindo de íons positivos (cátions) e íons negativos (ânions) (TURKDOGAN, 1996).

Dentre as principais funções da escória durante o processo de produção de aço, pode-se destacar, segundo PRETORIUS (1998):

- Isolar o banho metálico com o objetivo de reduzir as perdas de calor;
- Proteger o banho metálico da oxidação, absorção de hidrogênio e nitrogênio da atmosfera;
- Cobrir o arco elétrico tanto no forno elétrico quanto no forno-panela, promovendo a proteção do revestimento refratário;
- Aumentar a qualidade do aço através da incorporação de óxidos de impurezas durante o refino primário e produtos da desoxidação durante o refino secundário, além da absorção de inclusões.
- Participar efetivamente nos processos de desfosforação no FEA e de dessulfuração no forno-panela;
- Ser o mais compatível possível com a natureza do revestimento refratário.

Existem diversas propriedades das escórias que podem ser medidas, ou calculadas através de modelos matemáticos, segundo ALMEIDA (2016), entre elas estão:

- Densidade;
- Viscosidade;
- Condutividade térmica;
- Condutividade elétrica;

- Tensão interfacial entre escória e metal.

Todas essas propriedades dependem principalmente da composição química e temperatura do processo.

3.3.2. Geração da Escória na Aciaria Elétrica

A primeira escória a ser formada na aciaria elétrica é a escória oxidante formada no FEA. Essa escória é resultante da fusão de sucata e oxidação do banho formado juntamente com cales adicionadas no forno. Esta escória é caracterizada por promover o ajuste primário de composição química do aço líquido e contribuir, principalmente, para a desfosforação do banho metálico líquido.

No forno-panela há a formação de uma nova escória, chamada de escória redutora, que é gerada a partir da adição de cal e desoxidantes. Esta escória tem o objetivo de contribuir, principalmente, para a desoxidação e dessulfuração do banho metálico líquido.

A figura 12 ilustra o processo de geração de escória na produção de aço via aciaria elétrica.

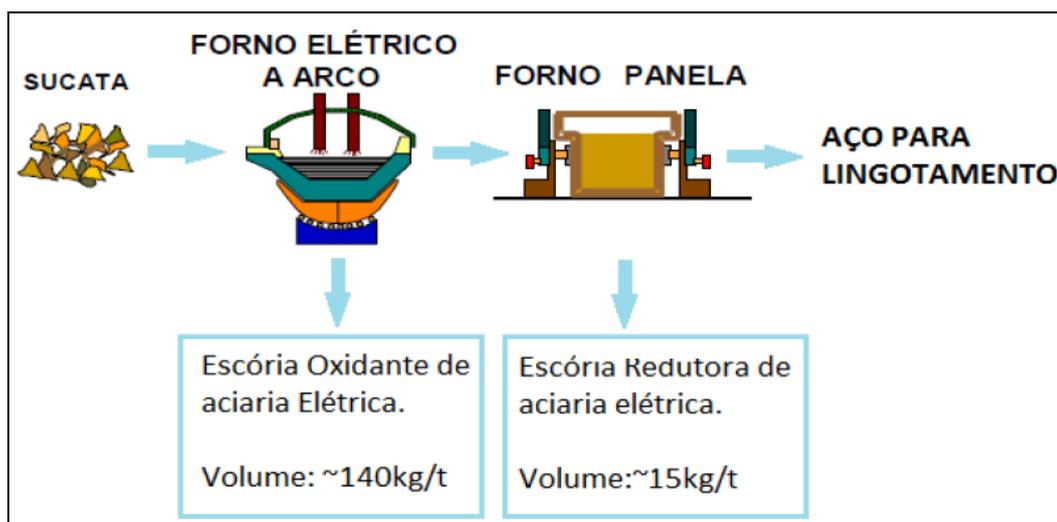


Figura 12. Ilustração do processo de geração de escória na produção de aço via aciaria elétrica. Fonte: adaptado de MASUERO *et al*, 2004.

A composição química das escórias é definida de acordo com o processo no qual está inserida. Escórias siderúrgicas são diferentes dependendo da etapa/processo, por

exemplo, escórias de refino primário, são diferentes de escórias de refino secundário, conforme a tabela 1, isso ocorre pela necessidade de propriedades diferentes requeridas em cada processo (ALMEIDA, 2016).

	FEA - Forno elétrico a arco (%)	FP - Forno- Panela (%)
CaO	25	55
SiO ₂	12	20
MgO	7	7,5
FeO	30	0,3
Al ₂ O ₃	7	15
MnO	7	1
P ₂ O ₅	0,5	0,1
S	0,2	0,4

Tabela 1. Composição química de escórias de diferentes processos siderúrgicos. Percentual em massa. Fonte: adaptado de ALMEIDA, 2016.

A tabela 1 mostra uma grande diferença entre as escórias, principalmente nos teores de CaO, SiO₂, FeO e Al₂O₃, que ocorrem pelas distintas características dos refinamentos. No caso do refino oxidante no FEA, tem-se um teor de FeO e MnO maiores do que no forno-panela, devido a grande oxidação do banho líquido. No caso do refino redutor no FP, tem-se valores mais altos de Al₂O₃ e SiO₂ que são utilizados na desoxidação do aço líquido (ALMEIDA, 2016).

Os óxidos observados na tabela 1 podem ser provenientes de diversas fontes. A tabela 2 mostra as possíveis origens dos principais óxidos e fluoretos formados durante o refino primário e secundário.

Óxidos	Origem
CaO	Cal (98% CaO)
	Dolomita ($\approx 58\%$ CaO e 39% MgO)
	Cálcio-Aluminatos ($\approx 45\%$ CaO e 53% Al_2O_3)
	Refratários dolomíticos
MgO	Dolomita ($\approx 58\%$ CaO e 39% MgO)
	Magnésia ($> 92\%$ MgO)
	Refratários magnésia-carbono e dolomíticos
SiO₂	Oxidação do Si na carga ($\underline{Si} + O_2 = SiO_2$)
	Desoxidação do aço ($2\underline{O} + \underline{Si} = SiO_2$)
	Areia e terra
	Refratários alta alumina
Al₂O₃	Oxidação da carga ($2\underline{Al} + 3/2O_2 = Al_2O_3$)
	Desoxidação do aço ($3\underline{O} + 2\underline{Al} = Al_2O_3$)
	Escória sintética Cálcio-Aluminatos ($\approx 45\%$ CaO e 53% Al_2O_3)
	Escória sintética Bauxita ($> 80\%$ Al_2O_3)
	Refratários alta alumina
FeO	Carga ($2Fe + O_2 = 2FeO$)
MnO	Carga ($2Mn + O_2 = 2MnO$)
	Desoxidação do aço ($Mn + O = MnO$)
CaF₂	Fluorita ($\approx 90\%$ CaF ₂)

Tabela 2. Origem dos óxidos e fluoretos formados durante o refino primário e secundário. Fonte: adaptado de PRETORIUS, 1998.

Os óxidos básicos, CaO e MgO, são importantes por protegerem os revestimentos refratários, já que são constituídas por óxidos básicos (MgO, MgO-C), evitando o consumo excessivo dos refratários. Estes óxidos também são responsáveis pela desfosforação. Além disso, a saturação da escória com esses óxidos é essencial para uma boa espumação (PRETORIUS; CARLISLE, 1998).

Além de a escória ser saturada em CaO/MgO, é importante o controle do teor dos outros óxidos, pois eles afetam a solubilidade do CaO e do MgO. Assim, trocando-se SiO₂ por Al₂O₃ aumenta-se a solubilidade de CaO, mas diminui-se a solubilidade do MgO. Adicionalmente, aumentando-se o teor de FeO na escória diminui-se a solubilidade do MgO, porém, tem efeito irrelevante na solubilidade do CaO (PRETORIUS; CARLISLE, 1998).

3.3.3. Propriedades físico-químicas das escórias de aciaria

Basicidade

Um dos principais controles que devem ser acompanhados durante todo o processo é a basicidade da escória. O conceito de basicidade da escória surgiu da observação do comportamento dos diferentes tipos de refratários em relação à escória utilizada. A noção de ácido e básico surgiu através da observação de que escórias ricas em sílica atacam os refratários dolomíticos, assim como as escórias compostas, em sua maior parte, por CaO e MgO são danosas á refratários silicosos (RIZZO, 2006b).

Geralmente, os óxidos constituintes da escória são classificados em ácidos, básicos e anfóteros (ácido ou básico dependendo do meio). Dentre os principais óxidos presentes na escória, podem-se citar alguns óxidos básicos, tais como CaO, MgO, MnO, Na₂O, K₂O; outros óxidos ácidos como SiO₂, P₂O₅, V₂O₅, B₂O₃ e, ainda, os óxidos anfóteros Al₂O₃, Cr₂O₃, TiO₂ (MASUERO, 2001).

Tal classificação é baseada na facilidade que um dado óxido possui em liberar seu íon oxigênio no banho metálico. Um óxido básico possui fraca atração de oxigênio e, com isso, tende a liberar seu íon no banho. O contrário ocorre com os óxidos ácidos que possuem uma forte atração de oxigênio e não tendem a liberar seu íon no banho (RIZZO, 2006b).

Os óxidos componentes da escória podem ser divididos em óxidos refratários (CaO e MgO), os quais ao serem adicionados aumentam a viscosidade da escória e, em óxidos fluxantes (SiO₂, Al₂O₃, FeO, MnO e CaF₂), os quais quando adicionados aumentam a fluidez da escória (para as escórias tipicamente encontradas na produção de aço via FEA) (PRETORIUS, 1998).

O conceito da basicidade da escória é uma tentativa de definir o equilíbrio entre os óxidos refratários e os óxidos fluxantes, sendo que a expressão mais utilizada é a proporção B2, que é a proporção em massa de CaO e de SiO₂ na escória (% CaO /% SiO₂). Além disso, outros índices utilizados para expressar a basicidade da escória são: B3 = CaO / (SiO₂+Al₂O₃); B4 = (CaO+MgO) / (SiO₂+Al₂O₃) e B5 = (CaO+MgO) / (SiO₂+Al₂O₃+CaF₂) (PRETORIUS, 1998).

Viscosidade

A viscosidade da escória é uma das variáveis de processo mais importantes. A resistência que se opõe ao fluxo de fluido é um fator significativo em muitos sistemas metalúrgicos, influenciando, por exemplo, a capacidade de retirar a escória do forno, a eficiência de separação do metal e da escória, o grau de espuma da escória, o desempenho do fluxo do lingotamento contínuo e cinética das reações do refino (KOZAKEVITH, 1959).

A fase de equilíbrio e o comportamento viscoso são determinados pela composição da escória, da pressão parcial de oxigênio e da temperatura. Na verdade, os componentes químicos, como SiO_2 e P_2O_5 (óxidos ácidos) apresentam uma forte ligação do oxigênio com o metal, fato que torna as escórias a base destes elementos altamente viscosas. Em um comportamento oposto, óxidos alcalinos e metais alcalinos terrosos, que são formados por ligações iônicas, constituem, portanto, líquidos de baixa viscosidade (DOS ANJOS, 2010).

Geralmente, quanto maior for a basicidade menor é a viscosidade de uma escória. Isso pode ser explicado pelo fato de que a sílica é formada por longas cadeias moleculares de silicatos $(\text{SiO}_4)^{-4}$ e a presença de CaO promove a quebra dessas cadeias através da formação de íons Ca^{+2} e O^{-2} , resultando no aumento da fluidez da escória. O MgO atua no mesmo sentido e o flúor, adicionado na forma de fluorita (CaF_2), também reduz a viscosidade, uma vez que, tal elemento atua de forma similar que os íons de oxigênio na quebra das cadeias de silicatos (RIZZO, 2006b).

Tensão Superficial

A tensão superficial da mistura de óxidos, que é definida como a força linear específica que age na interface da escória e do metal, segundo GEMO (2003), pode ser expressa pela equação 1. A tensão superficial atua na molhabilidade da escória do FEA, sendo um dado importante na avaliação do consumo de refratário (PRETORIUS, 1998).

$$\sigma = 754,24 - 569,4 (\% \text{SiO}_2/100) - 137,13 (\% \text{FeO}/100) \quad (1)$$

As relações entre índice de espumação e tensão superficial foram apresentadas em um estudo realizado por Skupien, figura 13, onde mostra que, com o aumento da temperatura, o índice de espumação e a tensão superficial decaem. Além disso, com o decréscimo da tensão superficial, a escória tem um maior índice de espumação

(SKUPIEN, 2000).

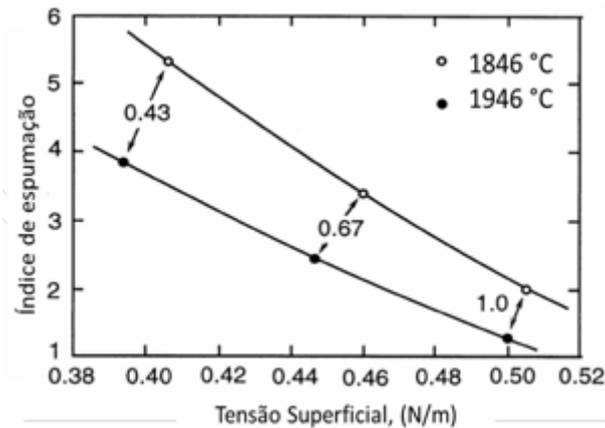


Figura 13. Influência da temperatura na tensão superficial e no índice de espumação.
Fonte: Adaptado de SKUPIEN, 2000.

3.4. Balanço de Massa de Aço no FEA

Denomina-se como balanço de massa o estudo comparativo entre os materiais de entradas e saídas do forno elétrico. Os objetivos do balanço são, por exemplo, a determinação das reações metalúrgicas (C, Si, Mn, Fe), a massa de ar infiltrado e a saída de gases em adição a dados bem conhecidos tais como carga metálica, consumo de eletrodo, produtividade, escória (VIEIRA, 2017).

O balanço de massa torna-se uma importante ferramenta em técnicas de otimização de escória uma vez que o mesmo pode ser usado para aproximar a composição da escória do FEA, dando ao aciarista condições de ajuste dos escorificantes, fluxo de oxigênio e carbono que resulte em uma escória objetivada (PRETORIUS, 1998).

Na utilização do balanço de massa, segundo PRETORIUS (1998), é importante considerar todas as contribuições para a escória do FEA, como:

- Escória residual do FEA
- O conteúdo de Si e Al da sucata;
- A quantidade de impureza (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO e MgO) vinda da sucata;
- O percentual de oxidação da Sucata (enferrujada);
- A composição de todos os escorificantes adicionados (Cal calcítica e cal dolomítica).

- A quantidade de escória que é perdida durante as operações de espumação.

A Figura 14 ilustra o resultado do balanço de massa médio de 31 corridas, realizado por PFEIFER e KIRSCHEN (2005), para um forno elétrico de 100 t de capacidade, energia específica de 450 kVA/t, um consumo de oxigênio, grafita e gás natural relativamente alto.

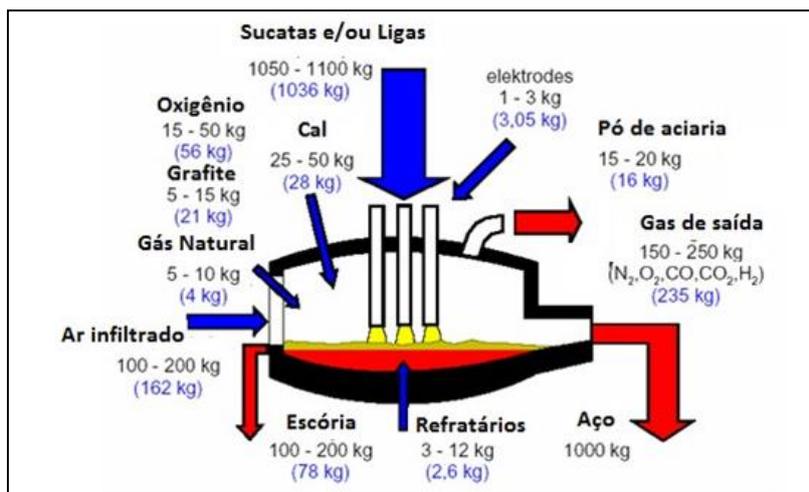


Figura 14. Balanço de massa médio de 31 corridas para um forno elétrico com capacidade para 100 toneladas. Adaptado de DOS ANJOS, 2010.

Estes resultados são baseados em balanços de massa de carbono (medição da saída de gases), nitrogênio (infiltração de ar) e CaO (massa de escória), conforme mostra a equação 2:

$$X_{CaO,Cal} M_{CaO} + X_{CaO,Refratário} M_{Refratário} = X_{CaO,Escória} M_{Escória} + X_{CaO,Pós} M_{Pós} \quad (2)$$

Onde:

X = Teor de CaO e M = Massa de CaO.

Os valores de $M_{CaO,Cal}$, $M_{CaO,pós}$ e $X_{CaO,Refratário}$, são conhecidos à partir de análises químicas das amostras. Os valores de $M_{Refratário}$ e $M_{Pós}$ são conhecidos a partir de dados estatísticos e M_{Cal} é um parâmetro do processo. A composição da cal da escória $X_{CaO,Escória}$ é determinada à partir de amostras de escórias retiradas no vazamento a cada corrida (PFEIFER e KIRSCHEN, 2005).

Para o balanço de massa do metal no FEA, equação 3, leva-se em consideração a entrada de sucata, ligas e cal em relação a saída de aço, escória e pó de aciaria.

$$X_{Ele,Suc} M_{Suc} + X_{Ele,Liga} M_{Liga} + X_{Cal} M_{Cal} = X_{Ele,Suc+Liga+Cal} M_{Aço} + X_{Ele,Suc+Liga+Cal} M_{Escó} +$$

$$X_{\text{Ele,Suc+Liga+Cal}} M_{\text{Pó}} \quad (3)$$

Onde:

X_{Ele} = Teor de Elementos, M_{Suc} = Massa de Sucata, M_{Liga} = Massa de Ligas, M_{Cal} = Massa de Cal, $M_{\text{Aço}}$ = Massa de Aço, $M_{\text{Escó}}$ = Massa de Escória, $M_{\text{Pó}}$ = Massa de Pó de Aciaria.

Os valores M_{Suc} , M_{Liga} , M_{Cal} , $M_{\text{Aço}}$, $M_{\text{Escó}}$, $M_{\text{Pó}}$ são conhecidos através da pesagem desses materiais. Os valores $X_{\text{Ele,Liga}}$, X_{Cal} , $X_{\text{Ele,Suc+Liga+Cal}}$ são conhecidos à partir de análises químicas de amostras. O valor $X_{\text{Ele,Suc}}$ é conhecido a partir de dados estatísticos e é um dos objetivos de estudo desse trabalho.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo irá descrever as principais características dos equipamentos e materiais utilizados e também mostrará fluxogramas para melhor entendimento da metodologia adotada para a realização do trabalho.

A figura 15 mostra o fluxograma geral da metodologia utilizada nesse trabalho.

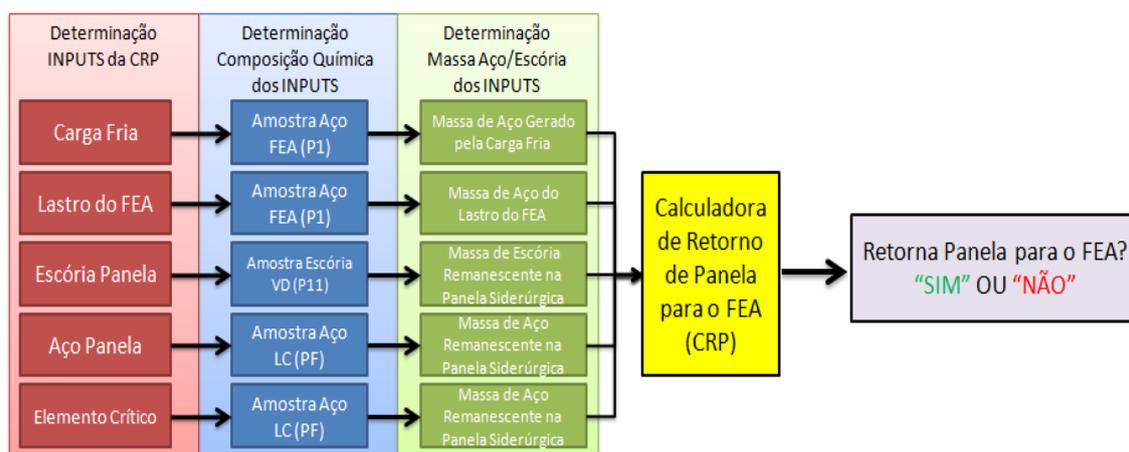


Figura 15. Fluxograma geral da metodologia utilizada no presente trabalho. Fonte: (O AUTOR).

O fluxograma mostrado na figura 15 detalha como os *inputs* da calculadora de retorno de painéis (CRP), como carga fria, lastro do FEA, escória remanescente da panela siderúrgica, aço remanescente da panela siderúrgica e os elementos críticos, são determinados e também mostra como são determinados a composição química dos inputs e a determinação da massa de aço e escória dos *inputs* da CRP. Também ressalta que o resultado da CRP possui uma etapa de análise do resultado para então ser definido se ocorrerá, ou não, o retorno da panela siderúrgica para o FEA.

4.1. Equipamentos Utilizados

Foram utilizados os seguintes equipamentos:

Forno Elétrico a Arco - FEA

O FEA da Gerdau Charqueadas, figura 16, é do fabricante VAI-FUCKS, possui

capacidade de 70 toneladas e utiliza canal de vazamento do tipo EBT. Para a fusão da carga, conta com 3 eletrodos de grafita com 500 mm de diâmetro cada. Para auxiliar a fusão da carga no FEA, é utilizado o sistema COJET que é um sistema de injeção de oxigênio, carbono e gás natural (BIELEFELDT, 2005).



Figura 16. FEA da Gerdau Charqueadas. Fonte: Cortesia da Gerdau Charqueadas (2018).

Lingotamento Contínuo - LC

O processo de lingotamento contínuo já foi melhor explicado no capítulo 3.2.5. Aqui teremos uma breve descrição da máquina de lingotamento contínuo da Gerdau Charqueadas. A máquina de lingotamento contínuo da Gerdau Charqueadas, figura 17, é do fabricante Concast e possui 3 veios de lingotamento de seção transversal 155 mm e/ou 240 mm com raio de máquina de 9 m. O corte dos tarugos é feito por oxicorte com comprimento mínimo de 5500 mm e máximo de 8300 mm para seção 155 mm e mínimo de 4700 mm e máximo de 8300 mm para seção 240 mm. Nesta estação de trabalho é realizado à retirada da prova final da composição química do aço no distribuidor (LIZE, 2016).



Figura 17. Lingotamento contínuo da Gerdau Charqueadas. Fonte: Cortesia da Gerdau Charqueadas (2018).

Panela Siderúrgica

A panela siderúrgica possui como função, em uma aciaria elétrica, o transporte de aço líquido a partir do FEA. A Gerdau Charqueadas conta com 8 panelas siderúrgicas com capacidade de 65 toneladas cada. As panelas siderúrgicas são revestidas com tijolos refratários de magnésia-carbono (MgO-C), possuem uma válvula do tipo gaveta e *plug* poroso para rinsagem, com Ar ou N₂, centralizado no fundo da panela siderúrgica.

A figura 18 mostra a comparação entre os ciclos da panela siderúrgica antes e depois da implementação da metodologia do presente trabalho na aciaria da Gerdau Charqueadas.

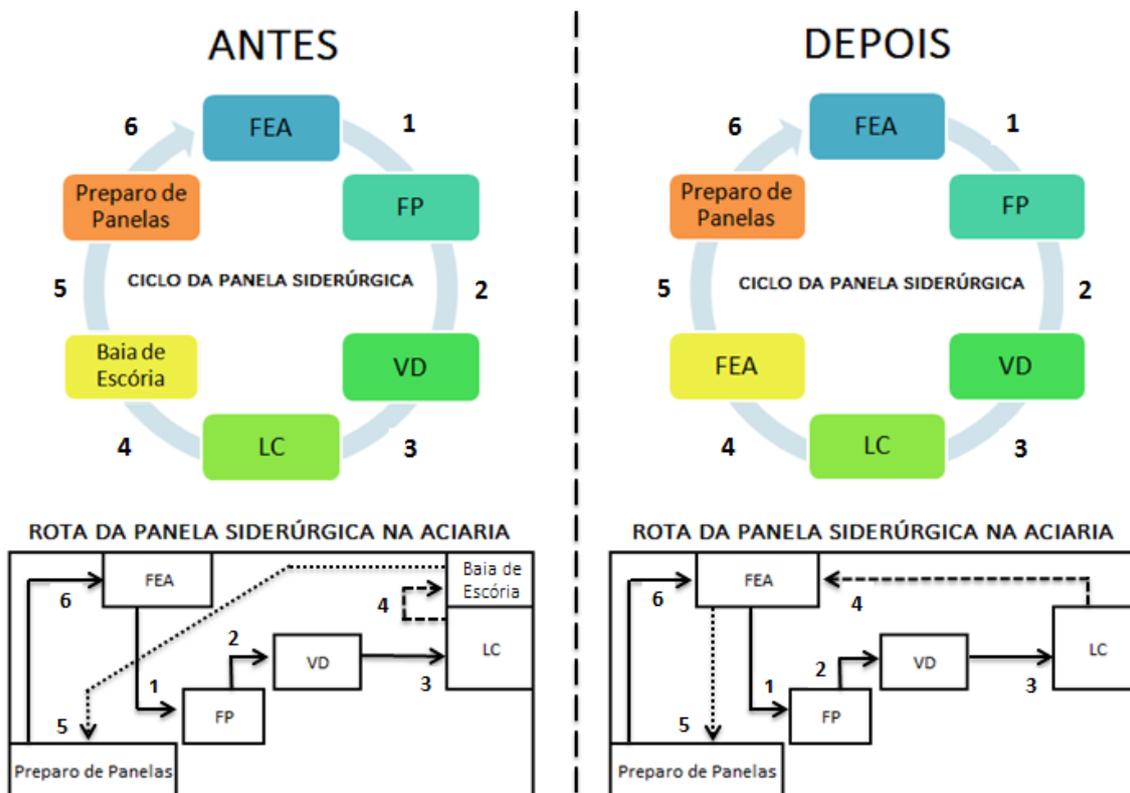


Figura 18. Comparação entre os ciclos da panela siderúrgica antes e depois da implementação do presente trabalho e representação esquemática da movimentação das panelas siderúrgicas na aciaria da Gerdau Charqueadas. Fonte: (O AUTOR).

A principal diferença entre os dois ciclos, mostrado pelo trajeto 4 da figura 18, é que ao invés da panela siderúrgica sair do LC e ser transportada para virar o aço e escória remanescentes na baia de escórias, a panela passou a seguir o trajeto do LC diretamente para o FEA para realizar a virada do aço e escória remanescentes na panela siderúrgica.

Pontes Rolantes

As pontes rolantes, figura 19, possuem como principal função o transporte das panelas siderúrgicas. As pontes rolantes também executam outras funções como, carregamento de sucata, transporte dos cestões de sucatas, abastecimento dos silos de ligas, troca de distribuidores, entre outras funções. A Aciaria da Gerdau Charqueadas possui 9 pontes rolantes, sendo que apenas 2 foram utilizadas para a execução desse trabalho, pois são as 2 pontes que fazem as movimentações da panela siderúrgica entre o FEA e o LC. As duas pontes utilizadas, CD1 e CD2, são do fabricante Barbarella com

capacidades de 105 t e 120 t respectivamente.



Figura 19. Ponte rolante, CD2, da aciaria da Gerdau Charqueadas. Fonte: Cortesia da Gerdau Charqueadas (2018).

Espectrômetros

O Laboratório Químico da Gerdau Charqueadas é equipado com 2 espectrômetros específicos para a análise química das amostras de aço e de escória do processo da aciaria. Os espectrômetros utilizados nesse trabalho serão especificados logo a seguir.

Espectrômetro para Análise de Aço

As amostras de aço retiradas do FEA, FP, VD e LC são analisadas em um espectrômetro de emissão ótica da marca Thermo modelo ARL4460, Figura 20. O espectrômetro de emissão ótica é um equipamento que possui a capacidade de efetuar análises químicas multielementares em um pequeno período de tempo.

O princípio de funcionamento de um espectrômetro de emissão ótica é o seguinte: a passagem de uma centelha elétrica entre o eletrodo e a amostra fornece energia necessária para que os elétrons da amostra sejam excitados e se desloquem para uma camada mais energética. Ao retirar a fonte de excitação, os elétrons retornam para a camada energética inicial, e acabam emitindo energia em forma de luz e com determinado comprimento de onda. O elemento é identificado através do comprimento de onda, e a quantidade do elemento presente na amostra é dada pela intensidade da linha espectral emitida (BREHM, 1999).



Figura 20. Espectrômetro de emissão ótica Thermo modelo ARL4460. Fonte: Cortesia da Gerdau Charqueadas (2018).

Espectrômetro para Análise de Escória

As amostras de escória retiradas do FEA, FP e VD são analisadas em um espectrômetro de emissão de raio-X da marca Philips modelo PW-2600, Figura 21. Esse espectrômetro utiliza a técnica de espectroscopia por fluorescência de raios-X (FRX) que é uma técnica não destrutiva e de rápida realização de ensaio.

O princípio de funcionamento da espectroscopia por fluorescência de raios-X (FRX) é o seguinte: a amostra é bombardeada por uma fonte de radiação (raios-X) que provoca a excitação dos elétrons levando-os a níveis mais energéticos (estado excitado). Quando ocorre o decaimento de elétrons do estado excitado para seu estado normal há a liberação de energia com determinado comprimento de onda específico que permite identificar os elementos presentes em uma amostra assim como estabelecer a proporção em que cada elemento se encontra presente na amostra (TOLEDO, 2003).



Figura 21. Espectrômetro de emissão de Raio-X Philips modelo PW-2600. Fonte: Cortesia da Gerdau Charqueadas (2018).

4.2. Materiais Utilizados

Durante o período de utilização da CRP, foram avaliadas 1635 corridas, de agosto a outubro de 2018, e utilizadas 232 qualidades diferentes de aços, divididos em: aço carbono, aço baixa liga e aço alta liga. Nenhuma restrição de composição química foi imposta durante o período de utilização da CRP.

Segundo AGGEN et. al. (2005) pode-se classificar os aços carbono, baixa liga e alta liga baseados em sua composição química, conforme a seguir:

- Aço Baixo Carbono: $< 0,2\% \text{ C}$
- Aço Médio Carbono: $< 0,2 - 0,5\% \text{ C}$
- Aço Alto Carbono: $> 0,5\% \text{ C}$
- Aço Baixa Liga: $\leq 8\%$ de elementos de liga
- Aço Alta Liga: $> 8\%$ de elementos de liga

4.3. Método Utilizado

O desenvolvimento da metodologia para aumentar o reaproveitamento de aço e escória remanescentes da panela siderúrgica em forno elétrico a arco foi baseado no balanço de massa do FEA, porém com algumas simplificações, como a não utilização do balanço dos gases envolvidos no processo de um FEA.

O método escolhido foi o desenvolvimento de uma calculadora que pudesse informar aos operadores da cabine do FEA se a qualidade de aço que foi lingotada no LC poderá retornar para o FEA sem que ocorram prejuízos à qualidade do aço que está no FEA, vide figura 22.

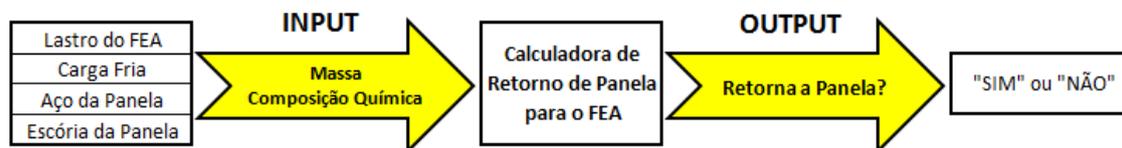


Figura 22. Fluxo de *inputs* e *outputs* da calculadora de retorno de panela para o FEA. Fonte: (O AUTOR).

A seguir estão descritos os métodos utilizados na aquisição dos dados para o desenvolvimento da metodologia.

4.3.1. Seleção dos Elementos Críticos

Os elementos críticos selecionados para a calculadora de retorno de panelas foram baseados nos elementos químicos analisados nas amostras de aço e escória da aciaria, conforme capítulo 4.3.2. Os elementos químicos definidos como críticos são o Cr, S, Ni, Mo, W, Co, Sn, Cu, Pb e Zn. Esses elementos foram escolhidos por base no diagrama de Ellingham para óxidos, figura 23, e também por pedidos da operação do FEA.

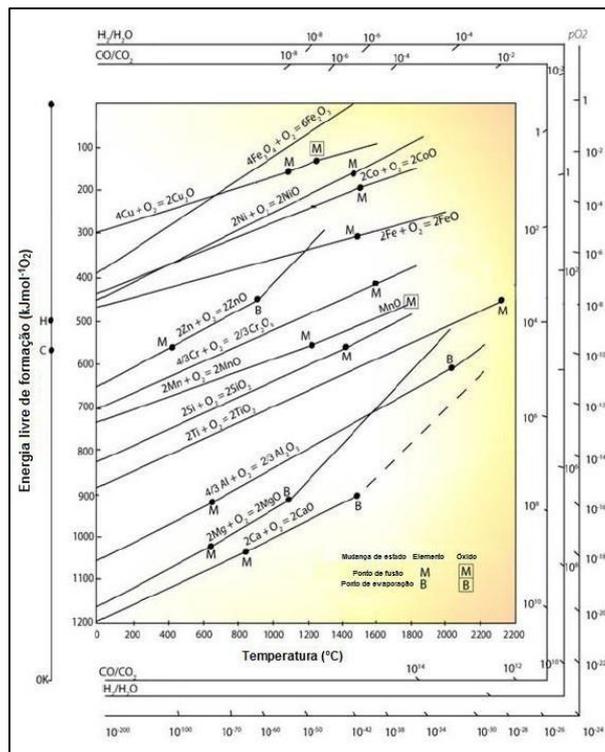


Figura 23: Diagrama de Ellingham para Óxidos. Fonte: adaptado de GASKELL, 1973.

Por análise ao diagrama de Ellingham, figura 23, os elementos S, Ni, Mo, W, Co, Sn, Cu e Pb são elementos que tendem a se manter dissolvidos no aço líquido, pois a oxidação do ferro é preferencial. É possível que ocorra a oxidação desses elementos no FEA, porém não é uma prática viável, visto que a reação de oxidação do Fe para óxido de ferro (FeO) ocorre preferencialmente, para qualquer temperatura, à oxidação desses elementos. Logo pode-se dizer que praticamente todo Fe do banho seria transformado em FeO, e migrado para escória, antes que ocorresse a oxidação desses elementos, tornando assim inviável a fabricação de aço via forno elétrico a arco.

O Zn é preferencialmente oxidado em relação ao Fe até a temperatura de aproximadamente 1200°C. Porém, de 1200 até aproximadamente 1300°C, o Fe torna-se preferencialmente oxidável em relação ao Zn. Por esse motivo o Zn está classificado como elemento crítico na calculadora de retorno de panelas.

O Cr é um elemento preferencialmente oxidável em relação ao Fe em qualquer temperatura, logo ele não deveria ser classificado como um elemento crítico. Porém, esse elemento foi selecionado como crítico, pois um alto teor de Cr no banho leva ao aumento do teor de óxido de cromo (III) (Cr_2O_3) na escória durante o refino oxidante. Durante o vazamento do FEA há uma pequena passagem de escória para a panela

siderúrgica, levando a uma posterior reversão de Cr da escória para o banho no FP, podendo, eventualmente, tirar a composição química, em relação ao Cr, fora da faixa especificada pelo cliente.

4.3.2. Obtenção das Amostras de Aço e Escória

As amostras possuem como objetivo a verificação da composição química do aço e da escória ao longo do processo de uma aciaria elétrica para que se possa manter o controle da composição química dentro do especificado pelo cliente. As amostras são encaminhadas ao Laboratório Químico através do correio pneumático. A figura 24 mostra a sequência de obtenção das amostras de aço e escória na Aciaria da Gerdau Charqueadas.

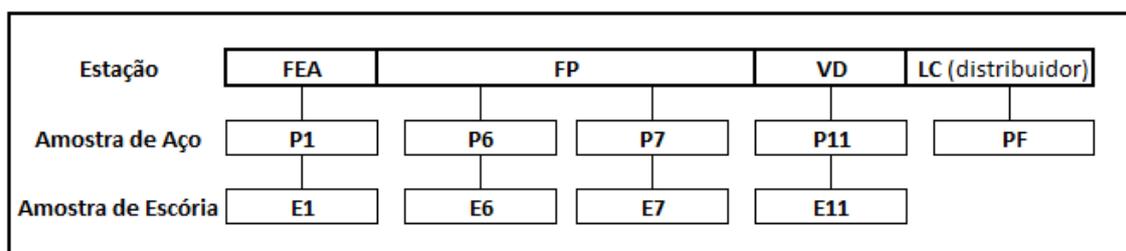


Figura 24. Esquema da sequência de obtenção das amostras de aço e escória na Aciaria da Gerdau Charqueadas. Fonte: (O AUTOR).

No final do refino do FEA, são retiradas as amostras de aço (P1) e escória (E1) para que se possa liberar a corrida para o FP. Na chegada da panela siderúrgica ao FP, são retiradas as amostras de aço (P6) e escória (E6) e ao final do refino do FP são retiradas as amostras de aço (P7) e escória (E7) para que se possa liberar a corrida para o VD. As amostras de aço (P11) e escória (E11) são retiradas no VD após o tempo de degaseificação. A última amostra de aço (PF) é retirada no distribuidor do LC. A última amostra de escória do processo é a E11 do FP.

Os elementos analisados em qualquer amostra de aço da aciaria, figura 25, são: C, Si, Mn, P, S, Cr, Ni, Mo, W, Co, V, Ti, Al, Sn, Cu, Pb, B, Nb, Bi, Ca, Zr, Zn, As, Sb, Te, Se e Fe.



Figura 25. Amostra de aço retirada do FEA. Fonte: cortesia da Gerdau Charqueadas.

Os compostos analisados em qualquer amostra de escória da aciaria, figura 26, são: CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , FeO , MnO , Cr_2O_3 , P_2O_5 , CaF_2 , TiO_2 , V_2O_5 , K_2O , Na_2O e o elemento S.

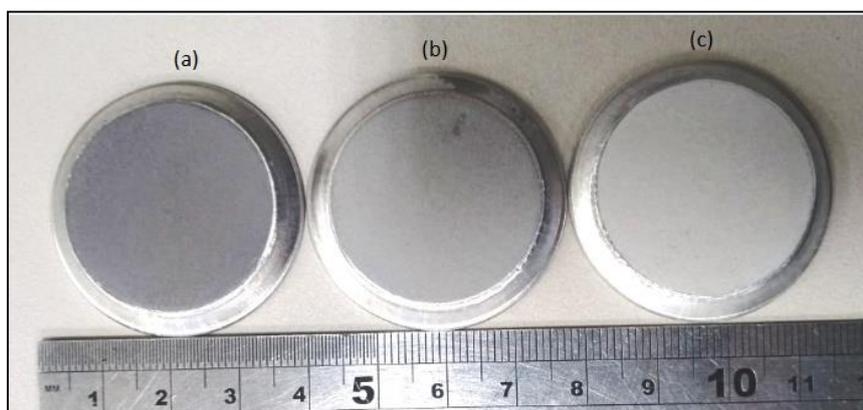


Figura 26. Amostras processadas de escória retiradas de: (a) FEA, (b) FP, (c) VD. Fonte: cortesia da Gerdau Charqueadas.

4.3.3. Obtenção da Massa e da Composição Química do Lastro do FEA

Massa do Lastro do FEA

Após a corrida de secagem do FEA, corrida que antecede uma parada programada da aciaria, o lastro do FEA foi vazado para uma panela siderúrgica e realizado a pesagem da massa do lastro do FEA através das células de carga do carro de transferência de painelas. O teste teve como objetivo validar o peso de lastro informado

pelos operadores do FEA, visto que a verificação da massa de lastro é feita por inspeção visual, corrida a corrida, pelos operadores do FEA.

Composição Química do Lastro do FEA

A análise da composição química do lastro do FEA é feita por um espectrômetro de emissão ótica, conforme apresentado no capítulo 4.1, na amostra de aço P1 do FEA.

4.3.4. Estimativa da Massa e da Composição Química do Aço gerado a partir da Carga Fria do FEA

Estimativa da Massa de Aço gerada a partir da Carga Fria do FEA

A quantidade total de sucata carregada no FEA é informada, através de um computador situado na cabine de controle do FEA, pelo software Cargas Frias desenvolvido pela Convolve Engenharia. A massa de aço formada a partir da sucata carregada no FEA é estimada pelo produto do total de sucata carregado no FEA com o rendimento metálico do FEA, conforme mostrado na equação 4.

$$M_{Carga\ Fria}^{aço} = M_{Sucata\ FEA}^{Total} \times Rendimento_{FEA} \quad (4)$$

Estimativa da Composição Química do Aço formado a partir da Carga Fria do FEA

A partir do banco de dados da aciaria da Gerdau Charqueadas, foram separadas as composições químicas das amostras de aço P1 de 4903 corridas do FEA, representando 8 meses de produção da aciaria. A aciaria da Gerdau Charqueadas possui atualmente 26 grupos de carga fria do FEA que apresentam faixas de composição químicas distintas entre si. Os dados das 4903 corridas do FEA foram divididos entre os períodos de fevereiro a julho, março a agosto, abril a setembro e subdivididos entre os elementos críticos Cr, S, Ni, Mo, W, Co, Sn, Cu, Pb e Zn para cada um dos 26 grupos de carga fria do FEA.

Através do programa Microsoft Excel, versão 2013, foi utilizado o valor do terceiro quartil (Q3) do método de estatística descritiva chamado *boxplot* para determinar um valor válido da porcentagem dos elementos críticos Cr, S, Ni, Mo, W,

Co, Sn, Cu, Pb e Zn nas cargas frias do FEA.

O *boxplot* ou diagrama de caixa é uma ferramenta gráfica que permite visualizar a distribuição e valores discrepantes (*outliers*) dos dados, fornecendo assim um meio complementar para desenvolver uma perspectiva sobre o caráter dos dados. Além disso, o *boxplot* também é uma disposição gráfica comparativa (REIS, E.A., REIS I.A., 2002). Segundo GUIMARÃES (2008), as medidas descritivas de variáveis quantitativas fornecidas por um *boxplot*, figura 27, são:

- Primeiro Quartil (Q1): representa o ponto em que 25% dos dados estão abaixo dele.
- Mediana (Q2): é o valor médio dos dados em que metade dos pontos estão acima e a metade está abaixo desse valor.
- Terceiro Quartil (Q3): representa o ponto em que 75% dos dados estão abaixo dele.
- Limite Inferior (LI): é uma barreira de *outliers*, o limite inferior é igual a $Q1 - 1,5 * (Q3-Q1)$.
- Limite Superior (LS): é uma barreira de *outliers*, o limite superior é igual a $Q3 + 1.5 * (Q3-Q1)$.
- *Outlier*: são pontos que ficam fora dos limites inferior e superior, podem representar erros no processo de coleta ou de processamento dos dados, e, nesse caso, devem ser corrigidos ou excluídos do banco de dados.

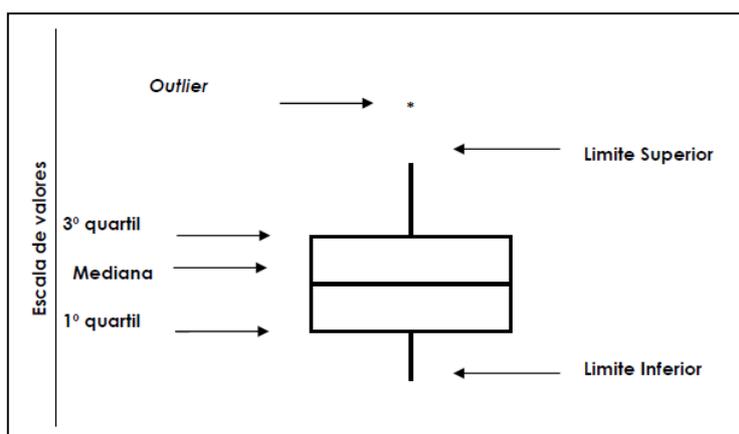


Figura 27. Representação esquemática de um *boxplot*. Fonte: adaptado de REIS, E.A., REIS I.A., 2002.

4.3.5. Obtenção da Massa de Aço e Escória Remanescentes na Painela Siderúrgica

Massa de Aço e Escória Remanescentes na Painela Siderúrgica

Foram realizados 2 testes para quantificação da massa de aço e escória remanescentes na painela siderúrgica, que serão descritos a seguir.

Para a realização do Teste 1, após término do lingotamento contínuo, foram vazados o aço e escória remanescentes na painela siderúrgica de 16 corridas em sequência no portão A12 (baía de escória) da Aciaria da Gerdau Charqueadas. Para o Teste 2, realizado em outra data, foi utilizado o mesmo procedimento do Teste 1, porém foram utilizados 23 corridas em sequência.

Para o processamento individual dos Testes 1 e 2, foi utilizada uma estação separadora de aço e escória situada no pátio de sucatas da Gerdau Charqueadas, porém pertencente a uma empresa terceirizada. Na estação separadora, é feita a fragmentação do material em menores tamanhos separando o material magnético (aço) do material não magnético (escória). Os materiais separados foram individualmente colocados no caminhão de movimentação do pátio de sucatas e pesados na balança de movimentação interna do pátio de sucatas.

4.3.6. Obtenção da Composição Química de Aço e Escória Remanescentes na Painela Siderúrgica

Composição Química do Aço Remanescente na Painela Siderúrgica

A composição química do aço remanescente da painela siderúrgica é obtida através da análise por espectrometria de emissão ótica, conforme descrito no capítulo 4.1, da amostra PF retirada no distribuidor do LC. O resultado da análise da amostra de aço é verificado em um computador na cabine do FEA através do Sistema de Transmissão de Provas (STP) conforme a figura 28.

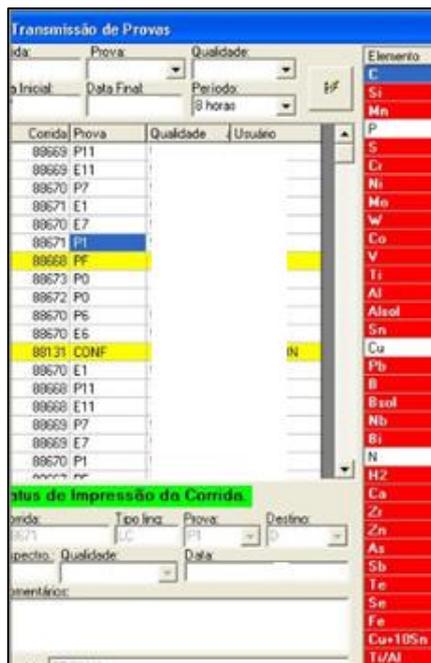


Figura 28. Sistema de Transmissão de Provas (STP) para verificação da composição química das amostras de aço. Fonte: Cortesia da Gerdau Charqueadas (2018).

Composição Química da Escória Remanescente na Panela Siderúrgica

A composição química da escória remanescente da panela siderúrgica é obtida através da análise por espectroscopia por fluorescência de raios-X, conforme descrito no capítulo 4.1, da amostra E11 retirada no VD. O resultado da análise da amostra de escória é verificado em um computador na cabine do FEA através do Sistema de Transmissão de Provas (STP) conforme a figura 29.

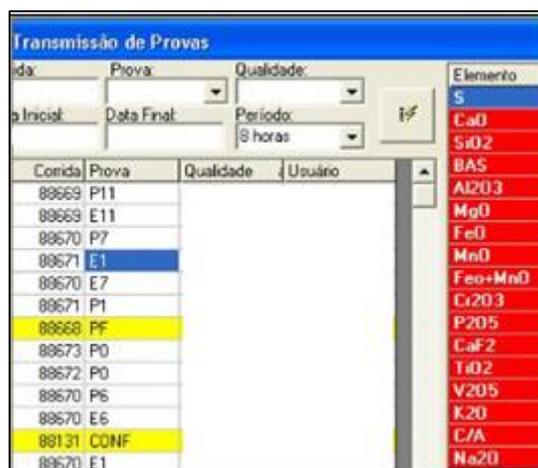


Figura 29. Sistema de Transmissão de Provas (STP) para verificação da composição química das amostras de escória. Fonte: Cortesia da Gerdau Charqueadas (2018).

4.4. Calculadora de Retorno de Painelas para o FEA

A figura 30 mostra a interface da calculadora de retorno de painelas para o FEA, desenvolvida com o programa Microsoft Excel, onde o operador da cabine do FEA deve inserir as informações necessárias para que a calculadora retorne um resultado estimado da porcentagem do elemento químico crítico selecionado.

CALCULADORA DE RETORNO DE PAINELAS PARA O FEA						
ELEMENTO CRÍTICO	CARGA NO FEA	Faixa do Elemento(%)	P1(%)	PF(%)	E11(%)	Lastro (t)

Pode voltar?	Resultado
Inserir Informações	Aguardando Resultado

Figura 30. Interface da Calculadora do Retorno de Painelas para o FEA. Fonte: (O AUTOR).

As informações necessárias para o funcionamento da calculadora são:

- Elemento Crítico: Elemento químico que poderá ser prejudicial à composição química da corrida que está no FEA.
- Carga no FEA: Tipo de carga fria que está sendo utilizado para a corrida que está no FEA.
- Faixa do Elemento: Porcentagem máxima do elemento crítico, especificado pelo cliente, da corrida que está no FEA.
- P1: porcentagem do elemento crítico da amostra P1 da última corrida do FEA, pois esse irá informar a composição química do lastro.
- PF: Porcentagem do elemento crítico da amostra PF do distribuidor do LC, pois esse irá informar a composição química do aço remanescente na panela siderúrgica que poderá retornar para o FEA.
- E11: Porcentagem do composto químico da amostra 11 da corrida que irá voltar ao FEA.
- Lastro: massa de lastro verificado pelo operador a partir da inspeção visual do FEA.

- As informações retornadas pela calculadora são:
- Pode Voltar?: Retorna uma resposta "SIM" ou "NÃO" indicando se é possível ou não retornar a panela para o FEA.
- Resultado: Retorna um valor esperado para a porcentagem do elemento crítico ao final da corrida do FEA.

4.4.1. Balanço de Massa da Calculadora de Retorno de Painelas para o FEA

A calculadora utiliza o princípio do balanço de massa para fornecer um resultado aproximado da porcentagem do elemento crítico ao final da corrida do FEA. A equação 5 mostra como esse resultado é obtido.

$$CQ_{Final}^{Elemento} = \left(\frac{M_{Lastro}^{Elemento} + M_{CF}^{Elemento} + M_{Panela}^{Elem.Aço} + M_{Panela}^{Elem.Escória}}{M_{Lastro} + M_{Carga\ Fria}^{aço} + M_{Panela}^{aço}} \right) \times 1000 \quad (5)$$

Onde:

$CQ_{Final}^{Elemento}$ = resultado aproximado da porcentagem do elemento crítico ao final da corrida do FEA.

Para calcular a quantidade de elemento crítico no lastro do FEA, utiliza-se a equação 6.

$$M_{Lastro}^{Elemento} = M_{Lastro} \times P1 \quad (6)$$

Onde:

M_{Lastro} : massa do lastro do FEA, vide capítulo 5.1.1.

$P1$: porcentagem do elemento crítico na amostra P1.

Para calcular a quantidade de elemento crítico na carga fria do FEA, utiliza-se a equação 7.

$$M_{CF}^{Elemento} = M_{Carga\ Fria}^{aço} \times \%_{Carga\ Fria}^{Elemento} \quad (7)$$

Onde:

$M_{Carga\ Fria}^{aço}$: conforme a equação 4, vide capítulo 4.3.4.

$\%_{Carga\ Fria}^{Elemento}$: porcentagem do elemento crítico na carga fria do FEA.

Para calcular a quantidade de elemento crítico do aço remanescente da panela

siderúrgica, utiliza-se a equação 8.

$$M_{\text{Panela}}^{\text{Elem.Aço}} = M_{\text{Panela}}^{\text{aço}} \times PF \quad (8)$$

Onde:

$M_{\text{Panela}}^{\text{aço}}$: massa de aço remanescente na panela siderúrgica, vide tabela 7.

PF : porcentagem do elemento crítico na amostra PF.

Para calcular a quantidade de elemento crítico da escória remanescente da panela siderúrgica, utiliza-se a equação 9.

$$M_{\text{Panela}}^{\text{Elem.Escória}} = M_{\text{Panela}}^{\text{escória}} \times E11 \times \%_{\text{Composto Escória}}^{\text{elemento}} \quad (9)$$

Onde:

$M_{\text{Panela}}^{\text{escória}}$: massa de escória remanescente na panela siderúrgica, vide tabela 7.

$E11$: porcentagem do elemento crítico na amostra E11.

$\%_{\text{Composto Escória}}^{\text{elemento}}$: porcentagem do elemento crítico nos compostos da escória informado na tabela 3.

COMPOSTO	ELEMENTO	ELEMENTO (%)
Al ₂ O ₃	Al	0,36
Cr ₂ O ₃	Cr	0,68
MnO	Mn	0,77
P ₂ O ₅	P	0,44
SiO ₂	Si	0,47
TiO ₂	Ti	0,57
V ₂ O ₅	V	0,39
DEMAIS	-	1

Tabela 3. Porcentagem dos elementos críticos nos compostos da escória. Fonte: (O AUTOR).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos testes necessários para a implementação da calculadora de retorno de painelas para o FEA, os resultados comparativos entre os períodos sem utilização e com utilização da CRP e também serão apresentados os principais ganhos e perdas, em relação ao custo final do aço, durante o período de utilização da CRP.

5.1. Resultados dos INPUTS da Calculadora de Retorno de Painelas

A seguir, serão apresentados os resultados dos testes necessários para a implementação da CRP.

5.1.1. Lastro do FEA

Após pesagem do lastro do FEA nas células de carga do carro de vazamento, conforme capítulo 4.3.3, obteve-se o resultado de 14 toneladas de lastro. Esse resultado está dentro de uma faixa de valor esperado, pois os resultados da inspeção visual feita pelos operadores do FEA, corrida a corrida, variam entre 13 e 17 toneladas de lastro, dependendo do rendimento do FEA. Um valor de lastro considerado ideal, para um bom desempenho do FEA, é de 15 toneladas. Esse número não consta em literatura, porém é a quantidade de lastro encontrado na prática quando se obtém um bom rendimento no FEA da Gerdau Charqueadas. Normalmente, quando o lastro fica inferior ou superior à faixa de 13 a 17 toneladas, os operadores da cabine do FEA entram em contato com os operadores das pontes rolantes de confecção dos cestões de sucata para que sejam adicionados, respectivamente, mais ou menos sucata na confecção dos cestões.

A análise da composição química do lastro do FEA possui apenas cunho informativo na discussão desse trabalho, pois é feita por um espectrômetro de emissão ótica, conforme apresentado no capítulo 4.1, para todas as amostras de aço P1 do FEA.

5.1.2. Carga Fria

As composições químicas das cargas frias do FEA, durante o período de

utilização da CRP, foram calculadas a partir dos resultados de composição química das amostras P1 do FEA entre os meses de fevereiro e setembro de 2018, totalizando 4903 corridas. A cada virada de mês, do período de utilização da CRP, os dados foram renovados para os últimos 6 meses, para que os resultados pudessem levar em consideração a variação da composição química das cargas frias do mês que acaba de encerrar.

Os resultados das composições químicas das cargas frias do FEA do mês de agosto, tabela 4, foram baseados na análise de 3603 amostras P1 entre os meses de fevereiro e julho. Para o resultado do mês de setembro foram analisadas 3682 amostras P1 entre os meses de março e agosto. Para o resultado do mês de outubro foram analisadas 3699 amostras P1 entre os meses de abril e setembro. Os resultados das composições químicas das cargas frias do FEA dos meses de setembro e outubro encontram-se no apêndice A.

A tabela 4 mostra os resultados das porcentagens dos elementos críticos Cr, S, Ni, Mo, W, Co, Sn, Cu, Pb e Zn presentes em cada tipo de carga fria do FEA no mês de agosto, calculados conforme capítulo 4.3.4.

FAIXA DE ELEMENTOS PARA CALCULADORA - AGOSTO										
CARGA	ELEMENTOS CRÍTICOS (%)									
	Cr	S	Ni	Mo	W	Co	Sn	Cu	Pb	Zn
60	0,0950	0,0430	0,0870	0,0270	0,0070	0,0100	0,0130	0,1910	0,0004	0,0220
61	0,1100	0,0420	0,0990	0,0310	0,0080	0,0100	0,0130	0,2000	0,0004	0,0200
62	0,1250	0,0380	0,1070	0,0370	0,0070	0,0100	0,0130	0,1908	0,0004	0,0220
63	0,1350	0,0410	0,1080	0,0480	0,0070	0,0100	0,0130	0,1878	0,0004	0,0230
64	0,2470	0,0360	0,3705	0,1450	0,0080	0,0170	0,0120	0,1788	0,0004	0,0220
471	0,1320	0,0300	0,6995	0,0475	0,0070	0,0210	0,0120	0,2385	0,0014	0,0240
602C	0,0785	0,0273	0,0763	0,0230	0,0060	0,0080	0,0110	0,1428	0,0001	0,0163
603C	0,1055	0,0355	0,0945	0,0248	0,0070	0,0098	0,0118	0,1858	0,0003	0,0198
60AS	0,0458	0,0213	0,0633	0,0188	0,0063	0,0093	0,0100	0,1445	0,0001	0,0188
60F	0,1170	0,0320	0,1000	0,0350	0,0070	0,0100	0,0130	0,1860	0,0008	0,0230
60M	0,0330	0,0100	0,0390	0,0100	0,0060	0,0080	0,0040	0,0550	0,0001	0,0270
60MAG	0,0700	0,0288	0,0693	0,0190	0,0070	0,0090	0,0100	0,1383	0,0001	0,0210
60ZT	0,1060	0,0420	0,0840	0,0260	0,0070	0,0090	0,0120	0,1880	0,0005	0,0170
61A	0,0740	0,0430	0,0730	0,0270	0,0060	0,0090	0,0130	0,1700	0,0002	0,0230
61AS	0,0800	0,0290	0,0800	0,0320	0,0070	0,0090	0,0110	0,1330	0,0004	0,0380
61CR	0,0910	0,0420	0,0870	0,0260	0,0070	0,0100	0,0130	0,1940	0,0004	0,0240
61CU	0,0998	0,0418	0,0938	0,0280	0,0070	0,0100	0,0130	0,1953	0,0003	0,0210
62A	0,2680	0,0300	0,1020	0,0420	0,0120	0,0130	0,0160	0,1850	0,0026	0,1640
62CU	0,1300	0,0390	0,1060	0,0365	0,0070	0,0110	0,0130	0,2015	0,0004	0,0210
63A	0,1503	0,0298	0,0925	0,1883	0,0080	0,0100	0,0120	0,1603	0,0001	0,0205
63CU	0,1355	0,0420	0,1010	0,0440	0,0070	0,0110	0,0130	0,1910	0,0003	0,0210
63MO	0,1220	0,0400	0,1240	0,3400	0,0080	0,0110	0,0120	0,1960	0,0005	0,0200
64CU	0,2650	0,0410	0,3538	0,1393	0,0080	0,0170	0,0123	0,2040	0,0003	0,0230
64MO	0,1135	0,0240	0,8135	0,5038	0,0060	0,0248	0,0108	0,1908	0,0001	0,0158
65I	0,3298	0,0328	1,3848	0,2073	0,0080	0,0370	0,0110	0,1798	0,0003	0,0258
65IHK	0,2585	0,0340	1,2510	0,1945	0,0085	0,0350	0,0120	0,1855	0,0003	0,0240

Tabela 4. Resultados da porcentagem dos elementos críticos das cargas frias do FEA para o mês de agosto. Fonte: (O AUTOR).

A variação do *mixing* de sucatas ao longo do ano provoca uma variação da composição química média das cargas frias do FEA. A variação química dos elementos críticos das cargas frias do FEA durante o período de utilização da CRP podem ser comparadas entre a tabela 4 e as tabelas 1 e 2 do apêndice A. Dentre os elementos críticos das cargas frias do FEA as principais variações foram, durante o período de utilização da CRP, para Cr, Ni e Mo das cargas 64, 471 e 63A, conforme mostra a tabela 5.

Principais Variações de Elementos Críticos nas Cargas Frias durante Período de Utilização da CRP										
AGO - SET			AGO - OUT				SET - OUT			
Carga	Ni (%)	Mo (%)	Carga	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Carga	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)
64	-	0,06	471	0,14	0,40	0,16	471	0,11	0,18	0,12
471	0,22	-	63A	-	-	0,15	63A	-	-	0,16

Tabela 5. Principais variações de elementos críticos nas cargas frias do FEA durante o período de utilização da CRP. Fonte: (O AUTOR).

A carga 471 é uma carga que possui alto residual de Cr, Ni e Mo e foi utilizada para a confecção de oito tipos distintos de qualidades de aço durante o período da CRP. As principais alterações de elementos críticos, na carga 471, são referentes ao Ni, principalmente entre os meses de agosto e outubro, onde ocorreu um aumento de 0,40% na composição química, passando de 0,6995%, em agosto, para 1,1035% de Ni, em outubro. A variação de 0,40% de Ni representa, para um carregamento médio de 67 toneladas de sucata da carga 471 no FEA, um aumento de 268 kg de Ni no FEA.

5.1.3. Aço e Escória Remanescentes da Panela Siderúrgica

A tabela 6 informa os resultados dos testes 1 e 2, descritos no capítulo 4.3.5, da determinação da quantidade de aço e escória remanescentes da panela siderúrgica após lingotamento e mostra que para a média de número de corridas dos testes 1 e 2, 19,5 corridas, há, aproximadamente, 5,19 t de aço e 21,6 t de escória remanescentes de panela siderúrgica após lingotamento.

	TESTE 1	TESTE 2	MÉDIA
Nº CORRIDAS	16	23	19,5
AÇO (t)	4,16	6,21	5,19
ESCÓRIA (t)	23,2	20,0	21,6

Tabela 6. Resultados dos testes 1 e 2 da determinação de aço e escória remanescentes da panela siderúrgica após lingotamento. Fonte: (O AUTOR).

A Tabela 7 mostra a média da quantidade de aço e escória remanescentes nas panelas siderúrgicas após lingotamento da aciaria da Gerdau Charqueadas. Esses resultados foram obtidos realizando a média para uma corrida a partir dos resultados da coluna "MÉDIA" da tabela 6. Esses valores serão utilizados como *inputs* fixos da calculadora de retorno de panelas até que novos testes sejam feitos, com maior número de corridas, para melhor aferição desses valores.

MÉDIA DE MATERIAL REMANESCENTE POR PANELA	
Aço (t)	0,26
Escória (t)	1,16

Tabela 7. Valores dos *inputs* de aço e escória remanescentes da panela siderúrgica na calculadora de retorno de panelas. Fonte: (O AUTOR).

O material separado para os testes são processados, pela planta separadora, no estado sólido, porém atribui-se os resultados encontrados como se o material esteja no estado líquido. Logo, para cada panela siderúrgica após lingotamento há, em média, 0,26 t de aço e 1,16 t de escória, no estado líquido, que podem ser reaproveitados no FEA.

5.2. Resultados da Calculadora de Retorno de Panelas

Neste item serão apresentados resultados comparativos entre os períodos sem utilização e com utilização da CRP, referentes aos números de retornos de panelas siderúrgicas para o FEA durante os dois períodos.

5.2.1. Aumento do Retorno de Panelas Siderúrgicas para o FEA

A prática de retornar aço e escória remanescentes da panela siderúrgica, após lingotamento, para o FEA teve início na aciaria da Gerdau Charqueadas em 2016, porém a quantificação e estratificação dos números dessa prática tiveram início apenas em abril de 2018. A implementação da calculadora de retorno de panelas siderúrgicas para o FEA foi efetuada em agosto de 2018. Optou-se por analisar dados a partir de maio para que houvesse uma comparação simétrica entre os períodos sem uso da CRP e

com uso da CRP. A figura 31 mostra a estratificação dos números das painelas siderúrgicas retornadas e não retornadas para o FEA no período de maio até outubro de 2018.

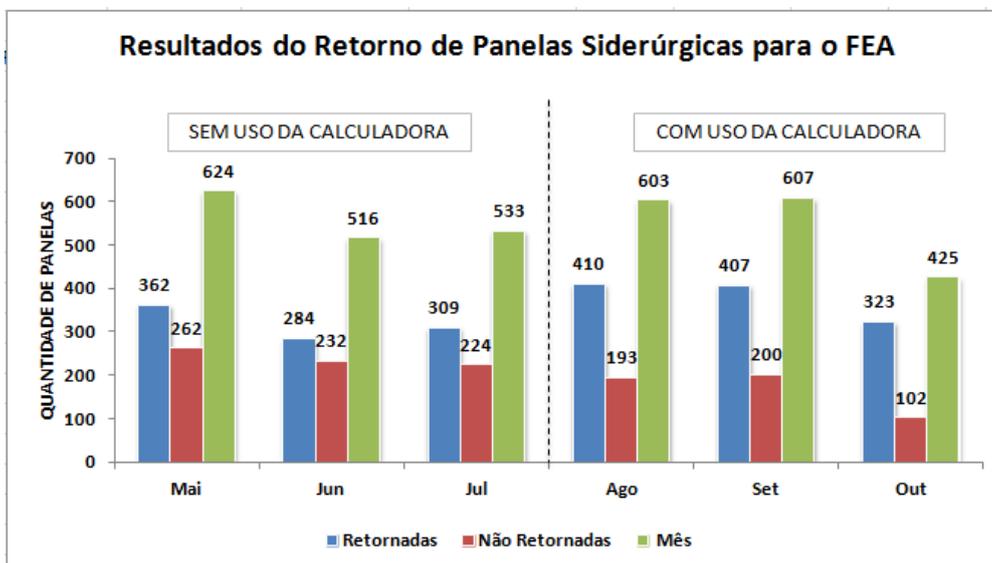


Figura 31. Resultados do retorno de painelas siderúrgicas para o FEA. Fonte: (O AUTOR).

A partir da análise da figura 31, é possível perceber que a quantidade de painelas siderúrgicas retornadas para o FEA é maior no período de agosto até outubro do que no período de maio até julho, coincidindo com o início da implementação da CRP. A figura 32 mostra que no período sem a utilização da CRP obteve-se um total de 46% de retorno de painelas siderúrgicas para o FEA equivalendo a 955 painelas siderúrgicas retornadas. O período com a utilização da CRP obteve um total de 54% de retorno de painelas siderúrgicas para o FEA equivalendo a 1140 painelas siderúrgicas retornadas.

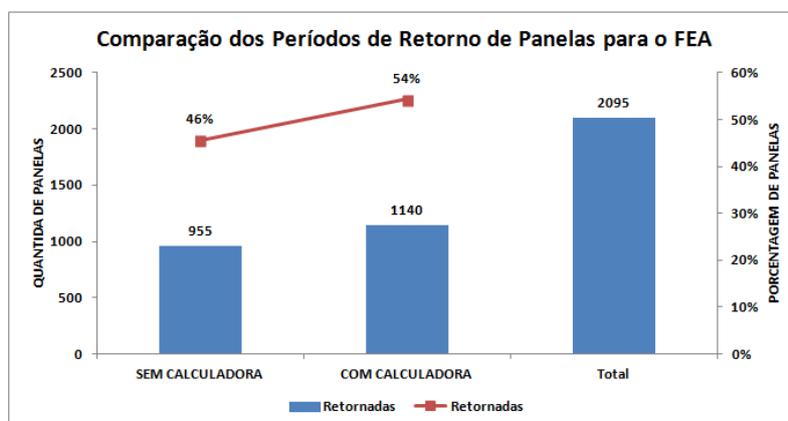


Figura 32. Comparação dos períodos de retorno de painelas siderúrgicas para o FEA. Fonte: (O AUTOR).

O aumento de 8% no total de panelas siderúrgicas retornadas para o FEA, vide figura 32, é atribuído à implementação da CRP e comprova que a metodologia desenvolvida para aumentar o reaproveitamento de aço e escória remanescentes da panela siderúrgica em forno elétrico a arco fornece resultados positivos.

A figura 33 mostra a comparação mensal dos retornos de panelas siderúrgicas para o FEA e evidencia, no primeiro mês de utilização da CRP, um aumento de 10% na quantidade de panelas retornadas para o FEA.

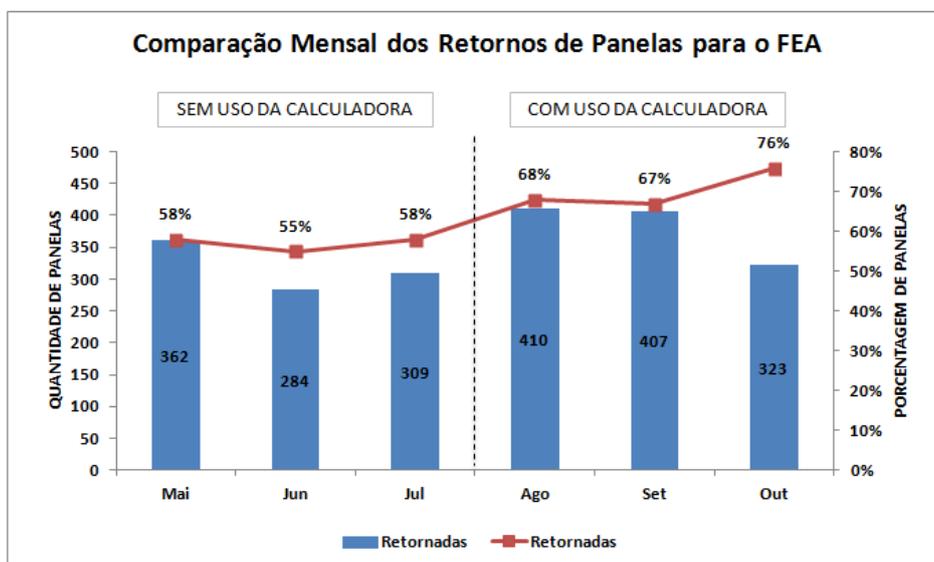


Figura 33. Comparação mensal dos retornos de panelas siderúrgicas para o FEA. Fonte: (O AUTOR).

No mês de outubro, vide figura 33, atingiu-se 76% de panelas siderúrgicas retornadas para o FEA. Esse resultado é atribuído à utilização da CRP em conjunto com o fator de que no mês de outubro houve um menor volume de produção acarretando na redução da quantidade total de panelas possíveis de serem retornadas para o FEA, vide figura 31, auxiliando na obtenção desse resultado.

5.2.2. Motivos de não haver Retorno de Panelas Siderúrgicas para o FEA

O aumento nos resultados de panelas siderúrgicas retornadas para o FEA era esperado, porém havia uma expectativa de que se alcançassem resultados constantes, na faixa de 70 a 80% de retorno de panelas siderúrgicas, com a utilização da CRP. Os motivos de não alcançar os resultados esperados foram divididos em causas de

composição química, causas de manutenção e causas de operação, que serão descritos a seguir:

- Causas de composição química: é dado quando a calculadora de retorno de painelas siderúrgicas para o FEA retorna o resultado "NÃO", o que significa que a quantidade do elemento crítico contido na panela siderúrgica poderá exceder a faixa de composição química especificada pelo cliente.
- Causas de manutenção: quando há a ocorrência de qualquer manutenção não programada no FEA impossibilitando o retorno de painelas siderúrgicas para o FEA.
- Causas de operação: quando há ocorrências de aspectos operacionais impossibilitando o retorno de painelas siderúrgicas para o FEA, como: troca de eletrodos do FEA, troca de turno dos operadores do FEA, FEA atrasado em relação ao sincronismo da aciaria, pontes, CD1 ou CD2, atrasadas para retirar a panela do LC, entre outros motivos.

A figura 34 mostra, de forma quantitativa, os motivos pelos quais não houve retorno de panela siderúrgica para o FEA durante o período de utilização da CRP, baseado nas causas por composição química e causas de manutenção e operação.

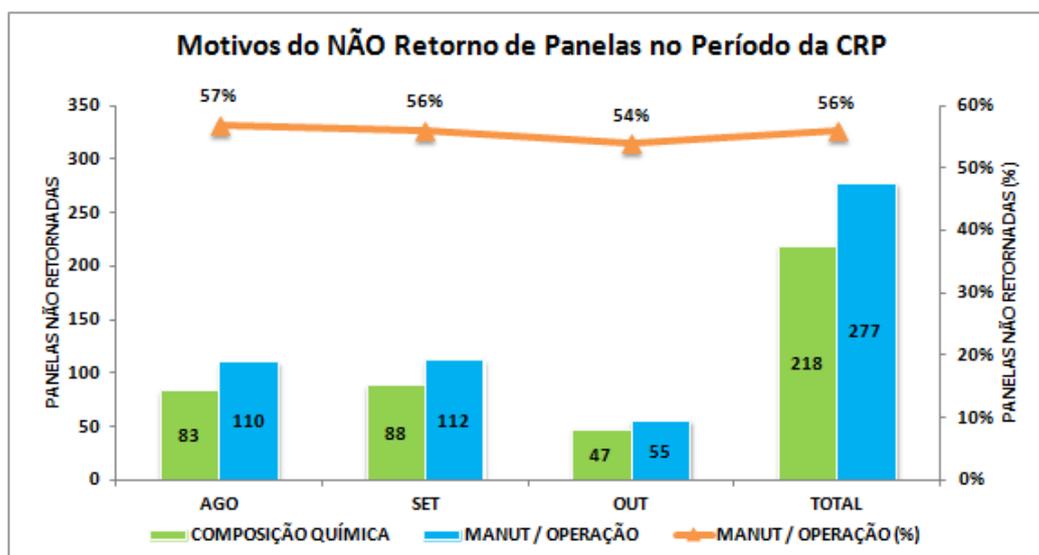


Figura 34. Motivos de não haver painelas siderúrgicas retornadas para o FEA durante o período de utilização da CRP. Fonte: (O AUTOR).

A partir da análise da figura 34, percebe-se que os principais motivos para não se ter atingido os resultados esperados de aumento dos retornos de panelas siderúrgicas para o FEA são por causas de manutenção e operação do FEA. No período de utilização da CRP, 56% dos casos em que não houve retorno de panelas para o FEA são atribuídos a causas de manutenção e operação, ou seja, não foi possível utilizar a CRP em 277 ocasiões durante esse período. Os 44% de panelas siderúrgicas não retornadas por composição química serão melhores detalhados a seguir.

A figura 35 mostra o diagrama de Pareto, do período da CRP, dos principais motivos de haver panelas siderúrgicas não retornadas para o FEA por motivos de composição química. Segundo WERKEMA (1995), o diagrama de Pareto é um gráfico de barras que ordena as frequências das ocorrências, da maior para a menor, permitindo a priorização dos problemas. Sua maior utilidade é a de permitir uma fácil visualização e identificação das causas ou problemas mais importantes, possibilitando a concentração de esforços sobre os mesmos.

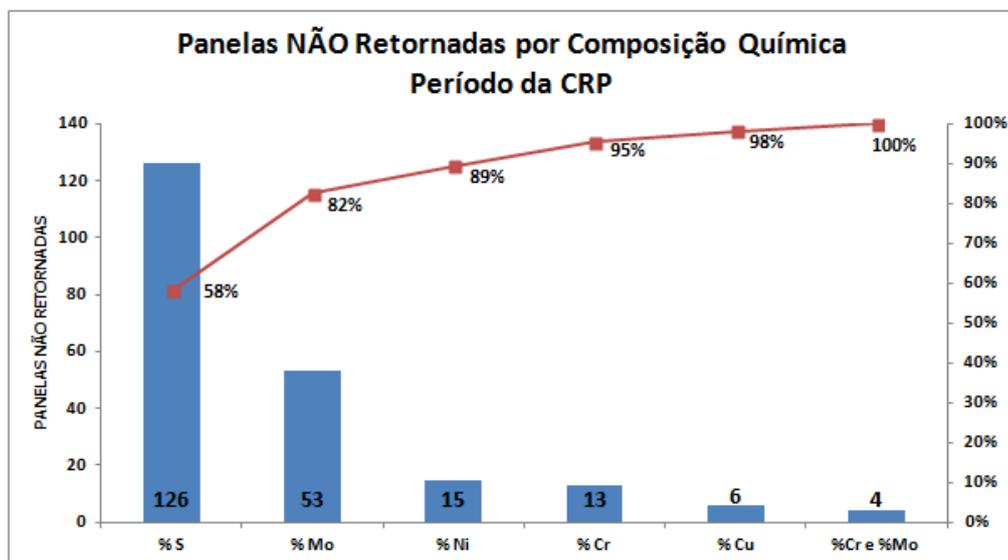


Figura 35. Diagrama de Pareto do período da CRP, das panelas siderúrgicas não retornadas para o FEA por composição química. Fonte: (O AUTOR)

Ao analisar os diagramas de Pareto da figura 35, os principais motivos de não haver retorno de panelas siderúrgicas por causa de composição química para o FEA, representando 82% dos casos, são pela alta porcentagem de enxofre na escória do refino secundário, devido a formação de CaS na escória do refino secundário durante o

processo de dessulfuração que ocorre no FP e no VD, e pela alta porcentagem de molibdênio no aço remanescente na panela siderúrgica após lingotamento.

A alta incidência de panelas siderúrgicas não retornadas por causa de enxofre, 58% dos casos conforme a figura 35, atribui-se ao modo como é calculado o resultado final da CRP para o balanço de massa do enxofre, conforme capítulo 4.4.1. A CRP considera que todo enxofre contido na escória de refino secundário remanescente da panela siderúrgica será revertido ao banho metálico no FEA, devido ao ambiente altamente oxidante, para minimizar o risco de ultrapassar o limite de dessulfuração da escória do refino secundário. Porém, não foram encontrados estudos que possam dizer qual seria uma taxa de reversão provável do enxofre contido na escória de refino secundário para o banho metálico no FEA.

5.2.3. Aumento de Panelas Siderúrgicas Retornadas para o FEA por Cr, Ni e Mo

A figura 36 mostra a comparação das panelas siderúrgicas não retornadas para o FEA por porcentagens de Cr, Ni e Mo entre os períodos sem utilização e com utilização da CRP e evidencia a porcentagem de aumento de retorno de panelas entre os períodos.

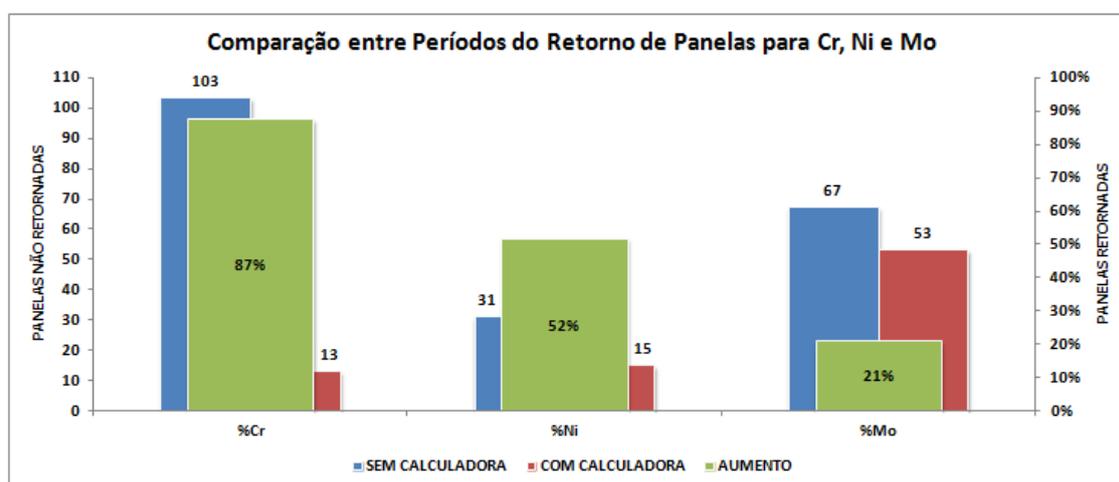


Figura 36. Comparação entre períodos do retorno de panelas siderúrgicas para o FEA por Cr, Ni e Mo. Fonte: (O AUTOR).

A partir da análise da figura 36, observa-se que houve um aumento acentuado de panelas siderúrgicas retornadas para o FEA, por porcentagem de Cr, após o início da utilização da CRP. Houve uma redução de 90 panelas siderúrgicas não retornadas por

%Cr o que equivale a um aumento de 87% de painéis siderúrgicos retornados para o FEA durante o período de utilização da CRP. Para as painéis siderúrgicos não retornados para o FEA por porcentagem de Ni, houve uma redução de 16 painéis siderúrgicos não retornados, o que equivale a um aumento de 52% de painéis siderúrgicos retornados para o FEA durante o período de utilização da CRP. Para as painéis siderúrgicos não retornados para o FEA por porcentagem de Mo, houve uma redução de 14 painéis siderúrgicos não retornados, o que equivale a um aumento de 21% de painéis siderúrgicos retornados para o FEA durante o período de utilização da CRP.

5.3. Ganhos e Perdas da Calculadora de Retorno de Painéis

A seguir, serão apresentados os principais ganhos e perdas, do presente trabalho, em relação ao custo final do aço durante o período da CRP.

5.3.1. Ganhos com o Reaproveitamento de Aço e Escória no FEA

A figura 37 mostra a quantidade de aço retornado para o FEA durante o período de utilização da CRP. A partir do número de painéis retornados para o FEA, vide figura 32, e da quantidade de aço líquido remanescente por painel siderúrgico, vide tabela 7, estima-se que ao total foram retornados 296,4 toneladas de aço líquido para o FEA no período de agosto a outubro de 2018.

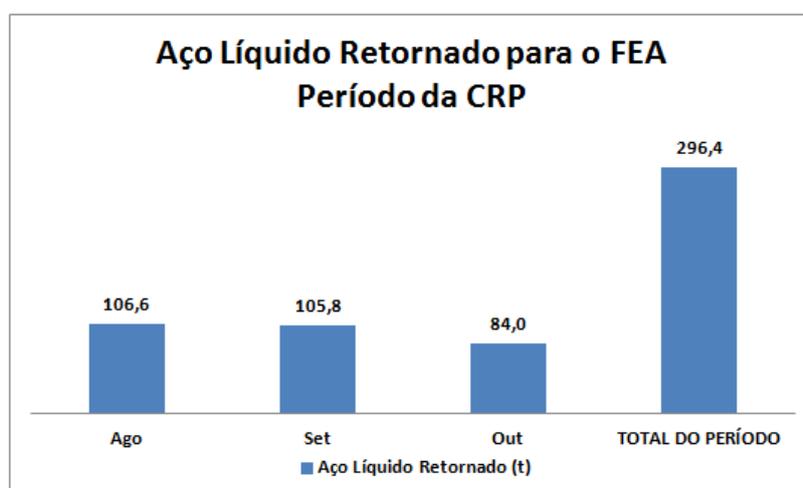


Figura 37. Quantidade de aço líquido retornado para o FEA durante o período de utilização da CRP. Fonte: (O AUTOR).

A partir da informação de que a aciaria da Gerdau Charqueadas possui um peso médio de aço vazado de 62 toneladas por corrida, a figura 38 mostra que, para o período de utilização da CRP, a quantidade de aço retornado para o FEA representou, em média, uma quantidade de aço equivalente a 2,4 corridas que não foram desperdiçadas como resíduo de aciaria e retornaram para o processo ainda no estado líquido.

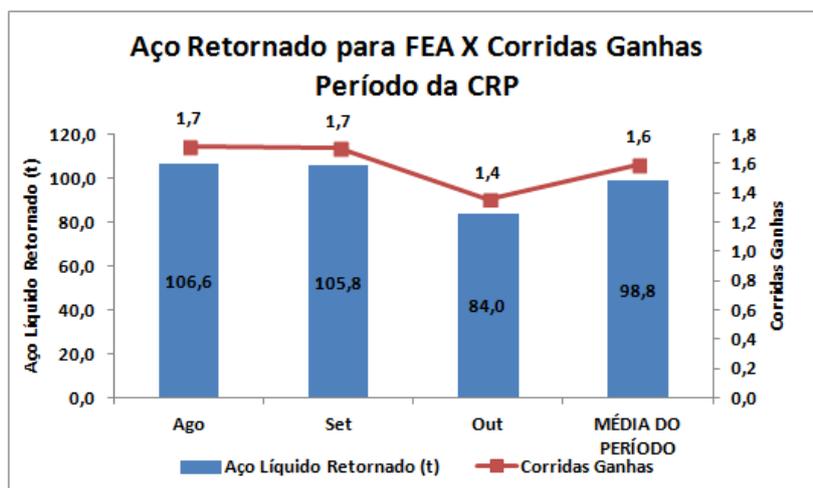


Figura 38. Relação entre a quantidade de aço líquido retornado para o FEA e a quantidade equivalente de corridas ganhas durante o período de utilização da CRP. Fonte: (O AUTOR).

A figura 39 mostra a quantidade de escória retornada para o FEA durante o período de utilização da CRP. A partir do número de painéis retornados para o FEA, vide figura 32, e da quantidade de escória líquida remanescente por painel siderúrgica, vide tabela 7, estima-se que ao total foram retornados 1322,4 toneladas de escória líquida para o FEA no período de agosto a outubro de 2018.

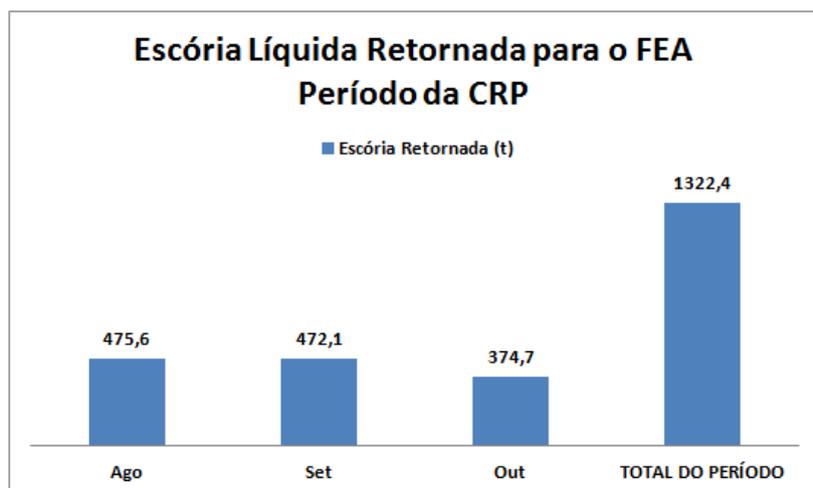


Figura 39. Quantidade de escória líquida retornada para o FEA durante o período de utilização da CRP. Fonte: (O AUTOR).

O reaproveitamento de aço e escória remanescente da panela siderúrgica após lingotamento implica diretamente em ganhos monetários, para a Gerdau Charqueadas, com a redução de gastos com o processamento e destinação de co-produtos. A tabela 8 mostra a quantidade média mensal de aço e escória remanescentes da panela siderúrgica reaproveitados no FEA, após lingotamento, no período da CRP.

Aço e Escória Retornados para o FEA				
	Agosto	Setembro	Outubro	Média Mensal
Aço (t)	106,6	105,8	84,0	98,8
Escória (t)	475,6	472,1	374,7	440,8
Total (t)	582,2	577,9	458,7	539,6

Tabela 8. Média mensal da quantidade aço e escória remanescentes da panela siderúrgica reaproveitados no FEA, após lingotamento, no período da CRP. Fonte: (O AUTOR).

A escória do refino secundário que não for retornada para o FEA após lingotamento é processada por uma empresa terceirizada para realizar a britagem e separação da fração de aço contida nessa escória. A fração metálica recuperada é revendida para a Gerdau Charqueadas, para ser utilizada como sucata no FEA. A escória processada, ou seja, britada e sem a fração metálica, é destinada para aterro sanitário terceirizado de classe II.

Com a utilização da CRP, uma média mensal de 98,8 toneladas de aço líquido estão sendo reaproveitados no FEA, vide tabela 8, e deixando de ser revendido para a Gerdau Charqueadas como sucata. Ainda com a utilização da CRP, uma média mensal de 440,8 toneladas de escória estão sendo reaproveitadas no FEA, vide tabela 8, e deixando de ser destinado para aterro sanitário. A partir dessas informações, pode-se concluir que há ganhos monetários consideráveis para a aciaria da Gerdau Charqueadas, com uma redução média de 0,069% no custo final do aço produzido, referentes a processamento de co-produto de aciaria, com a prática do reaproveitamento de aço e escória remanescentes da panela siderúrgica no FEA.

5.3.2. Ganho de Rendimento Metálico do FEA

A figura 40 mostra a relação entre a quantidade de aço líquido remanescente da

panela siderúrgica retornado para o FEA e o aumento de rendimento metálico do FEA durante o período de utilização da CRP. O mês de outubro apresentou o maior aumento de rendimento metálico do FEA, pois mesmo não tendo a maior quantidade de aço líquido retornado para o FEA, em comparação a agosto e setembro, foi o mês que apresentou maior porcentagem de retorno de painéis siderúrgicos para o FEA, 76% vide figura 33, mostrando que quanto maior a porcentagem de retorno de painéis maior será o aumento do rendimento metálico do FEA.

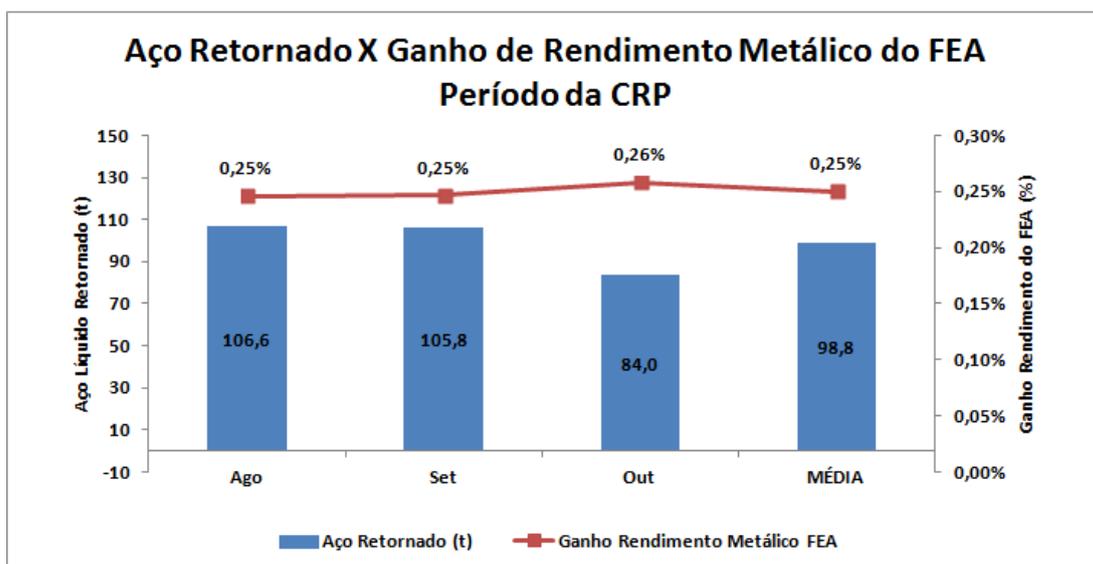


Figura 40. Relação entre a quantidade de aço líquido remanescente de painéis siderúrgicos para o FEA e o aumento de rendimento metálico do FEA durante o período de utilização da CRP. Fonte: (O AUTOR)

O ganho de rendimento metálico do FEA da Gerdau Charqueadas com o reaproveitamento de aço líquido remanescente da painéis siderúrgicos foi calculado, pelas equações 10, 11 e 12, da seguinte maneira.

$$\text{Ganho}_{FEA}^{\text{Rendimento}} = \text{Rend}^{FEA (Mês)} - \text{Rend}_{\text{sem painéis retornadas}}^{FEA (Mês)} \quad (10)$$

Onde:

$$\text{Rend}^{FEA (Mês)} = \left(\frac{M_{\text{Aço Vazado}}^{Mês}}{M_{\text{Carga Fria}}^{Mês} + M_{\text{Corridas Retornadas}}^{Mês}} \right) \times 100 \quad (11)$$

$$Rend_{sem\text{ panelas retornadas}}^{FEA (Mês)} = \left(\frac{M_{Aço\ Vazado}^{Mês} - M_{Painelas\ Retornadas}^{Mês}}{M_{Carga\ Fria}^{Mês} + M_{Corridas\ Retornadas}^{Mês}} \right) \times 100 \quad (12)$$

Onde:

$M_{Aço\ Vazado}^{Mês}$: massa total de aço líquido vazado do FEA no mês.

$M_{Carga\ Fria}^{Mês}$: massa total de carga fria do FEA no mês.

$M_{Corridas\ Retornadas}^{Mês}$: massa total de aço líquido de corridas que tiveram que voltar para o FEA por algum problema ocorrido na aciaria durante o mês.

$M_{Painelas\ Retornadas}^{Mês}$: massa total de aço líquido remanescente da panela siderúrgica retornada após lingotamento do mês.

O aumento de rendimento metálico do FEA durante o período de utilização da CRP teve um impacto positivo em relação aos custos globais da aciaria, com uma redução média de 0,164% no custo final do aço produzido, auxiliando no aumento de produção da aciaria.

5.3.3. Ganho Energético do FEA

O reaproveitamento de aço e escória remanescentes da panela siderúrgica fornece um *input* de energia térmica para o FEA, porém, para cada panela siderúrgica retornada para o FEA, ocorrem perdas térmicas pela abertura da abóboda do FEA. Para o cálculo da energia fornecida pelo retorno de painelas para o FEA foi levado em consideração a energia fornecida pela escória e aço líquidos remanescentes da panela siderúrgica. A energia fornecida pode ser calculada pela equação 13.

$$E = (m \cdot c_p \cdot \Delta T) / 3600 \quad (13)$$

Onde:

E = energia fornecida pela escória e/ou aço líquido [kWh]

m = massa de escória e/ou aço líquido [kg]

c_p = calor específico da escória e/ou aço líquido [kJ/kg°C]

ΔT = diferença térmica da escória e/ou aço líquido com o ambiente [°C]

Para a massa (m) utilizou-se a massa média de escória e aço líquidos

reaproveitados no FEA durante o período de utilização da CRP, vide tabela 8. Segundo SESHADRI et al (2010), o calor específico (c_p) do aço líquido é 0,68 kJ/kg°C. Segundo INABA et al (2004) o calor específico (c_p) da escória líquida é 1,50 kJ/kg°C. Para calcular a diferença térmica (ΔT) utilizou-se o sistema Panela-Ambiente, que leva em consideração a variação de temperatura média entre a massa de aço e escória remanescentes da panela siderúrgica retornada para o FEA e a temperatura ambiente da aciaria. A tabela 9 mostra o resultado da energia média mensal fornecida pela quantidade de escória e aço líquidos das panelas siderúrgica no FEA durante o período de utilização da CRP.

	m (Kg)	Cp (KJ/kg °C)	T _{amb} (°C)	T _{Panela} (°C)	ΔT (°C)	Energia (kJ)	Energia (KWh)	Energia Média Mensal (KWh)
AÇO	98800	0,68	25	1450	1425	95737200	26594	288319
ESCÓRIA	440800	1,50	25	1450	1425	942210000	261725	

Tabela 9. Energia média mensal fornecida pelo reaproveitamento de escória e aço líquidos das panelas siderúrgica no FEA durante o período de utilização da CRP. Fonte: (O AUTOR).

A energia perdida por radiação, pela abertura da abóboda, por causa do retorno de panelas siderúrgicas para o FEA, pode ser calculada pela equação 14, a seguir:

$$E = \frac{A_{carcaça} \cdot K_b \cdot \epsilon_{aço/escória} \cdot (T_{FEA}^4 - T_{amb}^4)}{1000} \cdot \frac{t_{retorno}}{60} \cdot n_{retornos} \quad (14)$$

Onde:

E = energia perdida pela abertura da abóboda [kWh]

$A_{carcaça}$ = seção superior da carcaça do FEA [m²]

K_b = constante de Stephan-Boltzmann [W/(m².K⁴)]

$\epsilon_{aço/escória}$ = emissividade da superfície aço/escória

T_{FEA} = temperatura de fusão no FEA [K]

T_{amb} = temperatura ambiente da aciaria [K]

$t_{retorno}$ = tempo de retorno de aço e escória para dentro do FEA [min]

$n_{retornos}$ = número de panelas siderúrgicas retornadas para o FEA.

A emissividade do aço líquido, segundo SESHADRI et al (2010), é 0,28. A emissividade da escória líquida, segundo FERRARO (2014), é 0,89. O valor da emissividade da superfície metal/escória ($\epsilon_{\text{aço/escória}}$) é 0,59, obtido através da média entre as emissividades do aço líquido e da escória líquida, e é condizente com o valor utilizado pelo software *Scrap Optimizer System* (S.O.S) da Gerdau Charqueadas. A tabela 10 mostra a energia média mensal perdida pelo FEA, por radiação, durante o período de utilização da CRP.

$A_{\text{carcaça}} (\text{m}^2)$	$\epsilon_{\text{aço/escória}}$	K_b	$T_{\text{FEA}} (\text{K})$	$T_{\text{amb}} (\text{K})$	$Q (\text{KW})$	$t_{\text{retorno}} (\text{min})$	n_{retornos}	Energia Média Mensal (KWh)
29,2	0,59	5,67E-08	1923	298	13361,0	1,17	362	94073

Tabela 10. Energia média mensal perdida pelo FEA, por radiação, durante o período de utilização da CRP. Fonte: (O AUTOR).

A partir dos ganhos e perdas de energia pelo retorno de uma panela siderúrgica para o FEA, vide tabelas 9 e 10, é possível estimar a balanço energético médio mensal durante o período de utilização da CRP, conforme tabela 11 a seguir.

Ganho Energético Médio Mensal c/ Aço e Escória (kWh)	Perda Energética Média Mensal p/ Radiação (kWh)	Balanço Energético Médio Mensal da CRP (kWh)
288319	94073	194245

Tabela 11. Balanço energético médio mensal durante o período de utilização da CRP. Fonte: (O AUTOR).

A partir do balanço energético médio mensal da CRP, tabela 11, pode-se obter o custo do quilowatt-hora por tonelada de aço produzido, conforme a equação 15 a seguir:

$$\text{Custo}_{\text{kWh/t}} = \frac{\text{Balanço Energético}}{\text{Produção}_{\text{corrigida}}} \cdot \text{Preço}_{\text{kWh}}^{\text{Aci}} \quad (15)$$

Onde:

$\text{Custo}_{\text{kWh/t}}$ = custo do quilowatt-hora por tonelada de aço produzido [R\$/t]

Balanço Energético = balanço energético médio mensal da CRP [kWh]

$\text{Produção}_{\text{corrigida}}$ = produção da aciaria descontadas as perdas de processo [t]

$\text{Preço}_{\text{kWh}}^{\text{Aci}}$ = preço do quilowatt-hora da aciaria [R\$/kWh]

O reaproveitamento de aço e escória remanescentes de panela siderúrgica após lingotamento, durante o período de utilização da CRP, representou uma redução média mensal de energia para o FEA de 1,272% MWh, vide tabela 11, conferindo uma redução de 0,047% do custo do quilowatt-hora por tonelada de aço produzido, impactando diretamente no custo final de produção do aço.

5.3.4. Ganho por Consumo de Eletrodo do FEA

O ganho de energia do FEA provido pelo reaproveitamento de aço e escória remanescentes de panela siderúrgica impacta direta e positivamente no consumo de eletrodos do FEA, pois será necessário menor tempo de utilização para aquecimento do banho. A redução de consumo de eletrodos do FEA pode ser calculado pela equação 16, a seguir:

$$\mathbf{Consumo}_{Eletrodo}^{Específico} = \frac{\mathbf{Consumo}_{Eletrodo}^{Mensal}}{\mathbf{Energia}_{FEA}^{Mensal}} \cdot \frac{\mathbf{Balanço\ Energético}}{\mathbf{Produção}_{Corrigida}} \quad (16)$$

Onde:

$\mathbf{Consumo}_{Eletrodos}^{Específico}$ = consumo específico mensal de eletrodos do FEA [kg/t]

$\mathbf{Consumo}_{Eletrodo}^{Mensal}$ = consumo total de eletrodos por tonelada de aço no mês [kg/t]

$\mathbf{Energia}_{FEA}^{Mensal}$ = energia total do FEA por tonelada de aço no mês [kWh/t]

Balanço Energético = balanço energético médio mensal da CRP [kWh]

$\mathbf{Produção}_{corrigida}$ = produção da aciaria descontadas as perdas de processo [t]

Durante o período de utilização da CRP, a partir do consumo específico mensal de eletrodos do FEA, obteve-se uma redução mensal de 1,298% kg de consumo de eletrodo de grafite do FEA devido ao balanço energético positivo, vide tabela 11, com o reaproveitamento de aço e escória remanescentes de panela siderúrgica no FEA. Essa redução impacta diretamente na redução do custo de consumo de eletrodos do FEA, que pode ser calculado pela equação 17, a seguir:

$$\mathbf{Custo}_{Eletrodo}^{Consumo} = \mathbf{Consumo}_{Eletrodo}^{Específico} \cdot \mathbf{Preço}_{Eletrodo} \quad (17)$$

Onde:

$\mathbf{Custo}_{Eletrodo}^{Consumo}$ = custo do consumo de eletrodos por tonelada de aço [R\$/t]

$Consumo_{Eletrodos}^{Específico}$ = consumo específico de eletrodos [kg/t]

Preço_{Eletrodo} = preço do quilo de eletrodo [R\$/kg]

Segundo a S&P GLOBAL (2017), para o segundo semestre de 2018, os preços de contratos com fornecedores de eletrodos de grafite sofrerão um aumento de mais de 50% em relação aos contratos anuais de 2017. Isso evidencia a importância da redução do consumo de eletrodos, onde, com o balanço energético médio mensal da CRP sendo positivo, vide tabela 12, possibilitou uma redução média no custo de consumo de eletrodo de 0,052%, impactando diretamente no custo final de produção do aço.

5.3.5. Perdas por *Power Off* do FEA

Para que possa ser vazado todo o aço e escória remanescentes da panela siderúrgica após lingotamento para dentro do FEA é necessário que ocorra a abertura da abóboda do FEA gerando tempo de *power off* (Poff). A figura 41 mostra o tempo de Poff do FEA devido ao retorno de painéis siderúrgicos para o FEA durante o período de utilização da CRP.

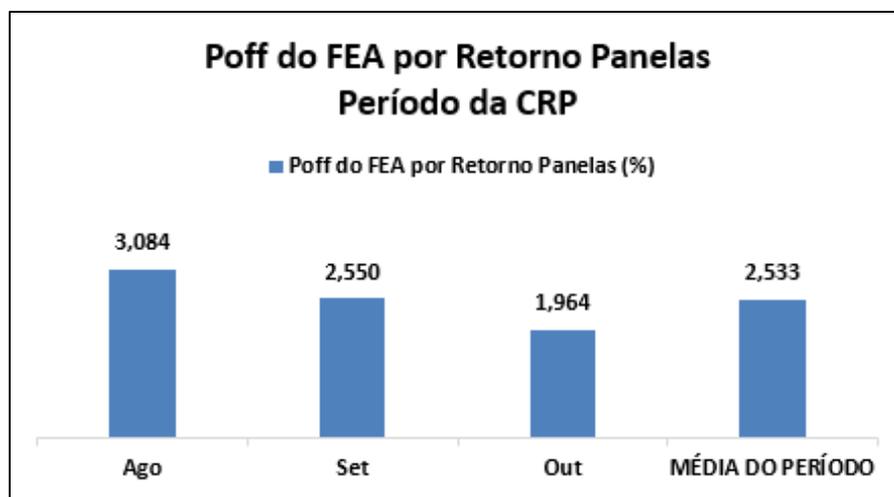


Figura 41. Tempo de Poff do FEA devido ao retorno de painéis siderúrgicos para o FEA durante o período de utilização da CRP. Fonte: (O AUTOR)

A partir do tempo total mensal de Poff por retorno de painéis siderúrgicos para o FEA e do tempo de *tap to tap* (TTT) do FEA é possível fazer uma estimativa da quantidade de corridas que poderiam ter sido produzidas durante o mês. A tabela 12

mostra a quantidade mensal de corridas que poderiam ter sido produzidas durante o período da CRP.

	Poff Retorno Painelas (%)	TTT(min)	Corridas Poderiam ser Produzidas
Ago	3,084	W	5,9
Set	2,550	X	4,9
Out	1,964	Y	3,6
MÉDIA	2,533	Z	4,8

Tabela 12. Quantidade mensal de corridas que poderiam ter sido produzidas durante o período da CRP. Fonte: (O AUTOR).

A aciaria da Gerdau Charqueadas atua como um sistema puxado de produção onde o LC é quem dita o sincronismo de produção da aciaria. Atualmente o LC é o gargalo de produção da aciaria da Gerdau Charqueadas resultando em tempos de Poff do FEA por bitola padrão, que é o tempo de Poff gerado quando o FEA precisa ser desligado devido à baixa velocidade de lingotamento do LC para que não haja estoque de painelas siderúrgicas com aço vazado entre o FEA e o LC. Por isso, as corridas que poderiam ser produzidas pelo tempo de Poff do FEA devido ao retorno de painelas siderúrgicas para o FEA, vide tabela 12, podem não representar um valor efetivo real de perda de produção, principalmente, pelo tempo de bitola padrão e por eventuais paradas da aciaria que podem ser geradas por outros problemas durante a produção.

A melhor maneira de contabilizar as perdas geradas pelo Poff do FEA, devido ao retorno de painelas siderúrgicas para o FEA, é a partir do custo do Poff do FEA. A utilização da CRP gerou um tempo médio mensal de Poff de 2,533% min, vide figura 41, acarretando em um aumento médio de 0,071% no custo final do aço produzido.

5.3.6. Relação entre as Perdas e Ganhos da Calculadora de Retorno de Painelas

A tabela 13 mostra a relação média mensal entre as perdas e ganhos do reaproveitamento de aço e escória remanescentes da panela siderúrgica no FEA durante o período de utilização da CRP.

	Resultado Médio Final no Aço (%)
Aumento de Rendimento do FEA	-0,164%
Redução da Destinação de Co-produtos	-0,069%
Redução de Gasto de Energia do FEA	-0,047%
Redução de Consumo de Eletrodos do FEA	-0,052%
Aumento de Poff do FEA	0,071%
BALANÇO FINAL	-0,261%

Tabela 13. Relação média mensal entre as perdas e ganhos do reaproveitamento de aço e escória remanescentes da panela siderúrgica no FEA durante o período de utilização da CRP. Fonte: (O AUTOR).

O balanço final entre as perdas e ganhos durante o período de utilização da CRP, vide tabela 13, apresenta uma redução no custo médio final do aço produzido de 0,261%, mostrando que o reaproveitamento de aço e escória líquidos remanescentes de panela siderúrgica no FEA após lingotamento é uma prática viável e traz benefícios financeiros para a aciaria da Gerdau Charqueadas.

6. CONCLUSÕES

- Com a utilização de uma calculadora de retorno de panelas para o FEA (CRP) obteve-se um aumento geral de 8% no reaproveitamento de aço e escória líquidos remanescentes da panela siderúrgica em forno elétrico a arco, quando comparado ao período sem utilização da CRP, equivalentes a 48,1 t de aço e 214,6 t de escória reaproveitados.
- Os elementos químicos S, Ni, Mo, W, Co, Sn, Cu e Pb foram determinados como críticos por tenderem a se manter dissolvidos no aço líquido frente a preferencial oxidação do Fe. O Zn foi determinado como elemento crítico devido ao Fe torna-se preferencialmente oxidável, em relação ao Zn, na faixa de temperatura de 1200 até aproximadamente 1300°C. O Cr foi determinado como elemento crítico, mesmo sendo preferencialmente oxidável em relação ao Fe em qualquer temperatura, por haver a reversão de Cr da escória para o banho no FP.
- Conseguiu-se determinar as composições químicas dos elementos críticos das cargas frias utilizadas no FEA evidenciando a variação de composição química entre os meses de utilização da CRP devido ao *mixing* de sucatas ao longo do ano.
- Obteve-se um aumento médio mensal de 0,25% no rendimento metálico do FEA, a partir do período de utilização da CRP, com a prática de reaproveitamento do aço e da escória remanescentes da panela siderúrgica no forno elétrico a arco.
- Com a utilização da CRP, obteve-se uma redução do volume de processamentos e destinação de co-produtos de aciaria, com uma média mensal de 98,8 toneladas de aço e 440,8 toneladas de escória remanescentes de panelas siderúrgicas reaproveitadas no FEA.
- Durante o período de utilização da CRP, constatou-se uma redução média mensal de energia para o FEA de 1,272% MWh fornecidos pelo reaproveitamento de aço e escória remanescentes de panela siderúrgica após lingotamento.
- Obteve-se uma redução mensal de 1,298% kg de consumo de eletrodo de grafite do FEA durante o período de utilização da CRP devido a redução de energia consumida pelo FEA.
- Constatou-se que a prática de retornar panelas siderúrgicas para o FEA gerou um *Power Off* médio mensal de 2,533% min durante o período de utilização da CRP.

- Conseguiu-se construir uma metodologia para o reaproveitamento de aço e escória remanescentes de panela siderúrgica para o FEA gerando uma redução de 0,261% no custo médio final de produção do aço da aciaria da Gerdau Charqueadas. Essa metodologia pode ser aplicada, com adaptações, para outras aciarias.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se a avaliação da mudança na composição química e na massa da escória do FEA com o retorno de escória do forno-panela para o FEA.

Avaliar a reversão de enxofre da escória do forno-panela para o banho de aço líquido no FEA.

Avaliar se há redução no emprego de sucatas que são fontes de enxofre, como o arame de pneu, no FEA.

8. REFERÊNCIAS

ABM–Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais. **Introdução à Siderurgia**. Coleção de Metalurgia e Materiais 2. São Paulo, São Paulo, Brasil. 2007.

AGGEN, G. *et al.* **Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys**. 3^a ed. p. 234. ASM Handbook. ASM International, 2005.

ALMEIDA, R. A. M. **Estudo de Escórias de Refino Primário de Aços com Vistas a Redução do Consumo Energético em Fornos Elétricos a Arco**. Dissertação (mestrado). PPGE3M: UFRGS, 2016.

ALVES, P. C. **Análise do Rendimento Metálico do FEA Devido ao Uso do Sistema de Despoeiramento do Shredder**. Trabalho de Diplomação. Departamento de Metalurgia: UFRGS, 2016.

BIELEFELDT, W. V. **Estudo do Tratamento de Inclusões com Cálcio na Fabricação do Aço SAE 8620**. Dissertação (mestrado). PPGE3M: UFRGS, 2005.

BITTENCOURT, J. P. V. **Influência de Diferentes Vazões de Oxigênio e Tempos de Lança nos Parâmetros de Processo de um Forno Elétrico a Arco**. Trabalho de Diplomação. Departamento de Metalurgia: UFRGS, 2015.

BREHM, F. A. **Produção de padrões para análise espectrométrica por emissão óptica de uma liga de aço AISI/SAE 1020**. Dissertação (mestrado). PPGE3M: UFRGS, 1999.

BRITO R. M. **Eletricidade para Aciaria**. São Paulo: Gerdau S.A., 2008.

CHEVRAND, L. J. S. **Aciaria Elétrica**. São Paulo: ABM, 2007.

CONSTANTIN, N. **Refining Steels Produced in Electric Arc Furnace**. Series B,

Vol.75, Iss.2, 2013.

DA ROCHA, V. C. **Estudo Comparativo Entre Fluxantes Aplicados no Lingotamento Contínuo do Aço SAE 1046 MOD.** Trabalho de Diplomação. Departamento de Metalurgia: UFRGS, 2014.

DOS ANJOS, F. W. P. **Caracterização E Otimização Da Escória de um Forno Elétrico a Arco.** Monografia. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais: UFC, 2010.

GEMO, L. **Modellizzazione Di Alcuni Processi Del Forno Elettrico Ad Arco.** 2003.

GEYER, R. M. **Estudo Sobre a Potencialidade de uso das Escórias de Aciaria como Adição ao Concreto.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS, 2002.

GOMES, R. L. **Análise Energética de um Forno Elétrico a Arco de 40t Utilizando Gusa Líquido.** Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade de Engenharia de Materiais: UFPA, 2012.

GUIMARÃES, P. R. B. **Métodos Quantitativos Estatísticos.** 1ª ed. p. 39-43. Curitiba: IESDE Brasil S.A., 2008

JOHN, A. L. **Melhoria no Desempenho de Injetores Supersônicos em Operações em um Forno Elétrico a Arco,** 2009. 105 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre, 2009.

KOZAKEVITH, P. **Viscosity of Lime-Silica Melts Between 1660^a to 2100 °C.** INTERNATIONAL symposium AIME. 1959.

KROTH, L. F. *et al.* **Influência da Composição Química da Escória na Partição do Fósforo em Fornos Elétricos a Arco.** Salão UFRGS: XXVII Salão de Iniciação

Científica, Porto Alegre, 2015.

LIZE, H. L. **Estudo de Estabilização de Enxofre na Fabricação do Aço SAE 1070 Modificado**. Dissertação (mestrado). PPGE3M: UFRGS, 2016

MALFA, E. *et al.* **Cost and Energy Effective Management of EAF with Flexible Charge Material Mix**. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, v. 158, n. 1, p. 3-12, 2013.

MASUERO, A. B. **Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento**. 267 p. Tese (Doutorado em Engenharia). – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2001.

MASUERO, A.; DAL MOLIN D.; VILELA, A. **Estabilização e Viabilidade Técnica da Utilização de Escórias de Aciaria Elétrica**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v.4, n. 2 p. 57-81, 2004.

MATTIELO, J. *et al.* **Análise das Propriedades refratárias de luvas EBT (Eccentric Bottom Tapping) e Relação com o Desempenho em Operação**. In: 45° Seminário de Aciaria - Internacional, 2014, Porto Alegre. 10 f.

MEMOLI F. *et al.* **Recycling of Ladle Slag in the EAF: A Way to Improve Environmental Conditions and Reduce Variable Costs in the Steel Plants**. Iron & Steel Technology Magazine. p. 68-76, February, 2007.

MOREIRA, M. F. **Apostila de Siderurgia**. Rio de Janeiro, 2012.

MOURÃO, M. B. *et al.* **Introdução à siderurgia**. 2ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

PFEIFER, H.; KIRSCHEN, M.; SIMÕES, J. P. **Thermodynamic analysis of EAF electrical energy demand**. ECC Birmingham. 2005.

POLISSENI, A. E. **Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Escória de Aciaria Elétrica Micronizada como Material Cimentício**. Tese (doutorado). UFRGS. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2005.

PRETORIUS E. B. **Foamy Slag Fundamentals and Their Practical Application to Electric Furnace Steelmaking**, Baker Refractories, 1998.

REIS, E. A.; REIS, I. A. **Análise Descritiva de Dados**. 1ª ed. p. 53-57. Departamento de Estatística da UFMG, 2002.

RIZZO, E. M. D. S. **Introdução aos Processos Siderúrgicos**. 1ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.

RIZZO, E. M. D. S. **Introdução aos Processos de Lingotamento dos Aços**. ABM, São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006.

RIZZO, E. M. D. S. **Introdução aos Processos de Refino Secundário dos Aços**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. São Paulo. 2006b.

ROSSI, D. **Influência da Proporção entre as Vazões de Oxigênio e Gás Natural do Sistema de Injeção na Eficiência Energética de um Forno Elétrico a Arco**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre, 2014.

SILVA, A. C.; MEI P. R; **Aços e Ligas Especiais**. Editora Edgard Blücher, 2ª ed, 2006.

SIMA, A.; HOSSEIN, E. **The Effect of Foamy Slag in Electric Arc Furnace on Electric Energy Consumption**. University of Wollongong, Austrália, 2002.

SKUPIEN, D. **The Surface Tensions and Foaming Behavior of Melts in the System CaO-FeO-SiO₂**. Metallurgical and Materials Transactions, Vol 31B, 2000.

S&P GLOBAL; **Platts: Metals Insight**. Volume 12, Edição 18, 2017.

TOLEDO, H. **Técnicas fototérmicas e de raios-X para o monitoramento de sólidos e gases em materiais cerâmicos**. Tese (doutorado). CCT: UENF, 2003

TURKDOGAN, E. T. **Fundamentals of Steelmaking**. The Institute of Materials, London, 1996.

VIEIRA, D. **Análise Comparativa da Composição Química de Aço e Escória e Rendimento Metálico de um FEA Entre Parâmetros de Carregamento e Injeções Distintos**. Dissertação. PPGE3M: UFRGS, 2017.

WERKEMA, M. C. C. **As Ferramentas da Qualidade no Gerenciamento de Processos**. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1995.

World Steel Association. **World Steel In Figures 2018**. Disponível em <<https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:f9359dff-9546-4d6b-bed0-996201185b12/World+Steel+in+Figures+2018.pdf>>. Acesso em 03 nov 2018.

APÊNDICE A

FAIXA DE ELEMENTOS PARA CALCULADORA - SETEMBRO										
CARGA	ELEMENTOS CRÍTICOS (%)									
	Cr	S	Ni	Mo	W	Co	Sn	Cu	Pb	Zn
60	0,0950	0,0440	0,0890	0,0270	0,0070	0,0100	0,0130	0,1920	0,0004	0,0220
61	0,1130	0,0430	0,1040	0,0320	0,0070	0,0100	0,0140	0,2080	0,0003	0,0200
62	0,1310	0,0380	0,1100	0,0380	0,0070	0,0110	0,0130	0,1910	0,0004	0,0210
63	0,1360	0,0410	0,1118	0,0520	0,0070	0,0110	0,0130	0,1890	0,0003	0,0220
64	0,2365	0,0340	0,4085	0,2065	0,0090	0,0170	0,0120	0,1805	0,0003	0,0215
471	0,1660	0,0380	0,9220	0,0860	0,0070	0,0290	0,0120	0,1950	0,0003	0,0190
602C	0,0785	0,0273	0,0763	0,0230	0,0060	0,0080	0,0110	0,1428	0,0001	0,0163
603C	0,1055	0,0355	0,0945	0,0248	0,0070	0,0098	0,0118	0,1858	0,0003	0,0198
60AS	0,0458	0,0213	0,0633	0,0188	0,0063	0,0093	0,0100	0,1445	0,0001	0,0188
60F	0,1170	0,0310	0,1030	0,0350	0,0070	0,0100	0,0120	0,1860	0,0008	0,0230
60M	0,0343	0,0100	0,0333	0,0100	0,0060	0,0080	0,0043	0,0520	0,0001	0,0270
60MAG	0,0815	0,0260	0,0748	0,0210	0,0070	0,0100	0,0100	0,1555	0,0001	0,0220
60ZT	0,1070	0,0420	0,0988	0,0268	0,0070	0,0095	0,0123	0,1880	0,0022	0,0165
61A	0,0740	0,0430	0,0730	0,0270	0,0060	0,0090	0,0130	0,1700	0,0002	0,0230
61AS	0,0870	0,0290	0,0805	0,0270	0,0070	0,0095	0,0130	0,1445	0,0001	0,0290
61CR	0,0910	0,0420	0,0870	0,0260	0,0070	0,0100	0,0130	0,1940	0,0004	0,0230
61CU	0,1160	0,0410	0,1030	0,0300	0,0080	0,0100	0,0130	0,2010	0,0002	0,0210
62A	0,2680	0,0300	0,1020	0,0420	0,0120	0,0130	0,0160	0,1850	0,0026	0,1640
62CU	0,1300	0,0390	0,1080	0,0380	0,0070	0,0110	0,0130	0,2015	0,0004	0,0215
63A	0,1503	0,0298	0,0925	0,1883	0,0080	0,0100	0,0120	0,1603	0,0001	0,0205
63CU	0,1350	0,0410	0,1060	0,0460	0,0070	0,0110	0,0130	0,1940	0,0002	0,0210
63MO	0,1215	0,0400	0,1140	0,3523	0,0078	0,0110	0,0120	0,1885	0,0003	0,0180
64CU	0,2540	0,0410	0,3590	0,1410	0,0080	0,0170	0,0120	0,2040	0,0003	0,0220
64MO	0,1135	0,0240	0,8135	0,5038	0,0060	0,0248	0,0108	0,1908	0,0001	0,0158
65I	0,3260	0,0330	1,4035	0,2175	0,0080	0,0370	0,0110	0,1870	0,0003	0,0225
65IHK	0,2640	0,0340	1,2560	0,2025	0,0083	0,0350	0,0120	0,1850	0,0003	0,0240

Tabela 1. Resultados da porcentagem dos elementos críticos das cargas frias do FEA para o mês de setembro. Fonte: (O AUTOR).

FAIXA DE ELEMENTOS PARA CALCULADORA - OUTUBRO										
CARGA	ELEMENTOS CRÍTICOS (%)									
	Cr	S	Ni	Mo	W	Co	Sn	Cu	Pb	Zn
60	0,0950	0,0430	0,0890	0,0270	0,0070	0,0100	0,0130	0,1905	0,0005	0,0210
61	0,1058	0,0410	0,1058	0,0320	0,0080	0,0110	0,0130	0,2000	0,0002	0,0190
62	0,1250	0,0370	0,1103	0,0380	0,0070	0,0110	0,0120	0,1890	0,0003	0,0200
63	0,1343	0,0410	0,1140	0,0560	0,0070	0,0110	0,0130	0,1880	0,0002	0,0220
64	0,2365	0,0335	0,4390	0,2250	0,0090	0,0180	0,0120	0,1905	0,0002	0,0180
471	0,2750	0,0390	1,1035	0,2100	0,0088	0,0335	0,0120	0,1935	0,0001	0,0173
602C	0,0785	0,0273	0,0763	0,0230	0,0060	0,0080	0,0110	0,1428	0,0001	0,0163
603C	0,1055	0,0355	0,0945	0,0248	0,0070	0,0098	0,0118	0,1858	0,0003	0,0198
60AS	0,0463	0,0203	0,0633	0,0188	0,0060	0,0093	0,0103	0,1445	0,0006	0,0188
60F	0,1170	0,0310	0,1050	0,0360	0,0070	0,0100	0,0120	0,1850	0,0008	0,0230
60M	0,0408	0,0110	0,0380	0,0110	0,0060	0,0080	0,0050	0,0640	0,0001	0,0248
60MAG	0,0810	0,0268	0,0708	0,0210	0,0070	0,0100	0,0100	0,1548	0,0001	0,0208
60ZT	0,0998	0,0408	0,1503	0,0303	0,0073	0,0123	0,0123	0,1953	0,0022	0,0158
61A	0,0730	0,0430	0,0730	0,0270	0,0060	0,0090	0,0130	0,1810	0,0001	0,0270
61AS	0,0825	0,0270	0,0790	0,0275	0,0073	0,0098	0,0135	0,1495	0,0001	0,0178
61CR	0,0900	0,0410	0,0880	0,0260	0,0070	0,0100	0,0130	0,1940	0,0004	0,0230
61CU	0,1150	0,0410	0,1030	0,0310	0,0080	0,0100	0,0130	0,2018	0,0002	0,0200
62A	0,2680	0,0300	0,1020	0,0420	0,0120	0,0130	0,0160	0,1850	0,0026	0,1640
62CU	0,1238	0,0390	0,1060	0,0370	0,0070	0,0110	0,0130	0,1980	0,0004	0,0200
63A	0,1440	0,0340	0,1023	0,3425	0,0080	0,0110	0,0120	0,1678	0,0001	0,0188
63CU	0,1238	0,0390	0,1070	0,0480	0,0080	0,0110	0,0128	0,1910	0,0002	0,0208
63MO	0,1190	0,0390	0,1190	0,3410	0,0080	0,0110	0,0120	0,1940	0,0003	0,0170
64CU	0,2448	0,0410	0,3553	0,1408	0,0070	0,0170	0,0130	0,2058	0,0003	0,0205
64MO	0,1140	0,0310	0,7880	0,4760	0,0080	0,0240	0,0110	0,1950	0,0001	0,0170
65I	0,3450	0,0315	1,4285	0,2325	0,0080	0,0365	0,0110	0,1910	0,0002	0,0220
65IHK	0,2700	0,0340	1,2670	0,2100	0,0080	0,0350	0,0120	0,1880	0,0003	0,0240

Tabela 2. Resultados da porcentagem dos elementos críticos das cargas frias do FEA para o mês de outubro. Fonte: (O AUTOR).