

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
BRUNA MILLER TOLEDO

TRATAMENTO DE DESGASEIFICAÇÃO A VÁCUO

Taubaté - SP
2018

BRUNA MILLER TOLEDO

TRATAMENTO DE DESGASEIFICAÇÃO A VÁCUO

Trabalho de Graduação apresentado para obtenção do Certificado de Graduação do curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Orientador(a): Prof^o Dr Aluisio Pinto da Silva

**Taubaté – SP
2018**

SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU

T649t Toledo, Bruna Miller
Tratamento de degaseificação a vácuo / Bruna Miller Toledo. -- 2018.
39 f. : il.

Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Aluisio Pinto da Silva, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Aço. 2. Degaseificação. 3. Qualidade. 4. Tratamento. I. Título.
II. Graduação em Engenharia Mecânica.

CDD – 669.142

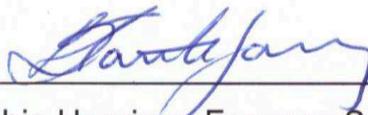
Ficha catalográfica elaborada por Shirlei Righeti – CRB-8/6995

BRUNA MILLER TOLEDO

TRATAMENTO DE DESGASEIFICAÇÃO A VÁCUO

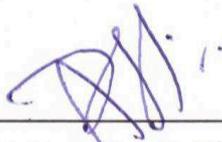
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO APROVADO COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE **"GRADUADO EM ENGENHARIA MECANICA"**

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO COORDENADOR DE CURSO DE GRADUAÇÃO DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. Me. Fábio Henrique Fonseca Santejani
Coordenador de Trabalho de Graduação

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Aluisio Pinto da Silva
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ



Prof. Ivair Alves dos Santos
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

06 de novembro de 2018

Dedico este trabalho aos meus pais Enia Miller Toledo e Jayme Carlos Toledo, ao meu irmão, Willian Miller Toledo, ao meu namorado, Leonardo Ribeiro Antunes.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pela minha vida, minha família e meus amigos.

Aos meus pais *Jayme* e *Enia*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos e estiveram ao meu lado em todos os momentos.

Ao meu irmão *Willian* que teve paciência em auxiliar nas minhas dúvidas diante deste trabalho.

Ao meu namorado *Leonardo* por me ajudar durante toda a realização deste trabalho, sempre incentivando e apoiando.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Aluisio Pinto da Silva* por todo o incentivo e motivação na orientação deste trabalho.

Ao *Prof. Ivair Alves dos Santos* da banca por aceitar compor a banca examinadora.

RESUMO

Indústrias siderúrgicas estão sempre atentas ao surgimento de novos procedimentos que possam trazer qualidade para os seus produtos e assim atender com satisfação todos os clientes possíveis. Sendo assim, o investimento em melhores processos que são capazes de aumentar a qualidade do seu produto final, teve um grande aumento. No caso do processo de fabricação do aço, algumas industriais estão utilizando o tratamento de desgaseificação a vácuo que promete trazer uma extensa melhoria nas propriedades mecânicas de seus aços, havendo uma boa diferença dos fabricados no processo comum. Devido a isso, pretende-se realizar um estudo para adquirir maiores informações sobre o processo do tratamento de vácuo e confirmar a viabilidade de sua utilização. Portanto, o presente estudo de caso tem por objetivo principal realizar pesquisas e experimentos que demonstrem, por meio dos resultados, a melhoria ao se optar por tal processo. A metodologia escolhida para a realização do trabalho de graduação foi o estudo de caso analítico, que foca na pesquisa sobre o tratamento de desgaseificação a vácuo e nos experimentos para a comprovação da qualidade do tratamento de desgaseificação. Depois dos experimentos, foi possível demonstrar por meio de resultados a melhor qualidade do aço adquirido pelo tratamento. Além disso, pode observar-se a diferença entre as propriedades de um aço comum para um desgaseificado, auxiliando assim na escolha do tipo de material para a utilização em projetos industriais.

Palavras-chave: Desgaseificação. Aço. Qualidade.

ABSTRACT

Steelmaking industries are always attentive to the appearance of new procedures that can bring quality to their products and thus satisfy all possible customers with satisfaction. So, investing in better processes that are able to increase the quality of your final product has seen a huge increase. In the case of the steelmaking process, some industrialists are using the vacuum degassing treatment that promises to bring an extensive improvement in the mechanical properties of their steels, with a good difference from those manufactured in the common process. Due to this, it is intended to carry out a study to acquire more information on the process of the vacuum treatment and to confirm the viability of its use. Therefore, the main purpose of the present case study is to carry out research and experiments that demonstrate, through the results, the improvement in the choice of such process. The methodology chosen to carry out the graduation work was the analytical case study, which focuses on the research on the vacuum degassing treatment and on the experiments to prove the quality of the degassing treatment. After the experiments, it was possible to demonstrate by means of results the best quality of the steel acquired by the treatment. In addition, the difference between the properties of a common steel for a degassing can be observed, thus aiding in the choice of the type of material for use in industrial designs.

KEYWORDS: Degassing. Steel. Quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – ESQUEMA SIMPLIFICADO DE UM FORNO ELÉTRICO A ARCO.....	16
Figura 2 – ESQUEMATIZAÇÃO DE BORBULHAMENTO NO AÇO LÍQUIDO.....	20
Figura 3 – ESQUEMATIZAÇÃO DA AÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO NO AÇO LÍQUIDO.....	21
Figura 4 – ESQUEMATIZAÇÃO DO SISTEMA DE DESGASEIFICAÇÃO A VÁCUO	24
Figura 5 – ESQUEMATIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DE VÁCUO	25
Figura 6 – VACUÔMETRO.....	26
Figura 7 – MONTAGEM TÍPICA DO EJETOR	27
Figura 8 – ESQUEMATIZAÇÃO DO CICLONE.....	27
Figura 9 – ESQUEMATIZAÇÃO DO CONDENSADOR	28
Figura 10 – AMOSTRAS PASSADAS PELO SISTEMA DE DESGASEIFICAÇÃO...33	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – BALANÇO QUÍMICO DOS ELEMENTOS NA FUSÃO NO FEA.....	18
Tabela 2 – SEQUÊNCIA DE FUNCIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS	24
Tabela 3 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO SAE 1548	33
Tabela 4 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO SAE 12L14	33
Tabela 5 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO SAE 1548.....	34
Tabela 6 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO SAE 12L14.....	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Alongamento
FEA	Forno elétrico a arco
FP	Forno panela
HB	Hardness Brinell
LE	Limite de Escoamento
LR	Limite de Ruptura
SAE	Society of Automotive Engineers
TG	Trabalho de Graduação
VAD	Vacuum Arc Degassing
VCD	Vacuum Carbon Deoxidation
VD	Vacuum Degassing
VOD	Vacuum Oxygen Decarburising
Z	Redução de Área

LISTA DE SÍMBOLOS

m	Comprimento
T	Tonelada
Ca	Cálcio
Mg	Magnésio
Si	Silício
Al	Alumínio
Zr	Zircônio
Ti	Titânio
B	Boro
Mn	Manganês
P	Fósforo
S	Enxofre
Cr	Cromo
Nb	Nióbio
V	Vanádio
Cu	Cobre
Ni	Níquel
Sn	Estanho
Sb	Antimônio
Mo	Molibdênio
Co	Cobalto
As	Arsênio
W	Tungstênio
Zn	Zinco
Cd	Cádmio
Pb	Chumbo
°C	Grau celsius
O	Oxigênio
N	Nitrogênio
H	Hidrogênio
C	Carbono
mmHg	Milímetros de mercúrio

bar	Unidade de pressão atmosférica
Torr	Unidade de pressão
ppm	Partes por milhão
µg	Micrograma ou milésimo de grama
CO	Monóxido de carbono
%	Percentual
Mbar	Milésimo de bar
°	Grau
MPa	Mega pascal
”	Polegada

SUMÁRIO

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 FUNDIÇÃO DO AÇO.....	16
2.1.1 Operação (Fundição)	17
2.2 REFINO SECUNDÁRIO	18
2.2.1 Forno Panela.....	19
2.2.1.1 Operação (Forno Panela).....	20
2.2.2 Desgaseificação – Tratamento sob vácuo.....	21
2.2.2.1 Tipos de desgaseificação	22
2.2.2.2 Desgaseificação em Panela	22
2.2.2.2.1 Funcionamento Básico do Sistema	23
2.2.2.3 Equipamentos do sistema de desgaseificação.....	25
3 METODOLOGIA	30
3.1 Estudo de Caso.....	30
4 DESENVOLVIMENTO	32
4.1 Amostras	32
4.1.1 Representação de corpo de prova	32
4.2 Composição Química	33
4.3 Propriedades mecânicas	33
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
6 CONCLUSÃO	37
REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

As empresas buscam sempre melhorar a qualidade dos seus produtos para satisfazer e conquistar cada vez mais os seus clientes. Estão em uma constante busca de novos métodos, processos, tecnologias, e tudo que possa contribuir. Dentre essas buscas temos o processo de desgaseificação a vácuo que traz grandes contribuições ao aço fabricado, assim como, a “ Redução/eliminação de gases dissolvidos, redução do carbono dissolvido e oxidação preferencial do carbono dissolvido sobre o cromo quando no refino do aço inoxidável. “ (Desgaseificação do aço, 2009), com isso temos a diminuição do aparecimento de trincas, pontos de tensões, descontinuidades e conseqüentemente aumentando a vida útil do material.

O processo de desgaseificação a vácuo é aplicado em diversos tipos de substâncias liquefeitas, sendo um deles o aço líquido. Portanto as aciarias tem sido uma das quais tem adotado e procurado cada vez mais tal processo, melhorando ainda mais seu produto com a eliminação das descontinuidades e tensão no material. Cada empresa de fabricação de aço apresenta uma necessidade específica para o processo de desgaseificação, com isso cada sistema é projetado para melhores atende-lo, sendo assim temos diversos tipos de processos em constante desenvolvimento.

No processo de desgaseificação a vácuo, os gases contidos no aço líquido são removidos para aumentar a pureza e a resistência do mesmo quando sólido. Durante este processo, ocorre a diminuição da pressão de ar no interior do recipiente onde o aço se encontra e a injeção de gás inerte (argônio) que ajudam a eliminar os gases do aço e dispersá-los à atmosfera.

Este estudo de caso será baseado em dados laboratoriais e na comparação entre um aço que passou pela adição de ligas apenas (tais como Chumbo – 12L14B 2 1112^a) e um aço passa pela desgaseificação (tais como 1548HB – alto manganês e 50B40HC – alto cromo), além disso terá foco principal nos possíveis avanços e descobertas no respectivo assunto, também serão destacados suas aplicações e seus benefícios para com a indústria moderna e seus respectivos clientes cada vez mais exigentes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

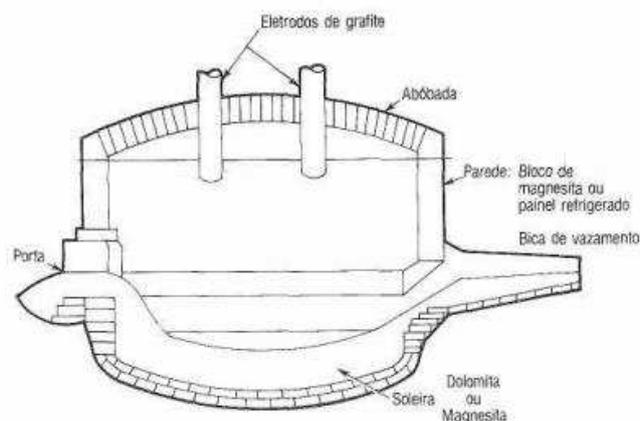
Este capítulo tem como finalidade abordar os processos que envolvem direta e indiretamente o processo de desgaseificação para obter conhecimento sobre assunto, e assim realizar uma comparação entre um aço que apenas foi atribuído a um processo de refino básico (adição de ligas) e um aço que passa pelo processo de desgaseificação, além dos equipamentos que compõem o mesmo.

2.1 FUNDIÇÃO DO AÇO

Este processo ocorre no forno elétrico à arco (FEA) que está representado na figura 1, que é composto por uma panela de seção circular com o fundo em forma de calota. Esta panela é feita de chapas de aço com espessura entre 19m a 26m, e é revestida internamente por painéis de refrigeração nas laterais e por refratários no fundo. O diâmetro da panela varia de acordo com a capacidade de cada forno e com a profundidade necessária para produção desejada, podendo variar de 400m para fornos de 5T e até 1000m para fornos de 120T (CARDOSO E CASSIMIRO, s.d.).

A tampa ou abóbada é composta por refratários e é refrigerada com circulação de água sob pressão. Nela possui três aberturas para o posicionamento de três eletrodos que são sustentados por três garras de cobre presas em braços que realizam o seu movimento (CARDOSO E CASSIMIRO, s.d.).

Figura 1 - Esquema simplificado de um forno elétrico a arco. A carcaça foi cortada diametralmente. Um dos eletrodos não aparece na figura, por este motivo



Fonte: (SILVA, 2011, p. 4)

2.1.1 Operação (Fundição)

A panela recebe um pré-aquecimento antes do início do processo de fundição. Em seguida, a mesma é forrada com uma determinada quantidade de ferro gusa, que é fundida. Com o ferro gusa já fundido adiciona-se o primeiro cestão de sucata misturada com cal que é fundido por meio de 3 (três) eletrodos de chumbo/grafite, que são alimentados por uma corrente elétrica e ao entrarem em contato com a sucata geram uma descarga elétrica (curto circuito) onde aumenta a temperatura fundindo o material. A adição de sucata é repetida mais 2 (duas) vezes assim que a carga dentro do forno está suficientemente fundida. Os eletrodos ficam em constante movimento, o que contribui para a homogeneidade da temperatura dentro da panela e são resfriados por meio de chuveirinhos para garantir uma maior vida útil do mesmo (INFORMAÇÃO VERBAL¹).

Após a adição de todos os cestões e a fundição total dos mesmos é colhida uma amostra que é enviada por meio de torpedo para o laboratório químico para verificar se a composição do aço está correta. O resultado deve ser enviado o quanto antes para a cabine do FEA, tendo em média um tempo de 5 minutos a partir do recebimento da amostra (INFORMAÇÃO VERBAL¹).

Em todo o processo, ocorre adição de algumas ligas que irão incorporar o aço e formação de escória que auxiliarão na remoção de impurezas no aço durante sua fundição, conforme a tabela 1. Com isso, têm-se um refino oxidante ou refino primário do aço. Esse refino é responsável por “atingir o nível de carbono especificado para o aço produzido, reduzir o teor de fósforo no aço líquido abaixo da especificação (usualmente abaixo de 0.015%), homogeneizar a composição e temperatura do aço e aquecer o aço líquido até a temperatura necessária para o vazamento” (FERREIRA, 2011).

¹ Informações obtidas por meio de vivência no setor da aciaria e contato com funcionários que atuam na produção do aço.

Tabela 1 - Balanço químico dos elementos na fusão no FEA

Grupo	Comportamento Termodinâmico	Elemento
I	Elementos que são incorporados à escória	Ca, Mg, Si, Al, Zr, Ti, B
II	Elementos que se dividem entre aço e escória	Mn, P, S, Cr, Nb, V
III	Elementos que são incorporados ao aço	Cu, Ni, Sn, Sb, Mo, Co, As, W
IV	Elementos que são vaporizados	Zn, Cd, Pb

Fonte: (FERREIRA, 2011, p. 19)

A temperatura de trabalho varia entre 1570°C a 1680°C de acordo com cada etapa da fundição. Além disso, todo o excesso de gás e impurezas geradas por este processo é purificado e eliminado por um sistema de coletor de pó (FERREIRA, 2011, p. 19).

Assim que o aço se encontra com a composição e temperatura desejada nesse processo faz-se o vazamento do mesmo para uma panela que irá prosseguir para o processo de refino secundário (INFORMAÇÃO VERBAL²).

Todo este processo de fundição é controlado por meio de um painel de controle pelos colaboradores que ficam na cabine do FEA. Na cabine eles são responsáveis por abrir e fechar a abóbada (“tampa” da panela) para adicionar a sucata, regular o movimento dos eletrodos, pela troca dos mesmos, por recolherem a amostra, entre outros (INFORMAÇÃO VERBAL²).

2.2 REFINO SECUNDÁRIO

No refino secundário são eliminadas as impurezas, sendo que as principais são o oxigênio (O), o enxofre (S), o nitrogênio (N), o hidrogênio (H) e o fósforo (P). A junção dessas impurezas (oxigênio, enxofre, nitrogênio e fósforo) formam inclusões no aço que na maior parte dos casos são prejudiciais ao material, causando a “diminuição da plasticidade, diminuição da tenacidade, formação de trincas e formação de defeitos superficiais” (MOURÃO *et al*, 2007).

No caso do hidrogênio, sua presença no aço pode causar o aparecimento de trincas internas e/ou fragilizar o material (MOURÃO *et al*, 2007).

² Informações obtidas por meio de vivência no setor da aciaria e contato com funcionários que atuam na produção do aço.

Nesse processo pode ser realizado também o “acerto de composição química do aço, a descarburização ou remoção do carbono (C) e a alteração da morfologia das inclusões remanescentes” (MOURÃO *et al*, 2007).

O processo de refino é dividido em três tipos:

a) Operações após o forno: ocorre após o vazamento do aço do forno e antes de sua solidificação. As operações após o forno são: injeção de pós na panela, desgaseificação, acerto da temperatura, entre outros. Esses processos influenciam na composição química e na limpeza do aço, sem alterar a sua solidificação (SILVA e MEI, 1981);

b) Processos de Refusão: caracterizados pela refusão de um lingote, tendo refino e solidificação gradual, com estrutura muito superior às dos lingotes convencionais (SILVA e MEI, 1981);

c) Processos especiais de elaboração: processos em que o aço (ou outra liga) é produzido em fornos com características especiais, como por exemplo, condições de pressão, diferentes dos processos convencionais (SILVA e MEI, 1981).

Teremos como visão principal do estudo de caso as operações pós forno, porém será abordado a seguir apenas tal tema, assim sendo o equipamento mais popular responsável por este processo o Forno Panela (FP).

2.2.1 Forno Panela

O forno panela é composto por uma panela feita de aço com revestimento interno de refratário que suporta altas temperaturas do aço líquido (1550°C a 1650°C) e com um dispositivo de plug poroso (MOURÃO *et al*, 2007). Possui também uma abóbada com painéis refrigerados e um furo de passagem para a acomodação de três eletrodos de chumbo/grafite. E uma cabine de comando.

Quando o aço é vazado na panela ele segue para o processo de remoção de escória e em seguida vai para o forno panela.

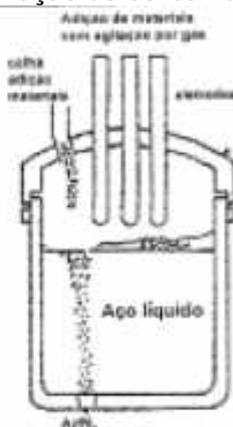
2.2.1.1 Operação (Forno Panela)

A panela contendo o aço é colocada sobre o trole (carro que transporta a panela) e posicionado sob a abóbada e tampado, com isso os eletrodos são acionados ligando o forno e dando início ao processo de refino secundário.

Para a realização do refino é necessário que o aço líquido esteja em movimento, ou seja, em constante agitação. Essa agitação pode ser causada por dois principais métodos:

- **Borbulhamento:** ele é realizado através de injeção de gás inerte (argônio) por meio de um plug poroso encontrado no fundo da panela que está representado na figura 2. O borbulhamento do aço líquido faz com que se tenha homogeneização térmica e química (MOURÃO *et al*, 2007).

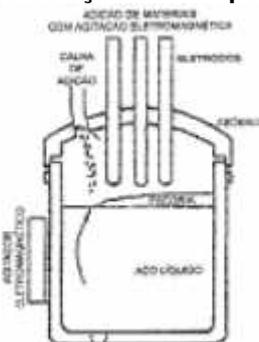
Figura 2 - Esquematização de borbulhamento no aço líquido



Fonte: (MOURÃO, 2007)

- **Campo magnético:** Cria-se um campo magnético induzido por meio de bobinas localizadas na parede externa da panela que está representado na figura 3. Esse campo magnético agita o aço líquido e traz resultados semelhantes ao método de borbulhamento. Porém neste método é necessário que a panela seja construída de um aço não-magnético para que não ocorra aquecimento da mesma no momento de indução do campo magnético (MOURÃO *et al.*, 2007).

Figura 3 - Esquemática da ação do campo magnético no aço líquido



Fonte: (MOURÃO, 2007)

A agitação do aço pode ser forte, como por exemplo em processo de vácuo, ou mais suave quando se deseja auxiliar na flotação das inclusões que serão absorvidas pela nova escória que será removida ao fim deste processo (MOURÃO *et al*, 2007). Além disso, adiciona-se as ligas necessárias para atingir a composição química final desejada do aço.

Ao fim deste refino, o aço líquido pode seguir para o lingotamento ou para outro refino secundário que consiste na desgaseificação do aço. O processo de desgaseificação acontece no forno panela.

2.2.2 Desgaseificação – Tratamento sob vácuo

A desgaseificação é uma operação de refino secundário após o forno, em que o aço líquido é exposto a um vácuo médio (0,5 - 1 mmHg ou 0,001 bar ou 1 torr) e agitado. O objetivo principal deste processo é remover os gases existentes no aço líquido (SILVA e MEI, 1981). A quantidade de partículas de gás aceitável no aço são de 3 a 4 ppm (ou μg).

Os principais objetivos que conduzem a utilização do processo de desgaseificação são:

- Remoção de gases dissolvidos no aço líquido, principalmente o hidrogênio e em condições adequadas, o nitrogênio (SILVA e MEI, 1981);
- Redução do teor de carbono. A oxidação do carbono até os níveis desejados para os aços de extra-baixo carbono ou aços inoxidáveis e aços para fins elétricos só é viável pela redução da pressão do gás CO (SILVA e MEI, 1981);

- Desoxidação pelo carbono. A alteração do equilíbrio entre carbono e oxigênio dissolvidos no aço causada pela redução da pressão do gás CO resulta em teores de oxigênio muito baixos (e, conseqüentemente, em alta limpeza interna) em aços para construção mecânica, como aços para rolamentos (SILVA e MEI, 1981).

2.2.2.1 Tipos de desgaseificação

Com a evolução da desgaseificação surgiu três tipos de se realizar o processo, onde cada um tem suas vantagens e desvantagens (SILVA E MEI, 1981, 1988).

Segundo Silva e Mei (1981, 1988), os três tipos são:

- Desgaseificação a Jato: Ocorre no vazamento do forno ou no lingotamento sob vácuo. Apesar de ser bem eficiente, este processo não apresenta a mesma flexibilidade dos processos realizados em panela (SILVA e MEI, 1981, 1988).

- Desgaseificação em panela: a panela com o aço líquido é transferida a uma câmara, onde é realizado o vácuo. A agitação desse aço pode ser feita pela injeção de gás inerte (argônio) ou pela geração de campos magnético, sendo necessário o uso de panela não magnética (austenítico) (SILVA e MEI, 1981, 1988).

- Desgaseificação por circulação: neste processo, o aço líquido permanece na panela e é aspirado para dentro de uma câmara de vácuo que suporta apenas uma parte de todo o aço presente na panela. Ao ser aspirado faz com que ocorra a circulação do mesmo, assim temos todo o aço líquido exposto ao vácuo (SILVA e MEI, 1981, 1988).

Ao longo desse estudo de caso, o foco principal será realizado no processo de desgaseificação em panela.

2.2.2.2 Desgaseificação em Panela

O processo de desgaseificação em panela se divide em:

- VD (Vacuum Degassing - Desgaseificação a Vácuo): Nesse processo se realiza a desgaseificação, desoxidação (remoção de oxigênio em excesso) e

dessulfuração (adequar a quantidade de enxofre especificado – máximo de 0,015 %), podendo também descarbonetar sem o uso de oxigênio para alcançar aços com teores de carbono abaixo de 0,01%. Ele ainda permitir boa homogeneização do aço líquido. Processo voltado à produção de aços com baixos teores em gases (ARAÚJO, 1997).

- VCD (Vacuum Carbon Deoxidation – Desoxidação do Carbono sob Vácuo): Similar ao processo anterior, o VCD usa o oxigênio presente no aço líquido para remover o carbono através da formação de CO a uma pressão de 20 mbar (ARAÚJO, 1997).

- VOD (Vacuum Oxygen Decarburising - Descarbonetação a Vácuo com Oxigênio): Esse processo nada mais é do que o processo VD com a injeção de oxigênio. Nele utiliza a injeção de oxigênio para realizar de descarbonetação sem grandes alterações a quantidade de cromo presente no aço líquido. Processo voltado à produção de aço inoxidável (ARAÚJO, 1997).

- VAD (Vacuum Arc Degassing - Desgaseificação a Vácuo com Arco Voltaico): Os processos de desgaseificação ocorrem separadamente do processo de adição de ligas. Já no VAD os dois processos (adição de ligas e desgaseificação) são realizados em um único (ARAÚJO, 1997).

Dentre as opções dadas no processo de desgaseificação em panela abordaremos o processo VD.

2.2.2.2.1 Funcionamento Básico do Sistema

O processo de desgaseificação a vácuo (figura 4) é realizado em cinco estágio, sendo que cada estágio apresentará uma redução de pressão (Torr), conforme indicado na tabela 2. No primeiro estágio inicia-se o funcionamento dos ejetores 5a, 5c, e 5b que ficam no final do sistema, ele é responsável por eliminar grande parte do ar presente (INFORMAÇÃO VERBAL³).

No segundo estágio começa a funcionar os ejetores 4a e 4b, permanecendo apenas os ejetores 5a e 5b do estágio anterior. Esse estágio é o mais lento, pois em todos os ejetores estão tendo injeção de vapor, iniciando o vácuo (INFORMAÇÃO VERBAL³).

³ Informações obtidas em um treinamento fornecido pela Gerdau S.A. sobre desgaseificação a vácuo administrado por um engenheiro de manutenção. As figuras 4, 5, 7, 8, e 9 foram elaboradas a partir do treinamento.

No terceiro estágio começa a funcionar o ejetor J3, enquanto apenas os ejetores 4a e 5a permanecem funcionando do estágio anterior. O ejetor J3 é responsável por auxiliar na diminuição de pressão. A partir desse estágio libera-se a água dos condensadores (INFORMAÇÃO VERBAL⁴).

No quarto estágio o ejetor J2 começa a funcionar juntamente com os demais do estágio anterior. O ejetor J2 auxilia na diminuição de pressão (INFORMAÇÃO VERBAL⁴).

No quinto e último estágio o ejetor J3 começa a funcionar juntamente com os ejetores do estágio anterior. No último estágio a pressão do vácuo diminui para menor que 1 torr (0,001 bar ou 1mmHg) (INFORMAÇÃO VERBAL⁴).

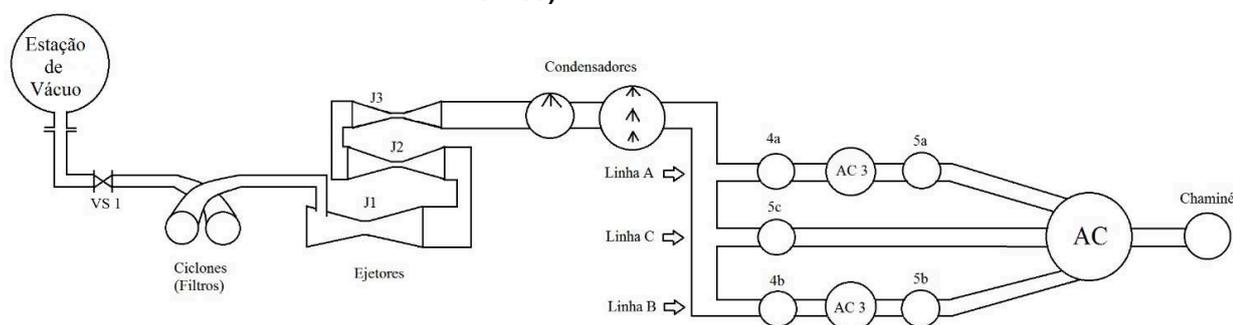
Tabela 2 – Sequência de funcionamento dos equipamentos

Estágios	Sequência de Equipamentos	Pressão [Torr]
1º	5a - 5c - 5b	(715 - 150)
2º	4a - 4b - 5a - 5b	(150 - 50)
3º	J3 - 4a - 5a	(50 - 25)
4º	J2 - J3 - 4a - 5a	(25 - 4,5)
5º	J1 - J2 - J3 - 4a - 5a	(4,5 - < 1)

Fonte: Treinamento sobre desgaseificação

Com isso, concluímos que o processo de desgaseificação a vácuo ocorre de trás para frente, já que os equipamentos iniciais estão localizados no fim do sistema.

Figura 4 - Esquematização do sistema de desgaseificação a vácuo. Condensadores (Ac e Ac3)



Fonte: Treinamento sobre desgaseificação

⁴ Informações obtidas em um treinamento fornecido pela Gerdau S.A. sobre desgaseificação a vácuo administrado por um engenheiro de manutenção. As figuras 4, 5, 7, 8, e 9 foram elaboradas a partir do treinamento.

2.2.2.3 Equipamentos do sistema de desgaseificação

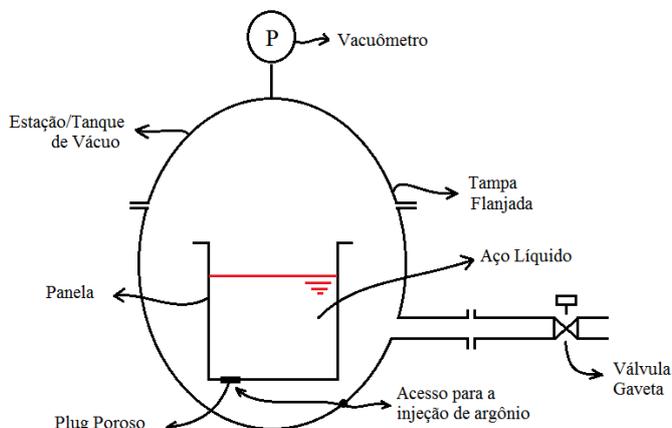
Ao longo das pesquisas pode-se observar a existência de equipamentos diferentes para diversos tipos de desgaseificação. Focaremos a seguir nos equipamentos do sistema a ser estudado.

Os equipamentos do sistema de desgaseificação nos quais está sendo baseado este estudo de caso são:

- Estação/tanque de vácuo

O tanque de vácuo que está representado na figura 5, determina-se o recipiente onde se encontra a panela contendo o aço líquido, onde é realizado a correção das composições químicas e físicas do aço (feita através da adição de ligas, borbulhamento e aquecimento), e também o processo de desgaseificação (INFORMAÇÃO VERBAL⁵).

Figura 5 – Esquematização da estação de vácuo



Fonte: Treinamento sobre desgaseificação

- Medidor de pressão (Vacuômetro)

Vacuômetro é um manômetro responsável por medir pressões abaixo da pressão atmosférica, próximas da ausência completa de ar ou de qualquer gás, ou seja, do vácuo (SILAS, s.d.).

⁵ Informações obtidas em um treinamento fornecido pela Gerdau S.A. sobre desgaseificação a vácuo administrado por um engenheiro de manutenção.

Este, que está representado na figura 6, auxilia na verificação da pressão a cada etapa do processo de degaseificação.

Figura 6 – Vacuômetro



Fonte: (SILAS, s.d.)

- Dutos

Tubulação responsável por guiar todas as impurezas e gases removidos do aço líquido, transferindo-as de um equipamento para outro até a finalização do processo, onde os dutos encaminham os gases para chaminé.

- Bombas de vácuo

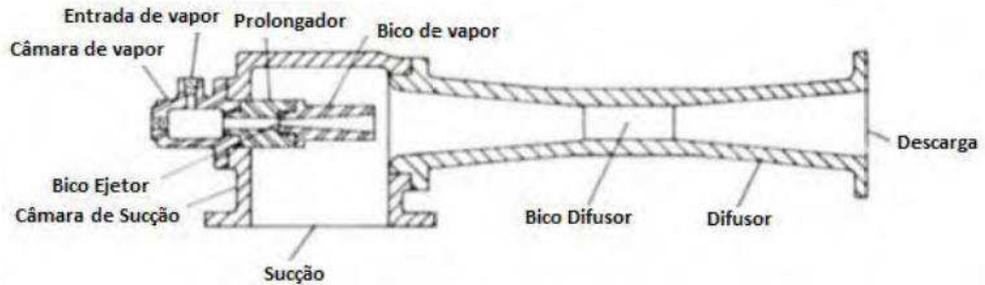
É denominado o aparelho destinado a remover todo o gás contido no aço líquido, capaz de baixar a pressão até o valor necessário. Um dos tipos de bomba de vácuo utilizada são os ejetores o qual abordaremos durante o estudo de caso (OLIVA, 2013).

- Ejetores

Componente composto por um injetor de vapor. Sua estrutura semelhante a uma ampola, apresenta um estreitamento no meio do seu corpo onde comprime a passagem do ar para aumentar a velocidade da mesma, está representado na figura 7. Este componente junto com uma injeção de ar atmosférico, é responsável por gerar o vácuo através da sucção (OLIVA, 2013).

Muitas das vezes preferem-se o uso de ejetores ao invés de bombas de vácuo por não apresentarem problemas com as poeiras geradas pelo processo (OLIVA, 2013).

Figura 7 – Montagem típica do ejetor

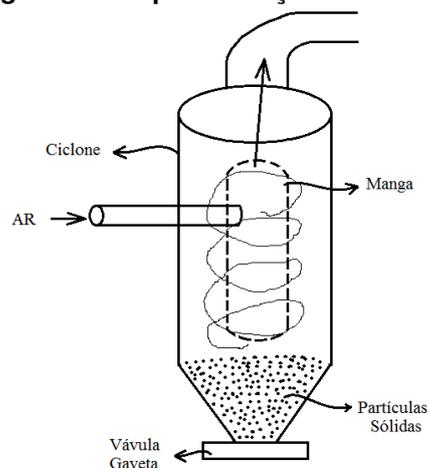


Fonte: (OLIVA, 2013)

- Ciclone (filtro)

Os gases contaminados são transferidos através dos dutos do tanque para os ciclones (filtro) que está representado na figura 8, onde ficam constantemente em movimentos circulares por conta do recipiente cilíndrico, onde as impurezas ficam na parte externas da manga (malha), e nas paredes do equipamento onde são decantadas por vibrações e eliminadas por meio de bags. Sendo assim, os ciclones são responsáveis por auxiliar na purificação dos gases (INFORMAÇÃO VERBAL⁶).

Figura 8 – Esquematização do ciclone



Fonte: Treinamento sobre desgaseificação

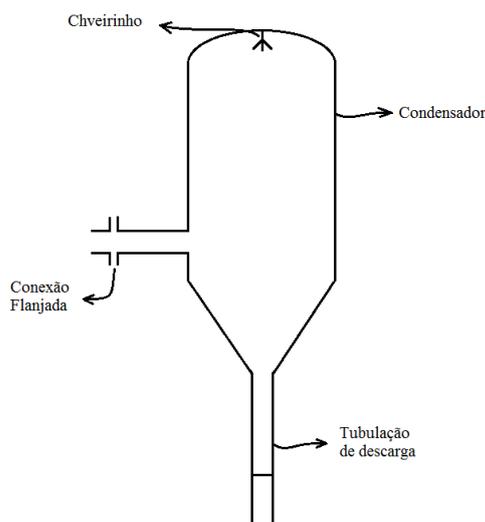
⁶ Informações obtidas em um treinamento fornecido pela Gerdau S.A. sobre desgaseificação a vácuo administrado por um engenheiro de manutenção.

- Condensador

O ar chega comprimido nos condensadores devido à alta pressão e temperatura sofrida ao longo do caminho, uma parte dele torna-se líquida que é descartada pela tubulação de descarga para o tanque de água. A outra parte ainda gasosa e quente que chega ao condensador, que está representado na figura 9, passa por pequenos chuveirinhos presentes dentro do mesmo, o que faz com que a temperatura caia rapidamente e condense novamente outra parte desse gás. Esse processo se repete mais uma vez, e novamente no final do sistema e o gás restante e purificado é eliminado na atmosfera (INFORMAÇÃO VERBAL⁷).

A tubulação de descarga do condensador deve suportar uma coluna de água de 10 metros, já que o final dessa tubulação fica no tanque de água (INFORMAÇÃO VERBAL⁷).

Figura 9 – Esquemática do condensador



Fonte: Treinamento sobre desgaseificação

- Válvulas

Todo o sistema de desgaseificação a vácuo é composto por válvulas que auxiliam na abertura da passagem do gás para a saída do tanque de vácuo e para o

⁷ Informações obtidas em um treinamento fornecido pela Gerdau S.A. sobre desgaseificação a vácuo administrado por um engenheiro de manutenção.

acesso dos equipamentos em cada fase do processo. Além disso temos válvulas de escape caso algum equipamento seja sobrecarregado (INFORMAÇÃO VERBAL⁸).

- Sistema de exaustão (Chaminé)

Os gases finais são transferidos através dos dutos até a chaminé, que tem como função principal a exaustão dos mesmos (INFORMAÇÃO VERBAL⁸).

⁸ Informações obtidas em um treinamento fornecido pela Gerdau S.A. sobre degaseificação a vácuo administrado por um engenheiro de manutenção.

3 METODOLOGIA

Metodologia é o campo em que se estuda os melhores métodos praticados em determinada área para a produção do conhecimento, ou seja, a metodologia apresenta diversos métodos na qual pode-se basear o desenvolvimento de uma pesquisa. Sendo assim, o método a ser utilizado neste TG (trabalho de graduação) será o estudo de caso.

3.1 Estudo de Caso

“ O estudo de caso é caracterizado pelo estudo profundo e exaustivo de um ou de poucos objetos, de maneira a permitir o seu conhecimento amplo e detalhado, tarefa praticamente impossível mediante os outros tipos de delineamentos considerados. ” (GIL, 2008, p. 58).

Ou seja, o estudo de caso é uma investigação sobre um assunto específico, onde procura-se informar suas principais características e a sua importância.

O estudo de caso tem alguns dos seguintes propósitos:

- Explorar situações da vida real cujos limites não estão claramente definidos (O QUE..., 2018);
- Descrever a situação do contexto em que está sendo feita determinada investigação (O QUE..., 2018);
- Explicar as variáveis causas de determinado fenômeno em situações muito complexas que não possibilitam a utilização de levantamentos e experimentos (O QUE..., 2018).

O estudo de caso pode ser dividido em três tipos:

- Exploratórios: é desenvolvida quando existe pouco conhecimento sobre um determinado problema ou assunto, obtendo assim familiaridade com o mesmo (MONOGRAFIA..., 2011);
- Descritivos: como o próprio nome diz, ela descreve o assunto em estudo assim como o seu comportamento. Este método é usado principalmente para

identificar, avaliar e descrever sobre as características de um determinado problema ou assunto (MONOGRAFIA..., 2011);

- Analíticos: amplia as conclusões do estudo de caso descritivo ao analisa e explicar por que ou como os fatos estão acontecendo, podendo construir ou desenvolver novas teorias que irão ser confrontadas com as teorias que já existiam, proporcionando avanços do conhecimento (MONOGRAFIA..., 2011).

Portanto, pode-se definir que este TG (trabalho de graduação) será voltado para um estudo de caso descritivo já que trabalharemos com teorias e experimentos obtidos por meio de livros e internet.

Os resultados adquiridos ao longo deste estudo de caso serão para comprovarmos a melhor qualidade de um aço que passa pelo processo de desgaseificação.

4 DESENVOLVIMENTO

O aço submetido ao processo de desgaseificação, que comumente foi citado nas pesquisas para o aprimoramento do estudo de caso, foi: Alto Manganês (SAE 1548). E o aço utilizado como comparativo foi um aço que não passou pelo processo, que seria um aço carbono SAE 12L14. Os mesmos têm como finalidade de utilização voltada para a área automotiva.

4.1 Amostras

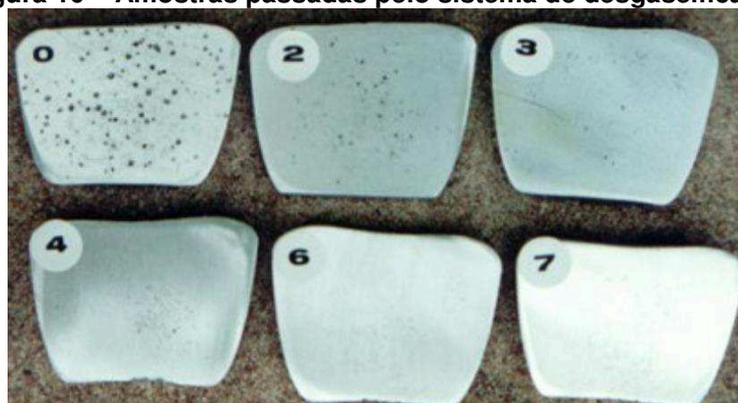
As amostras da fabricação do aço SAE 12L14 foi coletada da corrida por meio do manipulador e as amostras da fabricação do aço SAE 1548 foram coletadas manualmente para a realização dos testes químicos.

Sendo que o aço SAE 1548, aço carbono com alto teor de manganês, passou pelo processo de desgaseificação, enquanto o aço SAE 12L14, aço carbono resulfurado e refosforado de fácil usinagem, passou apenas pelo processo de fabricação comum.

4.1.1 Representação de corpo de prova

Após a solidificação do aço, retirou-se pequenas partes para uma análise mais profunda, notou-se que quanto maior o tempo em que o aço passa pelo processo de desgaseificação a vácuo, menores são as porosidades do material, assim tornando as diferenças de teores de hidrogênio visíveis, na figura 10 cada número sobre a imagem do respectivo corpo de prova representa a quantidade de tempo em minutos que o mesmo passou pelo processo.

Figura 10 – Amostras passadas pelo sistema de desgaseificação



Fonte: (FUOCO, 2016)

4.2 Composição Química

Por meio de pesquisas através da internet, e também com o auxílio do catálogo da Gerdau obteve-se a composição química do aço SAE 1548, tabela 3, que passou pelo sistema de desgaseificação e o aço SAE 12L14, tabela 4, que passou pelo processo normal de fabricação.

Tabela 3 – Composição química do aço SAE 1548.

SAE	C [%]	Mn [%]	P Max. [%]	S Max. [%]
1548	0,44 – 0,52	1,10 – 1,40	0,03	0,05

Fonte: Manual de aços, 2003 - Gerdau

Tabela 4 – Composição química do aço SAE 12L14.

SAE	C Max. [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Pb [%]
12L14	0,15	0,85 – 1,15	0,04 – 0,09	0,26 – 0,35	0,15 – 0,35

Fonte: Manual de aços, 2003 - Gerdau

4.3 Propriedades mecânicas

Por meio de pesquisas através da internet e com o auxílio do catálogo da Arcelor Mittal obteve-se as propriedades mecânicas do aço SAE 1548, tabela 5, que passou pelo sistema de desgaseificação e o aço SAE 12L14, tabela 6, que passou pelo processo normal de fabricação.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas do aço SAE 1548.

Procedimento	LR [MPa]	LE [MPa]	A (2'') [%]	Z [%]	HB
Laminado	660	370	14	33	197
Trefilado	730	620	10	28	217

Fonte: Guia do aço - ArcelorMittal

Tabela 6 – Propriedades mecânicas do aço SAE 12L14.

Procedimento	LR [MPa]	LE [MPa]	A (2'') [%]	Z [%]	HB
Laminado	390	230	22	45	121
Trefilado	540	410	10	35	163

Fonte: Guia do aço - ArcelorMittal

Conforme demonstrado nas tabelas 5 e 6 temos LR como limite de ruptura, LE como limite de escoamento, A (2'') como alongamento, Z como redução em área e HB como dureza Brinell.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir de todos os dados obtidos através deste estudo de caso, observou-se que:

- Composição Química:

Comparando-se as tabelas 3 e 4, observa-se que em sua composição química o aço SAE 1548 (desgaseificado a vácuo) demonstrou que possui uma maior quantidade de Carbono (C) e Manganês (Mn), e uma menor quantidade de Fósforo (P) e Enxofre (S) do que o aço SAE 12L14 (não desgaseificado a vácuo).

O aço passado pelo desgaseificador a vácuo mostrou-se uma maior eficiência em relação ao quesito de dureza e resistência mecânica do mesmo, tudo isso devido ao aumento do seu teor de Carbono (C) em sua composição química. Mas também, o Carbono demonstrou-se um tanto incompatível com a presença do Fósforo (P).

Também apresentou uma maior quantidade de Manganês (Mn) em sua composição química, que teve como resultado do aumento uma menor “fragilidade a quente” do aço, permitindo a conformação mecânica correta e uma maior maleabilidade do aço. Colaborando também com o aumento notável do ponto de fusão do material em questão.

Porém o material desgaseificado a vácuo demonstrou em sua composição menores quantidades de Fósforo (P), pois tal elemento denomina-se como uma impureza no aço em questão, e também as qualidades que o elemento apresenta (aumento a resistência a tração) são aproveitadas nas quantidades que restaram após o processo, nada além da quantidade indicada na tabela 3 é necessária.

O elemento químico Enxofre (S) demonstrou uma menor quantidade na composição do material processado, pois o mesmo presente em grande quantidade no material estudado pode comprometer determinadas propriedades mecânicas do aço, tais como resistência à tração, a ductilidade e a tenacidade.

- Propriedades Mecânicas:

Comparando-se as tabelas 5 e 6, o aço SAE 1548 (desgaseificado a vácuo) possui uma melhor performance em relação ao aço SAE 12L14 (não desgaseificado

a vácuo) nos ensaios de tração e dureza, demonstrando um maior limite de ruptura e um maior limite de escoamento.

Realizou-se dois ensaios para cada aço, pois o mesmo apresentava-se em dois procedimentos diferentes: laminado e trefilado.

Com base no aço desgaseificado a vácuo (SAE 1548), no procedimento em que o material é trefilado, demonstrou valores mais significativos do que o aço laminado. Pois devido ao posicionamento dos grãos apresenta melhores propriedades mecânicas.

Devido a sua maior resistência e menor ductilidade acabou apresentando nos testes uma menor redução de área e menor alongamento. Tendo em vista que é um material voltado para utilização de construção mecânica, sendo assim tais resultados são ótimos, tendo uma variação com a utilização do material.

6 CONCLUSÃO

Através de todo o estudo de caso observou-se que o processo de tratamento de desgaseificação a vácuo se mostrou eficiente, pois demonstrou resultados muito perceptíveis do que se esperava.

Os benefícios trazidos para o material por meio deste processo são totalmente voltados para sua construção mecânica e todo o seu aprimoramento mecânico, e não trazendo nada para a questão de estética do material. Dentre as melhorias notou-se uma grande diminuição de pontos de tensões na estrutura do material, com isso a redução de ocorrência de fraturas. Obteve-se também após a aplicação do processo uma grande melhora na resistência mecânica e na diminuição de sua fragilidade.

Por meio das análises realizadas nas amostras, pode-se observar que quanto maior o tempo em que o material permanece no processo de desgaseificação a vácuo melhores e mais eficientes são os resultados. Notou-se uma grande diminuição na porosidade, e impurezas do material.

Percebeu-se uma grande variedade na quantidade de maneiras de se realizar tal processo, porém a indústria em questão deve analisar qual melhor se adapta as suas necessidades e benefícios requeridos para o seu produto. Sendo este processo muito utilizado no meio automobilístico, pois requer uma maior exigência mecânica do material em questão.

Atualmente o processo descrito no estudo de caso não abrange em sua totalidade as siderúrgicas, porém futuramente pode vir a ser adotado pelas demais. Pois, este processo não precisa de uma implantação severa, onde necessita-se de mudanças rígidas, ele se adapta aos processos atuais das indústrias apenas acrescentando uma etapa. Podendo também atuar com quaisquer tipos de metais.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, LUIZ ANTONIO DE. **Manual de Siderurgia: Produção**. 1ª edição. São Paulo: Arte & Ciência, 1997. Volume 1, 470 p.

BREDA MOURÃO, MARCELO et al. **Introdução à Siderurgia**. 1ª edição. São Paulo: ABM, 2007. Volume 1, 428 p.

SILVA, ANDRÉ LUIZ DA COSTA E; MEI, PAULO ROBERTO. **Aços e ligas especiais**. 2ª edição. Sumaré, SP: ELETROMETAL S.A. Metais Especiais, 1988. Volume único, 512 p.

SILVA, ANDRÉ LUIZ DA COSTA E; MEI, PAULO ROBERTO. **Tecnologia dos aços**. 1ª edição. Sumaré, SP: Eletrometal: Universidade estadual de Campinas, 1981. Volume único, 380 p.

GIL, A. C. **Método e técnicas de pesquisa social**. 6ª. ed. São Paulo: Atlas S.A, 2008.

OLIVA, ROBSON VITOR. **Análise de viabilidade técnica-econômica na substituição de um sistema combinado de geração de vapor-vácuo por bombas secas**. Guaratinguetá, 2013. 85 p.

Desgaseificação do aço. (2009). Acesso em 10 de Março de 2017, disponível em Gardner Denver Nash Brasil Indústria e Comércio de Bombas Ltda.: http://www.gdnash.com.br/Newsletter/Desgaseificacao_a_vacuio.html

FERREIRA, LEANDRO. (2011). **Forno elétrico a arco (FEA)**. Fonte: Ebah: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAe9pAAK/forno-eletrico-a-arco>

SILAS, J. (s.d.). **Para que serve um manômetro?** Fonte: Brasil Escola: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/para-que-serve-um-manometro.htm>

CARDOSO, A.; CASSIMIRO, L. (s.d.). **Fornos elétricos industriais: fornos de indução e de arco elétrico**. SENAI. Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfI3sAC/fornos-eletricos-industriais?part=4>

Fuoco, R. (14 de 12 de 2016). **Importância do tratamento de desgaseificação na fundição de peças em ligas de alumínio**. Fonte: LinkedIn:
<https://www.linkedin.com/pulse/import%C3%A2ncia-do-tratamento-de-desgaseifica%C3%A7%C3%A3o-na-fundi%C3%A7%C3%A3o-fuoco/>

Monografia 3: tipos de pesquisa. (2011). Fonte: Educadmi:
<https://educadmi.wordpress.com/2011/09/02/monografia-3-tipos-de-pesquisa/>

O que é estudo de caso ? (2018). Fonte: Guia da Monografia:
<https://guiadamonografia.com.br/estudo-de-caso/>

Silva, A. L. (2011). **Capítulo 7 - Forno Elétrico a Arco**. Acesso em 23 de 09 de 2018, disponível em Equilibriumtrix:
https://www.equilibriumtrix.net/refino/capitulos_acs_refino/Capitulo%207%20fea%20rev%202%20com%20indice%2028072013.pdf

http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifpa/tecnico_metalurgica/siderurgia.pdf

<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfI3sAC/fornos-eletricos-industriais?part=4>

http://www.equilibriumtrix.net/refino/capitulos_acs_refino/Capitulo%207%20fea%20rev%202%20com%20indice%2028072013.pdf

<https://pt.linkedin.com/pulse/import%C3%A2ncia-do-tratamento-de-desgaseifica%C3%A7%C3%A3o-na-fundicao-fuoco>

http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo_acos_gerdau.pdf

<http://longos.arcelormittal.com/pdf/produtos/industria/guia-aco/catalogo-guia-aco.pdf>

<https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=5>