

Universidade Federal de São João Del Rei Campus Alto Paraopeba Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANÁLISE, CÁLCULO E MODELAGEM DO SISTEMA A VÁCUO

EM PLANTA DE DESGASEIFICAÇÃO RH, COMPOSTA POR

EJETORES A VAPOR PARA REFINO DE AÇOS

INTERSTICIAL FREE.

Aluno: Volney Viana Nogueira

Orientador: Dr. Edson Romano Nucci

Ouro Branco, 2018



Universidade Federal de São João Del Rei - UFSJ

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

Volney Viana Nogueira

ANÁLISE, CÁLCULO E MODELAGEM DO SISTEMA A VÁCUO

EM PLANTA DE DESGASEIFICAÇÃO RH, COMPOSTA POR

EJETORES A VAPOR PARA REFINO DE AÇOS

INTERSTICIAL FREE.

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Universidade Federal de São João Del-Rei, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Área de Concentração: Análise, Controle e Otimização de Sistemas e Processos Industriais.

Orientador: Prof. Dr. Edson Romano Nucci.

Ouro Branco

2018

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB) e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N778a Nogueira, Volney Viana. Análise, cálculo e modelagem do sistema a vácuo em planta de desgaseificação RH, composta por ejetores a vapor para refino de aços intersticial free / Volney Viana Nogueira ; orientador Edson Romano Nucci. -- Ouro Branco, 2018. 133 p.
Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química) -- Universidade Federal de São João del-Rei, 2018.
1. Desgaseificação do aço intersticial free. 2. Equação de bombeamento a vácuo. 3. Throughput. 4. Bomba de vácuo. I. Nucci, Edson Romano, orient. II. Título. MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE VOLNEY VIANA NOGUEIRA, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI, EM 21 DE MAIO DE 2018.

BANCA EXAMINADORA:

Prof.Dr Edson Romano Nucci PPGEQ/UFSJ

Tobion an laTpack

Prof. Dr. Demian Patrick Fabiano

PPGEQ/UFSJ

Prof. Dr. Guilherme Liziero Ruggio da Silva

IFMG

Ouro Branco, 2018.

DEDICATÓRIA

À minha esposa Andréa Nogueira que com amor, compreensão e incentivo abdicou de muitos fins de semana na minha companhia para que meu sonho, que se tornou também dela, fosse realizado.

Aos meus pais Paulo Nogueira e Terezinha Viana Nogueira que acreditaram ser possível a conclusão do mestrado.

AGRADECIMENTOS

A Deus por conceder saúde e força de vontade.

Ao meu orientador Prof. Dr. Edson Romano Nucci pelo respeito e apoio.

Ao meu amigo Rui Coelho que contribuiu para a coleta de dados e informações técnicas e amigos Rogério Geraldo, Saulo Uainer e Gustavo Avila pelo incentivo.

Resumo

Nessa dissertação é analisado uma planta de desgaseificação RH, cuja sigla é a inicial dos nomes das empresas *Ruhrstahl* e *Heraeus*. Elas se uniram para desenvolver uma planta industrial para desgaseificar o aço líquido. Em particular, é tratado uma planta constituída por ejetores a vapor para a desgaseificação do aço IF, *intersticial free* ou livre de interstícios, um dos mais exigentes devido à dificuldade de desgaseificação. O aço IF é uma subcategoria do aço ultrabaixo carbono, UBC. Com o RH é possível produzir aço para peças que podem ser submetidas a grandes esforços mecânicos e chapas que estão sendo usadas em aplicações de conformação e estampabilidade profunda, sendo cada vez mais utilizadas na indústria branca (eletrodomésticos), amarela (agrícola) e automotiva.

A análise foi realizada a partir da equação geral para o processo de bombeamento, calculando os valores de vazão mássica e gerando equações específicas para o throughput, que é a pressão versus a vazão, para as fontes de gases existentes no processo e por fim, identificando a velocidade efetiva de bombeamento. As fontes relevantes encontradas foram a vaporização; gases do processo: dióxido de carbono, monóxido de carbono, oxigênio e hidrogênio; injeção controlada de: argônio e nitrogênio e ar atmosférico. As fontes consideradas irrelevantes, conforme referência bibliográfica são a sublimação, permeação e sorção, além do nitrogênio conforme testes realizados. Outras fontes de gás foram analisadas, mas não devem ser consideradas na equação geral para o processo de bombeamento, pois são falhas do sistema, uma vez que podem prejudicar a velocidade para atingir o vácuo e sua pressão de estabilidade: a infiltração externa, a recirculação de gás e água dos condensadores como fonte de gás. Dessa forma foi possível definir todos os termos da equação para o processo de bombeamento a vácuo, com destaque ao throughput, possibilitando a sua utilização em ferramentas de simulação, retratando de forma bastante realística um processo complexo e extremamente importante e que está recebendo uma atenção maior da siderurgia devido aos aços de alto valor agregado que são produzidos no RH. Este estudo pode ser utilizado como referência para o desenvolvimento do processo de desgaseificação e dos equipamentos envolvidos.

Palavras chave: Bomba de vácuo, desgaseificação do aço, equação de bombeamento a vácuo, *throughput.*

Abstract

In this dissertation an RH degassing plant is analyzed, which is the initial name of the Ruhrstahl and Heraeus companies. They came together to develop an industrial plant to degas the liquid steel. In particular, a plant consisting of steam ejectors for the degassing of the IF steel is treated, interstitial free or free of interstices, one of the most demanding because of the difficulty of degassing. The IF steel is a subcategory of the ultra-low carbon steel, UBC. With RH it is possible to produce steel for parts that can be subjected to great mechanical stresses and plates that are being used in deep forming and stamping applications, being increasingly used in the white (household electrical), yellow (agricultural) and automotive industries.

The analysis was performed from the general equation for the pumping process, calculating the mass flow values and generating specific equations for the throughput, which is the pressure versus the flow, for the sources of gases in the process and, finally, identifying the actual speed of pumping. The relevant sources were vaporization; process gases: carbon dioxide, carbon monoxide, oxygen and hydrogen; controlled injection of: argon and nitrogen and atmospheric air. The sources considered irrelevant, according to bibliographical reference are the sublimation, permeation and sorption, besides the nitrogen according to tests performed. Other sources of gas have been analyzed, but they should not be considered in the general equation for the pumping process, because they are system failures, since they can impair the speed to reach the vacuum and its stability pressure: external infiltration, recirculation of gas and water from the condensers as a source of gas. Thus, it was possible to define all the terms of the equation for the vacuum pumping process, with emphasis on throughput, allowing its use in simulation tools, depicting in a very realistic way a complex and extremely important process that is receiving greater attention because of the high value added steel produced in HR. This study can be used as reference for the development of the degassing process and the equipment involved.

Keywords: Vacuum pump, steel degassing, vacuum pumping equation, throughput.

Lista de Figuras

Figura 1- Fluxograma de processos e produtos entre mineração e aciaria18
Figura 2 - Principais plantas responsáveis pelos principais processos da aciaria19
Figura 3 – Exemplo Convertedor LD21
Figura 4 - Sequência de operação no convertedor22
Figura 5 - Temperatura de uma corrida típica no Forno Panela24
Figura 6 - Fluxograma de um Forno Panela24
Figura 7 – Reatores de Desgaseificadores a Vácuo V.D. e V.D.O.B27
Figura 8 - Desgaseificador a vácuo RHOB – Região entre Panela e Reator27
Figura 9 – Representação do sistema a vácuo29
Figura 10 – Representação Esquemática do Balanço de Massa no RH30
Figura 11 - Concentração de H e O no aço líquido a 1600°C em equilíbrio com as misturas de H_2 e H_20
Figura 12 - Influência da pressão de vácuo em mbar, junto com o volume total injetado de argônio em <i>m</i> ³ na perna de subida, no teor em ppm de nitrogênio no aço
Figura 13: Tipos de interstícios na estrutura cristalina dos aços36
Figura 14 - Relação da pressão parcial com %C x %O de referência para um aço a 1600 °C38
Figura 15 - Pressões absoluta, manométrica e de vácuo40
Figura 16 - Bombas de vácuo conforme o princípio de operação43
Figura 17: Range de pressão dos processos industriais a vácuo44
Figura 18: Range de trabalho das bombas de vácuo mais comum45
Figura 19 - Layout de bombas de vácuo a jato de vapor47
Figura 20 – Instalação barométrica e não barométrica de condensadores48
Figura 21 – Representação esquemática de um ejetor50
Figura 22 - Representação do orifício calibrado do bico de injeção de vapor50
 Figura 23 - Representação esquemática de um ejetor e evolução idealizada da velocidade e pressão estática do fluido de trabalho ao longo do eixo do ejetor. a) Vista de secção do ejetor; b) Evolução da pressão estática ao longo do ejetor; c) Evolução da velocidade ao longo do ejetor
Figura 24 - Diagrama da metodologia da dissertação de mestrado52
Figura 25 - Símbolos utilizados para câmara e bomba de vácuo e bomba de vácuo formada por ejetores na norma DIN 28401
Figura 26 – Representação de um Sistema de Vácuo formado por Ejetores54
Figura 27 – Parte da composição química típica de um aço IF61

Figura 28 - Pressão de saturação de vapor para a maioria dos metais usados na tecnologia do vácuo com a indicação da pressão de vapor do ferro líquido66
Figura 29 - Permeação o hidrogênio através de vários materiais70
Figura 30 - Processos durante a permeação71
Figura 31 - Redução do teor de oxigênio em ppm através da combinação de carbono no aço líquido e no segundo momento através da adição de alumínio, reagindo com oxigênio formando alumina76
Figura 32 - Queda de concentração de oxigênio para corridas IF com erro de medição
Figura 33 - Queda de concentração de oxigênio para corridas IF77
Figura 34 - Média pressão de vácuo em mbar x tempo em minutos para corridas IF78
Figura 35 - 1º Imersão das pernas no aço. 2º Sucção do aço da panela pela força do vácuo até a altura onde se inicia a circulação entre reator e panela. 3º Nível de aço no vaso ou reator, durante o tratamento
Figura 36– Throughput de 0_2 , CO e $C0_2$ em $kg.m^2/s^3$
Figura 37 – Vazão mássica em kg/h de 0_2 , CO e $C0_2$
Figura 38 – Vazão mássica de CO, $C0_2$ e 0_2 em kg/h entre 2 e 9 minutos86
Figura 39 – Throughput de CO, $C0_2$ e 0_2 em $kg.m^2/s^3$ entre 2 e 9 minutos87
Figura 40 – Redução de hidrogênio em PPM durante corridas IF
Figura 41 – Redução de hidrogênio em PPM durante corridas IF, desconsiderando amostras com elevação do teor de hidrogênio com o tempo90
Figura 42 – Geração em kg/h de H_2 a partir do aço IF
Figura 43 – Throughput de H_2 em $kg.m^2/s^3$ durante corridas de aço IF
Figura 44 – Throughput de H_2 em $kg.m^2/s^3$ durante corridas de aço IF (corrigida)93
Figura 45: Purgas de nitrogênio no sistema de vácuo96
Figura 46: Exemplo de um sistema de vácuo formado por ejetores a vapor, com diferentes estágios de pressão97
Figura 47: Volume da bomba de vácuo99
Figura 48: Volume do Sistema de Vácuo100
Figura 49 – Representação da vazão em kg/h de ar na bomba de vácuo102
Figura 50 – Representação do throughput $(kg.m^2/s^3)$ de ar na bomba de vácuo103
Figura 51 – Representação da vazão em kg/h de ar no sistema durante tratamento de corridas IF104
Figura 52 – Representação do throughput $(kg. m^2 / s^3)$ de ar no sistema105

Figura 53 – Representação de um sistema de vácuo com medidores de vácuo para cálculo da condutância107
Figura 54: Redução da pressão de vácuo com o tempo com a bomba de vácuo isolada108
Figura 55: Redução da pressão de vácuo com o tempo com o sistema completo média durante tratamento de corridas IF110
Figura 56: Velocidade Efetiva de Bombeamento Sef em $(kg.m^2/s^3)$ de 0 a 37 minutos116
Figura 57: Velocidade Efetiva de Bombeamento Sef em $(kg.m^2/s^3)$ de 0 a 10 minutos.

Lista de Tabelas

Sumário

1 Introdução	.16
1.1 Objetivo Geral	.17
1.1.1 Objetivos Específicos	.17
2. Revisão Bibliográfica	.18
2.1 Fabricação e Refino do Aço - Aciaria	.19
2.1.1 Fusão e Refino Primário	.20
2.1.2 Refino Secundário do Aço	.23
2.1.2.1 Forno Panela	.23
2.1.2.2 Estação de Borbulhamento	.25
2.2 Desgaseificador a Vácuo	.25
2.2.1 Cinética do Processo Circulação de Aço	.30
2.2.2 Funções do RHOB	.32
2.2.2.1 Desidrogenação	.32
2.2.2.2 Desnitrogenação	.34
2.2.2.3 Descarburação	.35
2.2.2.4 Aquecimento Químico	.38
2.2.2.5 Ajuste químico	.38
2.3 Vácuo	.39
2.4 Formas de se atingir o vácuo	.42
2.5 Bomba de vácuo a jato de vapor	.45
2.5.1 Condensador	.48
2.5.2 Ejetor	.49
3. Metodologia	.52
3.1 Desenvolvimento físico e matemático para modelagem de processo bombeamento em vácuo	de .53
3.2 Definição do aço a ser analisado, aço IF	.60
3.3 Identificação das fontes de gases e vapores $\sum_{i=1}^{n} Q_i$.61
4. Análise, Resultados e Discussão	.63
4.1 Determinação da vazão mássica e throughput	.63
4.1.1 Infiltração, throughput, Q_{Inf}	.63
4.1.2 Vaporização, throughput, Q_{vap}	.65
4.1.3 Sublimação, throughput, <i>Q_{sub}</i>	.69
4.1.4 Permeação, throughput, Q_{perm}	.69
4.1.5 Sorção, throughput, <i>Q_{sorç}</i>	.72

4.1.6 Gases e Vapores de Processo, throughput, Q_{GVP}	73
4.1.6.1 Oxigênio, gás carbônico e dióxido de carbono Q_{02} ; Q_{C0} ; Q_{C02}	73
4.1.6.2 Hidrogênio Q _H	88
4.1.6.3 Nitrogênio <i>Q_N</i>	93
4.1.7 Injeção controlada de gases, throughput, Q _{IC}	94
4.1.7.1 Injeção controlada de argônio, throughput, Q _{ICA}	
4.1.7.2 Injeção controlada de nitrogênio, throughput, Q_{ICN}	95
4.1.8 Água dos condensadores como fonte de gás	97
4.1.9 Evacuação do ar atmosférico da bomba de vácuo e do sistema de throughput Q_{AR}	e vácuo, 99
4.1.9.1 Evacuação do ar atmosférico da bomba de vácuo, throughput Q_{arbd}	_{omba} .101
4.1.9.2 Evacuação do ar atmosférico do sistema de vácuo, thr $Q_{arsistema}$	oughput 103
4.2 Velocidade efetiva de sucção com a bomba de vácuo isolada e completo.	sistema 105
4.3 Equações que representam o processo de desgaseificação do aço IF.	112
4.4 Velocidade Efetiva de Bombeamento	113
5 Conclusões	117
6 Sugestões para Trabalhos Futuros	119
Referências	120
Apêndice A	125
Apêndice B	132

1 Introdução

Para se entender a função de um desgaseificador a vácuo é importante entender o contexto no qual ele está inserido. Há vários processos dentro de uma siderúrgica que transformam várias matérias-primas em um produto que precisa novamente ser processado até chegar ao produto final, aço com determinada especificação química e consequentemente determinada especificação mecânica. Alguns desses processos trabalham com fusão de materiais na presença de gases, principalmente hidrogênio, oxigênio e nitrogênio que acabam fazendo parte da constituição do aço líquido e precisam ser retirados antes de sua solidificação nos processos de lingotamentos.

A presença de gases no interior do aço líquido reduz sua resistência mecânica, podendo dar início a trincas em peças submetidas a grandes esforços mecânicos como em pás de turbinas e barras de direção e em chapas submetidas a conformação e estampagem, além atribuir má qualidade superficial ao aço nos processos de lingotamentos, trefilação, conformação e laminação.

Uma vez esclarecido o contexto do processo do desgaseificador na siderurgia é necessário entender as várias funções de uma planta de desgaseificação de aço que utiliza o vácuo como fundamento. Para então relacionar as funções com parâmetros de operação e dimensionais dos equipamentos e sua influência na obtenção do vácuo, necessário para retirar os gases do aço líquido.

O vácuo deve ser gerado em um ambiente controlado onde o metal líquido se encontra. Esse vácuo deve ser alto o suficiente, ou seja, quanto mais alto o vácuo, mais baixa a pressão, para conseguir retirar os gases. E para processos industriais, a baixa pressão deve ser aliada da velocidade pela qual a pressão é reduzida para que os gases sejam retirados com o menor tempo possível.

De acordo com Umrath (2007), há várias formas de gerar vácuo na indústria, uma das mais eficientes para retirar os gases do aço líquido é a utilização de um ou mais ejetores a vapor que em conjunto com outros equipamentos é denominado bomba de vácuo, onde é possível gerar o vácuo adequado na velocidade que a indústria precisa.

1.1 Objetivo Geral

Analisar, calcular e modelar o processo de desgaseificação do aço líquido, através de testes, conhecendo os parâmetros e fenômenos físicos relacionados com a

obtenção do vácuo através da bomba composta por ejetores a vapor em uma planta siderúrgica, visando fornecer dados para simulações e desenvolvimento do processo e equipamentos.

1.1.1 Objetivos Específicos:

- a) descrever todas as fontes de gases envolvidas no processo de desgaseificação do aço líquido IF e definir quais são relevantes, quais são irrelevantes e quais são relevantes, mas fruto apenas de falha no processo e que não devem ser consideradas na equação geral do processo de bombeamento a vácuo;
- b) detalhar as fontes de gases relevantes no processo, realizando várias análises químicas da composição do aço para conhecer a vazão mássica e throughtput de gases envolvidos, bem como definir a equação que representa a queda de pressão de vácuo, podendo assim isolar o termo S_{ef} , velocidade efetiva de bombeamento, da equação geral para o processo de bombeamento a vácuo, definindo assim todas as variáveis.

2 Revisão Bibliográfica.

A metalurgia é a ciência responsável pela extração de metais a partir de seus minérios e a siderurgia é um ramo da metalurgia que trata especificamente da extração do ferro do minério de ferro. Alguns dos produtos finais de uma siderúrgica são o vergalhão e perfil estrutural para construção civil, fio máquina para a indústria de trefilação, chapas para indústria branca e automobilística (SIDERGURGIA, 2016).

No Apêndice A, foi realizada uma revisão bibliográfica dos processos e produtos desde a mineração até a aciaria dentro de uma usina siderúrgica integrada. Nesse apêndice é possível conhecer melhor o fluxograma da Figura 1.



Figura 1: Fluxograma de processos e produtos da mineração a aciaria.

De acordo com seu processo produtivo, as usinas siderúrgicas são classificadas como integradas, semi-integradas ou não integradas. As usinas integradas que tem seu processo produtivo iniciado com a utilização de minério de ferro, operam as três fases básicas (IBS, 2007).

a) redução, que envolve processos de sinterização, pelotização e alto-forno.

 b) refino, que envolve os processos de dessulfuração e o processos dentro da aciaria: refino primário, secundário e lingotamentos; c) laminação, que envolve processo de laminação de perfis estruturais, chapas, fio máquina entre outros.

As usinas semi-integradas operam duas fases, sendo as mais usuais o refino e laminação. Essas usinas partem do ferro gusa, ferro esponja ou sucata, para transformá-los em aço. As usinas não integradas operam apenas uma fase do processo: redução ou laminação (IBS, 2007).

Ainda dentro da contextualização, são tratados os processos e produtos dentro da Aciaria. macroprocesso refino. onde acontece 0 dando importância ao Desgaseificador, objeto de estudo dessa dissertação, conforme Figura 2. As plantas citadas na Figura 2 estão detalhadas no capítulo 2.1 e o desgaseificador no capítulo 2.2 onde é então detalhado o processo de desgaseificação guanto a sua cinética e funções. Também é realizada a revisão sobre o conceito de vácuo e as formas de o alcançar, com destaque a bomba de vácuo a jato de vapor e seus principais equipamentos: condensadores e ejetores.



Figura 2 - Principais plantas responsáveis pelos principais processos da aciaria.

2.1 Fabricação e Refino do Aço - Aciaria.

A aciaria é a unidade dentro da usina siderúrgica responsável em transformar o ferro gusa em diferentes produtos como lingotes, tarugos, blocos e placas com os mais diversos tipos de aço. Os três primeiros produtos são classificados como Longos

e o ultimo como Planos e são utilizados em outras unidades como a Laminação e Trefilação fora da Aciaria como matéria prima para serem transformados em:

a) perfis estruturais, utilizados na fabricação de grandes equipamentos como navios, estruturas mecânicas como pontes e civis como prédios.

b) fio máquina, utilizado na fabricação de elementos fixadores, como porcas, parafusos, prisioneiros e rebites. Também é utilizado na fabricação de arames para esferas de rolamento, molas helicoidais entre outros (FIO-MÁQUINA – AÇO CONTRUÇÃO MECÂNICA, 2017).

 c) chapas grossas de 6,30 a 100 mm servindo às mais diversas finalidades, como construção civil, naval, produção de equipamentos rodoviários e agrícolas (CHAPAS GROSSAS GERDAU, 2017).

d) bobinas e chapas a quente que são produtos do laminador de tiras a quente nas espessuras entre 2 a 20mm e podem ser utilizadas nas mais diversas aplicações, estrutural, tubos e estampagem (BOBINAS E CHAPAS A QUENTE GERDAU, 2017).

Dentro da aciaria, conforme Figura 2, tem-se o processo de fusão e refino ou refino primário constituído pelo convertedor ou conversor e seus periféricos, responsável em transformar o gusa em aço. O processo seguinte é o refino secundário constituído pelo forno panela, estação de borbulhamento e finalmente o desgaseificador a vácuo. O refino secundário proporciona propriedades químicas ao aço para que possa ser lingotado. Por último, tem-se os processos de lingotamentos, responsáveis em solidificar o aço líquido em diferentes formatos, como os já citados tarugos com bitola quadrada geralmente entre 100 e 160 mm, blocos com bitola quadrada geralmente entre 800 e 470 mm e placas geralmente nas de 220 e 250 mm com largura entre 800 e 2100 mm. (CHAPAS GROSSAS GERDAU, 2017).

2.1.1 Fusão e Refino Primário.

"A composição química do gusa, principal matéria-prima utilizada na fabricação do aço, está longe da composição típica dos aços, devendo ser reduzidos os teores de carbono, enxofre, fósforo, manganês, entre outros " (CASTRO, 2013). A redução do teor de carbono é a principal modificação do gusa para que se transforme em aço. Conforme Chiaverini (2012) o gusa se torna aço quando o teor de carbono é abaixo de 2,11% sendo que no gusa esse teor pode chegar a 5%.

Há vários tipos de convertedores, o principal deles, o convertedor LD (*Linz e Donawitz*), originado das cidades de *Linz e Donawitz* na Áustria no final da década de 40 e rapidamente difundido no mundo chegando a ser instalado no Brasil no final da década de 50. O convertedor LD é responsável pela produção de 73,7% do aço produzido no mundo, sendo o segundo processo o forno elétrico responsável por 25,8%. Se a matéria prima possui majoritariamente gusa, pois também pode ser utilizado sucata, o convertedor LD é utilizado, se majoritariamente sucata é então utilizado o forno elétrico. O maior produtor de aço no mundo é a China com 49,6% e o Brasil com 2,05 % é o oitavo maior produtor do mundo (STEEL STATISTICAL YEARBOOK, 2016).

Para a redução do carbono no gusa líquido, originado principalmente do coque adicionado no alto-forno, é utilizado uma lança de injeção de oxigênio, que sopra o oxigênio combinando o mesmo com o carbono formando CO e CO₂ dentro do convertedor, Figura 3. Os gases CO e CO₂, são recuperados pelo sistema de recuperação de gás e posteriormente utilizados nas caldeiras para produção de vapor. O desgaseificador a vácuo é uma das plantas onde o vapor é utilizado e sua função está detalhada no capítulo 2.5.2. No fundo do convertedor é injetado nitrogênio ou argônio para propiciar a homogeneidade do aço e facilitar captura do carbono pelo oxigênio (CASTRO, 2013).





Antes de ser iniciado o sopro com o oxigênio, pode se adicionar ou não sucata, proveniente do próprio processo siderúrgico. A sucata gerada na aciaria geralmente são pontas de tarugos, bloco ou placas onde se concentra as impurezas ou peças

Fonte: Adaptado de Castro (2013).

inteiras que são descartadas devido a erros de composição química ou erros dimensionais. A sucata também pode ser originada por processos antes ou após a aciaria. Na laminação, por exemplo, a sucata pode ser chapas deformadas ou com imperfeições, ranhuras na superfície devido a presença de micro bolhas que deveriam ser retiradas no Desgaseificador. A sucata gerada antes da aciaria é proveniente do alto-forno. Muitas vezes o gusa gerado não possui a composição guímica adeguada para ser processado na dessulfuração primária ou aciaria e precisa ser descartado. Quando isso acontece, o gusa é encaminhado através do carro torpedo a um local, conhecido geralmente por pátio de emergência, onde é basculado. O basculamento é feito em cima de formas onde gusa é resfriado a temperatura ambiente para posterior utilização no convertedor. As formas facilitam a remoção, o armazenamento e transporte para o convertedor (MARTINI, 2015).

No convertedor, além da redução do teor do carbono do gusa, são retirados alguns elementos químicos na forma de escória, como o enxofre que não pôde ser retirado no processo anterior de dessulfuração primária. O aço é retirado durante o basculamento do convertedor e a escória, que é sempre menos densa, fica no fundo. Essa escória recebe um jato de gás inerte, chamado slag splashing, que espalha a escória na superfície do refratário, protegendo o mesmo para a próxima corrida. A escória remanescente é então vazada e retirada do convertedor, conforme ilustrado na Figura 4.



Figura 4 - Sequência de operação no convertedor.

¹ ABM, Introdução aos Processos de Refino Primário dos Aços nos Convertedores a Oxigênio, 2006.

Além da retirada de carbono na forma de gás, impurezas e elementos químicos danosos ao aço são retirados junto com a escória e a composição química é ajustada no convertedor. Por isso o processo que ocorre no convertedor é chamado de fusão e refino. Fusão devido a sucata que é fundida junto com o gusa e refino devido aos elementos de liga que são acionados ao aço para que tenha as propriedades especificas para cada tipo de aço requerido (MARTINI, 2015). A adição de sucata não é obrigatória, mas desejada, pois permite reutilizar material que seria descartado no processo, sendo ambientalmente correto. Quanto a dimensão, de acordo com Castro (2013), os convertedores variam de dimensão, conforme cada usina siderúrgica e podem processar entre 30 a 350 t de gusa no período de 13 a 20 minutos..

2.1.2 Refino Secundário do Aço.

Conforme Machado, Sobrinho e Arrivabene (2003), o refino secundário do aço abriga vários processos. Aqui são destacados três deles, o processo no Forno Panela, Estação de Borbulhamento e Desgaseificador a Vácuo, objeto de estudo desta dissertação que será tratado em tópico especifico. O objetivo do refino secundário é acertar a composição química e temperatura final do aço, antes do lingotamento. A palavra refino vem da necessidade de refinar a composição e chegar no acerto químico dentro da faixa permitida para cada aço. A palavra secundário vem da segunda etapa do refino, a primeira etapa é realizada no convertedor que realiza o primeiro ajuste. Todas as plantas do refino secundário podem ser utilizadas em conjunto ou sozinhas para o refino final, dependendo da classe de aço a ser produzido.

2.1.2.1 Forno Panela

O forno panela é um processo que consegue elevar a temperatura do aço para que o mesmo seja lingotado na temperatura correta, além de realizar o acerto químico. Na Figura 5 é possível verificar o acerto da temperatura realizado pelo forno panela em uma corrida típica, que pode ser feito em várias etapas, cada pico de temperatura no gráfico significa que os eletrodos foram ligados. Os eletrodos são fabricados de grafite e ficam muito próximos ao aço líquido. Através dos eletrodos é passado uma corrente elétrica entre eles e o aço líquido, devido a diferença de potencial, proporcionando a elevação da temperatura do aço. O acerto da temperatura pode ser desde a temperatura de solidificação do aço, em torno de 1500 °C, até aproximadamente 1700 °C, dependendo da temperatura desejada no lingotamento, conforme Sampaio, Braga e Fugii (2006). A elevação da temperatura do aço líquido é realizada aproximando-se eletrodos ao banho e passando uma corrente elétrica entre eles sem existir contato físico. Ao mesmo tempo são adicionados elementos de liga ao aço e injeção de gás inerte no fundo da panela para promover a homogeneidade do banho com relação a temperatura e composição química. A Figura 6 ilustra uma vista esquemática do processo com os principais equipamentos.





Fonte: Adaptado de Sampaio, Braga e Fugii (2006)



Figura 6 - Fluxograma de um Forno Panela.

Fonte: RIZZO², 2006 apud BRAGA; SAMPAIO; FUGI, 2006.

² RIZZO, E. M. S. Introdução aos Processos de Refino Secundário dos Aços. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006.

2.1.2.2 Estação de Borbulhamento

Na estação de borbulhamento, ou estação de rinsagem, da mesma forma que o forno panela, são adicionadas ligas para o acerto químico e injeção de gás inerte no fundo da panela para homogeneização do banho, mas não há um sistema de aquecimento. A temperatura pode ser acertada para o lingotamento, mas apenas para baixo, seja através do borbulhamento de gás ou adição de sucata. Ao contrário da sucata utilizada no convertedor, a sucata utilizada deve ter sua composição química muito bem conhecida, pois pode não haver outra oportunidade de acerto químico antes do lingotamento, de acordo com Machado, Sobrinho e Arrivabene (2003); Scheid (2010).

2.2 Desgaseificador a Vácuo RH

O desgaseificador a vácuo faz parte do refino secundário do aço, mas será tratado nesse tópico em especifico. Conforme Figura 2, o desgaseificador pode receber o aço diretamente do convertedor, ou do forno panela ou da estação de borbulhamento, preparando o aço para os lingotamentos.

Até o momento foram descritos vários processos dentro de uma siderúrgica, em todas elas há fusão de materiais, injeção, geração e percolação de gases através de materiais fundidos. Estes gases acabam ficando no interior do aço líquido, formando compostos químicos ou livres de ligações químicas, mas influenciando nas propriedades do aço e precisam ser eliminados ou controlados.

O desgaseificador a vácuo é um processo que tem como objetivo retirar gases no interior do aço líquido além de adicionar elementos de liga. Tem seu maior rendimento com o aço sob vácuo, para a produção de aços especiais. Com a evolução do desgaseificador, outras funções foram acrescidas ao desgaseificador como descarburação forçada e elevação da temperatura do aço que serão descritos neste estudo (MARTINS *et al.*, 2004).

Desgaseificador a vácuo RH é conhecido apenas pela sigla RH (*Ruhrstahl e Heraeus*), iniciais das palavras *Ruhrstahl* e *Heraeus*, nomes das empresas que se juntaram para desenvolver essa planta industrial. Quando o RH possui Sopro de Oxigênio do inglês *Oxygen Blowing* (OB) a planta é conhecida também por *Ruhrstahl*

and Heraeus Oxygen Blowing (RHOB), conforme Siemens (2008)³. O RH é de suma importância para a produção de aços especiais uma vez que é utilizada para produção de aços de aços de alta qualidade dentro de Aciarias com grande volume de produção, geralmente acima de 30 toneladas por corrida ou batelada.

O consumo sempre crescente de aço com características mais nobres, como os aços estruturais de alta resistência, exige maiores rigor de composição química e grau de limpeza. Isto levou ao desenvolvimento de novas técnicas de tratamento do aço na panela, entre os quais a desgaseificação à vácuo (SIEMENS, 2008)³.

As primeiras referências ao tratamento do aço líquido sob vácuo remontam a mais de um século e os problemas principais que impediam o seu desenvolvimento estavam associados à dificuldade de produção de vácuo suficientemente alto e com capacidade de sucção necessária para eliminar os elevados teores de gases dissolvidos no aço (SIEMENS, 2008)³.

Só com o desenvolvimento da engenharia do vácuo, no período de 1940 a 1945, é que a aplicação em escala industrial de desgaseificação a vácuo obteve resultados positivos em trabalhos realizados pela companhia alemã *Borechumer Vereiu*, na década de 1950 (SIEMENS, 2008)³.

Existem quatro tipos de Plantas de Desgaseificação a Vácuo do inglês *Vacuum Degassing* (VD.), *Vacuum Degassing with Oxygen Blowing* (VDOB.), RH e RHOB. A primeira planta, VD consiste em inserir uma panela com aço líquido em um vaso maior hermeticamente fechado, onde o vácuo é produzido. Nele, o aço é borbulhado intensamente pelo fundo da panela por um gás inerte. A segunda planta, VDOB, utiliza o mesmo processo da VD e mais uma Lança que pode soprar oxigênio no banho. As plantas VD e VDOB são representadas na Figura 7. A terceira planta, RH, o aço líquido da panela é succionado para um vaso através de um dos dois tubos chamados de pernas e o aço fica circulando entre panela e vaso que fica hermeticamente fechado e sob vácuo. A quarta e última planta, RHOB, utiliza o mesmo processo do RH e mais uma Lança que pode soprar oxigênio no banho, conforme Figura 8, (MARTINS *et al.,* 2004).

³ Informação fornecida pela empresa SIEMENS durante o treinamento: Processo e manutenção do desgaseificador a vácuo. Ouro Branco, 2008.

O termo vaso, citados nas Figuras 7 e 8, é o mesmo que reator, onde todas as reações químicas acontecem, seja pela adição de elementos de liga, ou pela injeção de gás.O termo câmara de vácuo também é utilizado quando se quer dar importância ao vaso como um recipiente em vácuo.



Lança de Oxigênio Linha Sucção Vácuo Calha Adição Ligas Vaso ou Reator (parede externa em aço e interna em refratário) Ø 2114 mm Argônio Injetado Aço Líquido Perna de Descida Perna de Subida Panela Refratada

Figura 8 - Desgaseificador a vácuo RHOB – Região ente Panela e Reator.

Na Figura 8 é possível verificar:

- a) calha de adição de ligas, que é o equipamento final de todo um sistema de silos de armazenagem, correias transportadoras e balanças;
- b) linha de sucção, por onde todos os gases são succionados por uma bomba de vácuo, que neste estudo é formado por vários ejetores e condensadores;
- c) lança de oxigênio, que possui várias funções:

 elevar a temperatura do aço, através de uma reação exotérmica entre oxigênio e alumínio que é adicionado pela calha de adição;

 retirar carbono do aço, reação entre oxigênio e carbono do aço e formando monóxido de carbono e dióxido de carbono;

- reator ou vaso, revestido internamente por refratário, onde todas as reações químicas acontecem;
- e) perna de subida e descida, conhecida também como snorkel, revestida internamente e externamente por refratário pois há contato de aço líquido em ambos os lados;
- f) panela, também revestido internamento com refratário, por onde o aço líquido é transportado até o RH;
- g) tubulação de argônio, por onde é injetado argônio para reduzir a densidade do aço e promover a circulação do aço entre reator e panela.

O número de plantas de desgaseificação a vácuo tipo RHOB para o refino do aço vem aumentando no mundo e existem 7 delas no Brasil. Na Usiminas em Ipatinga, Minas Gerais M.G. e Cubatão, São Paulo S.P., Gerdau, Ouro Branco M.G, Companhia Siderúrgica em Volta Redonda, M.G., Arcelormittal em Serra, Espirito Santo E.S. e recentemente na Companhia Siderúrgica do Pecém em Fortaleza CE. e Ternium no Rio de Janeiro, R.J. (ABM, 2017).

A importância dessas plantas vem aumentando devido a vários fatores: necessidade de aumentar a qualidade dos aços, aumentar o rendimento das ligas adicionadas e reduzir custo com energia elétrica, quando é possível transferir a produção do forno panela para o desgaseificador.

Para análise do processo é muito importante conhecer em detalhes seu funcionamento, as variáveis envolvidas e fatores que podem contribuir ou prejudicar o produto final. Neste sentido será detalhado:

a) cinética do processo;

- b) funções do RHOB;
 - desidrogenação;
 - desnitrogenação;
 - descarburação;
 - aquecimento químico;
 - ajuste químico.

De forma a antecipar, para que o leitor tenha uma visão ampla e esquemática do sistema de vácuo é apresentada a Figura 9 onde é possível verificar desde o reator, onde os gases são retirados do aço, até a chaminé e tanque de água por onde gases e vapores são eliminados. Também é possível identificar a válvula principal de vácuo, por ela a bomba pode ser isolada do resto do sistema, além dos ejetores e condensadores, equipamentos responsáveis em gerar o vácuo. E os principais insumos para o vácuo: vapor e água. Lembrando que o sistema ilustrado é para a desgaseificação do aço liquido analisado nessa dissertação e que há outras configurações e layouts de equipamentos, principalmente para a bomba de vácuo, que podem inclusive sequer possuir ejetores e condensadores.





Para que seja possível identificar o balanço de massa de uma corrida típica durante o processo de desgaseificação no RH, é apresentado a Figura 10, onde na bomba de vácuo é utilizado água direta nos condensadores, vapor nos ejetores, argônio ou nitrogênio na perna de subida, isso durante todo o processo. Na máquina de injeção de fios é injetado fios de elementos de liga, geralmente no final do tratamento da corrida, que normalmente não é utilizada para aços IF, enquanto é utilizado argônio ou nitrogênio no fundo da panela para homogeneizar a corrida. Enquanto o aço é tratado, na calha de adição de ligas é adicionado elementos de ligas para propiciar as características químicas de cada aço. Na lança de gás, também chamada lança de oxigênio ou tcob, é utilizado argônio, nitrogênio e oxigênio, mas normalmente não utilizada para aços IF. No final tem-se 224 toneladas de aço líquido na composição química correta, a 1600°C e gases sendo eliminados para chaminé e água sendo tratada e ou resfriada.

ſ	Água Direta(contato com gases do processo)1512 m³/h a 0,35 MPa, 35°C nos Condensadores		Vaso com 224	Γ	Média 540 Kg de elementos de liga para aços convencionais e 1170 Kg p/ aços especiais		Sistema
	Vapor 29 t/h, 1 MPa e 280 °C nos Ejetores	┥	foneladas Aço Líquido. Inicio do	┢	Alumínio, 200 kg, quando necessário aquecer o aço.		_ de adição de ligas
Bomba	Água Refrigeração Indireta (sem contato com gases do		processo no RH.	┢	Argônio ou N2, 150 m³/h, 25°C, 0,7 a 1 MPa, 99,6% de pureza.		ue ligus
de - Vácuo	pr0cesso), 340 m³/h, 40°C, 0,7 MPa (entrada), Componentes Aquecidos		2 a 5 minutos para atingir 0.67 mbar de		O2, 3150 m³/h, 25°C, 1 a 2 MPa. N2, 130 m³/h, 25°C, 2 MPa,		Lança de Gás.
	Argônio ou N2, 180 m³/h, 25°C, 0,7 a 1 MPa, 99,6% de pureza, Pernas do Vaso		pressão de vácuo. Vaso com 224	ľ	Purga. Água Indireta (sem contato com gases do processo) 340 m ³ /h,		
Máquina de Injeção de Fios	Argônio ou N2, 10 m³/h, 25°C, 0,35 a 0,7 MPa, 99,6% para borbulhamento na Panela na posição de Injeção de Fios		toneladas Aço Líquido Vácuo a 0,67 mbar 15 a 35 minutos de tratamento sob vácuo profundo.		(saída) Água Direta (contato com gases do processo)1542 m³/h a		
	Elemento de Liga, 110 Kg de FeCa ou CaSi na Máquina de Injeção de Fios				Condensadores para filtragem e resfriamento.		Para reieito
	-		Vaso com 224 toneladas Aço Líquido Refinado.	ŀ	Ar aim, NZ, Argonio, CO, CO2, partículas metálicas para chaminé.		ou re- processo

Figura 10 – Representação Esquemática do Balanço de Massa no RH.

2.2.1 Cinética do Processo Circulação de Aço.

Conforme Martins *et al.* (2004) e Zhang e Fei Li (2014), o aço circula entre panela e vaso refratado, Figura 8, para que o processo de desgaseificação aconteça. A panela com aço líquido é posicionada abaixo do reator e há sistemas onde o reator é

abaixado e outros onde a panela é elevada até que as pernas sejam imersas no aço líquido. Na imersão o vaso não pode estar em vácuo, pois caso isso aconteça o vácuo irá succionar o aço e a escória que fica por cima junto com o ar do ambiente, formando um spray para o interior do vaso, impregnando a lança de oxigênio, calha de adição de ligas e linha de sucção. Uma vez que as pernas estejam imersas no aço, é então gerado vácuo dentro do reator e o aço flui da panela para o reator, até o nível em que o vácuo consegue succionar. O vácuo, através da diferença de pressão interna no reator e a pressão atmosférica do lado externo, produz força necessária para a sucção do aço líquido. Lembrando que o vácuo não é atingido instantaneamente e quanto menor o tempo para o seu atingimento, menor será o tempo de tratamento do aço no desgaseificador. Após inundar o reator, o aço líquido fica estacionado, sem movimento e o vácuo succiona os gases do aço (oxigênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono, argônio injetado na perna de subida, nitrogênio e hidrogênio), ficando uma parte do aco líquido na panela e outra parte no reator e os gases que são retirados do aço são aqueles presentes apenas na superfície do aço líquido, no interior do reator que é a área exposta de fato ao vácuo. Para promover o contato de todo aço líquido ao vácuo, em uma das pernas que estão imersas, é injetado um gás, geralmente argônio e alguns casos, nitrogênio. O argônio injetado em uma das pernas faz com que o aço líquido tenha a sua densidade reduzida, fluindo o aço junto com o gás para a superfície no banho dentro do reator. Neste momento, o vácuo succiona os gases já presentes no aço e o argônio que acabou de ser injetado em uma das pernas. O aço volta a ganhar densidade e desce para a panela pela perna onde não há injeção de argônio. Dessa forma é gerado um fluxo de aço líquido entre panela e vaso. Para a perna onde é injetado o gás é dado o nome de perna de subida e para a perna onde não há injeção de gás é dado o nome de perna de descida. Dessa forma, é necessário injetar gás no aço líquido para que o gás injetado e os gases já presentes antes da injeção sejam retirados durante o tratamento do aço.

O fluxo de aço líquido no reator retira seus gases devido ao vácuo e homogeneíza todo o banho, enquanto elementos de liga são adicionados.

A circulação do aço no reator, depende de vários parâmetros, como o diâmetro das pernas e sua penetração no banho, velocidade que se atinge o vácuo, nível de vácuo, fluxo de gás na perna de subida e são objetos de estudos de vários trabalhos atualmente (MANSUR, 2008 *apud* LEMOS, 2011).

A Equação (1) de (Ono⁴ *et al.* 1981 *apud* Zhang e Fei Li, 2014), representa o fluxo Q em (toneladas/minuto) de circulação entre reator e panela, D_U é o diâmetro interno da perna de subida, D_d é o diâmetro interno da perna de descida, ambos em (cm), G é o fluxo de gás injetado na perna de subida em (NL/min) e H é a altura de injeção do gás em relação a altura do banho no vaso em (cm). Onde o H depende da pressão de vácuo.

$$Q = 3.8 \cdot 10^{-3} \cdot D_{u}^{0.3} \cdot D_{d}^{1.1} \cdot G^{0.31} \cdot H^{0.5}$$
(1)

2.2.2 Funções do Desgaseificador a Vácuo com Sopro de Oxigênio - RHOB

O RHOB tem a função principal retirar gases do aço, principalmente o hidrogênio e o nitrogênio. O hidrogênio em particular não traz qualquer benefício para o aço, sempre sendo desejado a sua retirada. O nitrogênio, para aços muito específicos, pode gerar ligações químicas benéficas podendo em algum grau serem mantidos na constituição química do aço. Retirar carbono, na forma de CO e CO₂ é outro importante gás a ser retirado, mas por motivos diferentes, pois o carbono muda a estrutura do aço modificando completamente as suas propriedades mecânicas, alterando bastante a classificação do aço. Por último, o oxigênio também deve ser retirado, mas o oxigênio não necessariamente precisa do vácuo para ser retirado, podendo ser eliminado por processos de desoxidação convencionais da metalurgia secundária, que empregam elementos desoxidantes como alumínio (AI) e silício (Si) seguidos de borbulhamento com gases inertes para limpeza do aço através de flotação de inclusões (RIBEIRO *et.al., 2004*). Por outro lado, pode se optar em utilizar o oxigênio presente no aço para retirar o carbono através do desgaseificador e os elementos desoxidantes nem sempre são empregados.

2.2.2.1 Desidrogenação

O hidrogênio, por não formar ligações químicas, fica livre no aço líquido e esse quando é solidificado em qualquer um dos processos de lingotamentos para a obtenção de tarugos, blocos, placas e *beam blank* formam microbolhas. Essas microbolhas, no processo de laminação ou trefilação, aparecem como depressões ou sulcos ocasionando a perda do produto final. Outra forma de falha que as microbolhas podem provocar é a fragilidade das peças mecânicas. Esforços repetitivos, de tração

⁴ K. Ono, M. Yanagida, T. Katoh, M. Miwa, and T. Okamoto, Denki-Seiko Electr. Furn. Steel 52, 149 (1981).

ou de cargas aplicadas podem ocasionar trincas que tem seu início exatamente nas microbolhas (RIBEIRO *et.al.*, 2004).

Do posto de vista termodinâmico, o H monoatômico migra para regiões de maior energia livre, ou seja, nos contornos dos grãos, resultando em descontinuidade no interior da peça (RIBEIRO *et.al.*, 2004).

São várias as origens do hidrogênio no aço líquido, desde a fusão do coque e minério de ferro, onde o hidrogênio flui para o aço devido a umidades dos minérios até ao ar atmosférico presente em todos os processos citados, até a impureza do oxigênio soprado no convertedor (RIBEIRO *et.al.*, 2004). As principais fontes de hidrogênio no aço líquido são:

- a) umidade das adições de elementos de liga;
- b) exposição do banho líquido ao meio ambiente e consequentemente absorção a umidade do ar;
- c) difusão de hidrogênio através da escória que cobre o banho líquido;
- d) dissociação de umidade pelo arco voltaico;
- e) absorção de umidade presente nos refratários.

Com relação ao item d, o processo no forno panela, o aquecimento do aço é realizado através do arco voltaico entre ele o eletrodo. Existe então uma dissociação do hidrogênio da umidade do ar que conduz esse elemento químico ao aço líquido pelo arco voltaico.

A Figura 11, ilustra como se comporta o teor de hidrogênio e oxigênio, conforme experimentos de (RIBEIRO *et al.*, 1996, p. 260) quanto a pressão de vácuo onde o banho ficou exposto a uma atmosfera de H_2 e H_2O cujo a constante de equilíbrio é expressa pela Equação 2, onde a pressão é expressa em atm, concentrações em partes por milhão (PPM) e temperatura em °C. Demonstrando a forte influência da pressão de vácuo no teor de hidrogênio no aço a 1600 °C, uma temperatura média na qual ocorre o tratamento do desgaseificador.

$$\frac{\log[H]^2[0]}{P_{H_2O}} = -\frac{1060}{T} + 11,913$$
(2)



Figura 11 - Concentração de H e O no aço líquido a 1600°C em equilíbrio com as misturas de H_2 e H_2O

Fonte: RIBEIRO et.al, 1996, p. 260

2.2.2.2 Desnitrogenação.

Conforme Ribeiro et al., (2004) o nitrogênio pode ser benéfico aos aços para cementação e tempera, pois reduz o tempo para ciclagem térmica e controle do crescimento dos grãos, devido a formação de nitretos, composto binário entre o hidrogênio e outro metal, tornando possível a chamada têmpera direta.

Por outro lado, o nível de nitrogênio deve ser controlado em uma faixa, geralmente baixa, como exemplo, o aço intersticial free (IF), ou livre de interstícios, no qual o máximo é 50 PPM em concentração. Acima desse faixa, o nitrogênio pode causar:

- a) envelhecimento;
- b) fragilização;
- c) corrosão sob tensão na forma de trinca intercristalina;
- nitretos indesejáveis, que são ligas extremamente duras e comportam de forma semelhante ao diamante, por exemplo, nitreto de boro, BN; nitreto de silício Si_3N_4 (INFOPEDIA, 2017).

O envelhecimento é a mudança das propriedades do aço com o passar do tempo, podendo inclusive ser muito rápido, podendo ocasionar prejuízo na conformabilidade a frio (RIBEIRO et al. 2004).

O nitrogênio se desloca, durante a solidificação do aço nos processos de lingotamento, conforme as regiões que se resfriam primeiro, superfície e extremidades dos lingotes, causando uma mudança da distribuição dos átomos dissolvidos interticialmente no ferro, causando supersaturação de nitretos em algumas regiões, diminuindo a plasticidade, conformabilidade e resistência ao impacto (RIBEIRO *et al.* 2004)

A Figura 12 ilustra a importância da pressão de vácuo em mbar, junto com o volume total injetado de argônio em m^3 na perna de subida, no teor de nitrogênio em PPM de concentração do aço durante o processo de desgaseificação (RIBEIRO *et al.* 2004).

Figura 12 - influência da pressão de vácuo em mbar, junto com o volume total injetado de argônio em m^3 na perna de subida, no teor em PPM de nitrogênio no



Fonte: (RIBEIRO et al. 2004)

2.2.2.3 Descarburação

Atualmente os aços com baixo teor de carbono, chamado ultrabaixo carbono (UBC), abaixo de 30 partes por milhão (PPM) ou 0,003% e os aços *intertitial free* (IF), um subtipo do UBC, vêm sendo usados em aplicações de conformação e estampabilidade profunda de designs cada vez mais arrojados e complexos. O aço IF

ou livre de interstícios, que são os espaços vazios entre os átomos da estrutura cristalina, são aços que por apresentarem baixos percentuais de elementos intersticiais, que preenchem os interstícios, exibem boa plasticidade. Os aços IF são uma classe de aços que se distingue dos aços convencionais pelas seguintes propriedades: baixo limite de escoamento, alta qualidade superficial e grande elongação total. Tais propriedades são possibilitadas pelo controle de elementos intersticiais, como o carbono e nitrogênio, pois provocam de forma geral a resistência a deformação (FIETO, 2013).

Para se conseguir o UBC e o IF é necessário a utilização do desgaseificador a vácuo. Conforme Scheid (2010), os interstícios podem ser de diferentes tipos, conforme ilustrado na Figura 13:



Figura 13: Tipos de interstícios na estrutura cristalina dos aços.

Fonte: (SCHEID, 2010)

 a) lacunas, é caracterizado pela ausência de um átomo em uma posição que deveria ser ocupada na estrutura cristalina, isto gera uma deficiência de ligações entre os átomos (SCHEID, 2010);

 b) defeito auto intersticial, caracteriza-se pela presença de um átomo, do próprio elemento, chamado também de defeito de impureza intersticial em um interstício da estrutura cristalina, produzindo uma distorção e um acúmulo de energia muito maior do que uma lacuna (SCHEID, 2010);

c) discordância em cunha, pode ser vista como um plano extra de átomos, produzindo um efeito de cunha no reticulado. Por envolver um grande número de
átomos, uma discordância envolve um acúmulo de energia muito maior do que um defeito de lacuna ou intersticial (SCHEID, 2010).

d) contorno de grão, a orientação da estrutura de um material é subdividida em um grande número de zonas, cada uma delas com uma orientação diferente, isto é, cada uma das zonas forma um cristal independente. A estes cristais que possuem uma orientação particular é dado o nome de grãos. Na Figura 13 há uma representação da disposição dos átomos no interior dos grãos. Todos os grãos de uma mesma fase do material possuem a mesma estrutura cristalina, diferindo somente na orientação. A consequência desta orientação diferente está na fronteira entre os grãos onde existe uma zona de transição entre duas orientações e por isso, os átomos que fazem parte desta fronteira estão mal organizados e com um nível mais alto de energia, esta região é o contorno de grão que exerce um papel importante nas transformações de fase, onde a maior energia dos átomos favorece a nucleação e a deformação plástica, onde tem a função de restringir o movimento das discordâncias (SCHEID, 2010).

O processo de descarburação ocorre junto com o processo de desoxidação do aço. Durante a circulação do aço entre panela e reator há o encontro dos átomos de oxigênio com átomos de carbono formando *CO* e *CO*₂ que são succionados pelo vácuo. Essa etapa é chamada descarburação natural. A partir de um certo momento essa descarburação não ocorre mais e é necessário injetar oxigênio, através da lança de oxigênio, Figura 8, essa etapa sendo chamada de descarburação forçada. A descarburação forçada só é necessária para tipos específicos de aços.

Conforme Guo e Irons⁵ (2000) *apud* Neves (2008), na primeira etapa a pressão parcial do carbono e oxigênio é muito maior que a pressão parcial na câmara de vácuo, dessa forma a descarburação ocorre no interior do aço líquido e o fenômeno é chamado de autonucleação. Na segunda etapa, a descarburação ocorre somente na superfície exposta ao vácuo e a difusão do carbono na fase líquida controla a taxa de descarburação.

Conforme Brachet⁶ *et al.*, (1993) *apud* Silva (2010) é possível verificar no gráfico da Figura 14 a relação da pressão parcial (vácuo) do CO com o nível de carbono e

⁵ GUO, D.; IRONS, G.A., Modeling of Gas-Liquid Reactions in Ladle Metallurgy: Part I. Physical Modeling – Metallurgical and Materials Transactions, 2000.

⁶ Referência não encontrada na referência bibliográfica de (SILVA, 2010)

oxigênio, produto %C x %O, no aço líquido a 1600 °C para um determinado aço que pode ser utilizado como exemplo para a maioria dos aços.





2.2.2.4 Aquecimento Químico.

Utilizando a lança de oxigênio também é possível realizar aquecimento químico no RHOB em torno de 60 °C. Enquanto que no forno panela é feito aquecimento através de arco voltaico, no RHOB é realizado adição de alumínio durante a circulação do aço, entre reator e panela e então é soprado oxigênio com a lança, ocorrendo a reação química (D) (CASTRO⁷ et al., 2003 apud SILVA, 2010).

$$2Al_{(s)} + \frac{3}{2}O_{2(g)} = Al_2O_{3(s)} \qquad \Delta H^{\circ}_{298}Al_2O_3 = -400, 4\frac{Kcal}{mol} de Al_2O_3 \quad (A)$$

2.2.2.5 Ajuste químico

Pela calha de adição de ligas podem ser adicionados diferentes ligas, dezenas delas, para o ajuste da composição do aço. A grande vantagem da adição de ligas no RHOB em relação ao convertedor no refino primário e forno panela e estação de borbulhamento no refino secundário é o vácuo. A adição realizada sob vácuo em conjunto com a forte agitação durante a circulação do aço permite um maior rendimento das ligas por não haver forte oxidação.

Fonte: (SILVA, 2010).

⁷ Referência não encontrada na referência bibliográfica de (SILVA, 2010)

2.3 Vácuo

Até o momento foi verificado a importância do vácuo no refino secundário do aço, mas é importante deixar claro o conceito sobre vácuo.

Vácuo absoluto para a pressão, assim como zero absoluto para a temperatura, é algo inviável e se trata da ausência total de gases e vapores. A dificuldade do ser humano em entender esse conceito é justa, pois para atingir o vácuo é necessário retirar algo que não é visível e muito menos palpável de um ambiente que segundo nossos sentidos já está vazio, que no caso da tecnologia de vácuo é chamada câmara de vácuo, e na engenharia química, devido as reações químicas que acontecem em seu interior, recebe o nome de reator, representado na Figura 8.

Fisicamente é impossível retirar todas as moléculas de gás e vapor da câmara de vácuo por questões físicas inerentes a natureza (DESGASPERI, 2006). A medida que as moléculas e átomos são retiradas da câmara de vácuo a pressão é reduzida, comparado com o ambiente onde a câmara de vácuo está, propiciando a entrada de outras moléculas e átomos do ambiente e dos materiais das paredes da câmara de vácuo, através de vários fenômenos que serão descritos no capítulo de analises e resultados.

Lembrando que a pressão ambiente ou pressão atmosférica depende da altitude em relação ao nível do mar, pois ela é o peso da massa de ar que existe sobre um determinado local. Portanto ao nível do mar tem-se uma massa da atmosfera, acima desse nível, maior que a massa da atmosfera acima do ponto mais alto do monte Everest. Ao nível do mar, a pressão atmosférica pode ser estimada a partir da massa da atmosfera (M), da aceleração da gravidade (g) e raio da terra (RE). Considerando a massa da total da atmosfera M = $M = 5,14 \times 10^{18} kg$ e aceleração da gravidade = 9,81 m/s² e raio externo da terra = $6,37 \times 10^6$ m a pressão atmosférica é 10^5 Pa (pascal) ou 1000 mbar (milibar), sabe-se que o ar é uma mistura muito compressível, (M) varia significativamente com a altitude (h), consequentemente, a principal causa de variação da pressão atmosférica é a altitude (METEOROLOGIA, 2017).

$$Po = g x M/4 x \pi x RE^2$$
(3)

Ao nível do mar tem-se a pressão atmosférica de 10⁵ pascal ou mais precisamente 101.323 Pa ou 1013,23 mbar enquanto no ponto mais alto do monte Everest, a 8840 metros de altura, a pressão é 36.476 Pa ou 364,76 mbar. Ao nível do mar, a pressão de 364,76 mbar em uma câmara fechada é uma pressão de vácuo, enquanto no monte Everest essa pressão na câmara fechada é a mesma do ambiente, não sendo uma pressão de vácuo. Então a pressão de vácuo, ou simplesmente vácuo, é a pressão abaixo da pressão atmosférica onde a câmara de vácuo está situada.

Na Figura 15 é possível verificar a pressão de vácuo e a pressão absoluta, essa última medida em relação ao vácuo absoluto. Porém, a maioria dos instrumentos é calibrada para ler o zero da atmosfera local e indicar diferença entre ela e a pressão absoluta, indicando a pressão manométrica que pode ser positiva ou negativa, mas as pressões abaixo da pressão atmosférica são chamadas de pressão de vácuo.





Fonte: (CENGEL; CIMBALA, 2015)

Conforme Umrath (2007), existem vários níveis de vácuo classificados de certa forma arbitrariamente, dentro da tecnologia de vácuo, mas orientativa para se localizar dentro dos vários níveis atingidos pela tecnologia atual, Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos níveis de vácuo.				
Nível de Vácuo	Pressão			
Rough vacuum (RV) = Vácuo grosseiro/Baixo vácuo	1000 a 1 mbar			
<i>Medium vacuum (MV) =</i> Médio vácuo	1 a 10 ⁻³ mbar			
<i>High vacuum (HV) =</i> Alto vácuo	10 ⁻³ a 10 ⁻⁷ mbar			
<i>Ultrahigh vacuum (UHV)</i> = Ultra alto vácuo	10 ⁻⁷ a 10 ⁻¹⁴ mbar			
Senter Treadring de (LINARATIL 0007)				

Fonte: Traduzido de (UMRATH, 2007)

O estudo de sistemas em vácuo exige o conhecimento do comportamento dos gases a baixa pressão e seu pilar é a Teoria Cinética dos Gases, iniciado por James Clerk Maxwell no século XIX, relacionando as leis da mecânica às moléculas e a interação das mesmas entre si e entre elas e as paredes do recipiente em vácuo. Nessa teoria, os parâmetros mais importantes são a quantidade de moléculas ou átomos no recipiente em vácuo, a velocidade média, temperatura e a distância média que as moléculas percorrem sem colidir uma com as outras. A Equação 4 que liga todos esses parâmetros se resume a lei geral dos gases ideais (STEMPNIAK, 2002).

$$P.V = n.R.T$$
(4)

Onde P é a pressão, V é o volume, n é o número de mols, R é a constante universal dos gases que vale 8,3144 J/K mol e T é a temperatura absoluta.

Outra equação importante é a Equação (5) de distribuição de velocidades da Estatística de Maxwell-Boltzmann (STEMPNIAK, 2002). Essa equação não é utilizada nessa dissertação, mas pode ser utilizada como referência para trabalhos futuros.

$$N(v) = 4. \pi. N. (m/(2. \pi. k. T))^{3/2} v^2 e^{m.v^2/2.k.T}$$
(5)

Onde N(v)dv representa o número de moléculas cujas velocidades estão entre v e v+dv, m a massa de cada molécula, v a velocidade e k é a constante de Boltzmann que vale $1,38 \times 10^{-23}$ J/k.

Como já mencionado, a pressão de vácuo tem relação com o número de moléculas presentes, exemplo dado com relação a altitude. Com um olhar mais molecular, a pressão tem relação com o número de choques entre as moléculas e as paredes do recipiente e a distância média que as moléculas percorrem antes de cada colisão é o chamado caminho livre médio, conceito muito importante principalmente para alto e ultra alto vácuo. Apenas para exemplo, na pressão atmosférica, há 2. 10^{19} moléculas por cm^3 e reduzindo a pressão para um milionésimo disso, há ainda $3. 10^{13}$ moléculas no mesmo espaço, ou seja, ainda é muito grande. Outro fato curioso é o caminho livre médio entre as colisões, na pressão atmosférica é $6,5. 10^{-6}cm$, enquanto no médio vácuo é 5 cm e no alto vácuo é 500 cm (STEMPNIAK, 2002).

Um questionamento interessante sobre o vácuo desenvolvida com a física quântica é a teoria de Incerteza de Heisenberg que leva os cientistas interpretarem que a lei de conservação de energia pode ser violada em um espaço extremamente curto. Essa teoria em conjunto com a teoria da relatividade que cita que matéria e energia são conversíveis uma na outra, o espaço vazio poderia conter flutuações quânticas em que partículas de matéria são criadas e destruídas continuamente, então se o vácuo absoluto existisse, poderia deixar de ser, pois a matéria poderia nele aparecer de forma imprevisível (STEMPNIAK, 2002).

Voltando para a aplicação do vácuo em processos existentes, a grande maioria das atividades industriais em vácuo trabalham no nível de Baixo Vácuo e Médio Vácuo, citato na Tabela 1, sendo que o Ultra Alto Vácuo é utilizado predominantemente a nível de laboratório.

2.4 Formas de se atingir o vácuo.

Existem várias formas de se atingir o vácuo e a escolha do processo adequado envolve vários parâmetros, entre os principais se destacam o nível de vácuo necessário e o tempo para se atingir o vácuo. O equipamento ou os equipamentos utilizados para atingir o nível de vácuo necessário no tempo necessário é chamado de bomba de vácuo, que nem sempre é um componente mecânico rotativo acionado por um motor. Bomba de vácuo é um conjunto de equipamentos e ou componentes responsáveis em baixar a pressão de um recipiente, dentro da tecnologia de vácuo, como já informado, chamado de câmara de vácuo, obedecendo as particularidades do processo. Entre a câmara de vácuo e a bomba de vácuo há geralmente uma tubulação e que muitas vezes é acompanhada de válvulas, trocadores de calor e filtros que influenciam diretamente a capacidade da bomba de vácuo. Há casos especiais onde a bomba de vácuo fica dentro da câmara de vácuo, não existindo então a tubulação e seus acessórios. E o conjunto bomba de vácuo, tubulação e câmara de vácuo é chamado de sistema de vácuo (DEGASPERI, 2003)

Na Figura 16 é possível verificar várias bombas de vácuo conforme o princípio de operação (UMRATH, 2007). Para todas elas os princípios físicos no processo de realização do vácuo na câmara de vácuo é o mesmo, mas cada bomba de vácuo tem seus processos físicos individuais. A análise inicial do sistema de vácuo pode ser feita sem se conhecer as particularidades da bomba de vácuo, pois o que está sendo analisado é a pressão na câmara de vácuo.

A utilização de mais de uma bomba de vácuo pode ser utilizada, geralmente a primeira bomba trabalha em um range de pressão e a segunda bomba trabalha a partir de um range mais baixo, em conjunto ou sozinha com a primeira bomba. A bomba de vácuo formada por ejetores de vapor será tratada em especial nesta dissertação e está em destaque na Figura 16. (UMRATH, 2007).



Figura 16 - Bombas de vácuo conforme o princípio de operação.

Como já citado anteriormente, há sistemas para baixo, médio, alto e ultra alto vácuo. Há sistemas que podem ter a bomba de vácuo com pressão inicial no médio vácuo e pressão final no alto vácuo e várias outras possibilidades. Mas, todo sistema terá sua bomba de vácuo com pressão inicial na pressão atmosférica, e é comum encontrar sistemas com uma bomba de vácuo entregando a sua pressão final para ser a pressão inicial de outra bomba de vácuo. No caso específico da desgaseificação a vácuo RH do aço líquido, tratada nessa dissertação, há apenas uma bomba de vácuo que irá reduzir a pressão atmosférica para a pressão entre 0,1 a 10 mbar, que irá depender da exigência do aço a ser produzido. Esse range é de projeto, mas o tratamento do aço poderá trabalhar com pressão de até de 50 mbar, exigindo menos da bomba de vácuo, e consequentemente com menor consumo de vapor.

Na Figura 17 é possível verificar o range de pressão necessário para a maioria dos processos industriais que necessitam do vácuo, com destaque a desgaseificação do aço.



Figura 17: Range de pressão dos processos industriais a vácuo.

Fonte: : Traduzido de Umrath (2007).

É importante conhecer a pressão final desejada no dimensionamento do sistema de vácuo, pois esse conhecimento irá determinar a influência das fontes de gases e vapores na capacidade do sistema de atingir a pressão. Claro que para sistemas de ultra alto vácuo, as menores fontes de gases deverão ser consideradas e as grandes fontes de gases já deverão ter sido eliminadas ou succionadas por bombas de vácuo na região de baixo, médio ou alto vácuo. Consta na Figura 18 o range de trabalho das bombas de vácuo mais comuns, com destaque a bomba de vácuo formada por ejetores a vapor.





2.5 Bomba de vácuo a jato de vapor.

Conforme representado na Figura 18, há diferentes tipos de bombas de vácuo e podem ser classificadas conforme o princípio de operação. Especificamente a bomba de vácuo a jato de vapor ou bomba de vácuo composta por ejetores a vapor será detalhada nesta dissertação. Há alguns padrões internacionais que tratam especificamente desse tipo de bomba entre eles a Standards for *Steam Jet Vacuum System* conforme *Heat Exchange Institute* (2012) demonstrando a importância deste tipo de bomba.

Conforme Jet Vacuum Systems (2010), as bombas a jato de vapor são usadas para criar e manter o vácuo em evaporadores, secadores, plantas de destilação e refinarias e nos processos de liofilização, policondensação, desgaseificação e desodorização. Geralmente, as bombas de vácuo de vários estágios são usadas para pressões de sucção abaixo de 100 mbar. A grande vantagem das bombas de vácuo a jato de vapor, com exceção das válvulas, é a não existência de partes móveis, ejetores e condensadores não as possuem e podem ser usadas para vazões de 10 a 2.000.000 m^3/h . Para a evacuação de reatores utilizados para o tratamento de aço líquido é necessária uma rápida evacuação no começo do processo que é por batelada, isso significa que a capacidade de sucção das bombas de jato deve ser muito alta no início (geralmente vários milhares de kg/h), sugando um grande fluxo de gás inerte (até 2.000.000 m^3/h correspondendo a 1.500 kg/h no vácuo de 0,6 Disponibilidade aproximadamente mbar). imediata, resistente а pó, operacionalmente segura são características de sistemas de vácuo para desgaseificação do aço.

Institutos como a *KLM Technology Group* (2011) e empresas de tecnologia e produtos como GEA também desenvolvem padrões para o dimensionamento de sistema de vácuo e segundo Jet Vacuum Systems (2010) cita a seguinte sequência para o dimensionamento de sistema de vácuo: para o gás a ser succionado (determinação da composição do gás, massa molar kmol / kg, vazão mássica, pressão de vácuo de operação, temperatura no vácuo, pressão atmosférica), para o vapor que é o meio motriz (temperatura e pressão disponível) e para a água de refrigeração (temperatura e pressão disponível) e para a água de refrigeração (temperatura e pressão disponível) e para a água de refrigeração (temperatura e pressão), determinando assim o tipo e dimensões de ejetores e condensadores e estágios de vácuo.

Como já citado na Figura 9, o conjunto de ejetores e condensadores bem como todo o tipo de válvulas entre eles é denominado bomba de vácuo. A Figura 19 há a representação de duas bombas de vácuo. O ejetor 1 (E1), utilizando vapor de água, reduz a pressão no reator, succionando gases provenientes do mesmo. Gases do processo e vapor do ejetor 1 são succionados pelo ejetor 2 que reduz ainda mais a pressão do reator. Para isso, o ejetor 2 utiliza mais vapor que o ejetor 1, conduzindo gases e vapor de água para o condensador 1, exemplo da bomba da Figura 19 (a) e para o ejetor 3, exemplo da bomba da Figura 18 (b). O ejetor 3 da segunda bomba de vácuo precisa utilizar ainda mais vapor de água do que os ejetores 1 e 2 para

succionar os gases e vapor dos ejetores 1 e 2. Como o ejetor 1 e 2 estão em série, cada um deles é considerado um estágio da bomba. Os ejetores 3 e 3A da Figura 19 (a) são parte do terceiro estágio da bomba, pois estão em paralelo e succiona os gases do interior do condensador 1. O ejetor 3 da Figura 19 (b) sozinho é o terceiro estágio da segunda bomba de vácuo. A primeira bomba possui 6 ejetores e 4 estágios e a segunda bomba possui 5 ejetores e os mesmos 4 estágios. Zulhan e Schrade (2014) citam que há diversos *layouts* de bombas de vácuo com diferentes números de ejetores, condensadores e número de estágios.







a) Bomba de vácuo com 6 ejetores e 4 estágios. Fonte: Zulhan e Schrade (2014).



Cada estágio da bomba possui uma pressão. A entrada do ejetor 1 é a região de mais baixa pressão, onde a pressão de projeto deve ser atingida. O condensador mais próximo a chaminé é a região de mais alta pressão, pois está ligada com a chaminé que possui saída para a pressão atmosférica conforme Zulhan e Schrade (2014).

Os condensadores, representados por C1, C2 e C3 na Figura 19 tem a função de retirar o particulado de ferro proveniente do aço, suspenso no gás, e condensar o vapor de água proveniente dos ejetores a montante, literalmente lavando os mesmos e conduzindo o pó para um tanque logo abaixo. Tanto vapor de água e particulado pesam o sistema e o condensador reduz a força de arraste necessário dos próximos ejetores. Os ejetores, após o condensador, não precisam mais succionar o vapor de água dos ejetores anteriores e continuam a baixar a pressão com a utilização de vapor. No final, após o último condensador, se o processo possuir mais de um condensador, os gases são conduzidos para a chaminé.

2.5.1 Condensador

Existem dois modos de instalação dos condensadores segundo Wiegand® Steam Jet Cooling Plants (2012), instalação barométrica e não barométrica, Figura 20. Na instalação barométrica o condensador deve ficar a uma altura de 11 metros do nível do tanque de água, localizado abaixo do condensador. Isso é devido ao vácuo produzido no interior do condensador. A diferença de pressão entre a atmosférica e a pressão de vácuo pode chegar a um bar. Essa diferença pode succionar a água do tanque abaixo até uma altura de 10 metros, inundando o condensador no lugar de esvazia-lo. Lembrando que 10 metros de coluna de água é equivalente a 1 bar. Então, durante a operação, se um condensador atingir 0,1 bar de pressão de vácuo em um ambiente onde a pressão ambiente é 1 atm ou 1,013 bar, a diferença de 0,9 bar é capaz de succionar a água do tanque até uma altura de 9 metros. Se a diferença for 0,7 bar, a água será succionada até uma altura de 7 metros do nível do tanque de água e se manterá nesse nível dentro da tubulação entre condensador e tangue de água até que a pressão de vácuo seja sessada.



Figura 20 – Instalação barometrica e não barometrica de condensadores.

Fonte: Wiegand® Steam Jet Cooling Plants (2012)

As vantagens da instalação barométrica segundo segundo Wiegand® Steam Jet Cooling Plants (2012) são:

 a) pressão de sucção da bomba de circulação é sempre maior ou igual à pressão atmosférica, portanto, quase nenhum risco de cavitação;

b) condensador pode ser analisado como uma câmara de vácuo, sendo seu interior separado da pressão atmosférica por coluna líquida da tubulação barométrica, não podendo ser considerado como um vaso de pressão porque este arranjo não permite a acumulação de sobre pressão.

E como desvantagem: a altura de instalação dos condensadores deve estar a pelo menos 11 m acima do nível do tanque de água.

Quanto a instalação não barométrica, a vantagem é não necessidade de instalar os condensadores a altura de 11 m e as desvantagens, segundo Wiegand® Steam Jet Cooling Plants (2012), são:

 a) a pressão de sucção da bomba de água está abaixo da pressão atmosférica, portanto, a bomba de circulação deve ser protegida contra cavitação, nesse caso, a bomba deverá ser acionada quando o nível atingir um limite de nível no interior do condensador e a pressão de sucção da bomba de água será praticamente a mesma do condensador;

 b) devido à construção fechada, os vasos serão geralmente considerados como recipientes sob pressão que podem estar sujeitos a requisitos especiais em design e fabricação.

2.5.2 Ejetor

Ejetor ou os ejetores são os principais equipamentos da bomba de vácuo a vapor, pois são os responsáveis pela geração do vácuo. São acionados por um fluido, geralmente vapor, possuem grande simplicidade de construção, não possuindo partes móveis e uso de eletricidade. São ideais para operações com elevada flutuação de fluxo de massa e meios de sucção com elevada quantidade de partículas sólidas suspensas, mais do que as bombas de vácuo mecânicas, conforme Wiegand® Steam Jet Cooling Plants (2012).

A vantagem do uso de vapor nas plantas industriais, principalmente siderúrgicas, nas plantas de desgaseificação, é a sua disponibilidade, podendo-se utilizar inclusive de gás de aciaria, proveniente dos convertedores para o aquecimento da água,conforme Wiegand® Steam Jet Cooling Plants (2012).

O vapor, fluído primário, ao entrar no ejetor é forçado, pela sua pressão, a passar por um bico de injeção com um orifício calibrado, conhecido como bocal impelente, projetado como um bocal *Laval*, de acordo com as Figuras 21 e 22. O meio motriz (geralmente vapor) é expandido ao passar pelo bico, ganhando velocidade e perdendo pressão, onde a energia de pressão é transformada em energia cinética. No orifício calibrado, o vapor ultrapassa a velocidade do som. Este fluxo de energia é transmitido a todo o volume da cabeça do ejetor, onde há uma tubulação, aspirando os gases provenientes do reator, onde está o aço líquido. De acordo com a Figura 23, ao longo do cone de mistura o vapor perde velocidade e os gases succionados que são o fluido secundário, ganham velocidade, fazendo com que o conjunto da mistura perca velocidade, mas mantendo a pressão, no final da câmara de mistura. Ao longo da câmara de mistura os gases succionados ultrapassam a velocidade do som. Dentro da garganta, a velocidade da mistura é reduzida de forma súbita para abaixo da velocidade do som, aumentando também de forma súbita a pressão. Depois de passar pela garganta, no difusor, a energia cinética do fluxo de vapor é gradualmente convertida em energia potencial e é comprimido para uma maior pressão de descarga, conforme Wiegand® Steam Jet Cooling Plants (2012) e Lima (2013).







Figura 23 - Representação esquemática de um ejetor e evolução idealizada da velocidade e pressão estática do fluido de trabalho ao longo do eixo do ejetor. a) Vista de secção do ejetor; b) Evolução da pressão estática ao longo do ejetor; c) Evolução da velocidade ao longo do ejetor.



Fonte: Lima (2013)

Devido à quebra da velocidade do som tanto do vapor quanto dos gases succionados, há o fenômeno conhecido como estrondo sônico, onde um objeto, no caso do ejetor é o vapor, ultrapassa as ondas sonoras que ele mesmo emite (ÇENGEL, 2015). Por isso, os ejetores devem ser protegidos por uma camada de proteção acústica. O vapor também não pode perder temperatura, tanto antes de chegar no ejetor quanto no seu interior, pois isso implica em perda de energia e perda de pressão, o que reduz a eficiência do ejetor, reduzindo a sua velocidade e capacidade de arraste dos gases, devido a isso, além da proteção acústica, é necessária uma proteção térmica. Mesmo com toda a proteção citada, o ruído produzido exige a utilização de proteção auricular quando próximo de um ejetor em funcionamento.

3 Metodologia

Para analisar e modelar a desgaseificação do aço líquido através da bomba de vácuo é necessário detalhar a formulação física e matemática da equação geral para o processo de bombeamento na câmara de vácuo. Após isso, são descritos todos os fatores que influenciam a equação geral, como *throughput*, condutância da tubulação e velocidade de bombeamento (DEGASPERI, 2016). Atenção especial é dada ao *throughput* que diferencia o processo de bombeamento em vácuo de outros processos de bombeamento, particularmente para a desgaseificação do aço líquido, desenvolvendo especificamente a formulação para cada um deles. A Figura 24 resume a metodologia.

Figura 24 - Diagrama da metodologia da dissertação de mestrado.

Detalhar a formulação física e matemática da equação geral para o processo de bombeamento na câmara de vácuo para desgaseificação de aços.

Identificar todas as fontes possíveis de gases e vapores em sistemas em vácuo e definir as mais relevantes para o processo de desgaseificação do aço líquido.

Realizar testes de composição química do aço antes, durante e após o processo de desgaseificação para conhecer a concentração em PPM dos gases oxigênio, hidrogênio e nitrogênio em 5 corridas, realizando um total de 15 testes.

Analisar e calcular a vazão mássica e o *throughput*, que relaciona pressão e vazão de cada fonte gasosa para utilização na equação geral para o processo de bombeamento na desgaseificação do aço IF, o mais exigente quanto a bomba de vácuo.

Definir as equações que representam o *throughput* para as fontes de gases que variam com o tempo e os valores paras as fontes fixas. Definir também a equação que representa a queda de pressão com o tempo, definindo por fim a equação da velocidade efetiva de bombeamento para o processo, para que seja possível a realização de simulações.

O termo *throughput* não tem tradução direta para o português, mas é o produto da vazão pela pressão dos gases e vapores presentes no processo e tem três origens:

- a) meio externo ao sistema de vácuo, seja ela uma infiltração indesejada ou injeção controlada;
- b) meio interno e geração interna de gases provenientes do aço líquido;
- c) recirculação interna que são gases e vapores que deveriam deixar o sistema.

3.1 Desenvolvimento físico e matemático para modelagem de processo de bombeamento em vácuo.

Para a modelagem de qualquer sistema é necessário conhecer os princípios físicos, a partir de então fazer as considerações necessárias para que o modelo seja real o suficiente, pois a complexidade de uma modelagem pode inviabilizar o seu desenvolvimento e utilização. A divisão entre complexidade e simplicidade é uma linha tênue que só pode ser feita com conhecimento do processo e princípios físicos envolvidos.

O objetivo inicial é apresentar o desenvolvimento de uma equação que retrate o processo. Para isso, é necessário fazer o desenvolvimento físico e matemático, levantar todas as hipóteses possíveis e então realizar as simplificações. No campo da tecnologia do vácuo há muita teoria disponível, mas complexa e repleta de detalhes que muitas vezes não são utilizadas ou dispendem muita energia para utilização e implementação.

Segundo Degasperi (2006) com relação ao baixo vácuo e a abordagem discreta, pois a tese citada trata até o nível de ultra alto vácuo e também a abordagem contínua. Então, são feitas as considerações para o sistema de vácuo para desgaseificação de aço líquido.

A classificação de baixo vácuo está no range de pressão atmosférica até 1 mbar, citada na Tabela 1. Para desgaseificação do aço líquido, normalmente o vácuo é ligeiramente mais profundo, atingindo a casa de décimos de mbar, ou seja, 0,1 a 0,9 mbar, entrando na fase inicial da classificação de médio vácuo que vai até 0,001 mbar ou 10⁻³ mbar. Como o sistema em particular, que é tratado nesta dissertação vai até 0,68 mbar em condições ideais, é feito a primeira consideração, o sistema trabalha no baixo vácuo pois o escoamento dos gases é 99% feita na pressão de até 1 mbar. Com relação a abordagem discreta, é suficiente conhecer a pressão na câmara de vácuo na forma pontual com o decorrer do tempo. Conforme Degasperi (2006), a abordagem continua além da variação da velocidade efetiva de bombeamento e da pressão no tempo, trata da variação da pressão conforme a posição na câmara de vácuo. Abordagem mais sofisticada e detalhada em se tratando de modelagem, mas não necessária para o nível de baixo vácuo e para o processo de desgaseificação de aço líquido e se tratando da câmara de vácuo.

Para a representação do sistema é necessário utilizar uma Figura de representação do sistema de vácuo, utilizando a norma DIN 28401, *Deutsches Institut für Normung* ou Instituto Alemão para Normatização, por não possuir norma equivalente nacional. As bombas de vácuo e câmaras de vácuo, segundo a norma, possuem um símbolo próprio de representação e a bomba de vácuo formada por ejetores possui também um símbolo específico, conforme Figura 25.



Fonte: DIN 28401, Deutsches Institut für Normung ou Instituto Alemão para Normatização.

A representação do sistema de vácuo, poderia ser feita com o símbolo de bomba de vácuo geral, mas como estamos tratando do caso especifico de bomba de vácuo formada por ejetores, é mais prudente utilizar o símbolo especifico para esse tipo de bomba, conforme Figura 26.



Figura 26 – Representação de um Sistema de Vácuo formado por Ejetores.

Fonte: Adaptado de: DIN 28401, *Deutsches Institut für Normung* ou Instituto Alemão para Normatização.

A desgaseificação a vácuo do aço Ííquido envolve conhecimento sobre propriedades dos gases e escoamento de fluídos. A primeira equação a ser utilizada é dos gases ideais, chamada de *Clapeyron-Mendeleev*, conforme Sonntag; Borgnakke e Van Wylen (2009), a equação de gás ideal é um bom modelo para baixas massas especificas, situação que ocorre em baixas pressões e temperaturas altas, e está de acordo com o modelo que se pretende apresentar, onde há pressão de vácuo succionando gases do aço líquido a 1600 °C. A equação relaciona pressão,

representada por p, volume representado por V, número de mols representado por n, constante dos gases representado por R e temperatura representado por T. Para o sistema de vácuo, é considerado todas os parâmetros para a câmara de vácuo.

$$p V = n R T$$
(6)

Outra formatação para a formula é utilizar N para o número de moléculas e k que é a constante de Boltzmann.

$$p V = N k T$$
(7)

Derivando a Equação 7:

$$\frac{d}{dt}(p V) = \frac{d}{dt}(N k T) \rightarrow p \frac{dV}{dt} + V \frac{dp}{dt} = k T \frac{dN}{dt} + k N \frac{dT}{dt}$$
(8)

A câmara de vácuo não varia o volume e durante o processo a variação de temperatura é mínimo, portanto, são desconsideradas essas variações.

$$V\frac{dp}{dt} = kT\frac{dN}{dt}$$
(9)

A energia cinética relacionada ao escoamento de gases possui três graus de liberdade de movimento, um para cada direção, sendo que a energia cinética média de translação em cada direção é igual a $\frac{1}{2}$ k T. Então a energia cinética média total de translação por molécula (E_{ECM}) é três vezes a energia cinética média em cada direção sendo igual a:

$$E_{ECM} = \frac{3}{2} K T \tag{10}$$

Como a analise deve ser feita para um conjunto N de moléculas, é obtida a equação de energia cinética média para o total de moléculas (E)

$$E = \frac{3}{2} N k T$$
 (11)

Da equação de *Clapeyron-Mendeleev*: N K T = p V, a energia cinética média total para as moléculas:

$$E = \frac{3}{2} p V$$
 (12)

Derivando a equação $E = N E_{ECM}$ em relação ao tempo:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} N E_{ECM} \rightarrow \frac{dE}{dt} = E_{ECM} \frac{dN}{dt}$$
(13)

Ou seja:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{3}{2} k T \frac{dN}{dt}$$
(14)

Como já mencionado: $V \frac{dp}{dt} = k T \frac{dN}{dt}$ então é possível associar a variação de energia com a variação de pressão:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{3}{2} V \frac{dp}{dt} \to V \frac{dp}{dt} = \frac{2}{3} \frac{dE}{dt}$$
(15)

Lembrando que na câmara de vácuo há uma variação no número de moléculas e átomos, sejam elas injetadas, geradas ou já presentes, e outras sendo retiradas devido a bomba de vácuo. Essa variação no número de moléculas na câmara de vácuo (Q') é dada por:

$$Q' = \frac{dN}{dt}$$
(16)

Como N = $\frac{p V}{KT}$ a variação do número de moléculas no tempo será:

$$Q' = \frac{dN}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{pV}{kT}$$
(17)

Novamente, a câmara de vácuo não varia a temperatura e também não varia o volume com o tempo, consequentemente:

$$Q' = \frac{V}{kT} \frac{dp}{dt}$$
(18)

Como mencionado anteriormente: V $\frac{dp}{dt} = \frac{2}{3} \frac{dE}{dt}$ então:

$$Q' = \frac{2}{3} \frac{1}{kT} \frac{dE}{dt}$$
(19)

A partir desse momento é necessário entrar com a grandeza (Q) *throughput* citada pela primeira vez no *Glossary of terms used in vacuum technology* em 1958 e segundo Umrath (2007) é o produto do fluxo versus pressão pelo tempo em determinada temperatura que atravessa a seção de uma tubulação. As unidades utilizadas são 1 Pa \cdot m3 / s = 1 N \cdot m / s = 1 J \cdot / s = 1 W, ou seja, é energia por unidade de tempo, potência.

$$Q = \frac{p \cdot V}{t}$$
(20)

É importante ressaltar que a grandeza *throughput* (Q) é o produto da pressão pelo volume por unidade de tempo. Para ficar claro as unidades de Q, adotado nessa

dissertação como $\frac{kg \cdot m^2}{s^3}$ é utilizado as Equações 21, 22 e 23, sendo a pressão em Pascal (Pa), o volume em m³ e o tempo em segundos (s):

$$\frac{\text{Pressão. Volume}}{\text{tempo}} = \frac{\text{Pa. m}^3}{\text{s}}$$
(21)

Sendo:
$$Pa = \frac{\text{kg}}{\text{m.s}^2}$$
 (22)

Então:
$$Q_{vap} = \frac{kg}{m.s^2} \cdot \frac{m^3}{s} = \frac{kg.m^2}{s^3}$$
 (23)

Em outras palavras, é possível perceber que *throughput* é a vazão que depende da pressão e quanto menor a pressão, menor o valor de *throughput* que não tem uma tradução direta para o português, conforme já mencionado.

Já citado que: $p \cdot V = N \cdot k \cdot T$

$$Q = \frac{N k T}{t}$$
(24)

A Equação 16 mostra que o número de moléculas na câmara de vácuo (Q') é dada por Q' = $\frac{dN}{dt}$

Então throughput (Q):

$$Q = K T Q'$$
⁽²⁵⁾

Com a Equação 19, o número de moléculas variando no tempo Q' = $\frac{2}{3} \frac{1}{kT} \frac{dE}{dt}$, então *throughput (Q)*:

$$Q = \frac{2}{3} \frac{dE}{dt} \text{ ou } Q = k T \frac{dN}{dt}$$
(26)

Ou seja, *throughput*, é dois terços da variação da energia cinética média do movimento de translação das moléculas na câmara de vácuo.

A variação da pressão no tempo na câmara de vácuo é um balanço de energia cinética devido ao movimento das moléculas e átomos.

Como mencionado, *throughput* $Q = \frac{p v}{t}$ onde $\frac{v}{t}$ é a velocidade efetiva com que a câmara de vácuo é evacuada, definida como $S_{ef} = \frac{v}{t}$. O termo 'efetiva' para a velocidade é necessário, pois existe uma diferença entre a velocidade da bomba de vácuo S_{BV} , definido pelo fabricante da bomba e a velocidade que realmente a câmara de vácuo é evacuada. A diferença entre velocidade da bomba de vácuo S_{BV} , e

velocidade efetiva que a câmara de vácuo é evacuada S_{ef} depende primordialmente da condutância da tubulação entre bomba de vácuo e câmara. A condutância por sua vez é influenciada pelas dimensões da tubulação e seus componentes e ou acessórias, como válvulas e instrumentos, e depende também de outros equipamentos montados na tubulação, como trocadores de calor. Da mesma forma que é necessário utilizar o termo velocidade efetiva, é necessário utilizar o termo 'cv' para definir a pressão na câmara de vácuo, que é diferente da pressão na entrada da bomba e o termo 't', mostrando que a pressão é dependente do tempo, então, especificamente, é tratado a pressão na câmara de vácuo que varia com o tempo

Dessa forma o *throughput* $Q = k T \frac{dN}{dt}$ da bomba de vácuo simbolizado por Q_{BV} pode ser escrito da seguinte forma:

$$Q_{BV} = k T \frac{dN_{BV}}{dt} = S_{ef} P_{CV}(t)$$
(27)

A Equação 24 quantifica a vazão no tempo, que é a velocidade, dependente da pressão que varia com o tempo. Isso para os gases e vapores que deixam a câmara de vácuo CV. Mas, como já mencionado, a câmara de vácuo possui aço líquido e associado ao processo de desgaseificação há geração ou injeção de gases no sistema que deverão ser considerados para a modelagem do sistema de vácuo. Essa geração ou injeção de gases é o *throughput* de entrada na câmara de vácuo e será definido como:

$$\sum_{i=1}^{n} Q_i \tag{28}$$

Cada sistema de vácuo possui um ou vários *throughput* de entrada que inclusive poderão ser desconsiderados na modelagem em algumas circunstâncias. Essa analise irá depender de cada processo e do conhecimento sobre ele, definindo a influência de cada *throughput* em especifico e sua dificuldade de implementação matemática e simplificações possíveis e ou necessárias.

Voltando ao início do desenvolvimento físico matemático tem-se V $\frac{dp}{dt}$ e particularmente para o *throughput* que deixa a câmara de vácuo será definido o sinal negativo e sinal positivo para o que é gerado ou inserido na câmara de vácuo. Dessa forma, é encontrado a seguinte expressão:

$$V_{CV} \frac{dp_{cv}(t)}{dt} = -Q_{BV} + \sum_{i=1}^{n} Q_i$$
(29)

Utilizando a última expressão para o Q_{BV} é obtido a equação geral para o processo de bombeamento na câmara de vácuo:

$$V_{CV} \frac{dp_{cv}(t)}{dt} = -S_{ef} P_{CV}(t) + \sum_{i=1}^{n} Q_i$$
(30)

Conforme citado anteriormente, a velocidade efetiva de bombeamento(S_{ef}) é diferente da velocidade de bombeamento(S_{BV}). Existe uma relação entre as duas velocidades, que depende da condutância total (C_T) (UMRATH, 2007; HATA, 2008; PFEIFFER, 2013).

$$\frac{1}{S_{\rm ef}} = \frac{1}{S_{\rm BV}} + \frac{1}{C_{\rm T}}$$
(31)

Reorganizando a equação:

$$S_{ef} = \frac{S_{BV} C_T}{S_{BV} + C_T}$$
(32)

Substituindo S_{ef} na equação geral de bombeamento da câmara de vácuo é encontrado uma equação mais completa, chamada de Equação Fundamental para o Processo de Bombeamento a Vácuo (E_{PBV}) (DEGASPERI, 2006, 2016)

$$V_{CV} \frac{dp_{cv}(t)}{dt} = - \frac{S_{BV} C_T}{S_{BV} + C_T} P_{CV}(t) + \sum_{i=1}^{n} Q_i$$
(33)

As unidades geralmente utilizadas para *throughput*, Q, são *mbar*. $l.s^{-1}$; *tor*. $l.s^{-1}$; *Pa*. $m^3.s^{-1}e \frac{kg \cdot m^2}{s^3}$. Para a condutância, C, são $l.s^{-1}$; $m^3.h^{-1}$; $cm^3.s^{-1}$. Para velocidade de bombeamento, S, são: $l.s^{-1}$; $m^3.h^{-1}$; $cm^3.s^{-1}$

Lembrando que todo processo com objetivo de atingir o vácuo, parte de uma pressão inicial que é a pressão atmosférica local, que é a condição inicial do processo, $p_{cv}(t=0) = p_0$

Os sistemas de vácuo em geral têm como objetivo final reduzir a pressão na câmara de vácuo até um determinado valor. Dessa forma o termo $\frac{S_{BV} C_T}{S_{BV}+C_T}P_{CV}(t)$ deve ser maior que o termo $\sum_{i=1}^{n} Q_i$ para que o $\frac{dp_{CV}(t)}{dt}$ seja negativo, ou seja, a derivada da pressão no tempo seja negativa e ocorra uma redução de pressão na câmara de vácuo, uma vez que o volume da câmara de vácuo V_{CV} é constante. Essa redução na pressão na câmara de vácuo deve acontecer até que o $\frac{S_{BV} C_T}{S_{BV}+C_T}P_{CV}(t)$ seja igual ao

termo $\sum_{i=1}^{n} Q_i$ assim $\frac{dp_{cv}(t)}{dt} = 0$, dessa forma a pressão na câmara de vácuo é constante e final dentro do esperado para o processo.

A equação E_{PBV} é construída dentro do princípio de conservação de energia e é necessário a partir de agora definir a geração e inserção de gás no sistema, referente ao termo $\sum_{i=1}^{n} Q_i$, o termo referente a velocidade S_{BV} que é uma característica da bomba de vácuo e a condutância C_T que é característica da linha entre bomba de vácuo e câmara de vácuo, para que o modelamento seja completo.

Degasperi (2016) cita que as fontes de gases não são fáceis de serem identificadas quantitativamente e que é necessário definir o regime de escoamento para os cálculos das condutâncias. No capítulo 4 estão tratadas as fontes de gases e em seguida as considerações sobre condutância, velocidade de bombeamento e velocidade efetiva de bombeamento.

3.2 Definição do aço a ser analisado, aço IF.

É importante que a análise seja feita utilizando um aço que exija do sistema de vácuo, particularmente da bomba de vácuo e que possa ser utilizado como referência quanto a desgaseificação.

Há infinita possibilidades de tipos de aços, e um dos mais representativos é o aço *intersticial free* (IF), citado no item "2.3.2.3 Descarburação". Esse aço só pode ser tratado no desgaseificador, pois somente nele pode-se atingir a composição química adequada. Destacando novamente a necessidade de retirar, oxigênio, hidrogênio, nitrogênio e carbono. Na Figura 27 tem-se a composição típica de um aço IF, que pode ter outras composições, mas todas em torno do exemplo citado. A variedade das composições químicas do aço é devida a variedade e quantidade dos elementos de liga que podem ser adicionados ao aço líquido, que podem chegar a dezenas, citados no item "2.3.2.5 Ajuste químico". Na Figura 27, é possível verificar parte da composição química de um exemplo de aço IF que possui 18 elementos de liga, que somados são responsáveis por 0,6% da composição química do aço. O restante é basicamente ferro ou Ferrita, também conhecida como α -ferrita (α -Fe) ou ferro alfa, é um termo de ciência dos materiais para o ferro puro (FERRITE, 2017). Há aços que podem chegar a composição de 5% de elementos liga adicionados (CHIAVERINI, 2012), mas isso não acontece nos aços IF.

Elemento	Nome	Minimo	Máximo	Visado	Unidade
С	Carbono		0,003	0,004	%
Mn	Manganês	0,08	0,18	0,13	%
Si	Silício		0,03		%
S	Enxofre		0.006	0.006	%
Alt	Alumínio total	0,02	0,06	0,04	%
Ti	Titânio	0,03	0,045	0,037	%
N2	Nitrogênio	50			PPM

Figura 27 – Parte da composição química típica de um aço IF.

Outra informação importante é quanto a composição química do aço IF, particularmente com relação ao teor de hidrogênio, que não é uma exigência direta e sim indireta, ou seja, o teor de hidrogênio não é uma exigência do produto mas sim dos processos de lingotamento subsequentes ao desgaseificador. Abaixo de 3 PPM de concentração de hidrogênio no aço IF é o ideal, sendo aceitável até 7 PPM, pois acima desse valor há uma ocorrência de má qualidade superficial nos produtos dos lingotamentos.

A temperatura de 1600°C é a média e ideal para corridas de aço IF tratadas no desgaseificador, mas cada processo define essa temperatura devido ao layout e logística do processo, para que o aço tenha a temperatura correta nos Lingotamentos.

3.3 Identificação das fontes de gases e vapores $\sum_{i=1}^{n} Q_i$

A identificação das fontes de gases e vapores, que está dentro do termo $\sum_{i=1}^{n} Q_i$ das Equações 30 e 33 é de fundamental importância, sendo a sua sucção a essência de sistemas de desgaseificação mais complexos, que é o caso da desgaseificação do aço. Então é necessário identificar todas as fontes possíveis para que seja feita a análise detalhada de cada uma delas. Para isso foi feita uma consulta a literatura para identificar quais são factíveis com o processo, quais são possíveis de serem encontrados através de testes e quais serão identificados através de cálculos teóricos. As fontes possíveis de gases e vapores tem origem nos seguintes fenômenos e procedimentos:

 a) infiltração, que tem origem do meio externo ao sistema de vácuo para o meio interno; e a recirculação, que é tipo de infiltração, onde os gases e vapores que deveriam sair da bomba de vácuo, retornam sobrecarregando o sistema. b) vaporização, que tem origem no aço líquido, devido à pressão de vapor, temperatura e área exposta;

 c) sublimação, que é a passagem direta do estado sólido para o estado gasoso de algumas ligas que são adicionados ao aço líquido;

d) permeação, passagem de um gás de um meio mais concentrado para um meio menos concentrado, através de um sólido;

e) sorção, que envolve absorção e adsorção de um material por outro;

 f) geração de gás de processo, que são os gases que serão gerados ou retirados do aço líquido, que na verdade é a principal função do Desgaseificador;

g) injeção controlada, que são gases injetados, necessários ao processo;

 h) evacuação, que é retirada do ar atmosférico, presente nos primeiros instantes do processo;

i) geração de gás a partir da água dos condensadores;

4 Análise, Cálculos e Discussão.

A seguir são tratados cada uma das fontes gasosas, relacionado a pressão e volume com o tempo ou utilizando a variação do número átomos e moléculas em determinada temperatura com o tempo, conforme Equação 25, $Q = k T \frac{dN}{dt}$ termo citado na literatura como *throughtput*.

Também são feitas considerações sobre parâmetros da bomba e sistema de vácuo, visando o esclarecimento sobre seu dimensionamento e simulação do processo.

4.1 Determinação da vazão mássica e throughput.

A vazão mássica e *throughput* são diretamente relacionados e são os principais parâmetros a serem considerados em um sistema de vácuo. Afinal, é importante conhecer quais gases e em que condições estão presentes, sendo gerados ou injetados, para que então sejam succionados pela bomba de vácuo.

4.1.1 Infiltração, throughput, Q_{Inf}.

O termo infiltração é melhor utilizado do que o termo vazamento para sistemas de vácuo. O termo vazamento utilizado pelos autores na referência bibliográfica, é melhor utilizado para sistema de bombeamento largamente utilizado onde a pressão do fluido é acima da pressão atmosférica. A infiltração é um dos principais problemas de sistemas de vácuo na indústria, se trata da passagem de gás de um meio de maior pressão para um de menor pressão, dificultando atingir o vácuo preestabelecido. Há três tipos de infiltração, que são provenientes de:

- a) meio externo, com pressão ambiente, geralmente ar atmosférico;
- b) meio externo com pressão diferente da ambiente, geralmente um reservatório de gás;
- c) meio interno ao sistema de vácuo, mas com diferentes pressões, causando recirculação interna de gases.

O tipo (a) é a passagem de gás do meio externo, basicamente ar atmosférico, para o interior do sistema de vácuo, por causas obvias como vedações deterioradas, trincas em tubulações e componentes danificados como válvulas. O tipo (b) de infiltração é mais complexo para se identificar, por exemplo, a válvula que deveria liberar uma vazão de argônio a determinada pressão na perna de subida do vaso, mas que na verdade libera uma vazão maior. Para detectar esse tipo de falha é necessário um instrumento para medir a vazão de argônio. Para a bomba de vácuo tratada nessa dissertação, formada por ejetores a vapor e condensadores, há o tipo (c) de infiltração que ocorre dentro da bomba de vácuo por possuir diferentes níveis de pressão interna.

Uma infiltração pode ser calculada, mas com certeza irá envolver cálculos complexos devido à dificuldade de se determinar a condutância do orifício (C_{Inf}) onde há a passagem de gás. A equação que deve ser utilizada para determinar uma infiltração do meio atmosférico é, segundo Pfeiffer (2013):

$$Q_{\rm Inf} = C_{\rm Inf} \left(p_{\rm atm} - p_{\rm CV} \right) \tag{34}$$

A equação que deve ser utilizada para determinar a infiltração do meio pressurizado é a mesma, sendo apenas necessário substituir p_{atm} pela pressão do reservatório de gás p_{res} que está sendo injetado no sistema de vácuo, geralmente bem acima da pressão atmosférica e com consequências muito piores ao sistema de vácuo.

$$Q_{inf} = C_{inf} (p_{res} - p_{CV})$$
(35)

No caso da infiltração por recirculação interna, a pressão do gás a ser injetado é menor que a pressão atmosférica, pois a infiltração está dentro da própria bomba.

Uma forma de determinar experimentalmente a infiltração do sistema de vácuo é conhecer o *throughput* geral do sistema sem a infiltração. Uma vez que existe a infiltração, a pressão de vácuo final do sistema será mais alta. Fazendo o cálculo inverso da equação fundamental para o processo de bombeamento a vácuo, com o novo valor de $P_{CV}(t)$ e somando a incógnita Q_{Inf} ao *throughput* geral $\sum_{i=1}^{n} Q_i$ já conhecido.

$$V_{CV} \frac{dp_{cv}(t)}{dt} = -S_{ef} P_{CV}(t) + \sum_{i=1}^{n} Q_i + Q_{Inf}$$
(36)

Outra forma de detectar a infiltração, conforme Lafferty (1988) é isolar a câmara de vácuo (reator) ou câmara de vácuo e linha de bombeamento, ou todo o sistema de vácuo, Figura 9, de qualquer outro *throughput* após a pressão de vácuo tenha sido atingida. Uma vez que a pressão tenha sido atingida, é contado um período de tempo no qual a pressão irá se elevar. E através da Equação 37, é possível calcular o valor da infiltração (PFEIFFER, 2013). Onde a infiltração (Q_{Inf}) em [$Pa m^3 s^{-1}$] variação da pressão (Δp) em [Pa], volume (V) em [m^3] e variação do tempo (Δt) em [s]. A grande

dificuldade para conhecer o *throughput* de infiltração é isolar o sistema, após o vácuo tenha sido atingido.

$$Q_{\rm Inf} = \frac{\Delta p . V}{\Delta t} \tag{37}$$

Em resumo, a infiltração não deve ser considerada nos cálculos de capacidade de sucção do sistema de vácuo, pois é uma falha no sistema, uma falha recorrente nos sistemas de vácuo industriais, mas deve ser considerada na análise e entra dentro do fator de segurança do cálculo. Ao mesmo tempo, a infiltração deve ser considerada no projeto de robustez e confiabilidade dos equipamentos.

Como ferramenta de diagnóstico baseado na manutenção baseada na condição, da existência da infiltração, particularmente para a infiltração devido a recirculação interna de gases, é apresentado o capítulo 5.

4.1.2 Vaporização, throughput, Q_{vap}.

A vaporização ocorre devido a pressão de vapor P_v de uma substância pura. Conforme Çengel e Cimbala (2015), a P_v é definida como a pressão exercida por seu vapor em equilíbrio de fase com seu líquido numa dada temperatura. Portanto a pressão de vapor é a pressão na qual a fase vapor está em equilíbrio com a fase líquida ou sólida em uma temperatura especifica (ÜCER, 2017).

Lembrando que a pressão de vapor depende exponencialmente da temperatura, como é verificado na Figura 28.

Como 99,4% do aço IF é a ferrita, citado em "3.3 Definição do aço a ser analisado", ela é fonte *throughput* de vaporização do aço líquido.

Na fase líquida as forças intermoleculares mantêm a substância como um todo coeso. No caso do aço líquido que está em temperatura elevada, 1600°C, as moléculas movem-se vigorosamente, havendo um número grande de moléculas com energia suficiente para se libertar da interação das suas vizinhas.

A vaporização será, portanto, lenta a baixa temperatura e mais rápida às temperaturas elevadas. É necessário analisar se a vaporização será substancial comparativamente com outros gases do sistema.





Fonte: Traduzido de Umrath (2007).

Conforme Degasperi (2006), Safarian e Engh (2013), a Equação 38 pode ser utilizada para a vaporização. A quantidade de moléculas por unidade de área e unidade de tempo que vaporiza de uma superfície (J_{vap}) é:

$$J_{vap} = P_{vapor} N_A / \sqrt{2. \pi. M. R. T} = P_{vapor} / \sqrt{2. \pi. m. k. T}$$
(38)

Safarian e Engh (2013) também citam outras formulas e coeficientes que alteram a quantidade de moléculas por unidade de área em alguns experimentos, mas no casso do ferro, os valores foram muito próximos da teoria consolidada. Um fato importante é a condição para a vaporização do ferro no RH, que é ideal. Há a bomba de vácuo succionando todo o vapor de ferro, ou seja, o meio gasoso dentro da câmara de vácuo não se satura com o tempo, impedindo o equilíbrio termodinâmico. Outro fator importante é a condição de circulação do aço líquido entre panela e vaso (reator), renovando continuamente as moléculas expostas na superfície no interior do vaso e consequentemente expostas ao vácuo.

Com o gráfico da Figura 28, é possível encontrar a P_{vapor} do ferro. Mas há uma imprecisão na utilização do gráfico, portanto é utilizado uma ferramenta de cálculo online do departamento de física aplicada da Universidade de Tecnologia de Viena (SCHMID, 2017) que determina o valor de 8 Pascal ou 0,08 mbar para a temperatura de tratamento de 1600°C. Ou seja, o ferro líquido começa a entrar em ebulição nessa temperatura de 1600°C caso esteja na pressão de vácuo de 0,08 mbar. Para o sistema de vácuo utilizado como exemplo para essa dissertação, que trabalha com até 0,68 mbar de projeto, a temperatura de ebulição nessa pressão é 1782°C, portanto, acima dessa temperatura, o ferro líquido entraria em ebulição durante o tratamento, o que acarretará no aumento da taxa de vaporização.

Uma constatação, a faixa de pressão apresentada na Figura 23 para os sistemas de desgaseificação do aço, onde o valor mínimo de pressão é de 0,1 mbar ou 10 Pa, que é um pouco acima de pressão de vapor do ferro líquido a 1600°C e pode ser considerado como um fator de segurança para garantir que o ferro não irá entrar em ebulição.

É importante acrescentar mais informações sobre o processo para que a análise seja realizada. O reator onde o aço líquido é tratado é cilíndrico, fabricado em aço e parede interna refratada. O diâmetro útil ou interno do reator é 2114 mm, conforme Figura 12. Consequentemente a área exposta ao vácuo é 3,51 m^2 . Cada batelada ou corrida no desgaseificador possui 224 toneladas, ou seja, a massa (m) é 224.000 kg de aço.

Para a realização dos cálculos, é necessário conhecer a constante de Boltzmann (k) que é $1,3806503 \cdot 10^{-23} (m^2 \cdot kg)/(s^2 \cdot K)$. A constante universal dos gases é $8,314462 (m^3 \cdot kg)/(s^2 \cdot K \cdot mol)$. A massa molecular (M) do ferro é 55,845 g/mol ou 0,055845 kg/mol. O número de Avogadro (L) ou (Na) é $6,022 \cdot 10^{23}$ é o número de átomos ou moléculas por mol. Com o número de Avogadro e a massa molecular, é possível encontrar a massa do átomo de ferro que é $9,2735 \cdot 10^{-23}$ g/mol ou $9,2735 \cdot 10^{-26}$ kg/mol.

A quantidade de moléculas por unidade de área e unidade de tempo que evapora de uma superfície (J_{vap}) é dada pela Equação 39 (DEGASPERI, 2006).

$$J_{vap} = P_{vapor} / \sqrt{2. \pi. m. k. T}$$

$$= Pa / \sqrt{\frac{(m^2.kg)}{(s^2.K)} \cdot kg. k} = \frac{Kg}{m.s^2} / \sqrt{\frac{(m^2.kg^2)}{(s^2)}} = \frac{Kg}{m.s^2} / \frac{m.kg}{s} = \frac{Kg}{m.s^2} \frac{s}{m.kg} = \frac{1}{m^2.s}$$

$$= 8 / \sqrt{2.3,1415.9,27.10^{-26} \cdot 1,3806 \cdot 10^{-23}.1873,15} = 8 / 1,22.10^{-22}$$

$$= 6,5574.10^{22} \text{ atomos/m}^2. s$$
(39)

Ou:

$$J_{\text{vap}} = P_{\text{vapor}} N_A / \sqrt{2. \pi. M. R. T}$$

$$= 8.6,022.10^{23} / \sqrt{2.3,1415.0,055845.8,314462.1873,15}$$

$$= 48.176.10^{23} / 73,3625 = 6,5574.10^{22} \text{ atomos/m}^2. \text{ s}$$
(40)

Como o número de Avogadro 6,022. 10^{23} átomos de ferro que corresponde a 0,055845 kg, então 6,5574. 10^{22} átomos de ferro que vaporiza por cada m² é 0,0061 $\frac{kg}{s}$ ou 0,0036 $\frac{kg}{min}$ ou 21,8916 $\frac{kg}{h}$. Para a área exposta ao vácuo de 3,51 m^2 , o número de átomos total que vaporiza por segundo é

 $J_{\text{vap}} \text{ . área exposta ao ambiente} = número total de átomos$ (41) 6,5574 . $10^{22} \frac{\text{atomos}}{\text{m}^2.\text{s}} \text{ . } 3,51 \text{ m}^2 = 23,0165 \text{ . } 10^{22} \text{ atomos/s}$

Então é obtido a massa de ferro que vaporiza, considerando a área total de exposição, igual a 0,0224 $\frac{kg}{s}$ ou 1,3432 $\frac{kg}{min}$ ou 80,5934 $\frac{kg}{h}$

Agora é possível encontrar o *throughput* devido a vaporização (Q_{vap}) em vácuo por unidade de área utilizando a equação:

$$Q_{vap} = J_{vap}. k. T$$

$$Q_{vap} = \frac{1}{s}. \frac{(m^2.kg)}{(s^2.K)}. k = \frac{kg. m^2}{s^3}$$
(42)

Utilizando J_{vap} por m^2 de área de exposição:

$$Q_{\text{vap}} = 6,5574 \cdot 10^{22} \cdot 1,3806503^{-23} \cdot 1873,15 = 1695,85 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{2^3}$$

Utilizando J_{vap} por 3,51 m^2 de área total de exposição:

$$Q_{vap} = 3,51.6,5574.10^{22}.1,3806503^{-23}.1873,15 = 5952,44 \frac{kg \cdot m^2}{s^3}$$

É importante observar que a vaporização independe do volume ou massa do ferro líquido, mas sim da área exposta ao ambiente.

A vaporização é o principal responsável pelo acumulo de pó, oxido de ferro, na linha de sucção, o que reduz a condutância e consequentemente a capacidade da bomba de vácuo em reduzir a pressão de vácuo bem como a velocidade de seu atingimento. Essa informação terá mais detalhes no capítulo 4.2 Capacidade de sucção da bomba de vácuo. Outra observação citada por Jousten (2016) é relativa à existência do equilíbrio entre a vaporização e condensação. Em ambientes fechados, após os átomos provenientes da superfície líquida saturarem o ambiente gasoso, voltam a se condensar, ficando líquido e gás em equilíbrio. O que não ocorre na desgaseificação do aço, pois a bomba succiona o gás durante todo o tempo de tratamento.

4.1.3 Sublimação, throughput, Q_{sub}.

Conforme Çengel (2015), a sublimação é a passagem direta do estado sólido para o estado gasoso e ocorre quando a pressão do ponto triplo de uma determinada substância é acima da pressão atmosférica. No caso de sistema em vácuo, a pressão atmosférica citada pode ser interpretada como a pressão em vácuo e a pressão do ponto triplo é a pressão de vapor.

No refino do aço, dentro do vaso ou reator, há apenas aço líquido que durante o tratamento recebe a adição de elementos de liga, em estado sólido, que estão na temperatura ambiente. Esses elementos de liga, enquanto se aproximam do aço ganham calor, mas ao entrarem em contato com o aço são imediatamente misturados e homogeneizados, não havendo tempo suficiente para a sublimação se completar, ficando os gases retidos no interior do aço líquido, fazendo as ligações químicas necessárias para os quais foram adicionados. Além do mais a quantidade de elementos de liga é insignificante com relação ao volume ou massa total do ferro presente na composição.

De qualquer forma é importante ressaltar que algumas substancias adicionadas ao aço poderiam sublimar, pois possuem a pressão de vapor acima da pressão de vácuo mínima atingida pelo sistema de vácuo de 0,68 mbar na temperatura de 1600ºC. O cálcio possui a pressão de vapor de 1960 mbar, manganês possui pressão de 51,6 mbar (SCHMID, 2017).

Os cálculos para a sublimação são os mesmos para a vaporização, e são importantes para vários processos como por exemplo na metalização (DEGASPERI, 2006).

4.1.4 Permeação, throughput, Q_{perm}.

A permeação é a passagem de gás de um meio mais concentrado para um meio menos concentrado através de um sólido. No caso do sistema de vácuo, o meio sólido é a parede do reator, parede da linha de bombeamento e parede dos ejetores e condensadores da bomba de vácuo, todas elas formadas por chapas de aço e em algumas regiões são acrescentadas na parte interna uma camada de refratário. As moléculas e átomos do meio atmosférico são adsorvidas pela face externa na parede de aço, são difundidas pela parede de aço devido a agitação térmica e posteriormente são desorvidas no interior do reator. A permeação sofre influência da diferença de pressão entre os meios, temperatura, espessura e tipo de material e do tipo de gás permeado (DEGASPERI, 2006).

Roth (1988) desenvolveu vários gráficos com taxas de fluxo (K) que são constantes e que dependem das variáveis já citadas. A K é expressa em cm^3 de gás por segundo através de uma área em cm^2 de corte transversal da seção por milímetro de espessura e diferença de 1 atm entre o meio externo e interno. Em uma das retas do gráfico da Figura 29, ilustra a passagem em paredes de aço (*steel*): 27% Cr Steel e $FeCr_{80/20}$ e ferro Fe, que são materiais comuns da carcaça de reatores para desgaseificação.



Figura 29 - Permeação o hidrogênio através de vários materiais.

Roth (1988) cita que a permeação do hidrogênio através de metais aumenta com a raiz quadrada da pressão e que tal fato é explicado pela dissociação do hidrogênio em átomos, sua passagem através do metal e sua recombinação na dessorção em baixa pressão onde as moléculas do hidrogênio surgem, especialmente através do ferro, devido a efeitos químicos e eletrolíticos. O autor também cita que os gases nobres (hélio, neônio, argônio, criptônio, xenônio e radônio) não permeiam os metais em qualquer temperatura devido a não existência dos efeitos citados. Na Figura 30 é possível verificar a permeação através da parede de um reator. O lado de maior pressão, geralmente pressão atmosférica, p1, e o lado de menor pressão, p2, a densidade do gás que está sendo permeado durante a difusão n_{dis} que também depende da cinética das moléculas envolvidas e 2d sendo a espessura do material da parede.



Figura 30 - Processos durante a permeação.

Fonte: (JOUSTEN, 2016)

Jousten (2016) cita a equação para o cálculo da permeação:

$$Q_{perm} = K \cdot \frac{1}{2d} \cdot (p1 - p2)$$
 (43)

Jousten (2016) também cita que para gases nos quais as moléculas não se dissociam em certos materiais, a equação deve ser utilizada:

$$Q_{perm} = K \cdot \frac{1}{2d} \cdot (p1^{0,5} - p2^{0,5})$$
(44)

Degasperi (2006), cita que a permeação assume importância em sistema de ultra alto-vácuo com paredes muito finas e para materiais específicos. Dessa forma não será necessário considerar a permeação para o sistema de baixo vácuo para desgaseificação do aço líquido.

4.1.5 Sorção, throughput, Q_{sorc}.

A sorção, da mesma forma que a permeação, envolve os fenômenos de absorção e adsorção, onde um material sólido absorve um líquido ou gás e outra possibilidade é um material líquido absorver um gás. Diferente da permeação, na sorção, durante a absorção, a substância que está sendo absorvida, o absorvato, se mantêm na substância que absorve, o absorvente. Após, quando as condições de pressão, temperatura e concentração ambiente mudam, há o fenômeno de adsorção, onde o material que adsorve é chamado de adsorvente (ou agente adsorvente) e o material que é adsorvido é chamado de adsorbato (SORÇÃO, 2017). As condições citadas, permitem que a energia cinética dos átomos e moléculas sejam suficientes para a absorção, quando elas colidem com o material absorvente. Outras forças estão envolvidas na sorção, como a natureza polar de moléculas de água, presente no ar, de acordo com Hata (2008) é do tipo *Van Der Waals* citado por Degasperi (2006).

Para o processo de fabricação do aço, dentro da siderurgia, há várias oportunidades para a absorção de gases nos sólidos e líquidos, matérias primas do aço líquido, desde o processo de coqueificação até chegar ao processo do desgaseificador a vácuo. Há também várias oportunidades de adsorção, antes do aço líquido chegar no desgaseificador, pois as condições de pressão, temperatura e concentração se alteram constantemente. Mas segundo Degasperi (2006) a sorção, citado por ele como degaseificação, é de analise complexa e possui uma teoria profunda com detalhes específicos para diferentes situações. Jousten (2016) desenvolve a teoria especifica para esse tema, com a identificação da taxa de absorção, taxa de adsorção, modelo de Hobson para curva de bombeamento, isoterma de adsorção monocamada, adsorção multicamada e isoterma Brunauer-Emmett-Teller. Degasperi (2006) também menciona que a degaseificação, citada aqui como sorção, sendo a fonte mais comum e presente nos sistemas de vácuo, mas ao mesmo tempo só se torna uma fonte predominante a partir de 10^{-3} mbar, situação diferente de um desgaseificador a vácuo para o refino do aço, que opera com pressão mínima de 10⁻¹ mbar, citada na Figura 17. A sorção, dessa forma, não será considerada como um throughput na desgaseifcação do aço líquido.

É importante salientar a diferença entre gases presentes no meio líquido e solido com os gases que são absorvidos por tais meios. Por exemplo, os gases e líquidos que estão presentes nos poros do refratário do reator, geralmente ar e água, estão
presentes ali não devido a sorção, mas devido a impossibilidade de existir vácuo em condições ambientais. Da mesma forma, quando gusa é escoado pelo alto-forno, os gases percolam o gusa líquido, mas nem todo volume de gás é emanado na chaminé, permanecendo gás no meio líquido na forma de bolhas. Esses gases são oriundos do próprio processo e sua retirada será tratada no tópico, Gases e Vapores de Processo.

4.1.6 Gases e Vapores de Processo, throughput, Q_{GVP} .

Conforme Degasperi (2006), esta fonte de gás depende essencialmente do processo que está sendo realizado o vácuo, ou seja, é especifico de cada produto que está sendo tratado em vácuo. A retirada dos gases do aço líquido é a essência do desgaseificador. Conforme já citado, na grande maioria dos processos anteriores a desgaseificação, há percolação de gases no meio líquido, até mesmo no próprio RHOH há injeção de gases, que será tratado no Capítulo 4.7 Injeção controlada de gases, que acabam fazendo parte da constituição química do aço. Entre os principais gases há o oxigênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogênio e nitrogênio.

4.1.6.1 Oxigênio, monóxido de carbono e dióxido de carbono.

Durante a conversão do gusa em aço no convertedor através do sopro de oxigênio, são adicionados elementos de liga para que seja feito o refino primário do aço, ou seja, o ajuste químico inicial. Mas, durante a adição de ligas, ocorre uma desoxidação do aço, devido as reações dos elementos de liga com o oxigênio, reduzindo o teor de oxigênio no aço, importante na descarburação no desgaseificador. Então, para aços IF, não há adição de ligas no convertedor, para que o aço permaneça oxidado. Isso facilita a reação entre oxigênio e carbono no desgaseificador, deixando o aço na forma de monóxido de carbono e dióxido de carbono, para reduzir o teor de carbono do aço. Por esse motivo, o aço IF exige tanto do sistema de vácuo e só pode ser produzido no desgaseificador.

Reforçando o conceito da cinética do processo no RHOB: O aço circula entre panela e vaso (reator) e há vácuo no reator succionando os gases. O oxigênio presente no aço líquido, devido a agitação, permeia o aço até encontrar o átomo de carbono, formando monóxido de carbono e dióxido de carbono. O vácuo succiona os gases, descarburando o aço.

Um alto teor de oxigênio no IF facilita a retirada do carbono, mas nesse processo, o oxigênio também deixa o aço líquido na forma pura e se o teor de oxigênio não for suficiente para descarburação é soprado oxigênio dentro do reator através de uma lança de gás. A utilização dessa lança de gás não é desejada, pois controlando o processo, para que exista oxigênio suficiente proveniente do sopro de oxigênio no convertedor, não é necessário utiliza-la.

No desgaseificador, quando o teor de carbono no aço é suficientemente baixo, é necessário parar o processo de descarburação. Para isso, tem-se que reduzir o teor de oxigênio remanescente, então é adicionado alumínio para reagir com oxigênio e formar alumina, um óxido sólido, citado no item 2.3.2.4 - Aquecimento Químico. Essa reação é exotérmica, liberando calor para o aço líquido, compensando de certa forma a perda de calor do aço para o refratário do reator e da panela, Reação Química A. Uma vez adicionado o alumínio, em determinado tempo durante o tratamento, a reação se inicia e não haverá mais oxigênio disponível na forma de gás e consequentemente interrompe a geração de dióxido de carbono e monóxido de carbono.

$$2Al_{(s)} + \frac{3}{2}O_{2(g)} = Al_2O_{3(s)} \qquad \Delta H^{\circ}_{298}Al_2O_3 = -400, 4\frac{Kcal}{mol} de Al_2O_3 \quad (A)$$

Para conhecer o volume de oxigênio e consequentemente o *throughput* deste gás foram coletadas 3 amostras, uma no começo, outra no meio e a última no fim de cada uma das 5 bateladas ou corridas, durante o tratamento de um aço (IF) no desgaseificador a vácuo. Os valores encontrados em número de partes por milhão (PPM) estão na Tabela 2.

			Oxigênio								
Corrida	Tempo total de vácuo em minutos	Tempo de vácuo em minutos 1ª amostra	PPM 1ª amostra	Tempo de vácuo em minutos 2ª amostra	PPM 2ª amostra	Tempo de vácuo em minutos 3ª amostra	PPM 3ª amostra				
1ª Corrida	27	0	625	9	557	27	4				
2ª Corrida	34	2	620	6	576	32	4				
3ª Corrida	48	2	743	25	542	46	4				
4 ^ª Corrida	37	5	706	27	624	37	4				
5ª Corrida	36	3	612	22	576	30	3				

Tabela 2 – Concentração em partes por milhão (PPM) de oxigênio no começo, meio e fim de corridas IF.

A redução do teor de oxigênio no aço, depende da reação química entre os átomos de oxigênio (O) e carbono (C) presente no aço líquido. A combinação desses dois elementos químicos só é possível devido a recirculação do aço entre reator e panela, pois permite o encontro dos dois átomos. Tanto (O) quanto (C) possuem limites máximos na composição química do aço, mas o carbono atinge sua faixa de composição primeiro, durante o vácuo.

Para conhecer o momento em que o teor de carbono atinge a faixa de composição necessária, é utilizado um analisador de gás na chaminé. A reação entre oxigênio e carbono formam *CO e CO*₂ e quando a porcentagem desses dois gases é reduzida atingindo 3% da composição química dos gases que deixam o sistema de vácuo pela chaminé, indica que o aço já está na faixa de teor de carbono adequada, máximo 15 PPM de concentração e que praticamente não há mais carbono para reagir com o oxigênio. A análise de gases da chaminé é realizada através de um instrumento, analisador de gás, instalado diretamente na chaminé. No momento em que o teor de carbono é adequado, o teor de oxigênio no aço líquido ainda é alto, conforme Tabela 2, entre 542 e 624 PPM, sendo o desejado abaixo de 10 PPM e o visado abaixo de 6 PPM. Como não há mais carbono para reagir com oxigênio, é então adicionado o alumínio, que irá reagir com o oxigênio, uma reação exotérmica, formando alumina, reduzindo o teor de oxigênio, como já mencionado.

Na Figura 31 é possível perceber que há duas inclinações de retas com relação a queda de PPM de oxigênio. A primeira inclinação referente a redução de oxigênio devido a reação com o carbono, gerando gás $CO \ e \ CO_2$ e também devido a sua liberação na forma pura. A segunda inclinação é referente a redução de oxigênio devido a reação do oxigênio com o alumínio formando alumina. A primeira inclinação de reta deve ser considerada para o sistema de vácuo, devido a geração de gás.

Enfatizando, para o sistema de vácuo, é importante conhecer a quantidade de oxigênio e carbono que deixa o aço líquido na forma dos gases O_2 , $CO \ e \ CO_2$, ou seja, até a medição intermediária de oxigênio da Tabela 2 e Figura 31.

Para analisar a queda de O_2 no aço durante o vácuo é importante analisar as corridas com o PPM inicial aproximado. A primeira, segunda e quinta corridas possuem PPM bem próximos:625, 620 e 612 e constam na Tabela 3.



Figura 31 - Redução do teor de oxigênio em PPM através da combinação de carbono no aço líquido e no segundo momento através da adição de alumínio, reagindo com oxigênio formando alumina.

Tabela 3: Concentração em PPM de oxigênio no aço durante a geração de gás com tempo de vácuo para três corridas.

1ª Corrida	Tempo de vácuo 1ª e 2ª amostras	PPM de Oxigênio 1ª e 2ª amostras
Medição Inical	0	625
Medição final	9	557
2ª Corrida		
Medição Inical	2	620
Medição inal	6	576
5ª Corrida		
Medição inicial	3	612
Medição final	22	576

Como a medição do PPM foi realizado em momentos diferentes, é possível construir uma Tabela única que representa a queda de oxigênio no aço para uma corrida IF, conforme Tabela 4 e Figura 32 onde é possível perceber que a última medição de oxigênio possui um erro, pois seu PPM elevou no final.

Tempo de vácuo em minutos	PPM de oxigênio
0	625
2	620
3	612
6	576
9	557
22	576

Tabela 4: Representação da queda da concentração de oxigênio em PPM para corridas IF.





Eliminando a medição com erro, é possível construir o gráfico da Figura 33, mais realístico com relação a queda de PPM de oxigênio no aço IF:



Figura 33 - Queda da concentração em PPM de oxigênio para corridas IF.

Algumas considerações são necessárias para a análise do gráfico de PPM de oxigênio. Para isso é necessário conhecer a Tabela 5 e Figura 34 para verificar a queda de pressão de vácuo em mbar durante as corridas:

1ª co	1ª corrida 2ª corrida 5ª co		rrida Média das c		is corridas		
Tempo	Pressão	Tempo	Pressão	Tempo	Pressão	Tempo	Pressão
de	de	de	de	de	de	de	de
vácuo	vácuo	vácuo	vácuo	vácuo	vácuo	vácuo	vácuo
em	em	em	em	em	em	em	em mbar
minutos	mbar	minutos	mbar	minutos	mbar	minutos	emmai
0	896,3	0	896,1	0	898,6	0	897,0
1	409,7	1	338	1	316,7	1	354,8
2	91,3	2	93	2	94,3	2	92,9
3	39,2	3	63,7	3	82,9	3	61,9
4	30,4	4	48,4	4	70,4	4	49,7
5	35,9	5	46,9	5	49,6	5	44,1
6	24,3	6	28,9	6	35,7	6	29,6
7	24,5	7	22,3	7	21,6	7	22,8
8	25	8	20,9	8	19,8	8	21,9
9	26,8	9	5,6	9	16,2	9	16,2
10	26,4	10	5,1	10	16	10	15,8

Tabela 5 - Pressão de vácuo em mbar x tempo em minutos em corridas IF.

Figura 34 - Média pressão de vácuo em mbar x tempo em minutos para corridas IF.



Observa-se na Figura 34 que a pressão de vácuo levou dois minutos para mudar de patamar significativamente e que depois a taxa de queda de pressão é menor. Nos dois minutos iniciais o sistema está evacuando ar atmosférico do seu interior e após isso está succionando gases do aço (oxigênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogênio e nitrogênio) e outros gases que são injetados no sistema (nitrogênio e argônio). Estas informações estão claras ao longo da dissertação.

Para que ocorra a desoxidação do aço, existem outros fatores além do vácuo a serem considerados, conforme já citado no tópico 2.3.1 Cinética do Processo Circulação do Aço. Antes de iniciar o vácuo, as pernas do vaso, Figura 35, são imersas no aço líquido. Sem a imersão das pernas, o vaso não é vedado e não é possível fazer vácuo no interior do vaso. Quanto mais imergir as pernas, melhor, mas há a limitação do tubo de entrada de argônio na perna de subida, pois o aço líquido da panela não pode entrar em contato com o tubo. A imersão das pernas no aço irá reduzir a altura H2, altura essa que o vácuo terá que succionar o aço para inundar o reator, para que se inicie a circulação do aço entre reator e panela.

Figura 35 - 1º Imersão das pernas no aço. 2º Sucção do aço da panela pela força do vácuo até a altura onde se inicia a circulação entre reator e panela. 3º Nível de aço no vaso ou reator, durante o tratamento.



Com a utilização da Equação 45, que relaciona força, pressão e área, a Equação 46 que relaciona força, massa e gravidade, e a Equação 47 que relaciona massa e volume para densidade, é possível chegar na Equação 48, que relaciona densidade, volume, gravidade e área para a pressão. Essa pressão é a de vácuo, necessária para succionar o aço da superfície da panela até a parte superior da perna de subida do vaso, distância essa dada pela altura H2 de 1144 mm ou 1,144 m, posição 2, Figura 35. O volume citado é o volume interno da perna, dado pela multiplicação da área da base por altura, Equação 49. Dessa forma, foi encontrada a Equação 50 que representa o nível de vácuo requerido para que o aço seja succionado da panela, vencendo a gravidade, inundando o reator para que se inicie a circulação entre panela e reator. Segue o desenvolvimento para se chegar na Equação 50, onde H2 da Figura 35 é o *h* da Equação 50, *p* é a pressão, *F* = força, *V* = volume, *m* = massa, *g* = gravidade = 9,81 $\frac{m}{s^2}$, *A* = área, *d* = densidade do aço líquido = 7800 $\frac{kg}{m^3}$.

$$p = \frac{F}{A}$$
(45)

$$F = m.g \tag{46}$$

$$d = \frac{m}{v}$$
(47)

Então:
$$p = m.\frac{g}{A} \rightarrow p = d.V.\frac{g}{A}$$
 (48)

Sabe-se que
$$V = A_{base}$$
. h (49)

Então:
$$p = d.A_{\underline{base}} h.g/A_{\underline{base}} = d.h.g$$
 (50)

$$p = 7800 \frac{kg}{m^3} \cdot 1,144 m.9,81 \frac{m}{s^2} = 87.586,6 \frac{kg}{m^2 \cdot s^2} = 87586.5 Pa = 875,87 mbar$$

Analisando o gráfico da Figura 34, a diferença de 897 mbar para 875,87 mbar que é 21.1 mbar só seria atingida com cerca de 8 minutos, mas há uma vazão média de argônio sendo injetado na perna de subida de 128 NI/min ou 7,68 m^3/h , que reduz a densidade do aço. Estudos, conforme Zhang e Fei Li, (2014) e Sicorski, (2006) permite concluir que a densidade do aço pode cair para 7000 $\frac{kg}{m^3}$ o que altera a pressão encontrada para

$$p = 7000 \frac{kg}{m^3} \cdot 1.144 \text{ m. 9,81} \frac{m}{s^2} = 78558.5 \frac{kg}{m \cdot s^2} = 78558.5 \text{ Pa} = 785.6 \text{ mbar}$$

Novamente, analisando o gráfico da Figura 34, a diferença de 897 mbar para 785,6 mbar é de 122,64 mbar. Para se atingir a pressão de vácuo de 122,64 mbar é necessário um pouco menos de 2 minutos. Dessa forma, a queda de oxigênio no aço, só pode começar a ocorrer quando a pressão de vácuo atingir 122,64 mbar. Na Tabela 5, com 2 minutos, o sistema atinge 92 mbar e poucos segundos antes disso ocorre de fato uma circulação de aço, esse tempo é importante e considerado na análise dos gráficos mais à frente. Até esse momento, o vácuo estará succionando o ar presente no sistema de vácuo, vapor de ferro e outros gases que são injetados no sistema e que serão detalhados nos próximos tópicos para depois de então o oxigênio e outros gases do aço comecem a reduzir. Essa consideração é muito importante e deve ser destacada, os gases do processo serão gerados e succionados a partir de 2 minutos, durante esse tempo o ar do interior do sistema será completamente succionado.

Então, o tempo para se atingir o vácuo capaz de succionar o aço da panela até uma altura mínima no reator e a baixa vazão de circulação do aço entre panela e reator, detalhada no Apêndice B, explicam a baixa queda de PPM de oxigênio do aço nos minutos iniciais conforme Figura 33: Queda de PPM de oxigênio para corridas IF.

Outra consideração deve ser feita com relação ao volume de oxigênio que é retirado do aço. O oxigênio é retirado do aço pelo sistema de vácuo na forma de CO, CO_2 e O_2 . Um analisador de gás instalado na chaminé mede de forma online e continua o teor de cada um desses gases, conforme Tabela 6.

		Corrida 1			Corrida 2			Corrida 3 (quinta corrida)					
Tempo de Vácuo em min.	PPM de Oxigênio presente no Aço	P. vácuo em mbar	% CO	% CO ₂	% O ₂	P. vácuo em mbar	% CO	% CO ₂	% 0 ₂	P. vácuo em mbar	% CO	% CO ₂	% O ₂
0	625	897	0,2	0,1	10	897	0,3	0,3	8,1	897	0	0,2	5,4
2	620	91,3	0	3,8	17	93	0	4,1	16	94,3	0,1	5,8	16
3	612	39,2	0	6,8	18	63,7	0	7	17	82,9	0	8,8	17
6	576	24,3	0,1	11,9	15	28,9	0,3	11,8	11	35,7	0,3	9,9	12
9	557	26,8	0,8	0,5	5,5	5,6	17	2,5	2,7	16,2	15	3	3,5

Tabela 6 - % de CO, CO_2 e O_2 em relação a todos os gases na chaminé durante as três corridas.

Fazendo uma média para as três corridas, Tabela 7:

Média								
Tempo de Vácuo em minutos	P vácuo em mbar	% CO	% CO ₂	% O ₂				
0	897,0	0,17	0,2	7,9				
2	92,9	0,03	4,57	16,4				
3	61,9	0	7,53	17,3				
6	29,6	0,23	11,2	12,4				
9	16,2	10,9	2	3,9				

Tabela 7 - Média em % de CO, CO_2 e O_2 em relação a todos os gases na chaminé durante as três corridas.

Lembrando que há outros gases presentes na chaminé, argônio e nitrogênio, que serão detalhados a frente, mas que não influenciam a proporção entre os gases CO, CO_2 e O_2 , ou seja, independente do volume total da chaminé, o importante é conhecer a proporção entre cada um dos três gases.

Como o oxigênio proveniente do aço só pode deixar o sistema na forma pura ou na forma de $CO = CO_2$, a Tabela 7 pode ser refeita desconsiderando os demais gases. Tem-se então a Tabela 8.

Tempo de Vácuo em min.	P. vácuo em mbar	PPM de Oxigênio presente no Aço	Redução PPM de O ₂ por minuto no aço	Proporção de CO em relação a O ₂ e CO ₂ na chaminé em %	Proporção de CO ₂ em relação a O ₂ e CO ₂ na chaminé em %	Proporção de O ₂ em relação a CO e CO ₂ na chaminé em %
0	897	625	0	2,0	2,4	95,6
2	93	620	2,5	0,2	21,8	78,1
3	62	612	8	0,0	30,3	69,7
6	30	576	12,0	1,0	46,9	52,1
9	16	557	6,3	64,9	11,9	23,2

Tabela 8 - Média da % de gases O_2 , $CO \in CO_2$ que deixam a chaminé durante corridas IF.

Com a média em % de cada um dos gases na chaminé, é possível construir a Tabela 9 com a quantidade em PPM de cada um dos gases: $CO, CO_2 \in O_2$ que deixa o aço com o tempo e pressão de vácuo.

Tempo de Vácuo em min.	P. vácuo em mbar	PPM de Oxigênio presente no Aço	Redução PPM de O ₂ por minuto no aço	PPM de CO na chaminé por minuto	PPM de CO ₂ na chaminé por minuto	PPM de O ₂ na chaminé por minuto
0	897	625	0	0,000	0,000	0,000
2	93	620	2,5	0,004	0,545	1,952
3	62	612	8	0,000	2,427	5,573
6	30	576	12,0	0,117	5,631	6,251
9	16	557	6,3	4,109	0,754	1,470

Tabela 9 - Quantidade em PPM de CO, CO_2 e O_2 na chaminé que deixa o aço.

Alterando de PPM para número de átomos. Como PPM quantifica uma parte de soluto por 10⁶ partes da solução.

$$1 PPM = \frac{1 \text{ parte de soluto}}{10^6 \text{ partes de solução}}$$
(51)
$$1 PPM de O2 = \frac{1 \text{ grama de } O_2}{1 \text{ tonelada de aço}}$$

A corrida possui 224 toneladas de aço. Então, para a corrida:

$$1 PPM de O2 = \frac{1 grama de O_2}{1 tonelada de aço} x 224 toneladas$$

Então, utilizando a partir da Tabela 9 o valor de 1,952 PPM de O_2 que deixou o aço a cada minuto é igual a 437,248 gramas de O_2 (224 x 1,952). Como a molécula de O_2 são dois átomos e sabe-se que 1 mol de oxigênio é 6,022 $\cdot 10^{23}$ átomos, tem-se 12,044 $\cdot 10^{23}$ átomos para cada mol de O_2 . A massa atómica do oxigênio é 16 g/mol, assim 12,044 $\cdot 10^{23}$ átomos de oxigênio (O) é igual a 1 mol de moléculas de O_2 que é igual a 32 gramas.

6,022. 10^{23} moléculas de oxigênio (O_2) = 1 mol de moléculas O_2 = 32 gramas x moléculas de oxigênio (O_2) = - - - - - - - - - - = 437,248 gramas

Dessa forma, 1,952 PPM de O_2 são 437,248 gramas e 8,2285. 10^{24} moléculas de O_2 por minuto. Dividindo esse valor por 60, é encontrado o número de moléculas por segundo. E multiplicando esse número pela constante de Boltzmann $K = 1,3806503 \cdot 10^{-23}$ e pela temperatura em Kevin de 1873,15 é encontrado o *throughput* do O_2 de 3546,69 $kg \cdot m^2/s^3$.

Fazendo os mesmos cálculos para todos os gases, a partir da Tabela 9 é possível construir as Tabelas 10, 11 e 12 e gráfico da Figura 36.

Tempo de Vácuo em minutos	P. vácuo em mbar	PPM de Oxigênio presente no Aço	Redução PPM de O ₂ por minuto no aço	PPM de O ₂ na chaminé por minuto	Nº de moléculas de O₂ por minuto	Nº de moléculas de O₂ por segundo	Throughput O ₂ (K.T.N) em (kg. m ²)/s ³	
0	897	625	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
2	93	620	2,50	1,95	8,23x10 ²⁴	1,4x10 ²³	3546,69	
3	62	612	8,00	5,57	2,35x10 ²⁵	3,9x10 ²³	10120,43	
6	30	576	13,67	7,12	3x10 ²⁵	5x10 ²³	12936,71	
9	16	557	6,33	1,47	6,2x10 ²⁴	1x10 ²³	2670,92	

Tabela 10 - Número de moléculas e *throughput* de O_2 na chaminé proveniente do aço.

Tabela 11 - Número de moléculas e throughput de CO na chaminé proveniente do aço.

Tempo de Vácuo em minutos	P. vácuo em mbar	PPM de Oxigênio presente no Aço	Redução PPM de O ₂ por minuto no aço	PPM de CO na chaminé por minuto	№ de moléculas de CO por minuto	№ de moléculas de CO por segundo	Throughput CO (K.T.N) em (kg . m ²)/s ³
0	897	625	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2	93	620	2,5	0,01	0,00	0,00	0,00
3	62	612	8	0,00	0,00	0,00	0,00
6	30	576	13,7	0,13	6,26x10 ²³	1,04x10 ²²	269,84
9	16	557	6,3	4,11	1,98x10 ²⁵	3,3x10 ²³	8531,23

Tabela 12 - Número de moléculas e throughput de *CO*₂ na chaminé proveniente do aço.

Tempo de Vácuo em minutos	P. vácuo em mbar	PPM de Oxigênio presente no Aço	Redução PPM de O ₂ por minuto no aço	PPM de CO ₂ na chaminé por minuto	Nº de moléculas de CO₂ por minuto	Nº de moléculas de CO₂ por segundo	Throughput CO ₂ (K.T.N) em (kg . m ²)/s ³
0	897	625	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2	93	620	2,5	1,09	3,34x10 ²⁴	5,57x10 ²²	1440,00
3	62	612	8	2,43	7,45x10 ²⁴	1,24x10 ²³	3210,27
6	30	576	13,7	6,41	1,96x10 ²⁵	3,27x10 ²³	8468,25
9	16	557	6,3	0,75	2,3x10 ²⁴	3,83x10 ²²	990,82



É possível perceber que a reação entre carbono e oxigênio formando CO é beneficiada em detrimento da reação formando CO_2 a partir de 6 minutos, tempo no qual a pressão de vácuo está abaixo de 30 mbar, relacionando as Figuras 34 e 36. A reação formando CO consegue retirar mais carbono do aço, pois é necessário apenas um átomo de oxigênio para cada átomo de carbono, lembrando que o aço IF, é um aço ultra baixo carbono, UBC e um dos objetivos do RH é reduzir a concentração de carbono. Dessa forma, fica claro que a velocidade para reduzir a pressão de vácuo é importante para o processo.

A unidade mais utilizada para bombas de vácuo constituída por ejetores é a capacidade em kg/h. Multiplicando o número de moléculas de cada um dos gases das Tabelas 10, 11 e 12 por suas respectivas massas atômicas em quilos e dividindo pelo número de Avogrado, ou número de moléculas por mol, $6,022.10^{23}$ é possível encontrar a vazão mássica por minuto e consequentemente por hora. Os valores encontrados estão na Tabela 13 e gráfico da Figura 37.

Tempo de Vácuo em minutos	P. vácuo em mbar	Geração em kg/h de CO a partir do aço.	Geração em kg/h de CO ₂ a partir do aço.	Geração em kg/h de O ₂ a partir do aço.	Geração em kg/h de CO, CO ₂ e O ₂ a partir do aço.
0	897	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	93	0,0000	14,6496	26,23488	40,8845
3	62	0,0000	32,6592	74,8608	107,5200
6	30	1,7472	86,1504	95,6928	183,5904
9	16	55,2384	10,0800	19,7568	85,0752

Tabela 13 - Geração e sucção em Kg/h dos gases O_2 , $CO = CO_2$ a partir do aço.

Como já mencionado, quando o vácuo é iniciado, a quantidade em PPM de oxigênio do aço não deve cair de forma substancial pois a pressão de vácuo leva 2 minutos para ser reduzida e propiciar a circulação do aço. Se não há circulação do aço, a quantidade de oxigênio que se desprende é mínima. Então, até dois minutos, não é considerado que há sucção de O_2 , $CO = CO_2$ do aço líquido e sua presença na chaminé não advém do aço.



Refazendo o gráfico para O_2 , $CO \in CO_2$ agora a partir de dois minutos até 9 minutos onde é finalizado a geração de gás a partir do oxigênio, pois nesse momento é adicionado alumínio para reagir com oxigênio, formando alumina, um composto sólido.



Com relação ao gás CO, a sua geração é irrisória até seis minutos, pois a pressão de vácuo está acima de 30 mbar, Figura 34, e a reação química formando o monóxido

de carbono é beneficiada abaixo dessa pressão, e, portanto, será desconsiderada até esse tempo. Dessa forma é possível gerar os gráficos da Figuras 38 e 39.

As equações que representam a vazão mássica em kg/h entre 2 e 9 minutos de O_2 , $CO \ e \ CO_2$ são:

Vazão mássica de
$$\dot{m}(O_2)_2^9 = -6,2932.t^2 + 67,435.t - 78,509$$
 (52)

Vazão mássica de
$$\dot{m}(CO)_2^9 = 17,83.t - 105,24$$
 (53)

Vazão mássica de $\dot{m}(CO_2)_2^9 = -5,8973.t^2 + 65,444.t - 99,672$ (54)



Figura 39 – Throughput de O_2 , $CO \in CO_2 \text{ em } kg. m^2/s^3$ entre 2 e 9 minutos.

Lembrando que a constante de Boltzmann (k) = $1,3806503 \cdot 10^{-23} (m^2 \cdot kg)/(s^2 \cdot K)$, temperatura T = 1873,15 K e tempo em segundos.

Finalizando, as expressões que deverão ser utilizadas na equação fundamental para o processo de bombeamento em vácuo (E_{PBV}) para o *throughput* de gases e vapores do processo Q_{GVP} para o *throughput* de oxigênio Q_{02} , de gás carbônico Q_{CO} e dióxido de carbono Q_{CO2} são:

Para a molécula de
$$O_2$$
, entre 2 e 9 minutos para Q em $(\frac{\text{kg. m}^2}{\text{s}^3})$:
 $Q_{02}_{t=2}^{t=9}$: $(K.T.N)_{t=2}^{t=9} = -850, 77.t^2 + 9116, 5.t - 10614)_{t=2}^{t=9}$ (55)
Para a molécula de CO, entre 6 e 9 minutos para Q em $(\frac{\text{kg. m}^2}{\text{s}^3})$:

$$\boldsymbol{Q_{co}}_{t=6}^{t=9}: (K.T.N)_{t=6}^{t=9} = 2753, 8.t - 16253)_{t=6}^{t=9}$$
(56)

Para a molécula de C O_2 , entre 2 e 9 minutos para Q em $(\frac{\text{kg. m}^2}{\text{s}^3})$:

$$\boldsymbol{Q_{c02}}_{t=2}^{t=9}: (K.T.N)_{t=2}^{t=9} = (-579,68.t^2 + 6432,9.t - 9797,4)_{t=2}^{t=9}$$
(57)

4.1.6.2 Hidrogênio Q_H

Para as mesmas cinco corridas para as quais foram coletadas as amostras de oxigênio, foram coletadas as amostras de hidrogênio. Foram coletadas 3 amostras para cada corrida, mas para nenhuma delas o instrumento conseguiu realizar as três medições devido a sua sensibilidade. A coleta é manual e realizada com a inserção de uma haste com um sensor na ponta na superfície do banho, na região entre a panela e vaso. A escória da superfície e movimentos bruscos do operador no tempo que o sensor fica imerso no aço inviabilizam o resultado, sendo automaticamente descartado pelo instrumento. Mas no conjunto de amostras coletadas, fica evidente pela Tabela 16 que o volume de hidrogênio é muito menor que o volume de oxigênio. Ao mesmo tempo é evidente que é necessário um tempo maior de vácuo para retirar cerca de 4 PPM do hidrogênio do aço líquido. Dessa forma, não é apenas a capacidade de sucção da bomba de vácuo no sentido de reduzir a pressão que importa, mas o tempo em vácuo em que o aço líquido permanece.

Como já verificado, o oxigênio foi retirado do aço líquido até 9 minutos, enquanto o hidrogênio é retirado até o fim da corrida, e sendo um gás inerte, o hidrogênio é retirado na forma da molécula H_2 .

Corrida	Tempo total de vácuo em minutos	Hidrogênio							
		Tempo de vácuo em minutos 1ª amostra	PPM 1ª amostra	Tempo de vácuo em minutos 2ª amostra	PPM 2ª amostra	Tempo de vácuo em minutos 3ª amostra	PPM 3ª amostra		
1ª Corrida	27	2	5,9	-	-	27	1,5		
2ª Corrida	34	6	5,3	-	-	34	1,1		
3ª Corrida	48	-		19	2,0	48	1,3		
4ª Corrida	37	8	5,6	-	-	37	1,0		
5ª Corrida	36	-	-	-	-	36	1,6		

Tabela 14 – PPM de hidrogênio durante corridas de aço IF.

Condensando todas as amostras das cinco corridas, é possível construir a Tabela 15 e gráfico da Figura 40, onde é possível verificar a queda de hidrogênio com o tempo.

Tempo de vácuo em minutos.	PPM de hidrogênio
2	5,9
6	5,3
8	5,6
19	2
27	1,5
34	1,1
36	1,6
37	1
48	1,3

Tabela 15 – Redução em PPM de hidrogênio com o tempo de vácuo em uma corrida IF.



Duas considerações devem ser feitas com relação ao gráfico da Figura 40, a primeira delas é a impossibilidade teórica do teor de hidrogênio aumentar com o tempo e a segunda é o não conhecimento do teor inicial em PPM das corridas, o que pode levar alguma distorção no gráfico quando as informações são condensadas. Baseado no gráfico da Figura 40, são eliminadas as amostras que tiveram elevação do teor de hidrogênio com o tempo, elevando assim o R^2 de 0,8268 para 0,9126, no gráfico da Figura 41.



A partir das amostras coletadas, tem-se a redução em PPM de hidrogênio em cada intervalo entre amostras, Tabela 16.

Tempo de Vácuo em min.	P. vácuo em mbar	PPM de Hidrogênio presente no Aço	Redução PPM de H2 por minuto no aço
2	92,9	5,9	0
6	29,6	5,3	0,15
19	15,3	2	0,25
27	14,7	1,5	0,06
37	14,5	1	0,05

Tabela 16 - Redução em PPM de hidrogênio em cada intervalo entre amostras.

Alterando de PPM para massa em gramas de H_2 , através da Equação 51, já apresentada:

$$1 PPM = \frac{1 parte de soluto}{10^6 partes de solução}$$

$$1 PPM de H_2 = \frac{1 grama de H_2}{1 tonelada de aço}$$

A corrida possui 224 toneladas de aço. Então, para a corrida:

$$1 PPM de H_2 = \frac{1 grama de H_2}{1 tonelada de aço} x 224 toneladas$$

Utilizando da Tabela 16 o valor de 0,15 PPM de H_2 que deixou o aço a cada minuto tem-se 33,6 gramas de H_2 (224 x 0,15). Como a molécula de H_2 são dois átomos e sabe-se que 1 mol de hidrogênio é 6,022 $\cdot 10^{23}$ átomos, tem-se 12,044 $\cdot 10^{23}$ átomos para cada mol de H_2 . A massa atómica do hidrogênio é 1,00794 g/mol, assim 12,044 $\cdot 10^{23}$ átomos de hidrogênio (H) é igual a 1 mol de moléculas de H_2 que é igual a 2,01588 gramas.

6,022. 10^{23} moléculas de hidrog. $(H_2) = 1$ mol de moléculas $H_2 = 2,01588$ gramas x moléculas de hidrogênio $(H_2) = - - - - - - - - - = 33,6$ gramas

Realizando uma regra de três o valor de 0,15 PPM de H_2 que deixa o aço a cada minuto são 33,6 gramas e são 1,00373 $\cdot 10^{25}$ moléculas de H_2 . Lembrando que o número de moléculas de H_2 que deixa o aço é (N). E multiplicando esse número por segundo pela constante de Boltzmann $K = 1,3806503 \cdot 10^{-23}$ e pela temperatura em Kevin de 1873,15 é encontrado o *throughput* do H_2 . de 4.326,34 kg $\cdot m^2/s^3$. Repetindo os cálculos para os demais valores é possível elaborar Tabelas 17 e 18 e gráficos das Figuras 42 e 43.

Tempo de Vácuo em min.	P. vácuo em mbar	PPM de Hidrogênio presente no Aço	Redução PPM de H2 por minuto no aço	Geração g/minuto de H2 a partir do aço.	Geração kg/minuto de H2 a partir do aço.	Geração kg/hora de H2 a partir do aço.
2	92,9	5,9	0	0	0	0
6	29,6	5,3	0,15	33,6	0,0336	2,016
19	15,3	2	0,25	56	0,056	3,36
27	14,7	1,5	0,06	13,44	0,01344	0,8064
37	14,5	1	0,05	11,2	0,0112	0,672

Tabela 17 - Geração e sucção em g/m; Kg/min; kg/h do gás H2 proveniente do aço IF.

Tabela 18 -	Número	de moléculas e	e throughput de H	l ₂ proveniente	do aco	IF.
				2	•	

Tempo de Vácuo em min.	P. vácuo em mbar	PPM de Hidrogênio presente no Aço	Redução PPM de H ₂ por minuto no aço	Redução do numero de moléculas (N) de H ₂ por minuto no aço.	Redução do numero de moléculas (N) de H ₂ por segundo no aço.	Throughput de H ₂ (K.T.N) (kg .m ²)/s ³)
2	92,9	5,9	0	0	0	0
6	29,6	5,3	0,15	1,0037x10 ²⁵	1,6728x10 ²³	4326,34
19	15,3	2	0,25	1,6728x10 ²⁵	2,7881x10 ²³	7210,56
27	14,7	1,5	0,06	4,0149x10 ²⁴	6,6915x10 ²²	1730,53
37	14,5	1	0,05	3,3457x10 ²⁴	5,5762x10 ²²	1442,11





Na Figura 43, a linha de tendência entre 30 e 35 minutos apresentou uma redução e depois uma elevação do hidrogênio, o que seria fisicamente impossível, foi então gerado o gráfico da Figura 44, onde foram consideradas as Equações 58a e 58b, a primeira até 27 minutos e a segunda partir de 27 minutos.

Lembrando que a constante de Boltzmann (k) = $1,3806503 \cdot 10^{-23} (m^2 \cdot kg)/(s^2 \cdot K)$, temperatura T = 1873,15 K e tempo em segundos.



Finalizando, as expressões que deverão ser utilizadas na equação fundamental para o processo de bombeamento em vácuo (E_{PBV}) para o *throughput* de gases e vapores do processo Q_{GVP} para o *throughput* de hidrogênio Q_{H2} em $kg.m^2/s^3$ são:

Para a molécula de H_2 , entre 2 e 27 minutos:

$$\boldsymbol{Q}_{H2} \overset{t=27}{\underset{t=2}{\overset{t=27}{\overset{t=27}{\overset{t=27}{}}}} = (-45,117.t^2 + 1371,3.t - 2450,9)^{t=27}_{t=2}$$
(58a)

Para a molécula de H_2 , entre 27 e 37 minutos:

$$\boldsymbol{Q}_{H2} \overset{t=27}{\underset{t=2}{\overset{t=27}{\overset{t=3}{\overset{t=3}{\overset{t=3}{\overset{t=3}{\overset{t=3}{\overset{t=3}{\overset{t=3}{\overset{t=3}{\overset{t}{3}{\overset{t=3}{\overset{s}{3}}{\overset{t=3}{\overset{s}}{\overset{s}}{s}}{\overset{s}}{s}}{s}}}}}}}}}$$

4.1.6.3 Nitrogênio Q_N .

Para as mesmas cinco corridas para as quais foram coletadas as amostras de oxigênio e hidrogênio, foram coletadas as amostras de nitrogênio e também coletadas 3 amostras para cada corrida. Os resultados em PPM de nitrogênio estão na Tabela 19.

O valor de referência para o aço IF é nitrogênio abaixo de 50 PPM. E em todas as corridas, a amostra inicial já está abaixo desse valor. A explicação para isso é que o aço IF deixa o convertedor bastante oxidado, ou seja, está saturado de oxigênio, não havendo oportunidade de incorporação de nitrogênio do ar atmosférico pelo aço. Outra explicação é a não adição de elementos de liga e carburantes como o grafite e

coque no convertedor, que carregaria o nitrogênio da sua composição química e do ar atmosférico para o aço.

		Nitrogênio							
Corrida	Tempo total de vácuo em minutos	Tempo de vácuo em minutos 1ª amostra	PPM 1ª amostra	Tempo de vácuo em minutos 2ª amostra	PPM 2ª amostra	Tempo de vácuo em minutos 3ª amostra	PPM 3ª amostra		
1ª Corrida	27	0	23	8	24	27	34		
2ª Corrida	34	0	19	14	24	34	26		
3ª Corrida	48	0	26	38	26	48	29		
4ª Corrida	37	0	15	25	15	37	25		
5ª Corrida	36	0	21	18	16	36	20		

Tabela 19: Concentração em PPM de nitrogênio durante corridas de aço IF.

Em todas as amostras, ao contrário do que é esperado, o valor em PPM de nitrogênio se elevou durante o tratamento em vácuo, ou seja, não há geração de gás nitrogênio e sim incorporação pelo aço líquido no RH. Uma hipótese para isso é o fenômeno de sorção, já descrito no capítulo 4.5, onde o refratário da câmara de vácuo, nos momentos onde não há tratamento de corridas, fica exposto ao ar atmosférico, absorvendo nitrogênio e adsorvendo o mesmo durante o vácuo, devido a baixa pressão e alta temperatura. Teoricamente esse fenômeno não deve acontecer, conforme referência bibliográfica, pois sua relevância é a partir de 1 mbar e durante os testes o mínimo foi de 14 mbar. Outra hipótese, é a impureza do argônio injetado na perna de subida, que acaba se incorporando ao aço que já possui baixo PPM.

De qualquer forma, o nitrogênio não deve ser considerado como uma fonte de gás para a bomba de vácuo durante tratamento de corridas de aço IF.

4.1.7 Injeção controlada de gases, throughput, Q_{ic}

A injeção controlada de gases é necessária em vários pontos dentro do sistema de vácuo, sendo elas a injeção de argônio na perna de subida e injeção de nitrogênio como purga em alguns pontos.

Diferentes dos gases que são gerados no processo que variam com o tempo e que possuem um valor relevante a partir de dois minutos, momento esse em que a pressão

de vácuo está suficientemente baixa, a injeção controlada possui um valor fixo desde o início até o fim do vácuo.

4.1.7.1 Injeção controlada de argônio, throughput, Qica

Como já mencionado, sem a injeção de argônio, o aço liquido não reduz a densidade e não poderá ser circulado entre o reator e panela, necessário para que o argônio injetado e demais gases sejam succionados pelo vácuo. Ao mesmo tempo o gás injetado deve ser apenas o suficiente para promover uma circulação de aço adequada, pois ele também é uma carga para o sistema. No caso em estudo é injetado em média 120 $Nm^3/h = 0.03334 m^3/s$ a uma pressão de 8 bar = 0.8 MPa = 800.000 Pa e na temperatura de 25 °C = 298,15 K.

A vazão de argônio está nas condições normais de temperatura e pressão, CNTP, e nessas condições o peso especifico do argônio é 1,613 kg/m^3 e massa molecular é 39,948. (SONNTAG, 2009).

Para encontrar a vazão mássica: $120 m^3/h x 1,613 kg/m^3 = 193,56 kg/h = 0,0538 kg/s = 53,8 g/s$

Para cada segundo:
$$\begin{cases} 1 \ mol = 6,02 \ x \ 10^{23} \ \text{átomos} = 39,948 \ g \\ x \ \text{átomos} = 53,8 \ g \end{cases}$$

O número de átomos é 8,107440 x 10²³ átomos/s

Para encontrar o *throughput* para a injeção controlada de argônio é necessário multiplicar o número de átomos por segundo (N) pela constante de Boltzmann (k) = $1,3806503 \cdot 10^{-23} (m^2 \cdot kg)/(s^2 \cdot K)$, e pela temperatura T = 298,15 K do argônio. Nesse momento é importante fazer uma consideração com relação a temperatura, o argônio injetado está na temperatura ambiente e devido a sua alta velocidade de injeção e principalmente por não ser percebido queda significativa da temperatura do aço, é considerado que o argônio não retira calor do aço. Dessa forma, o argônio ao deixar o aço e entrar no reator, sendo succionado pela bomba de vácuo, estará na temperatura de T = 298,15 K.

$$Q_{ICA} = K.T.N = 3.337,35 \text{ kg. m}^2/\text{s}^3$$
 (59)

4.1.7.2 Injeção controlada de nitrogênio, throughput, Qicn

A injeção de nitrogênio ocorre em alguns pontos e funciona como purga, protegendo contra gases corrosivos e alta temperatura dos mesmos. São eles:

- a) calha de adição de ligas, afim de proteger as válvulas e sistema de ligas que estão acima da calha;
- b) bocal da lança de gás;
- c) câmara utilizada para filmar o interior do reator;
- d) saída do coletor de pó, forçando a queda de pó pelo coletor.

Os pontos mencionados estão ilustrados na Figura 45, e a vazão total é de 130 Nm^3/h .



Figura 45: Purga de nitrogênio no sistema de vácuo.

A vazão de nitrogênio está nas condições de normais de temperatura e pressão, CNTP, e nessas condições o peso especifico do nitrogênio é $1,13 kg/m^3$. (SONNTAG, 2009).

Para encontrar a vazão mássica: $130 m^3/h x 1,13 kg/m^3 = 135,6 kg/h = 0,03767 kg/s = 37,6667 g/s$

Para cada segundo: $\begin{cases} 1 \ mol = 6,02 \ x \ 10^{23} \ \acute{a}tomos = 14,0067 \ g \\ x \ \acute{a}tomos = 37,6667 \ g \end{cases}$

O número de átomos N é 1,618893 x 10^{24} átomos/s

Para encontrar o *throughput* para a injeção controlada de nitrogênio é necessário multiplicar o número de átomos por segundo (N) pela constante de Boltzmann (k) = $1,3806503 \cdot 10^{-23} (m^2 \cdot kg)/(s^2 \cdot K)$, e pela temperatura T = 298,15 K do nitrogênio injetado.

Nesse momento é importante fazer uma consideração com relação a temperatura do nitrogênio. Ele entra no reator e já é succionado pela bomba de vácuo, devido a isso, a temperatura do argônio ao entrar no espaço livre do reator é a ambiente.

$$Q_{ICN} = K.T.N = 6.664,0255 \text{ kg. m}^2/\text{s}^3$$
 (60)

4.1.8 Água dos condensadores como fonte de gás.



Figura 46: Exemplo de um sistema de vácuo formado por ejetores a vapor, com diferentes estágios de pressão.

Como já citado, os condensadores tem a função de condensar o vapor proveniente do(s) ejetores, além de lavar o gás do processo retirando as partículas suspensas. Mas a água dos condensadores pode se tornar uma fonte de gás para a bomba se a pressão de vácuo não estiver condizente com a temperatura de entrada da água. Para isso, deve ser considerada a pressão de vácuo dentro de cada condensador com a temperatura da água fornecida para a planta de desgaseificação. Lembrando que a pressão de vácuo da bomba é projetada para atingir seu mínimo na entrada do ejetor 1, ejetor mais próximo do vaso ou reator. Então, há vários estágios de pressão de vácuo diferente. Como o condensador 1 (C1) está em um estágio de vácuo mais profundo, ele está mais sujeito a se tornar uma fonte de gás do que o condensador 3, que está em um estágio de vácuo menos profundo, Figura 46.

Para verificar se a água pode se tornar uma fonte de gás não prevista para a bomba de bomba de vácuo, é necessário consultar tabelas termodinâmicas de pressão e temperatura da água.

Conforme a tabela termodinâmica para a pressão de saturação da água citada por Umrath (2007) a água na temperatura de 40°C se vaporiza a pressão de 73,78 mbar, ou seja, se a água fornecida para a planta estiver a 40°C e alimentar um condensador com pressão de vácuo de 73,78 mbar, a água irá se vaporizar, se tornando uma fonte de vapor não prevista para a bomba.

Para unidades siderúrgicas que pretendem instalar um desgaseificador e já possuem uma unidade de tratamento e refrigeração da água, a temperatura da água deve ser considerada no projeto do desgaseificador. De qualquer forma, o primeiro condensador da planta não deve ser localizado em uma região de baixa pressão, ou seja, logo após ao primeiro ejetor, pois dessa forma, se torna impraticável o fornecimento de água na temperatura adequada.

No caso em estudo, a saída do ejetor 1 está em 5 mbar, interpolando os valores na tabela de pressão de saturação do vapor, a temperatura em que a água se evapora é -2,42 °C. Devido a isso, a necessidade de deslocar o primeiro condensador no *layout* da planta, após o segundo, terceiro ou quarto ejetor, onde a pressão não é tão baixa. A consequência desse deslocamento é o aumento da vazão de vapor em cada um dos ejetores subsequentes ao ejetor 1, pois o ejetor 2 precisa de uma vazão de vapor muito maior que o ejetor 2, para arrastar ou succionar o vapor do ejetor 1, e o ejetor 3 precisa ainda mais de vapor para succionar o vapor do ejetor 1 e 2. No condensador o vapor é todo condensado e após ele os ejetores podem ter menor dimensão e vazão de vapor pois já vão receber o gás do sistema em uma menor pressão e sem carga de vapor dos ejetores anteriores.

Além da temperatura da água na entrada do condensador, a vazão de água também deve ser considerada e um balanço térmico entre a entrada de água e de vapor no condensador deve ser realizada. Mesmo que a temperatura de entrada da água no condensador esteja adequada, o volume de água pode ser insuficiente, superaquecendo a mesma, vaporizando a água e se tornando uma fonte de gás para a bomba.

A condição da água dos condensadores se tornar uma fonte de vapor para a bomba não deve ser considerada na equação geral de bombeamento da câmara de vácuo, mas é uma falha recorrente, muitas vezes devido a um desbalanceamento entre vapor e água ou devido a falha na planta de tratamento e refrigeração da água, fornecendo água a temperatura maior ao especificado no projeto.

Para a atual análise, as condições de pressão e temperatura estavam dentro do especificado para o projeto.

4.1.9 Evacuação do ar atmosférico da bomba de vácuo e do sistema de vácuo, *throughput* Q_{ar}

O ar atmosférico é uma importante fonte de gás para sistemas de vácuo composta por ejetores a vapor devido a suas grandes dimensões. Na Figura 9, tem-se a representação do sistema de vácuo, sendo que o lado direito, limitado pela válvula principal de vácuo, há a representação da bomba de vácuo, onde estão os ejetores e condensadores e lado esquerdo, está representado o restante do sistema de vácuo, composta por tubulação, coletor de pó, duto e reator.

Para as análises que serão feitas a seguir é importante conhecer o volume de ar atmosférico, tanto da bomba de vácuo, quanto do sistema completo.

Sabe-se que o volume da bomba de vácuo, entre a entrada do ejetor 1 e saída do condensador 3 é 206,05 m^3 , para encontrar esse valor foi feito um desenho em 3d da bomba de vácuo no software Solidworks, Figura 47.



Figura 47: Volume da bomba de vácuo.

O volume interno do sistema de vácuo completo é 296,39 m^3 , já considerando além da bomba de vácuo, tubulação, coletor de pó, duto e reator. Figura 48.



Como já mencionado no item 4.6 - Gases e Vapores de Processo, o vácuo estará succionando principalmente o ar atmosférico presente no sistema de vácuo até cerca de 2 minutos, pois só depois desse tempo o oxigênio, gás carbônico, dióxido de carbono e hidrogênio começam a serem succionados, momento esse que se inicia a efetiva circulação de aço entre reator e panela, devido a pressão de vácuo atingir cerca de 92 mbar. Até esse tempo de 2 min, será considerado que praticamente todo o ar atmosférico foi retirado do sistema de vácuo. É difícil precisar o quanto de ar atmosférico haverá no sistema após 2 min, mas testes de vácuo, onde a válvula principal de vácuo é fechada e a bomba é ligada, mostram que a pressão de vácuo de estabilidade é atingida em menos de 2 min, sem a presença de qualquer outra fonte de gás. Então, tanto para o volume de ar de 206,05 m^3 interno da bomba de vácuo quanto para o volume de 413,41 m^3 interno do sistema completo, são evacuados em 2 min, pois a bomba de vácuo consegue reduzir a pressão em ambos os casos no tempo definido. Para se conhecer a vazão mássica em kg/h é necessário considerar a temperatura do ar no interior do sistema de vácuo.

Entre uma batelada e outra, geralmente alguns minutos, o ar recebe calor do reator, cujo o refratário é mantido a 800°C, e de todo o restante da parede da

tubulação, condensadores e ejetores que trabalham com vapor a 220°C. E praticamente todo o sistema é envolto com uma camada de proteção térmica. Nestas condições, fazem com que o ar ganhe temperatura. Então o ar não está na temperatura ambiente. Conforme informações do fabricante, a temperatura chega a 180°C = 453,15 K e esse valor será considerado para o cálculo do *throughput*.

Fazendo uma transformação isobárica para a condição de CNTP, sendo V_{0B} o volume da bomba e V_{0S} o volume inicial do sistema de vácuo.

$$\frac{V_{0B}}{T_0} = \frac{V_1}{T_1} \rightarrow \frac{206,05}{453,15} = \frac{V_1}{273,15} \rightarrow V_1 = 124,2 \text{ m}^3 \text{ Volume de ar na bomba}$$
$$\frac{V_{0S}}{T_0} = \frac{V_2}{T_2} \rightarrow \frac{413,41}{453,15} = \frac{V_2}{273,15} \rightarrow V_2 = 249,2 \text{ m}^3 \text{ Volume de ar no sistema}$$

Conforme Çengel (2015) a densidade do ar na CNTP é 1,292 kg/m^3 . Nessa densidade, a massa de ar da bomba e do sistema são respectivamente 160,47 kg e 321,97 kg que serão succionados em 2 min. Na bomba a vazão mássica será de 80,2 kg/min = 1336,67 g/s = 4812 kg/h e no sistema será de 2683,08 kg/min = 2683,08 g/s = 9659,1kg/h. Mas não é de se esperar que a vazão mássica seja continua, ela deve ser maior nos primeiros segundos até atingir a vazão 0 em 2 minutos. Isso se deve ao número de átomos e moléculas, quanto menor, mais difícil é a sua sucção.

4.1.9.1 Evacuação do ar atmosférico da bomba de vácuo, throughput

$Q_{ar \ bomba}$

Ao acionar a bomba de vácuo isolada do sistema de vácuo, é possível construir a Tabela 20 de queda de pressão. Com o perfil de queda de pressão da bomba, é criado um perfil de queda de vazão de ar, sabendo-se a massa inicial de ar é 160,47 kg e que será zero com 2 minutos. Interpolando os demais valores, é completada a Tabela 20 com a queda de massa e vazão. É construído também o gráfico da Figura 49.

	61				
Tempo em segundos	Pressão de Vácuo em Pascal	Massa em kg	Vazão kg/s	Vazão g/s	Vazão kg/h
0	89.700	160,47	0,0000	0	0
30	54.350	96,46	2,1337	2134	7681,2
60	24.118	41,73	1,8243	1824	6567,6
90	3.820	4,98	1,2250	1225	4410
120	1.070	0	0,166	166	597,6

Tabela 20 - Equiparação e interpolação de pressão em Pascal com vazão em kg/h de ar no interior da bomba de vácuo.



Para encontrar o número de átomos por segundo (N), apenas na bomba de vácuo, a massa molar do ar na CNTP é 28,9645 g por mol.

 $1 mol = 6,02 x 10^{23} \text{ átomos} = 28,9645 g$ x átomos = 2.134 g

O número de átomos (N) é 4,435319 x 10^{25} átomos/s

 $1 mol = 6,02 x 10^{23} \text{ átomos} = 28,9645 g$ x átomos = 1.824 g

O número de átomos (N) é 3,791013 x 10^{25} átomos/s

 $1 mol = 6,02 x 10^{23} \text{ átomos} = 28,9645 g$ x átomos = 1.225 g

O número de átomos (N) é 2,546048 x 10^{25} átomos/s

$$1 mol = 6,02 x 10^{23} \text{ átomos} = 28,9645 g$$

x átomos = 166 g

O número de átomos (N) é 3,450154 x 10^{24} átomos/s

Para encontrar o *throughput* para a sucção de ar é necessário multiplicar o número de átomos por segundo (N) pela constante de Boltzmann (k) = $1,3806503 \cdot 10^{-23} (m^2 \cdot kg)/(s^2 \cdot K)$ e pela temperatura T = 453,15 K interna do reator que é a mesma do ar e construir Tabela 21 e Figura 50.

	01 (0	
Tempo em segundos	Vazão g/s	Throughput (K.N.T) (Kg.m^2)/s^3
0	0	0
30	2134	277492,04
60	1824	234451,71
90	1225	157470,89
120	166	29648

Tabela 21 - *Throughput* $(kg.m^2/s^3)$ de ar na bomba de vácuo.

Figura 50 – Representação do *throughput* $(kg.m^2/s^3)$ de ar na bomba de vácuo.



Com a Figura 50 é possível obter a Equação 61.

4.1.9.2 Evacuação do ar atmosférico do sistema de vácuo, throughput

$Q_{ar \ sistema}$

A evacuação do ar atmosférico do sistema de vácuo completo, durante o tratamento de corridas IF já foi realizado e representado na Figura 34 - Média pressão de vácuo em mbar x tempo em minutos para corridas IF. Com o perfil de queda de pressão do sistema, é criado um perfil de queda de massa e de vazão de ar, sabendose a massa inicial de ar é 321,97 kg e que será zero com 2 minutos. Interpolando os demais valores, é completada a Tabela 22 com a queda de massa e vazão. É construído também o gráfico da Figura 51.

Tempo em segundos	Pressão de Vácuo em Pascal	Massa em kg	Vazão kg/s	Vazão g/s	Vazão kg/h
0	89.700	321,97	0,0000	0	0
30	56.547	189,23	4,4247	4425	15928,8
60	35.480	104,88	2,8117	2812	10122
90	20.081	43,22	2,0553	2055	7399,2
120	9.287	0	1,440667	1441	5186,4

Tabela 22 - Equiparação e interpolação de pressão em Pascal com vazão em kg/h de ar no sistema durante tratamento de corridas IF.





Para encontrar o número de átomos por segundo (N), no sistema de vácuo, a massa molar do ar na CNTP é 28,9645 g por mol.

$$1 mol = 6,02 x 10^{23} \text{ átomos} = 28,9645 g$$

x átomos = 4.425 g

O número de átomos (N) é 9,196948 x 10^{25} átomos/s

 $1 mol = 6,02 x 10^{23} \text{ átomos} = 28,9645 g$ x átomos = 2812 g

O número de átomos (N) é 5,844479 x 10^{25} átomos/s

$$1 mol = 6,02 x 10^{23} \text{ átomos} = 28,9645 g$$

x átomos = 2055 g

O número de átomos (N) é 4,271125 $x \ 10^{25}$ átomos/s

$$1 mol = 6,02 x 10^{23} \text{ átomos} = 28,9645 g$$

x átomos = 1441 g

O número de átomos (N) é 2,994984 x 10^{25} átomos/s

Para encontrar o throughput para a sucção de ar é necessário multiplicar o número de átomos segundo (N) pela constante por de Boltzmann (k) = $1,3806503 \cdot 10^{-23} (m^2 \cdot kg) / (s^2 \cdot K)$, e pela temperatura T = 453,15 K interna do reator que é a mesma do ar e construir Tabela 23 e Figura 52.

Tabela 23 - Throughput (kg.m ² /s ²) de ar no sistema.								
Tempo em segundos	Vazão g/s	Throughput (K.N.T) (Kg.m^2)/s^3						
0	0	0						
30	4425	575399,4						
60	2812	365655						
90	2055	267219,4						
120	1441	187379						

Throughput $(l_{12}, m^2/a^3)$ do or no oistomo



Com a Figura 52 é possível a Equação 62.

$$Q_{ar\,sist.t=0}^{t=120} = (K.T.N)_{t=0}^{t=120} = (-0,0509.t^4 + 14,693.t^3 - 1438.t^2 + 50469.t - 5x10^{-7} (kg.m^2)/s^3$$
(62)

4.2 Velocidade efetiva de sucção com a bomba de vácuo isolada e sistema completo.

Até o momento foi realizado uma análise do sistema de vácuo e determinado quais fontes de gases são pertinentes e quais os valores ou equações que retratam a geração de gás, definido pelo termo $\sum_{i=1}^{n} Q_i$ na equação geral para o processo de bombeamento na câmara de vácuo, representada pela Equação 30:

$$V_{CV} \frac{dp_{cv}(t)}{dt} = -S_{ef} P_{CV}(t) + \sum_{i=1}^{n} Q_i$$
(30)

O termo S_{ef} corresponde a velocidade efetiva da bomba de vácuo que é uma característica construtiva do sistema de vácuo e diz com que velocidade a câmara de vácuo está sendo evacuada e com que pressão final a câmara de vácuo irá atingir. A S_{ef} tem relação direta com o termo S_{BV} que é a velocidade da bomba de vácuo sendo uma característica construtiva da bomba de vácuo. S_{ef} e S_{BV} estão relacionadas através da Equação 32:

$$S_{ef} = \frac{S_{BV} C_{T}}{S_{BV} + C_{T}}$$
(32)

A condutância total C_T diz o quão fácil é succionar os gases da câmara de vácuo até a bomba de vácuo. Em se tratando de tubulação, ela deve ser o mais curta e com o maior diâmetro possível para se ter o melhor ou maior C_T possível. É importante perceber pela equação 32 que a condutância tem o mesmo nível de importância que a velocidade da bomba de vácuo. Então, em um projeto de um sistema de vácuo, de nada adianta projetar uma bomba de vácuo, que é a parte mais onerosa com relação a tubulação, equipamentos e acessórios entre bomba de vácuo e câmara de vácuo, se a condutância não for suficientemente alta. Analisando a Equação 32, se a condutância tende ao infinito, Sef tende a assumir o valor de SBV e por outro lado se a condutância assume um valor muito menor que S_{BV} (C<<S_{BV}), a S_{ef} tende a assumir o valor da condutância. É importante nesse momento ressaltar uma importante constatação, é comum em plantas de desgaseificação do aço, o duto de sucção ou linha de sucção, apresentarem restrição de passagem do gás succionado, devido ao acumulo de óxido de ferro ou respingos de aço. Essa restrição na passagem reduz a condutância que por sua vez reduz a S_{ef}, aumentando o tempo para atingir a pressão de estabilidade do vácuo e muitas vezes não a atingindo, e o sistema começa a trabalhar em uma pressão de estabilidade fora do projeto. A redução da condutância muitas vezes não é associada com a perda da pressão de estabilidade de vácuo especificado no projeto por se fazer uma análise sem conhecer a importância da condutância. E de nada adianta aumentar a capacidade da bomba para conviver com restrições no duto e tubulação, pois a velocidade efetiva estará limitada ao valor da condutância quando essa estiver extremamente baixa. Novamente, é muito mais coerente, manter a linha de bombeamento limpa ou bem dimensionada do que investir em uma bomba de vácuo de maior dimensão, que além do alto investimento terá alto consumo de vapor. Tomando como exemplo, utilizando número adimensionais, se S_{BV} =100 e C=20, S_{ef} será 16,6 ao passo que se dobrar a capacidade da bomba, S_{BV} =200, o que envolve altos investimentos, S_{ef} será 18,2. Ao contrario, se condutância voltar a 100 (é comum encontrar essa redução na condutância 100 para 20), S_{ef} será 50.

Degasperi (2011) cita que a condutância pode ser encontrada através da Equação 69:

$$Q = C \,.\, (p_{1-}\,p_2) \tag{63}$$

A condutância pode ser encontrada experimentalmente com a medição instantânea da pressão na entrada da bomba de vácuo e na saída da câmara de vácuo, conhecendo-se o *throughput* Q. conforme Figura 53.





O caso em estudo não permite a instalação dos medidores de vácuo, mas como já mencionado, a condutância deve ser extremamente alta, caso contrário, a bomba de vácuo seria extremamente grande e onerosa e ainda S_{ef} será restrita a condutância. Será assumido neste trabalho que $S_{ef} = S_B$, ou seja, condutância extremamente alta

Com o intuito de encontrar a $P_{CV}(t)$ e consequentemente a S_{ef} da equação 30, é possível de se utilizar duas alternativas. A primeira delas é isolar a bomba de vácuo, do resto do sistema de vácuo, através do fechamento de uma válvula, chamada de válvula principal de vácuo e ilustrada na Figura 9. Dessa forma o termo $\sum_{i=1}^{n} Q_i$ da Equação 30, é constituído apenas como o *throughput* de ar da bomba e representada pela Equação 61 já apresentada anteriormente. Todas as demais fontes de gases estão isoladas.

$Q_{ar \ bomba} \frac{t=120}{t=0}$ =	= (K.	$(T.N)_{t=0}^{t=120}$	=	$(0,7963.t^3)$	-	212,21. <i>t</i> ²	+	14179.t	+	4320,8
(kg. <i>m</i> ²)/ <i>s</i> ³										(61)

Fechando a válvula principal de vácuo e ligando a bomba, é possível construir a Tabela 24 e gráfico da Figura 54.

Tempo em segundos	Pressão em Pascal
0	89.700
30	54.350
60	24.118
90	3.820
120	1.070
150	90
180	72
210	61
240	62
270	63
300	64
330	63

Tabela 24: Redução da pressão de vácuo	com o tempo, com a bomba de vácuo
isolada	







A Equação 65 pode ser considerada até 120 segundos, sem perda da interpretação da evolução da pressão com o tempo. Graficamente é possível perceber pela Figura 54 a estabilidade da pressão nesse tempo. Essa consideração será importante em analises posteriores.

Quando a pressão de vácuo se estabiliza, o termo $V_{CV} \frac{dp_{cv}(t)}{dt}$ da Equação 30 é igual a zero, $V_{CV} \frac{dp_{cv}(t)}{dt} = 0$.
A derivada da Equação 64, o termo $\frac{dp_{cv}(t)}{dt}$, é a seguinte equação:

$$\frac{\mathrm{d}p_{\mathrm{cv}}(t)}{\mathrm{d}t} = 3574,764e^{-0,036.t} \tag{65}$$

Voltando a Equação 30, $V_{CV} \frac{dp_{cv}(t)}{dt} = -S_{ef} P_{CV}(t) + \sum_{i=1}^{n} Q_i$, e conhecendo-se os termos $P_{CV}(t)$; $\frac{dp_{cv}(t)}{dt} \in \sum_{i=1}^{n} Q_i$, é possível reorganizar e isolar o termo S_{ef} . Dessa forma:

$$S_{ef} = \frac{1}{P_{CV}(t)} \cdot \left(-V_{CV} \frac{dp_{cv}(t)}{dt} + \sum_{i=1}^{n} Q_i \right)$$
(66)

tem-se definidos todos os termos, isolando a bomba de vácuo:

- a) Vcv, que representa o volume da câmara de vácuo na equação original. Como foi feito o isolamento da bomba de vácuo do restante do sistema, o volume considerado deve ser apenas da bomba de vácuo. Em muitos sistemas de vácuo, inclusive para a desgaseificação do aço, se a bomba for de anel líquido, seu volume interno é insignificante com relação ao volume da câmara e pode ser desconsiderado. No caso em especifico o volume interno é o volume da bomba de vácuo, igual a 189,24 m^3 e deve ser representado pelo termo Vbv;
- b) $\frac{dp_{cv}(t)}{dt}$, que é a derivada da queda de pressão com o tempo na bomba de vácuo e deve ser escrito como $\frac{dp_{bv}(t)}{dt}$
- c) P_{CV}(t), que representa a queda de pressão com o tempo na bomba de vácuo e deve ser escrito como P_{BV}(t)
- d) ∑_{i=1}ⁿ Q_i que representa o *throughput* apenas do ar atmosférico presente na bomba de vácuo e deve ser escrito como:

 $Q_{ar \ bomba} t_{t=0}^{t=120} = (K.T.N)_{t=0}^{t=120} = (0,7963.t^3 - 212,21.t^2 + 14179.t + 4320,8)$ $(kg.m^2)/s^3$ (61)

e) Sef deve ser escrito como Sbv, que é velocidade da bomba de vácuo.

Reescrevendo novamente a Equação 66, considerando apenas a bomba de vácuo, tem-se a Equação 67.

$$S_{bv} = \left(\frac{1}{P_{BV}(t)} \cdot (-189,24, \frac{dp_{bv}(t)}{dt} + Q_{ar\,da\,bomba})\right)_{t=0}^{t=120}$$
(67)

Com a condição inicial da pressão sendo a pressão atmosférica, $p_0 = 89.700 Pascal$, $p_{cv}(t = 0) = 89.700 e$ supondo que $S_{ef} = S_{BV}$.

Será possível em trabalhos futuros, utilizar ferramentas de simulação para o processo de bombeamento com a bomba de vácuo isolada.

A segunda forma de encontrar a $P_{CV}(t)$ e consequentemente a S_{ef} da Equação 30, é encontrar a queda de pressão com o tempo considerando a presença de todos os gases, ou seja, conhecer a $P_{CV}(t)$ durante o tratamento de uma corrida.

O gráfico mostrando a queda de pressão já foi vista na Figura 34 e na Figura 55 é acrescentado a linha de tendência e a equação polinomial que a representa.



Figura 55: Redução da pressão de vácuo com o tempo com o sistema completo, média durante tratamento de corridas IF.

A Equação 68 representa a queda de pressão em mbar no tempo até 10 min. é:

 $P_{CV}(t) = (-12,466.t^5 + 400,8.t^4 - 4925,6.t^3 + 28765.t^2 - 80083.t + 89988) \quad \substack{t=10\\t=0}$ (68)

A derivada da Equação 68, o termo $\frac{dp_{cv}(t)}{dt}$, é a Equação 69:

$$\frac{\mathrm{d}p_{\mathrm{cv}}(t)}{\mathrm{d}t} = (-62,34,t^4 + 1603,2,t^3 - 14776,8,t^2 + 57530,t - 80033)_{t=0}^{t=10}$$
(69)

Após 10 minutos a pressão de vácuo se mantem em 15,8 mbar ou 1580 Pascal. Nesse momento o termo $V_{CV} \frac{dp_{cv}(t)}{dt}$ da equação 30 é igual a zero, $V_{CV} \frac{dp_{cv}(t)}{dt} = 0$ Reescrevendo a Equação 66 que possui o termo S_{ef} já isolado e que deriva da equação geral para o processo de bombeamento na câmara de vácuo, Equação 30:

$$S_{ef} = \frac{1}{P_{CV}(t)} \cdot \left(-V_{CV} \frac{dp_{cv}(t)}{dt} + \sum_{i=1}^{n} Q_i \right)$$
(66)

tem-se definidos todos os termos, considerando o sistema de vácuo completo:

- a) Vcv, que representa o volume da câmara de vácuo. Para o sistema de vácuo constituído por ejetores a vapor, tanto o volume câmara de vácuo, linha de bombeamento e bomba de vácuo são considerados como volume da câmara de vácuo, devido a suas grandes dimensões. Dessa forma, o termo Vcv deve ser escrito como Vsv, volume do sistema de vácuo. Em muitos sistemas de vácuo, inclusive para a desgaseificação do aço, se a bomba for de anel líquido, seu volume interno é insignificante com relação ao volume da câmara e pode ser desconsiderado. No caso em especifico o volume interno Vsv é 296,39 m³;
- b) $\frac{dp_{cv}(t)}{dt}$, que é a derivada da queda de pressão com o tempo de todo o sistema e deve ser escrito como $\left(\frac{dp_{sv}(t)}{dt}\right)_{t=0}^{t=600}$
- c) P_{CV}(t), que representa a queda de pressão com o tempo de todo o sistema e deve ser escrito como P_{SV}(t)
- d) ∑_{i=1}ⁿ Q_i que representa o *throughput* todas as fontes de gases identificadas no sistema:
 - vaporização do ferro;
 - gases do processo (oxigênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogênio);
 - injeção controlada de nitrogênio e argônio.
 - ar atmosférico presente no interior do sistema.
- e) Sef deve ser escrito como Ssv, que é velocidade do sistema de vácuo.

Reescrevendo novamente a Equação 66, considerando o sistema de vácuo, temse a Equação 70:

$$S_{sv} = \frac{1}{P_{sv}(t)} \cdot (-296,39.\frac{dp_{sv}(t)}{dt} + \sum_{i=1}^{n} Q_{i(sv)})$$
(70)

Da mesma forma que a Equação 67, a Equação 70 possui a condição inicial da pressão sendo a pressão atmosférica, $p_0 = 89.700 Pascal$, $p_{cv}(t = 0) = 89.700$.

Será possível em trabalhos futuros, utilizar ferramentas de simulação para o processo de bombeamento com o sistema de vácuo completo.

O termo S_{bv} da Equação 67, representa a velocidade da bomba de vácuo considerando apenas o *throughput* do ar do interior da bomba, enquanto o termo S_{sv} da Equação 70 representa a velocidade efetiva de bombeamento considerando todos os *throughput* analisados nessa dissertação.

4.3 Equações que representam o processo de desgaseificação do aço IF.

Todas as equações e valores que representam o processo são apresentadas de forma a ter uma visão ampla dos resultados:

Equação 30 que representa o processo:

$$V_{CV} \frac{dp_{cv}(t)}{dt} = -S_{ef} P_{CV}(t) + \sum_{i=1}^{n} Q_i$$
(30)

Isolando o termo referente a velocidade efetiva de bombeamento, S_{ef} , que é a única incógnita, e inserindo o volume do sistema, 296,39 m^3 ,que é constante, de temse a Equação 66:

$$S_{ef} = \frac{1}{P_{cv}(t)} \cdot (-296,39 \cdot \frac{dp_{cv}(t)}{dt} + \sum_{i=1}^{n} Q_i)$$
(66)

O termo $P_{CV}(t)$ representa a queda de pressão de vácuo do sistema até 10 minutos, após esse tempo a pressão é constante, onde "t" em minutos e "p" em Pascal:

$$P_{CV}(t) = (-12,466.t^{5} + 400,8.t^{4} - 4925,6.t^{3} + 28765.t^{2} - 80083.t + 89988) \quad \substack{t=10\\t=0}$$
(68)

A derivada da Equação 68, o termo $\frac{dp_{cv}(t)}{dt}$, contida na Equação 66 é a Equação 69:

$$\frac{\mathrm{d}p_{\mathrm{cv}}(t)}{\mathrm{d}t} = (-62,34,t^4 + 1603,2,t^3 - 14776,8,t^2 + 57530,t - 80033)_{t=0}^{t=10}$$
(69)

O termo $\sum_{i=1}^{n} Q_i$ da Equação 66 representa o *throughput* de todas as fontes de gases identificadas no sistema e são:

- vaporização do ferro, do aço líquido, constante do início ao fim do processo:

$$Q_{vap} = J_{vap} k.T = 5952,44 \left(\frac{kg \cdot m^2}{s^3}\right)$$
 (42)

- oxigênio retirado do aço líquido entre 2 e 9 minutos:

$$Q_{02_{t=2}}^{t=9}:(K.T.N)_{t=2}^{t=9} = -850,77.t^2 + 9116,5.t - 10614)_{t=2}^{t=9} \left(\frac{\text{kg. m}^2}{\text{s}^3}\right)$$
(55)

- monóxido de carbono, CO, retirado do aço líquido entre 6 e 9 minutos:

$$\boldsymbol{Q_{co}}_{t=6}^{t=9} (K.T.N)_{t=6}^{t=9} = 2753, 8.t - 16253)_{t=6}^{t=9} \left(\frac{\text{kg. m}^2}{\text{s}^3}\right)$$
(56)

- dióxido de carbono, CO₂, retirado do aço líquido entre 2 e 9 minutos:

$$\boldsymbol{Q}_{\boldsymbol{\ell}\boldsymbol{0}\boldsymbol{2}}_{\boldsymbol{t}=\boldsymbol{2}}^{\boldsymbol{t}=\boldsymbol{9}:} (K.T.N)_{\boldsymbol{t}=2}^{\boldsymbol{t}=\boldsymbol{9}:} = (-579,68.t^2 + 6432,9.t - 9797,4)_{\boldsymbol{t}=2}^{\boldsymbol{t}=\boldsymbol{9}:} \left(\frac{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^3}\right)$$
(57)

- hidrogênio, H₂, retirado do aço líquido entre 2 e 27 minutos:

$$\boldsymbol{Q}_{H2} \overset{t=27}{\underset{t=2}{\overset{t=27}{\overset{t}2}{\overset{t=27}{\overset{t=27}{\overset{t=27}{\overset{t}2}{\overset{t}1}{\overset{t}1}{\overset{t}2}{\overset{t}2}{1$$

- hidrogênio, H_2 , retirado do aço líquido entre 27 e 37 minutos:

$$\boldsymbol{Q}_{H2} \underset{t=27}{\overset{t=37}{\underset{t=27}{\times}}} (K.T.N) \underset{t=27}{\overset{t=37}{\underset{t=27}{\times}}} = (-28,842.t + 2509,3) \underset{t=27}{\overset{t=37}{\underset{t=27}{\times}}} (\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3})$$
(58b)

- argônio, Ar, injetado na perna de subida e succionado do aço líquido e constante do início ao fim do processo:

$$Q_{ICA} = K.T.N = 3.337,35 \text{ kg. m}^2/\text{s}^3$$
 (59)

- nitrogênio, N^2 , injetado no sistema para proteger componentes e forçar a retirada de pó de ferro no coletor e constante do início ao fim do processo:

$$Q_{ICN} = K.T.N = 6.664,0255 \text{ kg. m}^2/\text{s}^3$$
 (60)

- ar atmosférico, presente no início do processo e succionado do sistema entre 0 a 120 segundos:

 $Q_{ar\,sistema} \mathop{t=120}_{t=0} = (K.T.N)_{t=0}^{t=120} = (-0.0509.t^4 + 14.693.t^3 - 1438.t^2 + 50469.t - 5x10^{-7} (\text{kg}.m^2)/s^3$ (62)

4.4 Velocidade Efetiva de Bombeamento

A velocidade efetiva de bombeamento S_{ef}, termo isolado na Equação 66, representa a capacidade de sucção do sistema de vácuo em succionar todos os gases durante o processo.

$$S_{ef} = \frac{1}{P_{CV}(t)} \cdot (-296,39, \frac{dp_{cv}(t)}{dt} + \sum_{i=1}^{n} Q_i)$$
(66)

Diferente da velocidade de bombeamento S_{BV} , que representa apenas a velocidade de bombeamento da bomba de vácuo (ejetores e condensadores), sendo mais interessante aos fabricantes da bomba de vácuo, a S_{ef} considera também a

condutância do sistema, ou o quão fácil é succionar os gases do reator até a bomba de vácuo, considerando a condutância da tubulação, filtros, trocadores de calor, válvulas e sujeiras no sistema, sendo a S_{ef} mais importante para o processo. A relação entre S_{ef} e S_{BV} está na Equação 32. Nessa dissertação, foi considerada a condutância máxima, ou seja, S_{ef} com valor muito próximo ou praticamente igual da S_{BV} .

$$S_{ef} = \frac{S_{BV} C_T}{S_{BV} + C_T}$$
(32)

Entender o perfil da S_{ef} durante a variação do tempo e consequentemente durante a variação da pressão é importante para atuar no processo e ou equipamentos visando restabelecer o seu perfil. Durante o projeto do sistema a S_{ef} deve possuir o maior valor possível no menor tempo. Conhecer o gráfico da S_{ef} também ajuda a identificar em que momento o sistema possui alguma infiltração citada no capítulo 4.1.1, obstrução pela vaporização do ferro identificado no capítulo 4.1.2, excesso ou redução na geração de gases citadas no capítulos 4.1.6, excesso ou redução na injeção controlada de gases citadas no capítulo 4.1.7, falha de equipamentos ou fornecimento de insumo como vapor e água nos condensadores, identificado no capítulo 4.1.8 ou alguma

Tempo (min.)	P (Pascal)	dp _{tv} (t) dt (Pascal)	$\frac{\frac{dp_{tv}(t)}{dt}}{\left(\frac{kg.m^2}{a^3}\right)}$	$Q_{02} t=9 \atop t=2$ $\left(\frac{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^3}\right)$	$Q_{co} t=9 \atop t=6 \ (rac{\mathrm{kg.m}^2}{\mathrm{s}^3})$	$Q_{CO2} \underset{t=2}{\overset{t=9}{\overset{t=2}{\overset{t}}{\overset{t}}{\overset{t}}{\overset{t}}{\overset{t}}}{\overset{t}}}}}}}}$	$Q_{H2}_{t=2}^{t=27}$ $\left(\frac{\mathrm{kg.m^{2}}}{\mathrm{s^{3}}}\right)$	Q_{ICA} $(rac{\mathrm{kg.m^{2}}}{\mathrm{s}^{2}})$	Q_{ICN} $(rac{\mathrm{kg.m^2}}{\mathrm{s^3}})$	$\begin{array}{c} t=120\\ ar sist_{t=0}\\ (\frac{kg \cdot m^2}{s^2})\end{array}$	$S_{ef} \atop (\frac{kg \cdot m^2}{s^3})$
0	89988	-80033	5952,44	0	0	0	0	3.337,35	6.664,03	0	263,78
0.5	56546,71	-54765,69	5952,44	0	0	0	0	3.337,35	6.664,03	575352	297,51
1	34132,73	-35738,94	5952,44	0	0	0	0	3.337,35	6.664,03	365364	321,51
1.5	19895,24	-21890,6	5952,44	0	0	0	0	3.337,35	6.664,03	266058	340,29
2	11491,09	-12252,04	5952,44	4215,92	0	749,68	6236,3	3.337,35	6.664,03	0	318,38
3	5068,36	-2197,34	5952,44	9078,57	0	4284,18	1256,93	3.337,35	6.664,03	0	134,53
4	4497,22	303,96	5952,44	12239,68	0	6659,32	2312,4	3.337,35	6.664,03	0	-11,77
5	4541,76	-365,5	5952,44	13699,25	0	7875,1	3277,66	3.337,35	6.664,03	0	32,84
6	3601,58	-1319,24	5952,44	13457,28	269,8	7931,52	4152,67	3.337,35	6.664,03	0	120,16
7	2215,94	-1166,94	5952,44	11513,77	3023,6	6828,58	4937,45	3.337,35	6.664,03	0	175,15
8	1567,71	-14,44	5952,44	7868,72	5777,4	4566,28	5631,99	3.337,35	6.664,03	0	28,12
9	1987,57	536,26	5952,44	2522,13	8531,2	1144,62	6236,3	3.337,35	6.664,03	0	-62,67
10	1458	-2613	5952,44	0	0	0	6750,38	3.337,35	6.664,03	0	546,76
15	1458	-2613	5952,44	0	0	0	7967,26	3.337,35	6.664,03	0	547,59
20	1458	-2613	5952,44	0	0	0	6928,29	3.337,35	6.664,03	0	546,88
25	1458	-2613	5952,44	0	0	0	3633,46	3.337,35	6.664,03	0	544,62
30	1458	-2613	5952,44	0	0	0	1644,04	3.337,35	6.664,03	0	543,25
37	1458	-2613	5952,44	0	0	0	1442,15	3.337,35	6.664,03	0	543,12

Tabela 25: Valores encontrados através das equações definidas para pressão, *throughput* e velocidade efetiva de bombeamento com erro.

A Tabela 25 resume todos os valores encontrados a partir das equações definidas e por fim apresenta a variação da S_{ef} no tempo, que tem também relação direta com a variação de pressão.

É possível perceber que a S_{ef} possui valores negativos no tempo 4 e 9 minutos que teoricamente é impossível. Isso é devido a imprecisão da Equação 68 que representa a queda de pressão. As derivadas das pressões nos respectivos tempos apresentam valores positivos, deixando claro o erro. Então os valores de pressão no tempo 4 e 9 minutos foram excluídos e inseridos novos valores realizando interpolação, chegando-se assim na Tabela 26 e Figuras 56 e 57.

Tempo	Р	$\frac{dp_{tv}(t)}{dt}$	$\frac{dp_{tv}(t)}{dt}$	$Q_{O2} t=9 t=2$	$Q_{CO}_{t=6}^{t=9}$	$Q_{CO2} \stackrel{t=9}{_{t=2}}$:	$Q_{H2}_{t=2}^{t=27}$	Q _{ICA}	Q _{7CN}	Q _{ar sist-t=0} t=120	$\mathbb{S}_{\texttt{ef}}$
(min.)	(Pascal)	(Pascal)	$(\frac{kg.m^2}{s^3})$	$(\frac{kg.m^2}{s^3})$	$(\frac{kg.m^2}{s^3})$	$(\frac{kg_{+}m^2}{s^3})$	$(\frac{kg,m^2}{s^3})$	$(\frac{kg,m^2}{s^3})$	$(\frac{kg,m^2}{s^3})$	$(\frac{kg.m^2}{s^3})$	$(\frac{kg.m^2}{s^3})$
0	89988	-80033	5952,44	0	0	0	0	3.337,35	6.664,03	0	263,78
0.5	56546,71	-54765,69	5952,44	0	0	0	0	3.337,35	6.664,03	575352	297,51
1	34132,73	-35738,94	5952,44	0	0	0	0	3.337,35	6.664,03	365364	321,51
1.5	19895,24	-21890,6	5952,44	0	0	0	0	3.337,35	6.664,03	266058	340,29
2	11491,09	-12252,04	5952,44	4215,92	0	749,68	6236,3	3.337,35	6.664,03	0	318,38
3	5068,36	-2197,34	5952,44	9078,57	0	4284,18	1256,93	3.337,35	6.664,03	0	134,53
4	4805,06	-1281,42	5952,44	12239,68	0	6659,32	2312,4	3.337,35	6.664,03	0	86,78
5	4541,76	-365,5	5952,44	13699,25	0	7875,1	3277,66	3.337,35	6.664,03	0	32,84
6	3601,58	-1319,24	5952,44	13457,28	269,8	7931,52	4152,67	3.337,35	6.664,03	0	120,16
7	2215,94	-1166,94	5952,44	11513,77	3023,6	6828,58	4937,45	3.337,35	6.664,03	0	175,15
8	1567,71	-14,44	5952,44	7868,72	5777,4	4566,28	5631,99	3.337,35	6.664,03	0	28,12
9	1512,85	-1313,72	5952,44	2522,13	8531,2	1144,62	6236,3	3.337,35	6.664,03	0	280,11
10	1458	-2613	5952,44	0	0	0	6750,38	3.337,35	6.664,03	0	546,76
15	1458	-2613	5952,44	0	0	0	7967,26	3.337,35	6.664,03	0	547,59
20	1458	-2613	5952,44	0	0	0	6928,29	3.337,35	6.664,03	0	546,88
25	1458	-2613	5952,44	0	0	0	3633,46	3.337,35	6.664,03	0	544,62
30	1458	-2613	5952,44	0	0	0	1644,04	3.337,35	6.664,03	0	543,25
37	1458	-2613	5952,44	0	0	0	1442,15	3.337,35	6.664,03	0	543,12

Tabela 26: Valores encontrados através das equações definidas para pressão, throughput e velocidade efetiva de bombeamento.

É observado que após 10 minutos a velocidade efetiva de bombeamento é praticamente constante e que até 10 min pode ser representado pela Equação 71 e Figuras 56 e 57..

$$S_{ef} = 0,2569.t^{5} - 6,4739.t^{4} + 59,926.t^{3} - 234,67.t^{2} + 291,16.t + 239,73$$
(71)



Figura 56: Velocidade Efetiva de Bombeamento S_{ef} em $(\frac{kg \cdot m^2}{s^3})$ de 0 a 37 minutos.

Figura 57: Velocidade Efetiva de BombeamentoS_{ef} em $(\frac{\text{kg. m}^2}{s^3})$ de 0 a 10 minutos.



Os gráficos das Figura 56 e 57 que representa a velocidade efetiva de bombeamento é a combinação de todos os fatores que influenciam o processo. Até 2 minutos tem-se um grande *throughput* de ar sendo succionado. De 2 a 9 minutos temse o *throughput* de praticamente todos os gases do processo sendo succionados, são eles o monóxido de carbono, dióxido de carbono e oxigênio. Após 9 minutos até o final, a desgaseificação é somente do hidrogênio, juntos com os demais gases que estão sendo injetados de forma constante, o argônio e nitrogênio.

5 Conclusões

Foi possível analisar, calcular e modelar o sistema de formação de vácuo constituído por ejetores a vapor para a desgaseificação do aço IF *intersticial free* ou livre de interstícios, um dos mais exigentes quanto a desgaseificação, com a utilização da equação geral para o processo de bombeamento, calculando os valores de vazão mássica e gerando equações específicas para o *throughput* e velocidade efetiva de bombeamento. As fontes de gases relevantes para a bomba de vácuo, foram:

- a) vaporização, que tem a sua origem na pressão de vapor do ferro, área exposta do aço líquido ao vácuo e temperatura. Sendo uma fonte de oxido de ferro, que pode obstruir a linha de sucção e reduzir a condutância e consequentemente a velocidade efetiva de bombeamento e pressão de vácuo;
- b) gases do processo que são o oxigênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrogênio. Sendo uma fonte de maior destaque a partir do momento em que o aço líquido começa a circular entre reator e panela, promovendo o encontro entre o oxigênio e carbono, importante para a descarburação do aço, principalmente o monóxido de carbono que se utiliza de um átomo de oxigênio para retirar um átomo de carbono e possui suas reações químicas aceleradas no momento em que há a redução das reações químicas do dióxido de carbono. Atenção especial a remoção do hidrogênio, que proporciona maior qualidade ao aço, reduzindo os interstícios, principal função do desgaseificador. A remoção do hidrogênio acontece durante todo o tratamento, mas é dificultada devido ao seu já baixo teor em PPM no início do processo.
- c) injeção controlada de nitrogênio, promovendo a proteção interna de equipamentos e contribuindo para a retirada do vapor de ferro;
- d) injeção controlada de argônio, necessária para que ocorra a circulação do aço entre reator e panela;
- e) ar atmosférico, responsável pela inercia na remoção dos demais gases no início do processo e sempre um problema para sistemas a vácuo.

As fontes de gás analisadas e definidas como não relevantes para o processo e sistema em analise foram:

 a) sublimação, os elementos de liga que sublimam possuem massa muito pequena quando comparado a massa do aço e quando adicionados reagem rapidamente fazendo parte da composição química do aço, não havendo tempo hábil para a conversão em gás;

- b) permeação, pois, conforme literatura, esse fenômeno ocorre a partir da pressão de vácuo de 10⁻⁷mbar, diferente de 10⁻¹mbar para desgaseificação do aço.
- c) sorção, que, também conforme literatura, ocorre para sistemas em vácuo a partir de 10⁻³mbar e, possivelmente, será um problema para sistemas futuros que pretendem desgaseificar o aço a esse nível de pressão.
- d) gás do processo, em particular o nitrogênio, que não é relevante para o aço IF devido a oxidação do aço e não adição de ligas e carburantes no convertedor, mas deve ser considerado para outros tipos de aço.

Entre as fontes de gás que não devem ser consideradas na equação geral para o processo de bombeamento, pois são falhas do sistema, mas devem ser consideradas na análise do processo, uma vez que podem prejudicar a velocidade para atingir o vácuo e sua pressão de estabilidade, bem como interferir nos resultados anteriores, se destacam:

- a) água dos condensadores como fonte de gás, caso a sua temperatura esteja acima da temperatura de vaporização conforme tabela termodinâmica.
- b) infiltração proveniente do meio externo, geralmente ar atmosférico e injeção controlada de gás em uma vazão maior do que necessária;
- c) infiltração proveniente do meio interno, gerando recirculação de gases.

Definido todos os termos da equação fundamental para o processo de bombeamento a vácuo, com destaque ao *throughput* e por fim a velocidade efetiva de bombeamento é possível a sua utilização em ferramentas de simulação, uma vez que todas as considerações foram feitas baseadas em análise profunda do processo associado com conhecimento termodinâmico, físico e matemático.

6 Sugestões para Trabalhos Futuros.

Simular algumas alterações no sistema e até mesmo falhas, como a injeção reduzida de gases e verificar o comportamento da velocidade efetiva de bombeamento e propor melhorias no processo ou demostrar padrões de falha que poderão auxiliar o processo na sua identificação.

Realizar experimentos práticos, com a tubulação já obstruída com particulado de ferro advindo da vaporização e investigar a relevância da condutância na velocidade efetiva de bombeamento. Sendo possível comparar os resultados e afirmar o nível de obstrução máxima sem prejudicar o tempo de tratamento.

Uma vez que o *throughput* de hidrogênio dita o tempo de tratamento do aço IF, realizar experimentos com agentes químicos e ou aumento da quantidade de oxigênio inicial no aço líquido, visando a retirada do hidrogênio, reduzindo o tempo de tratamento. Quando os gases oxigênio, monóxido de carbono e dióxido de carbono são succionadas, devido a dimensão maior de suas moléculas, elas acabam arrastando as moléculas de hidrogênio para a superfície para serem succionadas.

Referências

- ABM. **Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração.** Disponível em: br/>com.br/>br/>com.br/. Acesso em: 05.fev.2017.
- AÇOS & LIGAS. Aço: Processos de Fabricação Processo Siderúrgico. Disponível em: http://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=232>. Acesso em: 15 jan. 2017.
- AGUIAR, F.N.; Rosário R.S.; Tenório J.A.S.; Oliveira J.R. **Utilização de caulim e** resíduo de mármore na dessulfuração de ferro-gusa, Revista tecnologia em metalurgia, materiais e mineração, São Paulo, 2011.
- BLAZEK, R.; **VysokaPec**, Slovakia. Disponível em: https://commons.wikimedia. org/wiki/File:VysokaPec.jpg>. Acesso em: 15 dez. 2016.
- BRAGA, A.P.; SAMPAIO P.T.; FUGII T. Modelagem térmica de um forno panela utilizando redes neurais artificiais, 2006.
- BOBINAS E CHAPAS A QUENTE GERDAU. Disponível em: https://www.gerdau.com/br/pt/produtos/chapa-grossa-gerdau#ad-image-0>. Acesso em 20 jan. 2017
- Castro, R.G.M. Análise da Fluência e previsão de vida útil dos aços ASTM A387, ASTM A516 E DIN 16MO3 aplicados na fabricação de conversores-LD, Dissertação de mestrado em engenharia mecânica, UFSJ, São João Del-Rei, 2013.
- ÇENGEL, A.Y.; CIMBALA, M.J. Mecânica dos Fluidos Fundamentos e Aplicações. 3ª ed. São Paulo: AMGH, 2015.
- CHAPAS GROSSAS GERDAU. Disponível em: https://www.gerdau.com/br/pt/produtos/chapa-grossa-gerdau#ad-image-0>. Acesso em 20 jan. 2017
- CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos, 2012.
- COLLE, S. Lições de termodinâmica clássica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
- COSTA, L.C. Parâmetros de controle do processo de coqueificação das baterias de fornos de coque da COSIPA, Dissertação de mestrado em engenharia elétrica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.
- DEGASPERI, F.T. Contribuições para análise, cálculo e modelagem de sistema de vácuo, Tese de doutorado em engenharia elétrica, FEEC Unicamp, Campinas, 2006.
- DEGASPERI, F.T. Equação fundamental do processo de bombeamento em vácuo. Boletim Técnico da FATEC-SP — BT/41. Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC-SP, São Paulo, 2016.

- DEGASPERI, F.T. Modelagem, cálculo e medição de velocidade efetiva de bombeamento. Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC-SP, São Paulo, 2011.
- HEAT EXCHANGE INSTITUTE (HEI). **Standards for Steam Jet Vacuum Systems**. 7^a ed. Cleveland Ohio. 2012.
- IBS, Instituto Brasileiro de Siderurgia, Siderurgia Brasileira Relatório de Sustentabilidade, 2007.
- INFOPEDIA, **Dicionário Porto Editora**. Disponivel em: https://www.infopedia.pt/\$nitreto> Acesso em: 13 set. 2017.
- INSTITUTO ALEMÃO PARA NORMATIZAÇÃO. **DIN 28427**, Vacuum technology acceptance specifications for diffusions pumps and vapor jet vacuum pumps for vapour pressures of the pump fluid .< 1 mbar, 1983, Alemanha.
- JET VACUUM SYSTEMS, **GEA Process Engineering GEA Wiegand GmbH**. Ettlingen, Germany, 2010.
- KLM Technology Group. Process Design of Vacuum Equipment (Vacuum Pumps and Steam Jet – Ejectors). Malaysia. 2011.
- LEMOS, L.R. Maximização da eficiência de dessulfuração do gusa líquido num reator Kanbara, Dissertação de mestrado em engenharia de materiais, UFOP, Ouro Preto, 2011.
- FERNANDES, E.Z. Caracterização física, química, mineralógica e metalúrgica dos produtos granulados de minério de ferro, Tese de doutorado em engenharia metalúrgica e de minas, UFMG, Belo Horizonte, 2008.
- FERRITE. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Ferrite>. Acesso em: 25 mar. 2017
- FIETO, B.M. Evolução da microestrutura e das propriedades mecânicas de aços IF tratados termicamente, Projeto de graduação em engenharia de materiais, UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.
- FIO-MÁQUINA AÇO CONTRUÇÃO MECÂNICA, Disponível em: https://www.gerdau.com/pt/produtos/fio-maquina-aco-construcaomecanica#ad-image-0>. Acesso em: 20 jan. 2017
- HATA, D.V. Introduction to vacuum technology, New Jersey Columbus Ohio: Pearson Prentice Hall, 2008. 187 p. 13:978-0-13-045018-0
- JOUSTEN, K. Handbook of vacuum technology. 2^a ed. Weinheim Germany: Wiley-VCH, 2016. 1050 p. 978-3-527-41338-6

- KIRMSE, O.J. Estudo do Comportamento Metalúrgico do "Reator Kambara" através de modelagem física. Dissertação de mestrado em Engenharia de Materiais, UFOP, Ouro Preto, 2006.
- LAFFERTY, J.M. Foundations of Vacuum Science and Technology. New York: John Wiley & Sons, 1988. p.1121. 9780471175933
- Lima, R.C.F. Avaliação de modelos de turbulência na previsão do desempenho de ejetores, Dissertação de mestrado em engenharia mecânica, FEUP, Porto – Portugal, 2013.
- LEMOS, L.R. Maximização da eficiência de dessulfuração do gusa líquido num reator Kanbara, Dissertação de mestrado em engenharia de materiais, UFOP, Ouro Preto, 2011.
- MARTINS, A.A.; Ribeiro B.D.; Sampaio R.S.; Castro L.F.A. Tratamento sob Vácuo In: RIBEIRO, D.B. **Refino Secundário dos Aços**, Rio de Janeiro, ABM, 2004.
- MARTINS, J. **Procedimentos para avaliação de aglomerantes na pelotização**, XXII Encontro nacional de tratamento de minérios e metalurgia extrativa ENTMME, Ouro Preto, 2007.
- MARTINI, M. Avaliação do potencial de expansão de agregados siderúrgicos através da difratometria de raio-x e método de Rietveld, Dissertação de mestrado em engenharia de materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- METEOROLOGIA, geral e agrícola. Disponível em: <https://pt.scribd.com/doc/ 59207152/Calculo-Pressao-Atmosferica-x-Altitude>. Acesso em: 15 jan. 2017
- METSO, Mineração, pelotização de minério de ferro. Disponível em: http://www.metso.com.br/produtos/pelotizacao-de-minerio-de-ferro/. Acesso em: 21 jan. 2017
- NEVES, L. Avaliação dos efeitos da injeção de gás na câmara de vácuo no modelo físico de um desgaseificador RH. Dissertação em engenharia metalúrgica e de minas, UFMG, Belo Horizonte, 2008.
- NOÇÕES DE SIDERUGIA Materiais metálicos, processos de fabricação de ligas ferrosas. Disponível em: https://pt.slideshare.net/alinesouzads/noes-desiderurgia Acesso em 15 abr. 2017.
- ÜCER, K.B. Vacuum Evaporation, Wake Forest University, Winston-Salem Carolina do Norte Estados Unidos, disponível em: http://users.wfu.edu/ucerkb/Nan242/L06-Vacuum_Evaporation.pdf> Acesso em: 01 abr. 2017
- PFEIFFER, **The vacuum technology book**, volume II, part II. Mudersbach Germany: Msp druck und medien gmbh, 2013.

- RIBEIRO, D.B.; MARTINS, A.A.; Sampaio R.S.; Castro L.F.A. **Refino Secundário dos Aços**, Associação Brasileira de Metalurgia, Belo Horizonte, 1996.
- RIBEIRO, D.B.; MARTINS, A.A.; Sampaio R.S.; Castro L.F.A. **Refino Secundário dos Aços**, Associação Brasileira de Metalurgia, Belo Horizonte, 2004.
- ROTH, A. Vacuum Technology. 3^a ed. Amsterdam Netherlands: Elsevier Science B.V, 1988. 554 p. 0-444-88010-0
- RODRIGUES, P.E.; LOBÃO D.; PONTES, J.R.M; CARDOSO P.A. Aproveitamento das características físicas dos gases de alto-forno para geração de energia elétrica de uma siderúrgica: o caso da companhia siderúrgica de tubarão (CST), XXIII Encontro nacional de engenharia de produção ENEGEP, Ouro Preto, 2003.
- SAFARIAN, J.; ENGH A. T. Vacuum Evaporation of Pure Metals. Department of Materials Science and Engineering, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Journal Metallurgical and Materials Transactions A., vol. 44a, Trondheim - Norway: 2013.
- SCHMID, M. Vapor Pressure Calculator, Universidade de Tecnologia de Viena -Departamento de Física Aplicada - Física de superfície. Disponível em: https://www.iap.tuwien.ac.at/www/surface/vapor_pressure Acesso em: 01 abr. 2017.
- SHEID, A. Curso Básico de Aços, UFPR, Curitiba, 2010, 100 p.
- SICORSKI, R. S. Modelagem numérica aplicada a fenômenos de escoamento e mistura em modelos físicos de panelas de aciaria. Dissertação de mestrado em engenharia de minas, metalurgia e de materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- SIDERURGIA. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Siderurgia. Acesso em: 15 abr. 2017
- SILVA, M.J.A. Variação da taxa de descarburação para vários padrões de injeção de argônio na perna de subida do desgaseificador a vácuo RH, Dissertação em engenharia metalúrgica e de minas, UFMG, 2010.
- SONNTAG, R.E.; BORGNAKKE C.; VAN WYLEN, G.J. Fundamentos da termodinâmica. 5ª ed. Edgard Blucher, 1997.
- SONNTAG, R.E.; BORGNAKKE C.; Fundamentos da termodinâmica. 7ª ed. Edgard Blucher, 2009.
- SORÇÃO, Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Sor%C3%A7%C3%A3o Acesso em: 08 abr. 2017.

- STEEL STATISTICAL YEARBOOK. Disponível em: < https://www.worldsteel.org/ en/dam/jcr:37ad1117-fefc-4df3-b84f-6295478ae460/Steel+Statistical+ Yearbook+2016.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2017
- STEMPNIAK, R. A. A ciência e a tecnologia do vácuo: resumo histórico e algumas aplicações. Faculdade de Ciências Aplicadas de São José dos Campos e Sociedade Brasileira de Vácuo, São Paulo, 2002.
- SUN, F.; QUIN X.; FENG H.; CHEN L.; LIU X. Constructal design of a blast furnace iron-making process based on multi-objective optimization, Jornal Elsevier – Energy, 2016
- TRINDADE, L.C. Estudo sobre a queda na taxa de circulação do aço no desgaseificador RH em função da vida útil do vaso. Dissertação de mestrado em engenharia química, UFSJ, Ouro Branco, 2017.
- ÜCER, K.B. Vacuum Evaporation, Wake Forest University, Winston-Salem Carolina do Norte Estados Unidos, disponível em: <http://users.wfu.edu/ucerkb/Nan242/L06-Vacuum_Evaporation.pdf> Acesso em: 01 abr. 2017
- UMRATH, W. Fundamentals of Vacuum Technology, Cologne German, 2007.
- VIEIRA, C.B.; Rosière C.A.; PENA L.Q.; SESHADRI V.; ASSIS P.S. Avaliação técnica de minérios de ferro para sinterização nas siderúrgicas e minerações brasileiras: uma análise crítica, Revista Escola de Minas: Metalurgia & Materiais, Ouro Preto, 2003.
- ZHANG, L.; LI, F. Investigation on the Fluid Flow and Mixing Phenomena in a Ruhrstahl-Heraeus (RH) Steel Degasser Using Physical Modeling, School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 2014.
- WIEGAND® STEAM JET COOLING PLANTS Construction Details and How They Work, GEA Process Engineering - GEA Wiegand GmbH. Ettlingen, Germany, 2012.
- ZULFIADI, ZULHAN.; SCHAREDE, CHRISTIAN. Vacuum Treatment of Molten Steel: RH (Rurhstahl Heraeus) versus VTD (Vacuum Tank Degasser). Department of Metallurgical Engineering, Institut Teknologi Bandung, Indonesia e Technometal GmbH, Tenova Metals Division, Essen, Germany, 2014.

Apêndice A.

Revisão Bibliográfica dos Processos e Produtos desde a Mineração até a Aciaria em uma Usina Integrada.

1 Fabricação do Gusa.

O ferro gusa ou gusa é fabricado no alto-forno, mas antes deste processo há os processos de coqueificação para o carvão mineral, sinterização e pelotização para o minério de ferro. Carvão mineral e minério de ferro são as duas principais matérias primas para o alto-forno.

O minério de ferro é lavrado a céu aberto na maioria das minas e uma das classificações que recebe é quanto a sua granulometria. O minério de ferro granulado (*lump ore*) possui granulometria entre 6,3 mm e 31,7 mm e forma irregular. A *sinter feed* é constituída de partículas entre 0,15 mm e 6,3 mm e o *pellet feed* são partículas finas, com granulometria abaixo de 0,15 mm (FERNANDES, 2008).

O granulado pode ser utilizado diretamente no alto-forno ao contrário da *sinter feed* e da *pellet feed* que precisam passar por processos de sinterização e pelotização para ser transformado em sínter e pelotas respectivamente, Figura A1.

Figura A1 - Classificação do minério de ferro quanto a granulometria: a) exemplo de pelotas, b) sínter,



a) Pelotas de 5 a 18 mm. Fonte: (NOÇÕES..., 2016).

b) Sinter de 5 a 50 mm.

c) Granulado de 6 a 32 mm.

1.1 Coqueificação.

A coqueificação é a fabricação do coque, um tipo de combustível derivado da hulha ou carvão betuminoso que é um tipo de carvão mineral. Esse processo químico consiste no aquecimento do carvão mineral em altas temperaturas, até 1000°C para que seja realizada a quebra de suas moléculas em várias etapas. A primeira delas é a liberação de umidade e desvolatização. Há liberação de hidrocarbonetos pesados e alcatrão até 350°C. A segunda é chamada de fase plástica onde ocorre a obtenção

da fluidez até 500°C onde há o rompimento das pontes de oxigênio presentes na estrutura química devido à pressão dos gases difundindo-se na estrutura de micro poros do carvão. A terceira etapa é a resolidificação em torno de 700°C onde é definida a resistência mecânica do coque, muito importante no processo do alto-forno. Entre de 850°C a 1300°C, consiste na liberação de voláteis, sobretudo o hidrogênio (COSTA, 2008)

Um importante subproduto da coqueria, onde a coqueificação ocorre, é o gás de coqueria (GCO). Este gás possui um poder calorifico entre 4000 e 4500 kcal/Nm³ bem melhor que o gás do alto-forno entre 750 e 900 kcal/Nm³ (COSTA, 2008; RODRIGUES, 2003). O GCO é utilizado em toda a planta siderúrgica inclusive na coqueria e antes de sua utilização é tratada em uma planta carboquímica. Apesar do tratamento, ainda é considerado um gás extremamente corrosivo, portanto, tubulações e válvulas precisam ser fabricados em materiais especiais ou serem trocados com frequência.

O coque carrega intrinsicamente o enxofre ao gusa e consequentemente ao aço, esse elemento químico causa um grande dispêndio financeiro as usinas, tanto pela dificuldade de ser retirado quanto os danos que causa a equipamentos. Usinas siderúrgicas, principalmente as pequenas, que não utilizam o carvão mineral e sim o vegetal não convivem com os problemas causados pelo enxofre, mas por outro lado convivem com os problemas causados pelo fosforo que é outro elemento químico muito indesejado ao gusa e ao aço, (COSTA, 2008).

1.2 Pelotização

A pelotização consiste em transformar finos do minério de ferro que está na forma de partículas menores de 0,15 mm de alta qualidade em pelotas. No processamento do minério de ferro são gerados finos que para não serem descartados são transformados em pelotas. O minério de ferro também pode ser moído a um nível muito fino e misturado com calcário ou dolomita, como um agente fundente, e bentonita, uma argila da família das montmorilonitas, ou aglomerantes orgânicos, como um agente aglutinante. O processo de pelotização só foi possível no final da década de 40 devido descoberta deste importante mineral, a bentonita, não é por acaso, que o nome é originário *Fort Benton* da localidade na região de *Wyoming* (USA). Mas a bentonita, carrega junto com ela um alto teor de sílica, que reduz o teor

metálico da pelota e atualmente há esforços para produzir pelotas de baixo teor em sílica (MARTINS, 2007).

Se o minério for uma hematita (Fe₂O₃), geralmente utilizada nesse processo, coque ou carvão de antracito pode ser adicionado à mistura para atuar como um combustível interno a fim de ajudar a queimar as pelotas. Essa mistura é mesclada junta num misturador e alimentada para a formação de discos ou tambores de pelotas para produzir pelotas tamanho aproximado de 9-16mm. Em seguida são alimentadas para a máquina de endurecimento (METSO, 2017).

1.3 Sinterização

A sinterização é a preparação de finos de minério de ferro, com menor teor de Fe que aquele utilizado na pelotização, junto com cal e finos de coque para se chegar a um aglomerado chamado de sínter.

Conforme Vieira *et al.* (2003), o sínter é produzido a partir de uma mistura composta por vários tipos de minérios de ferro. Essa composição varia conforme o preço de cada um deles e critério técnicos que basicamente visa controlar os teores de Fe_{Total}, SiO₂, Al₂O₃, P, Mn, K₂O, Na₂O e PPC dos minérios da mistura. Esses limites são definidos por cada empresa, conforme sua experiência e tipo de equipamento que possui. É claro que altos teores de ferro e baixos teores de ganga (composta de silício, alumínio, cal e magnésio) e de outras impurezas encontradas no minério de ferro são sempre desejados.

O minério de ferro de alta qualidade para a siderurgia é a hematita compacta, devido ao seu elevado teor de Fe₂O₃ (aproximadamente 97 %), mas devido a seu custo e baixa reatividade, o minério itabirito vem sendo utilizado cada vez mais na forma de sínter em altos-fornos, pois apesar de apresentar um teor sensivelmente mais baixo de Fe₂O₃, (cerca de 50 % de Fe₂O₃ e 50 % de SiO₂) é bem mais facilmente moído e concentrado, permitindo a obtenção da sínter. O material sinterizado é mais poroso, o que garante melhor percolação pelos gases no alto forno, porém, apresenta menor resistência mecânica, por ser menos denso do que o minério compacto. Para correção da resistência mecânica são adicionados fundentes que são basicamente óxidos básicos, como CaO e MgO. Uma baixa resistência mecânica faz com que a carga adicionada no alto-forno se compacte, abafando e não permitindo a passagem

de gases podendo ocasionar inclusive a perda do equipamento, (AÇOS & LIGAS 2017).

1.4 Alto-Forno.

O alto-forno, segundo (SUN *et al.*, 2016) é um reator que utiliza sínter e ou pelotas como carga metálica, minério granulado e coque como combustível, fundentes como o calcário, descendo em um forno com a força da gravidade e contracorrente aos gases oriundos da queima do CO e CO2 na região das ventaneiras. As Figuras A2 e A3 ilustram as principais regiões ou zonas do alto-forno, o balanço de carga e as principais reações químicas.



Figura A2 - Zonas do Alto-Forno.

1.Ventaneiras 2. Zona de fusão 3 e 4. Zona de Redução dos óxidos de ferro 4. Zona de Redução dos óxidos de ferro 5. Zona de Formação de Camadas de Carga Metálica (sínter), Fundentes (calcário, quartzo e dolomita), Combustível Redutor (Coque) 6. Alimentação por Correia Transportadora 7. Escapamento de gases 8. Região das principais reações químicas 9. Canal para remoção de escória, não utilizado nos atuais altos-fornos. 10.Canal Principal para vazamento de ferro gusa e escória. 11. Chaminé para escoamento dos gases liberados. Fonte: (BLAZEK, 2016)

Na região 1 da Figura A2 é soprado ar a pelo menos 1000°C, o oxigênio do ar queima o carbono do coque na região 2 gerando CO_2 e também há a reação química de CO_2 + O_2 = 2CO. O CO é um gás redutor, ou seja, consegue reagir com o oxigênio

do oxido de ferro presente na sínter e ou pelota, liberando o ferro, ilustrado por Blazek (2016).

Os fundentes como o calcário já citado são importantes substancias químicas adicionados no alto-forno para baixar o ponto de fusão da ganga, possibilitando sua remoção. Os fundentes são divididos em básicos, portadores de CaO e ou MgO e ácidos, portadores de SiO2 e ou Al2O3. Os principais fundentes são calcário e cal que carrega o CaO, dunito, serpentinito e dolomita que carrega MgO e SiO₂, quartzo que carrega SiO₂ (ARRIVABANE, MACHADO e SOBRINHO, 2003).

No processo há formação de escória, oriunda das impurezas da carga, tais como os óxidos de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃), óxido de cálcio (Cao) e óxido de magnésio (MgO) e enxofre (S).

A escória como é menos densa que o ferro gusa é parcialmente separada e utilizada em outros processos. O ferro-gusa é então enviado para o processo de Dessulfuração.





Fonte: Adaptado de (SUN et al. 2016)

1.5 Dessulfuração.

O processo de dessulfuração primária também é conhecida pelo nome de Pré-Refino que é constituída de uma ou mais plantas com o objetivo de reduzir o enxofre,

mas também pode ser utilizada para reduzir fosforo e silício em processos chamados de dessulfuração, desfosforação e dessiliciação.

O gusa antes de ser transformado em aço precisa passar pelo processo de dessulfuração. No alto-forno materiais já são adicionados para que o enxofre seja retirado e se concentre na escória, mas para que o gusa seja transformado em aco na aciaria ele precisa passar por um processo especifico para que o enxofre chegue a níveis aceitáveis.

A justificativa para a existência deste processo é que a presença do enxofre, exceto para raras utilizações, não contribui para as boas propriedades mecânicas do aco como ductilidade, tenacidade, conformabilidade, soldabilidade e resistência à corrosão, sendo sua presença benéfica somente à usinabilidade (AGUIAR et al. 2011).

A dessulfuração ocorre com a adição de alguns elementos guímicos ao gusa, principalmente a cal (CaO) pelo seu baixo custo mas outros elementos podem ser adicionados como Carbonato de sódio (Na₂CO₃), Carbureto de Cálcio (CaC₂), Magnésio (Mg) (KIRMSE, 2006). Ocorre então uma reação do oxigênio liberado pelo CaO, através da reação do carbono dissolvido no gusa de acordo com as reações (A), (B) e (C).

$CaO + S + C \rightarrow CaS + CO$	(A)

$$CaO + S + C \rightarrow CaS + O$$
(B)
$$C + O \rightarrow CO$$
(C)

$$C + O \rightarrow CO$$
 (C)

Nesse processo o desejável é a formação do sulfeto e não do óxido e o ambiente redutor favorece. Por isso as misturas dessulfurantes geralmente são constituídas do agente dessulfurante, um desoxidante e um fundente (AGUIAR et al. 2011).

A dessulfuração pode ser feita em uma panela ou em um carro torpedo, que é um vaso transportado por uma locomotiva entre o alto-forno e aciaria. Em ambos os casos uma lança é inserida no gusa líquido para adição de material dessulfurante. Uma terceira forma é a utilização de uma planta especifica conhecida como KR, sigla vem do nome Reator Kambara, onde após a adição do material dessulfurante, o gusa é agitado através de pás mecânicas ou impeller como é mais conhecido, conforme Figura A4. O material dessulfurante reage com o enxofre gerando escória que é menos densa e flutua no gusa, facilitando sua retirada, seja basculando o carro

torpedo ou através de um raspador que irá retirar a mesma para outro recipiente, (KIRMSE, 2006).



Figura A4 - Dessulfuração em carro torpedo, em panela e no KR.

Fonte: (MANSUR⁸, 2008, p. 18-20 apud LEMOS, 2011, p. 2)

Quando a dessulfuração é feita na panela ou carro torpedo a fração de dispersão do agente dessulfurante, ou seja, as partículas dessulfurantes que entram em contato com o gusa é 30%, ao contrário do KR onde esse contato pode atingir 100% (LEMOS, 2011). Além do mais, o carro torpedo não foi projetado para propiciar a circulação do gusa e sua homogeneização e sim para evitar a troca térmica com o meio externo.

Fluxograma de processos e produtos citados estão descritos na Figura A5.



⁸ MANSUR , F.M. Monografia de graduação. Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola da Minas, UFOP, 2010, p 18-20

Apêndice B – Fatores de Processo e Equipamento que Influenciam a taxa de desoxidação do aço.

Há ainda outros fatores para que ocorra a desoxidação, também citado no tópico 2.3.1 Cinética do Processo Circulação do Aço, que são as dimensões das pernas, a vazão de gás na perna de subida e altura do aço no interior do vaso. Conforme Equação 1 já citada e novamente apresentada a seguir de (ONO *et al.* 1981, *apud* Zhang e Fei Li, 2014, p.7) o fluxo Q em em (t/min), D_U é o diâmetro interno da perna de subida = 0,650 cm, D_d é o diâmetro interno da perna de descida = 0,650 cm, G é a média do fluxo de gás injetado na perna de subida = 128 (NL/min) e H é a altura de injeção do gás em relação à altura do banho no vaso em (cm) e a altura do banho depende da pressão de vácuo.

$$Q = 3.8 \cdot 10^{-3} \cdot D_u^{0.3} \cdot D_d^{1.1} \cdot G^{0.31} \cdot H^{0.5}$$
⁽¹⁾

Há também outras equações, como a equação de Kuwabara⁹ (1988 *apud* Trindade, 2017)

$$Q = 1,63 \cdot G^{0,33} \cdot D^{1,33} \cdot \left(\ln(\frac{p_{atm}}{p_{vacuo}}) \right)^{0,33}$$
(2)

Sendo Q a vazão de aço líquido em m^3/min , D o diâmetro da perna em metros, G a vazão de gás na perna em NI/min, p_{atm} a pressão atmosférica em mbar e p_{vacuo} a pressão de vácuo em mbar.

Com um diâmetro da perna = 0,65 m, vazão de gás de 128 NI/min, pressão atmosférica de 897 mbar e pressão de vácuo atingida de 49,7 mbar em quatro minutos, a vazão Q de aço líquido é 6,3 m^3/min . O peso do aço tratado de 224 toneladas, possui o volume de 28,72 m^3 considerando o peso especifico do aço e 7800 t/ m^3 . Então para que todo o aço da panela entre em contato com o vácuo no vaso, para que os gases sejam succionados, foi necessário 4,5 minutos. Se o vácuo de 0,67 mbar especificado para a planta fosse atingido em 3 minutos, a vazão Q seria 8,743 m^3/min e o tempo para que todo o aço da panela entre em contato com o vácuo no vaso seria de 3,28 minutos. Com a equação de Kuwabara é possível construir a Tabela B1 e gráfico da Figura B1.

Tabela B1 - Vazão em m³/min e ton/min entre panela e vaso conforme pressão de vácuo.

⁹ KUWABARA, Tatsuro; UMEZAWA, Kazurize; MORI, Kouji and WATANABE, Hisashi, Investigation of Decarburization Behavior in RH-re-actor and Its Operation Improvement, Transactions of ISIJ, Vol.28 p.305-313,1988.

Pressão de vácuo em mbar	Vazão em m^3/min de aço entre panela e vaso	Vazão em ton/min de aço entre panela e vaso
897,0	0	0,00
354,8	4,45	34,71
92,9	5,97	46,57
61,9	6,3	49,14
49,7	6,47	50,47
44,1	6,56	51,17
29,6	6,83	53,27
22,8	7	54,60
21,9	7,02	54,76
16,2	7,2	56,16
15,8	7,22	56,32
0,7	8,74	68,17

Figura B1 - Vazão em ton/min de aço com a redução da pressão de vácuo.



Então, o tempo para se atingir o vácuo e a vazão de circulação do aço entre panela e reator explicam a baixa queda de PPM de oxigênio do aço nos minutos iniciais.