



# INVENTÁRIO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS NA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA

André Albuquerque Bittencourt de Oliveira

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Achilles Junqueira Bourdot Dutra

Rio de Janeiro

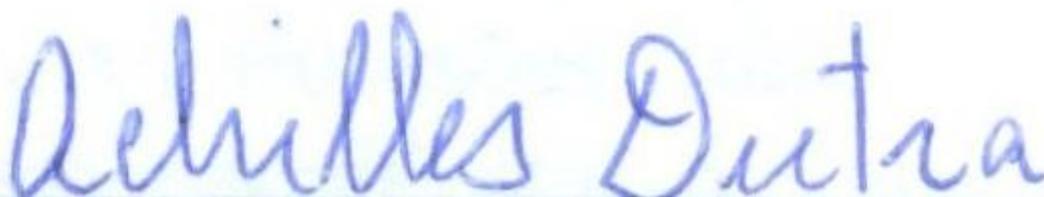
Fevereiro/2014

# INVENTÁRIO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS NA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA

André Albuquerque Bittencourt de Oliveira

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO  
DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA  
DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL  
DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
ENGENHEIRO METALÚRGICO.

Examinada por:



---

Prof. Achilles Junqueira Bourdot Dutra (Orientador)



---

Prof. Rupen Adamian



---

Prof. Renata Antoun Simão

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
Fevereiro de 2014

Oliveira, André Albuquerque Bittencourt  
Inventário das emissões atmosféricas na indústria  
siderúrgica/ André Albuquerque Bittencourt de Oliveira – Rio de  
Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2014.  
X, 85 p.: il.; 29,7 cm.  
Orientador: Achilles Junqueira Bourdot Dutra  
Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/  
Curso de Engenharia Metalúrgica, 2013.  
Referencias Bibliográficas: p. 82-85.  
1. Siderurgia 2.Emissões Atmosféricas. 3. Processos e  
emissões. 4. Controle Ambiental. 5. Tecnologias.  
I. Dutra, Achilles Junqueira Bourdot Dutra. II. Universidade  
Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia  
Metalúrgica. III. Inventário das emissões atmosféricas na indústria  
siderúrgica.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Metalúrgico.

## Inventário das Emissões Atmosféricas na Indústria Siderúrgica

André Albuquerque Bittencourt de Oliveira

Fevereiro/2014

Orientador: Achilles Junqueira Bourdot Dutra

Curso: Engenharia Metalúrgica

Apesar das medidas de prevenção e controle de poluição, a indústria siderúrgica é uma das grandes responsáveis pela poluição atmosférica em suas imediações. Muitos dos componentes presentes nos gases liberados pelos sistemas de exaustão desse tipo de indústria são considerados nocivos e prejudiciais, tanto ao meio ambiente quanto à comunidade próxima das áreas industriais. Neste trabalho foi feita uma breve descrição das principais unidades de uma usina siderúrgica integrada e se avaliou os tipos de emissões de cada uma destas unidades comparando com os limites estabelecidos pela legislação ambiental vigente (Resolução CONAMA N<sup>o</sup> 3 de 1990). O material particulado é um dos principais problemas associados à produção de ferro e aço; entretanto há uma carência de dados na literatura sobre tema. Assim, neste trabalho procurou-se abordar não só o problema do material particulado, mas também os problemas associados ao tamanho, forma e composição deste material. Foram abordados também os diferentes tipos de gases gerados durante o processo de fabricação

de aço, bem como seu efeito na saúde humana. Os processos de controle de emissões e, redução de poluentes foram também descritos e avaliados.

*Palavras-chave:* Siderurgia, Emissões atmosféricas, Processos e emissões, Controle ambiental e Tecnologias.

Summary of Graduation Project submitted to the polytechnic School / UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Metallurgical Engineer.

### Inventory of Air Emissions on Steel Industry Plants

André Albuquerque Bittencourt de Oliveira

February/2014

Advisor: Achilles Junqueira Bourdot Dutra

Course: Metallurgical Engineering

Despite the pollution control measurements, iron and steel industry is still one of the major responsible for atmospheric pollution in their neighborhood. Many of the components present in the gases emitted by the exhausting systems of this type of industry are noxious and hazardous to both men and environment, near these industries. In this work, a brief description of the major units of an integrated steel plant along with an evaluation of the amount and type of emissions of these units was carried out and compared with the current local legislation (Resolution CONAMA Nº 3 de 1990). Particulated matter (PM) is one of the main problems associated to iron and steel making, nevertheless there is a lack of data in the literature on this subject. Then, in this work, the issue of particulate matter and the problems associated with size, shape and composition of this material was considered. The composition of the different gases connected to steel making together with its effect on human health was addressed. The main process normally used to control emissions and pollution abatement were also described and evaluated.

Keywords: Steel, Atmospheric emissions, Process and emissions, Technologies and Environmental Control.

## SUMÁRIO

1	Introdução.....	10
2	Metodologia.....	12
3	Siderúrgicas Integradas .....	13
3.1	Produção de Aço.....	14
3.2	Comparativo: Conversor LD e Forno elétrico a arco .....	17
4	Emissão Atmosférica .....	19
4.1	Óxidos de carbono .....	20
4.2	Dióxido de Enxofre.....	21
4.3	Óxidos de Nitrogênio .....	22
4.4	Material Particulado.....	22
4.5	Compostos Orgânicos .....	27
4.6	Dioxinas e Furanos .....	28
5	Processos e Emissões.....	30
5.1	Coqueria .....	30
5.2	Sinterização .....	34
5.3	Pelotização.....	41
5.4	Alto-Forno .....	43
5.5	Aciaria .....	53
6	Controle Ambiental.....	58
6.1	CONAMA .....	58
6.2	Organização Mundial da Saúde (OMS) .....	63
7	Tecnologias de Recuperação .....	66
7.1	Coletores Mecânicos .....	66
7.2	Filtros Eletrostáticos .....	67

7.3	Filtros de Mangas .....	68
7.4	Lavadores .....	69
7.5	Desulfurização dos gases .....	71
7.5.1	Processo úmido com água do mar .....	71
7.5.2	Processo semi-seco com cal .....	72
7.5.3	Processo úmido com calcário .....	73
7.5.4	Processo seco com cal hidratada .....	73
7.6	Redução Catalítica Seletiva.....	74
7.7	Controle Tecnológico por Tipo de Planta .....	75
8	Discussão.....	77
9	Conclusões .....	82
10	Referências Bibliográficas.....	83

## Lista de Figuras

Figura 1 - Fluxograma da Usina (Arcelor, 2008). .....	13
Figura 2 - Impactos ambientais por rotas alternativas na produção de aço (IISI, 2002). 18	
Figura 3 - CSN: Emissão de CO <sub>2</sub> por tonelada de aço líquido produzido (Ricardo, D. C, 2004). .....	20
Figura 4 - Emissão de SO <sub>2</sub> da Coqueria (Conama, 2004).....	22
Figura 5 – Periculosidade de Emissão de Material Particulado (UNEP/WHO, 1994)... 25	
Figura 6- Hidrocarbonetos policíclicos Aromáticos (WHO, 1983).....	27
Figura 7 - CSN: Emissão de Benzeno (Ricardo, D. C, 2004). .....	28
Figura 8 - Estrutura da dioxina e do furano (POP's, 2013).....	29
Figura 9 - Foto da Coqueria CST .....	30
Figura 10 – Coqueria CST: Concentração de PM <sub>10</sub> em mg/Nm <sup>3</sup> (Instituto do Aço, 2010). .....	33
Figura 11 - Fluxograma de sinterização (Freitas, 2012) .....	35
Figura 12 - Processo de formação do sinter (ABM, 2003). .....	36
Figura 13 - Corte longitudinal de uma máquina de sinterização (ABM, 2003).....	38
Figura 14- Tecnometal: Foto de Disco de Pelotamento.....	42
Figura 15 – Emissão de Material Particulado Médio Emitido pela Pelotização (CONAMA, 2004). .....	43
Figura 16 - Representação do alto-forno (Rizzo, 2005).....	44
Figura 17 – Zona Granular de um Alto-Forno (ABM, 2003). .....	47
Figura 18 – Esquematização de uma Ventaneira Acoplada ao Anel de Vento (ABM, 2003). .....	49
Figura 19 - Conversor LD (ABM, 2003). .....	54
Figura 20 - Processo de funcionamento do Conversor LD (ABM, 2003). .....	55
Figura 21 - CSN: Emissão de Material Particulado em Kg/t de Aço Produzido (Ricardo, D. C. (2004)).....	56
Figura 22 - Funcionamento de Ciclone - Coletor mecânico (Enfil Catálogo, 2000).....	66
Figura 23 – Esquema de funcionamento de Filtros eletrostáticos (Enfil Catálogo, 2000). .....	67
Figura 24 - Funcionamento de Filtro de Manga (Enfil Catálogo, 2000). .....	68

Figura 25 - Funcionamento de lavadores (Enfil Catálogo, 2000). .....	70
Figura 26 - Desulfurização de gás por processo úmido (Enfil Catálogo, 2000). .....	72
Figura 27 - Dessulfurização de gás por processo semi-seco com cal (Enfil Catálogo, 2000). .....	72
Figura 28 - Dessulfurização de gás por processo úmido com calcário (Enfil Catálogo, 2000). .....	73
Figura 29 - Dessulfurização de gás por processo seco com cal hidratada (Enfil Catálogo, 2000) .....	74
Figura 30 - Processo de Redução Catalítica seletiva (Enfil Catálogo, 2000).....	75
Figura 31 - CSA: Rotas Alternativas Gusa-Líquido (Chauvet, 2013).....	78
Figura 32 - CSA: Emissão de PM <sub>10</sub> (Chauvet, 2013).....	79
Figura 33 - CSA: Emissão de PM <sub>10</sub> após início de operação da usina (Chauvet, 2013). 80	
Lista de Tabelas	
Tabela I - Produção de aço Mundial (Instituto do Aço, 2010).....	14
Tabela II - Produção de aço Bruto da América Latina (Instituto do Aço, 2010). .....	15
Tabela III - Produção de aço bruto por empresa (Instituto do Aço, 2010). .....	16
Tabela IV - Relação entre tipos de usina por tipo de produto (Instituto do Aço, 2010). 17	
Tabela V - Classificação de Poluentes Atmosféricos .....	19
Tabela VI - Emissão de poluentes na indústria siderúrgica (STAPPA, 2006).....	20
Tabela VII – Emissão de tonelada de CO <sub>2</sub> por tonelada de combustível consumido (IPCC, 2006).....	21
Tabela VIII – Correlação da emissão de CO <sub>2</sub> por tonelada de produto produzido (IPCC 2006). .....	21
Tabela IX – Classificação de Material Particulado (Almeida, 1999).....	24
Tabela X - Composição do culado proveniente da sinterização e da coqueria (Science Direct, 2006).....	26
Tabela XI - Emissão de dioxinas e furanos (POP's, 2013).....	29
Tabela XII – Tipos de carvão (Silva, 2008). .....	31
Tabela XIII – Emissões da coqueria (CONAMA, 2004).....	33
Tabela XIV – Coqueria: distribuição granulométrica da emissão de particulado – valor médio de 15 unidades distribuídas pelos EUA. (EPA, 2005).....	34
Tabela XV – Emissões da Sinterização (CONAMA, 2004). .....	40
Tabela XVI - Sinterização: Distribuição granulométrica do material particulado (EPA, 2005) .....	40
Tabela XVII - Emissões da Pelotização (CONAMA, 2004).....	42
Tabela XVIII – Composição típica do ferro-gusa (ABM, 2003) .....	50
Tabela XIX – Emissões do alto-forno (CONAMA, 2004). .....	51
Tabela XX – Alto- forno: distribuição granulométrica da emissão de material particulado (EPA, 2005).....	52
Tabela XXI - Distribuição granulométrica do gás de alto-forno (Batista, 2009).....	52
Tabela XXII – Ciclo do conversor LD (ABM, 2003).....	55
Tabela XXIII – Emissões do Conversor LD (CONAMA, 2004).....	56
Tabela XXIV – Conversor LD: distribuição granulométrica da emissão de particulados (EPA, 2005).....	57

Tabela XXV - Composição química da lama da aciaria (Marcos, 2011) .....	58
Tabela XXVI - Resolução CONAMA 003 de 1990 (Magalhães, 2005) .....	61
Tabela XXVII - Limites de emissão de poluentes atmosféricos na siderurgia (CONAMA, 2006).....	62
Tabela XXVIII - Diretrizes de qualidade do ar (Chauvet, 2013). .....	63
Tabela XXIX - Ação dos poluentes no meio ambiente (CETESB 2010). .....	64
Tabela XXX - Ação dos poluentes na saúde humana (CETESB 2010). .....	65
Tabela XXXI - Comparação qualitativa de separadores de particulados (Lora, 2002). .	71
Tabela XXXII - Tecnologia de redução de emissão na siderurgia (Instituto do Aço, 2010). .....	76
Tabela XXXIII - Tecnologias de Captação de Material Particulado (CETESB, 1997). 77	
Tabela XXXIV - - Investimento para redução de emissões (Instituto do Aço, 2010)....	81

## 1 Introdução

O crescimento populacional vem proporcionando uma maior demanda no consumo de matérias primas como, por exemplo, o aço, que pode ser encontrado em construções na forma de vergalhões, barras e para indústria automobilística funciona como sendo uma commodity, pois é utilizado em grande escala. Conforme a tendência da produção aumente com o tempo, existe a necessidade de discutir as implicações associadas à fabricação desse material.

A produção de aço tem como consequência emissão de resíduos, sejam essas emissões sólidas, líquidas ou gasosas. As fugacidades do material particulado presente nas emissões atmosféricas dessa indústria afetam a população que se encontra em regiões próximas. É o caso da Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST) e da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), onde a população foi crescendo com o passar dos tempos e foi se aproximando da área ocupada por esta indústria. Portanto, ao modificar a composição do ar nas adjacências da usina, conseqüentemente prejudicam o sistema respiratório da população, comprometendo assim a sua saúde. Portanto existe a necessidade de controlar esse tipo de problema.

A par desse problema, existe um controle rígido feito por órgãos ambientais, como por exemplo, o CONAMA, que estabelece um limite para emissão de substância levando em consideração a sua periculosidade.

O objetivo deste trabalho vai ser avaliar e quantificar as emissões atmosféricas de cada processo utilizado nas usinas siderúrgicas integradas, como também fazer um levantamento sobre prevenção e tratamento, averiguando propostas que sejam novas para o assunto em questão.

Na indústria siderúrgica é possível subdividir as emissões em duas categorias diferentes (Bohn R, 1978), são elas: emissões fugitivas de processos (*Process fugitive emissions*) e emissões fugitivas de poeira aberta (*Open dust Source of fugitive emissions*).

- *Process Fugitive Emissions*: Incluem partículas que não foram capturadas e gases gerados por processos como os que ocorrem no alto-forno, sinterização, coqueificação, Forno elétrico a arco, e equipamentos de laminação e purificação.
- *Open Dust Source of Fugitive Emissions*: São as partículas fugitivas que se encontram em pilhas de estoques que são influenciadas pela ação da natureza, como por exemplo, o vento que sopra as partículas menores para longe da pilha de estoque.

Então a primeira coisa a se fazer é identificar os tipos de emissão e analisar cada uma delas. E a partir daí avaliar, dentro de cada um dos processos, a possibilidade de recuperar ou minimizar as perdas.

A fonte de emissão de material particulado emitido por qualquer uma dessas categorias consiste primariamente no estudo do tipo de partículas e na emissão de gases associada em diferentes operações que serão abordadas no capítulo 4 de emissões atmosféricas.

Processo usual para avaliar os tipos emissões seria a seguinte:

- **Identificação da fonte**: A importante tarefa de coletar a informação e analisar os dados é capaz de identificar e fazer uma triagem de todas as fontes capazes de gerar emissões atmosféricas dentro de uma usina siderúrgica integrada ou semi-integrada.
- **Quantificação das emissões**: Utilização de técnicas que estimam a quantidade de emissões em cada fonte de acordo com a pré-determinação do CONAMA.
- **Análise de recuperação**: Dependendo da fonte de emissão, verificar a possibilidade de minimizar as perdas pelo melhoramento no sistema de retenção/captura das emissões.

De um modo geral, precisa-se compreender que uma grande quantidade de poluente na atmosfera afeta tanto o meio ambiente quanto a comunidades em geral. Portanto, dados como a quantidade de material particulado produzidas por uma usina siderúrgica integrada por tonelada de aço produzida são muito relevantes (World Bank Group, 1998).

- Planta de sinterização: uma planta de sinterização emite um elevado grau de poeira durante o seu funcionamento, que pode chegar a quantidades por volta de 20kg/t de aço.
- Planta de pelotização: particulados, em torno de 15 kg/t de aço.
- Alto-Forno: temos particulados que variam de 10 kg/t até 40 kg/t de aço.

- Forno Elétrico: os particulados nesse caso variam de 15 kg/t até 30 kg/t de aço.

Esses valores são referentes à parte do problema, pois como foi citado anteriormente ainda temos outros tipos de emissões além das poeiras, e cada processo requer um tipo de controle e prevenção específico dos poluentes.

Depois de decifrado o tipo de problema de cada setor dentro da indústria siderúrgica integrada, pode-se avaliar a possibilidade de utilização dessas técnicas que tendem a reduzir os impactos ambientais. Processos e técnicas serão discutidos posteriormente de modo mais detalhado.

Esse estudo tem como objetivo avaliar as fontes de emissões atmosféricas, analisar o tipo de poluente atmosférico, averiguar a sua composição e a distribuição granulométrica do material particulado e quantificar sempre que possível essas emissões. O foco será com relação as etapas que compreendem a planta de sinterização, coqueria, alto-forno e aciaria a oxigênio, além de apresentar tecnologias e métodos existentes para reduzir essas emissões.

## **2 Metodologia**

A metodologia empregada para o desenvolvimento deste trabalho envolve pesquisas bibliográficas disponíveis que descrevam as etapas para a produção de aço, a poluição do meio ambiente e a qualidade do ar, além de práticas de gestão e legislação ambiental. A pesquisa bibliográfica é realizada a partir de material científico disponibilizado através de livros, artigos e documentos.

Além de apresentar regulamentações feitas por órgãos ambientais tanto na esfera estadual quanto federal, através de publicações feitas dos mesmos. Disponibilizar os instrumentos de gestão e como ocorre na prática o efetivo controle realizado por esses órgãos. Ainda na conclusão é abordado um estudo sobre a Companhia Siderúrgica do Atlântico que teve de arcar com imposições feitas pelo controle ambiental, tendo grandes repercussões ao longo de seu funcionamento.

Ao longo dos capítulos é realizada uma abordagem política e econômica que aponta e discute questões relevantes sobre eventos de poluição do ar e são expostas tecnologias de contenção de emissões com o intuito de atender os órgãos responsáveis pela fiscalização ambiental.

A dissertação é composta por dez capítulos. Enquanto o primeiro é uma introdução este capítulo aborda a metodologia empregada. O terceiro capítulo apresenta um quadro geral sobre o setor da siderurgia mostrando a produção de aço no Brasil e no mundo. O quarto capítulo fala sobre os tipos de poluição atmosférica, dando ênfase nas siderurgias e nos locais ao seu redor. O quinto capítulo informa sobre os processos decorrentes das

usinas siderúrgicas e a quantidade emitida por cada etapa durante a produção de aço. Sexto capítulo remete instrumentos de gestão ambiental e a legislação vigentes no Brasil. Sétimo capítulo refere-se às tecnologias empregadas atualmente para a contenção das emissões atmosféricas apresentadas. Enquanto que o oitavo capítulo inclui uma discussão referente aos problemas enfrentados pela Indústria Siderúrgica Nacional. O nono constitui a conclusão, enquanto o décimo apresenta a bibliografia.

### 3 Siderúrgicas Integradas

De modo geral as emissões dentro das usinas siderúrgicas estão relacionadas com as etapas dos processos envolvidos para a formação do ferro gusa, e posteriormente a produção de aço. Em algumas etapas da produção, casos como o do alto-forno e o da coqueria os gases emitidos são reutilizados como fontes de energia alternativa, pela sua queima, devido ao fato de possuírem um elevado grau de poder calorífico.

Cada etapa até a produção do aço gera emissões atmosféricas de material particulado com composições e granulometrias diversas. As mais estudadas são: Forno elétrico a arco, veículos automotivos dentro das plantas siderúrgicas, LD, pilhas de minério e a sinterização.

A figura 1 apresenta o fluxograma usina Monlevade da ArcelorMittal fundada em 1935, localizada em Minas Gerais. Possui capacidade instalada de 1.200.000 t/ano de fio máquina para aplicações industriais. (ARCELORMITTAL MONLEVADE, 2008).

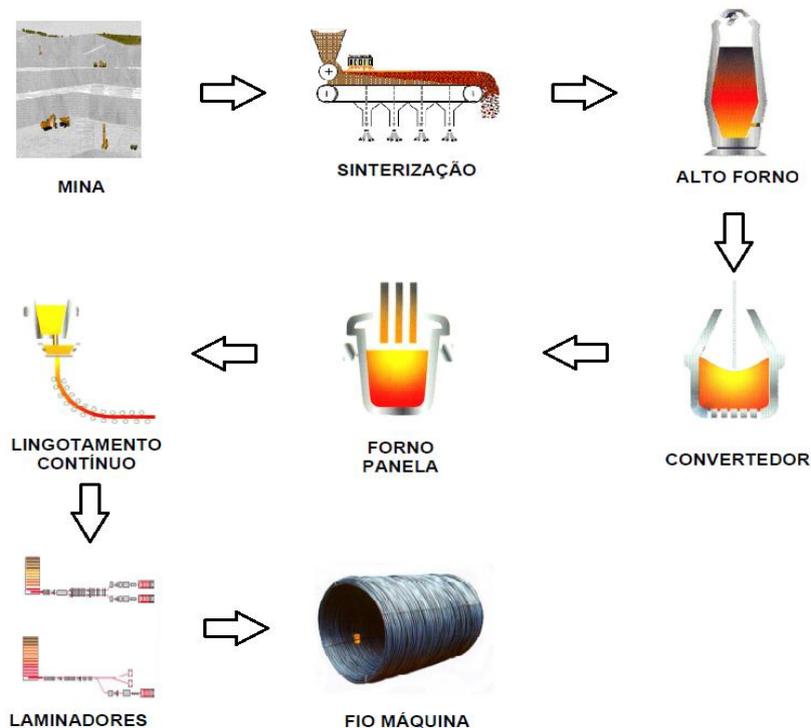


Figura 1 - Fluxograma da Usina (Arcelor, 2008).

### 3.1 Produção de Aço

A produção de aço mundial vem crescendo nos últimos anos e atingindo um nível de estabilidade nos períodos atuais, esse mesmo perfil é encontrado na produção brasileira de aço, conforme mostra a tabela I. Lembrando que a tendência para o futuro é de que a produção de aço eleve-se, devido ao aumento populacional e à crescente demanda do mercado para atender essa nova população.

Tabela I - Produção de aço Mundial (Instituto do Aço, 2010).

Unid.: 10<sup>6</sup> t

Produção de Aço Bruto	2000	2005	2006	2007	2008	2009
Mundial - (A)	848,9	1.144,3	1.246,9	1.351,53	1.329,1	1.223,7
América Latina - (B)	56,1	62,9	62,7	67,2	65,7	53,0
Brasil - (C)	27,9	31,6	30,9	33,8	33,7	26,5
C/A (%)	3,3	2,8	2,5	2,5	2,5	2,2
C/B (%)	49,7	50,2	49,3	50,3	51,3	50,0
Posição Relativa do Brasil no Mundo	8º	9º	10º	9º	9º	9º

Fonte: WSA/ILAFA/IABr

Atualmente o Brasil produz 2,2% do aço mundial, além de se encontrar no topo da produção com relação à América Latina, conforme indica a tabela II.

Tabela II - Produção de aço Bruto da América Latina (Instituto do Aço, 2010).

País	Unid.: 10 <sup>3</sup> t					
	2000	2005	2006	2007	2008	2009
Brasil	27.865	31.610	30.901	33.782	33.716	26.506
México	15.631	16.195	16.313	17.563	17.230	14.257
Argentina	4.479	5.380	5.572	5.387	5.543	4.014
Venezuela	3.835	4.907	4.693	5.005	4.225	3.808
Chile	1.352	1.540	1.607	1.679	1.523	1.308
Colômbia	660	1.007	1.211	1.245	1.053	1.053
Peru	751	790	901	881	1.001	718
Trinidad e Tobago	742	712	673	695	489	417
América Central	246	255	364	422	321	275
Cuba	336	245	257	268	279	267
Equador	58	82	86	87	259	259
Uruguai	38	64	57	71	57	57
Paraguai	77	101	103	95	59	54
<b>Total</b>	<b>56.070</b>	<b>62.888</b>	<b>62.738</b>	<b>67.180</b>	<b>65.755</b>	<b>52.993</b>

Fonte: WSA/ILAFA/IABr

A produção no país encontra-se distribuída da seguinte forma, com relação aos estados que mais contribuem: Minas Gerais (33%), Rio de Janeiro (22%), Espírito Santo (21%) e São Paulo (18%).

A contribuição de cada estado cresce com relação a produção de aço e as empresas que mais colaboram são: ArcelorMittal, CSN, GERDAU, SINOBRAS, USIMINAS, V&M do Brasil, Villares Metais e Votorantim Siderurgia. A tabela III apresenta a relação de cada uma dessas siderúrgicas e a quantidade de aço produzida ao longo da primeira década do ano 2000 (Instituto Aço Brasil, 2010).

Tabela III - Produção de aço bruto por empresa (Instituto do Aço, 2010).

Empresa	Unid: 10 <sup>4</sup> t					
	2000	2005	2006	2007	2008	2009
ArcelorMittal Aços Longos	2.571	3.272	3.569	3.739	3.502	3.171
ArcelorMittal Inox Brasil	856	753	810	797	770	607
ArcelorMittal Tubarão	4.752	4.850	5.136	5.692	6.177	5.334
CSN	4.782	5.201	3.499	5.323	4.985	4.375
Gerdau	6.681	7.569	7.698	8.111	8.711	6.105
Sinobras	-	-	-	-	42	181
Grupo Usiminas	7.184	8.661	8.770	8.675	8.022	5.673
V&M do Brasil	519	592	659	686	655	387
Villares Metals	95	133	122	135	140	92
Votorantim Siderurgia	393	579	638	624	712	617
<b>TOTAL</b>	<b>27.833</b>	<b>31.610</b>	<b>30.901</b>	<b>33.782</b>	<b>33.716</b>	<b>26.542</b>

Fonte: IABr

Ao total em 2009 a produção de aço bruto chegou a 26,5 milhões de toneladas. Lembrando que no ano de 2009 houve uma crise financeira mundial, reduzindo a produção mundial de aço.

Para esse trabalho os estudos das emissões e a aplicação das tecnologias para reduzir o impacto ambiental serão referentes às usinas integradas. Devido ao fato de que a emissão de poluentes é superior as não integradas, portanto terá um enfoque de maior relevância para o trabalho.

Conforme a tabela IV pode-se observar que o tipo de usina foi ordenado de modo a explicitar quais delas são integradas e quais são semi-integradas.

Tabela IV - Relação entre tipos de usina por tipo de produto (Instituto do Aço, 2010).

Tipo	Produto	Usinas Siderúrgicas
USINAS INTEGRADAS	LAMINADOS PLANOS	ArcelorMittal Inox Brasil (Timóteo/MG), ArcelorMittal Tubarão (Serra /ES), CSN (Volta Redonda /RJ), Grupo Usiminas (Ipatinga /MG e Cubatão /SP), ThyssenKrupp CSA Siderúrgica do Atlântico (Rio de Janeiro/RJ)
	LAMINADOS LONGOS	ArcelorMittal Aços Longos (Monlevado/MG), Gerdau Açominas (Ouro Branco/MG), Gerdau Aços Longos (Barão de Cocais/MG, Divinópolis/MG, Usiba/BA), V&M do Brasil (Belo Horizonte /MG), Siderúrgica Norte Brasil S. A. - Sinobras (Marabá/PA)
USINAS SEMI-INTEGRADAS	LAMINADOS LONGOS	Aços Villares (Pindamonhangaba/SP, Mogi das Cruzes/SP), Votorantim Metais (Barra Mansa /RJ), ArcelorMittal Aços Longos (Piracicaba/SP, Cariacica/ES, Juiz de Fora/MG), Gerdau Aços Longos (Açonorte/PE, Coarense/CE, Cosígua/RJ, Guaira/PR, São Paulo/SP, Riograndense/RS), Gerdau Aços Especiais (Piratini/RS), Villares Metals (SP)

Fonte: IABr

### 3.2 Comparativo: Conversor LD e Forno elétrico a arco

Observando as rotas que utilizamos para a produção do aço, onde de um lado temos o processamento do minério de ferro e do outro lado, o reaproveitamento de uma sucata, já seria um grande feito benéfico, para o meio ambiente, se utilizássemos a segunda possibilidade. Devido ao fato de que resultaria em menor dispêndio de energia para se obter um mesmo produto, e também seria menor o impacto ambiental devido a eliminação da necessidade de se ter uma planta de coqueificação, considerada como a maior vilã em termos de responsabilidade ambiental.

Entre as emissões de partículas poluentes destacam-se a emissão de CO<sub>2</sub> e outros gases com efeito de estufa. Neste caso, a produção de 1 kg de aço em forno de arco elétrico produz cerca de 460 gramas de equivalentes de CO<sub>2</sub>, enquanto que pela rota do alto-forno a produção de igual quantidade de aço após a aciaria é cerca de 2490 gramas de equivalentes de CO<sub>2</sub>.

Existe também a relação de eficiência energética na produção de aço através de cada rota, enquanto que pela utilização do alto-forno temos o consumo de aproximadamente 30 GJ, tem-se para o forno elétrico o consumo em torno de 10 GJ.

Lembrando que no caso do alto-forno, geralmente os gases produzidos no topo são reutilizados em forma de energia devido ao fato de possuírem poder calorífico elevado.

A figura 2 compara, em termos percentuais, impactos ambientais gerados por cada um dos processos.

Esses impactos não correspondem apenas às emissões atmosféricas; pode-se averiguar que dentre todos os impactos avaliados, a maioria é relacionada de um modo geral as modificações causadas no ar.

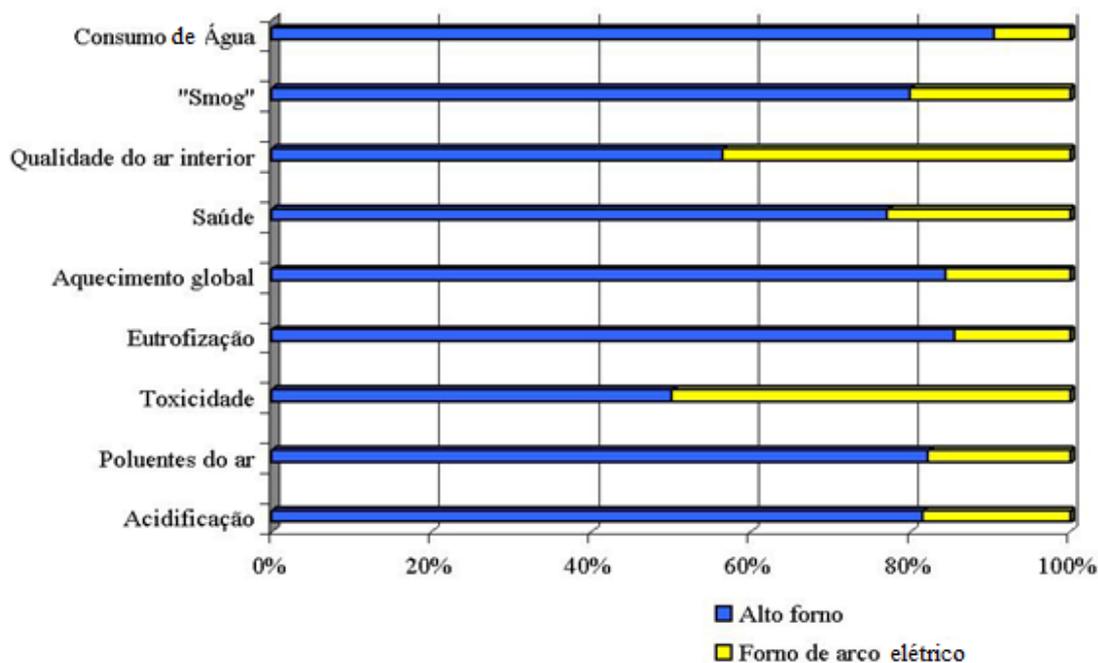


Figura 2 - Impactos ambientais por rotas alternativas na produção de aço (IISI, 2002).

De acordo com o gráfico pode-se averiguar que os impactos ambientais causados pela rota do alto-forno são mais elevados e causam mais danos à saúde dos que os do forno elétrico a arco.

Dentre todos esses impactos os fatores mais relevantes para esse trabalho são a qualidade do ar, poluentes do ar, toxicidade e saúde.

A fumaça projetada no topo de um alto-forno possui altos teores de CO<sub>2</sub> além de gases com efeito de estufa em uma quantidade muito superior do que a emitida por um forno elétrico a arco. Os poluentes presentes no ar são responsáveis pela degradação da saúde da população ao redor. Estes geram doenças de cunho respiratório geralmente, sendo absorvidos pelos pulmões ou, dependendo do caso, pela própria pele, caso a granulometria do particulado presente no ar esteja abaixo de cinco micrometros de diâmetro.

Além de provocar menores impactos com relação ao meio ambiente e ter menor consumo de energia na produção do aço, o forno elétrico a arco tem outra característica positiva bem relevante. É interessante ressaltar que para cada tonelada de aço reciclado

através dessa rota são poupados em torno de 1.25 toneladas de minério de ferro, 630 kg de carvão e 54 kg de calcário.

#### 4 Emissão Atmosférica

As emissões atmosféricas mais importantes provenientes das unidades operacionais da indústria siderúrgica são: material particulado (MP), óxidos de nitrogênio (NO, NO<sub>2</sub>), óxidos de enxofre (SO, SO<sub>2</sub>), óxidos de carbono (CO, CO<sub>2</sub>), metais pesados, compostos orgânicos voláteis, compostos acíclicos aromáticos, dioxinas e furanos, entre outros (Almeida, 1999). A tabela V a seguir contém maiores informações sobre poluentes (Assunção, 1998).

Tabela V - Classificação de Poluentes Atmosféricos

POLUENTES ATMOSFÉRICOS	
CLASSIFICAÇÃO	EXEMPLOS
MATERIAL PARTICULADO	POEIRAS, FUMOS, FUMAÇA, NÉVOAS
GASES E VAPORES	CO, CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> HC, NH <sub>3</sub> , CLORO, H <sub>2</sub> S
POLUENTES PRIMÁRIOS	CO, SO <sub>2</sub> , CLORO, NH <sub>3</sub> H <sub>2</sub> S, CH <sub>4</sub> , MERCAPTANAS.
POLUENTES SECUNDÁRIOS	O <sub>3</sub> , ALDEÍDOS, SULFATOS ÁCIDOS E NITRATOS ORGÂNICOS
POLUENTES ORGÂNICOS	HC, ALDEÍDOS, PARTÍCULAS ORGÂNICAS ÁCIDOS E NITRATOS ORGÂNICOS
POLUENTES INORGÂNICOS	CO, CO <sub>2</sub> , CLORO, NO <sub>x</sub> , POEIRA MINERAL NÉVOA ÁCIDAS E ALCALINAS
COMPOSTOS DE ENXOFRE	SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S, SULFATOS
COMPOSTOS NITROGENADOS	NO, NO <sub>2</sub> , HNO <sub>3</sub> , NH <sub>3</sub> , NITRATOS
COMPOSTOS ORGÂNICOS	HC, ALDEÍDOS, ÁLCOOIS
COMPOSTOS HALOGENADOS	HCL, HF, CFC, CLORETOS, SULFETOS
ÓXIDOS DE CARBONO	CO, CO <sub>2</sub>

Esse estudo tem como foco os poluentes apresentados como material particulado, óxidos de carbono, enxofre e nitrogênio citados na tabela, pois são produzidos em grandes quantidades pela indústria siderúrgica.

Em termos de quantidade de material emitido pelas diversas plantas da indústria siderúrgica como coqueria, sinterização, alto-forno e conversor LD temos, para o ano de 1999, os seguintes valores para as siderúrgicas dos EUA obtidos na tabela VI a seguir.

Tabela VI - Emissão de poluentes na indústria siderúrgica (STAPPA, 2006).

Emissão de Poluentes da indústria siderúrgica			
Tipo de Emissão	PM <sub>2,5</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
Quantidade Produzida	44,922	89,305	97,977

\* Tonelada de poluente emitido

#### 4.1 Óxidos de carbono

A emissão de gases do tipo CO e CO<sub>2</sub> são provenientes da queima de combustíveis fósseis, processos de combustão e entre outros. Dentro da siderurgia essa emissão pode ser encontrada em várias plantas, como por exemplo, no alto-forno através da queima do coque que é o combustível presente. A técnica analítica para quantificar esse composto é o infravermelho.

De todas as emissões produzidas por essa indústria, a emitida em maior quantidade é o dióxido de carbono que é um dos responsáveis pelo efeito estufa e, por consequência, o aquecimento global.

É interessante saber a correlação entre a produção de aço e a quantidade de emissões referentes a essa mesma atividade. A figura 3 apresenta alguns desses valores para a CSN.

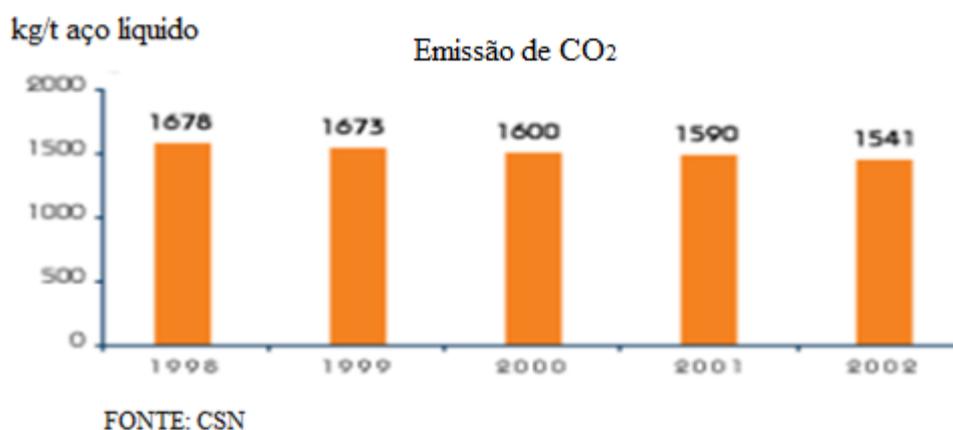


Figura 3 - CSN: Emissão de CO<sub>2</sub> por tonelada de aço líquido produzido (Ricardo, D. C, 2004).

As emissões emitidas pela utilização dos combustíveis provoca grandes preocupações com relação a quantidade de dióxido de carbono liberada. A tabela VII representa o fator de emissão de tonelada de CO<sub>2</sub> por tonelada de combustível (CETESB, 2010).

Tabela VII – Emissão de tonelada de CO<sub>2</sub> por tonelada de combustível consumido (IPCC, 2006).

Fator de emissão de CO <sub>2</sub>	
Tipo de combustível	Fator emissão (t CO <sub>2</sub> /t)
Gás Natural	2,61934
Carvão metalúrgico	2,63087
Gás de coqueria	1,91806
Coque de carvão mineral	2,72114
Gás do forno de coque	1,65789
Gás de alto-forno	0,58855

A tabela VIII representa a tonelada de CO<sub>2</sub> emitida durante a produção de ferro gusa pelo alto-forno e a produção de aço seja pelo conversor LD ou por forno elétrico a arco das plantas contidas dentro de uma usina siderúrgica (IPCC, 2006).

Tabela VIII – Correlação da emissão de CO<sub>2</sub> por tonelada de produto produzido (IPCC 2006).

Fator de emissão de CO <sub>2</sub>	
Tipo de Atividade	Fator emissão (t CO <sub>2</sub> /t)
Alto-forno	1,35
BOF	1,46
Forno Elétrico a Arco	0,08
Open Hearth Furnace (Siemens)	1,72
Sinterização	0,2
Coqueria	0,56

## 4.2 Dióxido de Enxofre

Esse composto é formado geralmente, a partir de processos industriais onde existe queima de combustíveis fósseis que possua enxofre em sua composição. Dependendo da quantidade de SO<sub>2</sub> presente na atmosfera, este reage com oxigênio e a umidade contida no ar resultando na formação de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, que é causador de chuva ácida.

A chuva ácida pode ocorrer a quilômetros de distância de onde a fonte do processo onde existe escape de SO<sub>2</sub> ocorreu. A consequência da chuva ácida é o efeito que ela tem sobre o meio ambiente, esta modifica o pH da água de lagos e lagoas presentes em uma floresta podendo matar parte da fauna e da flora locais. E ainda existe a depreciação de algumas atividades humanas como, por exemplo, a pesca, caça e agricultura. A técnica utilizada para quantificar esse material é a Pararosanilina.

Além de todos esses efeitos no meio ambiente, preponderam os problemas recorrentes na saúde humana que são os problemas respiratórios em pessoas saudáveis e aumento de riscos para pessoas que possuam problemas respiratórios prévios como asma e bronquite. O SO<sub>2</sub> é um gás incolor e possui odor azedo e a sua característica mais importante é de ser um composto altamente solúvel, sendo responsável por não permitir a sua absorção pelo sistema respiratório superior (Lora, 2002).

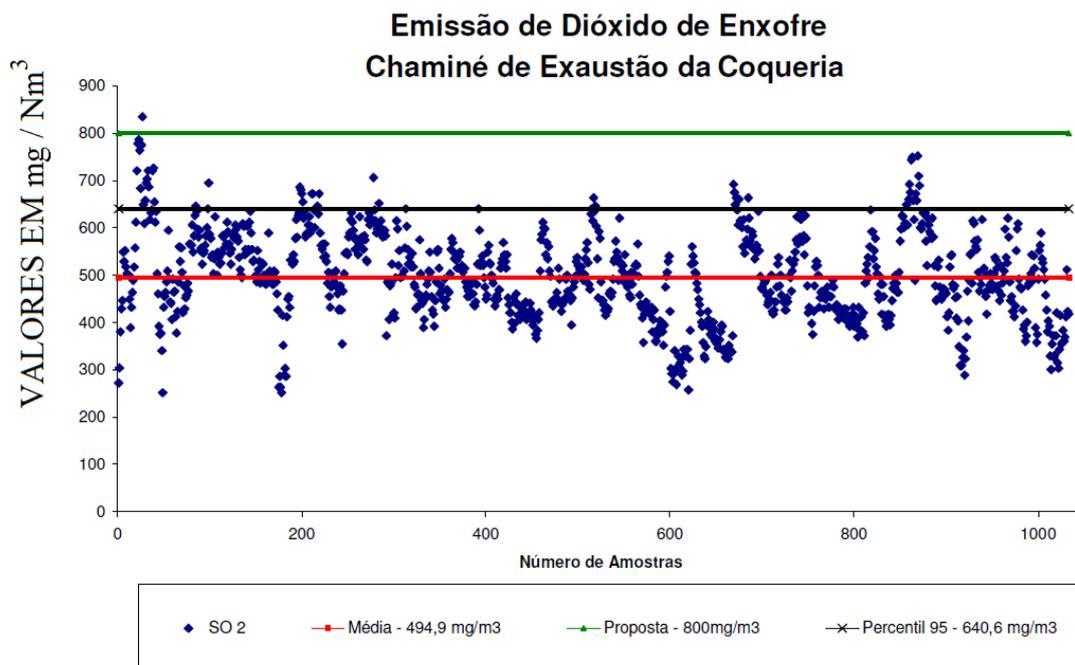


Figura 4 - Emissão de SO<sub>2</sub> da Coqueria (Conama, 2004).

A figura 4 mostra a quantidade de SO<sub>2</sub> média emitida pelo sistema de exaustão de um total de cinco plantas de coqueria espalhadas pelos EUA, no período de 1999.

### 4.3 Óxidos de Nitrogênio

A formação desses gases é proveniente de qualquer processo de combustão, este fato ocorre devido a existência de nitrogênio no ar, gerando tanto NO quanto NO<sub>2</sub>. As maiores fontes de geração de óxidos de nitrogênio são processos industriais, automóveis e a geração termelétrica.

No âmbito do meio ambiente estes gases formam compostos na atmosfera, por exemplo, aldeídos e compostos orgânicos nitrogenados. Quando combinados com chuva ocorre a produção de ácido nítrico, caso tenha a presença de luz e oxigênio promove a criação de efeito fotoquímico, combinação de fumaça com neblina, aparecimento de forte neblina durante período de forte insolação (Rocha, ET AL, 2009).

No âmbito da saúde esses gases causam irritações devido a sua capacidade de penetrar nas partes mais baixas das vias respiratórias, além de ter compostos associados a alguns tipos de câncer. Esse tipo de material é quantificado através da Quimiluminescência.

### 4.4 Material Particulado

Conforme o minério de ferro passa pelos processos decorrentes das etapas de uma usina siderúrgica integrada, ocorre a liberação de material particulado e para cada tipo de processo haverá a liberação de diferentes tipos de particulados, seja com relação a sua forma ou tamanho respectivo.

O material particulado emitido em diferentes etapas, desde o processamento do minério de ferro até a produção do aço líquido, possui características diversas, e, portanto existe a necessidade de classificar esse particulado, seja pelo formato, pelo tamanho ou até mesmo devido a diferentes composições químicas.

**Classificação quanto ao formato:** A morfologia e formato das partículas no material particulado atmosférico variam de acordo com a composição química (JACOBSON, 2002). Se a partícula de aerossol for higroscópica, ela vai absorver água em umidade relativamente alta e acaba se tornando esférica. Se íons estiverem presentes e a umidade relativa for baixa, cristais sólidos se formam dentro dessa partícula. Algumas partículas de aerossóis são lisas, outras são globulares, outras contêm camadas e outras ainda são fibrosas.

Geralmente as partículas não possuem perfil arredondado, existe uma grande variedade de formatos disponíveis para os particulados. Nesse quesito pode-se dizer que o material particulado em suspensão pode ser classificado como poeira e fuligem quando o material for sólido, enquanto que os termos névoa e neblina são empregados quando o material for líquido (Assunção, 1998). O formato das partículas é capaz de aumentar a periculosidade do particulado.

- Poeira: Partículas sólidas formadas geralmente por processos de desintegração mecânica. Geralmente são partículas não esféricas com diâmetro superior a 1  $\mu\text{m}$ .
- Fumos: Partículas sólidas formadas por condensação ou sublimação de substâncias sólidas. São de tamanho próximas a 1  $\mu\text{m}$  apresentando um formato esférico de modo geral. Podendo ser do tipo fumo metálico onde existem elementos metálicos livres como chumbo, cádmio, entre outros.
- Fumaças: Em sua maior parte contém substâncias sólidas, mas podem apresentar líquidos também; são formadas a partir da queima de combustíveis fósseis. Contém fuligem e uma fração mineral de cinzas.
- Névoas: Produzidas a partir de dispersão de um líquido (atomização) ou por processo de condensação. Tamanho de partícula em geral maior do que 5  $\mu\text{m}$ .

Para quantificar esse tipo de material é utilizada técnica de refletância.

**Classificação quanto ao tamanho:** Os particulados podem possuir tamanho inferior a 10 nanômetros e valores superiores a 10 micrômetros. Esta é uma classificação importante, pois o particulado é passível de ser carregado por um gás, dependendo da granulometria, quanto maior mais difícil de ser arrastado. A tabela IX apresenta as classificações referentes ao tamanho das partículas.

Tabela IX – Classificação de Material Particulado (Almeida, 1999).

Classificação por Tamanho	
Fração	Particulado
PTS	100
PM <sub>10</sub>	10
PM <sub>2.5</sub>	2.5
PM <sub>1</sub>	1
ULTRAFINO (UFP OU UP)	0.1

**PTS:** Partículas Totais em Suspensão – São Consideradas partículas com até 100 µm de diâmetro. São partículas consideradas inaláveis, pois são retidas antes de alcançar o sistema respiratório.

**PM<sub>10</sub>:** Partículas com até 10 µm de diâmetro – Também denominado de fração torácica, ou partículas grosseiras. Diâmetro superior a 2,5 µm ficarão retidos na parte superior do sistema respiratório (Miller Jr, 2007).

**PM<sub>2,5</sub>:** Partículas com até 2,5 µm de diâmetro – Essas partículas são denominadas de finas ou aerossóis secundários, geralmente são constituídas por nitratos, sulfatos e metais pesados como cobre, chumbo e zinco além de compostos orgânicos. Essas partículas podem atingir inclusive alvéolos pulmonares que estão localizados na região mais profunda do sistema respiratório, além de conseguirem viajar grandes distâncias da fonte que as produziu.

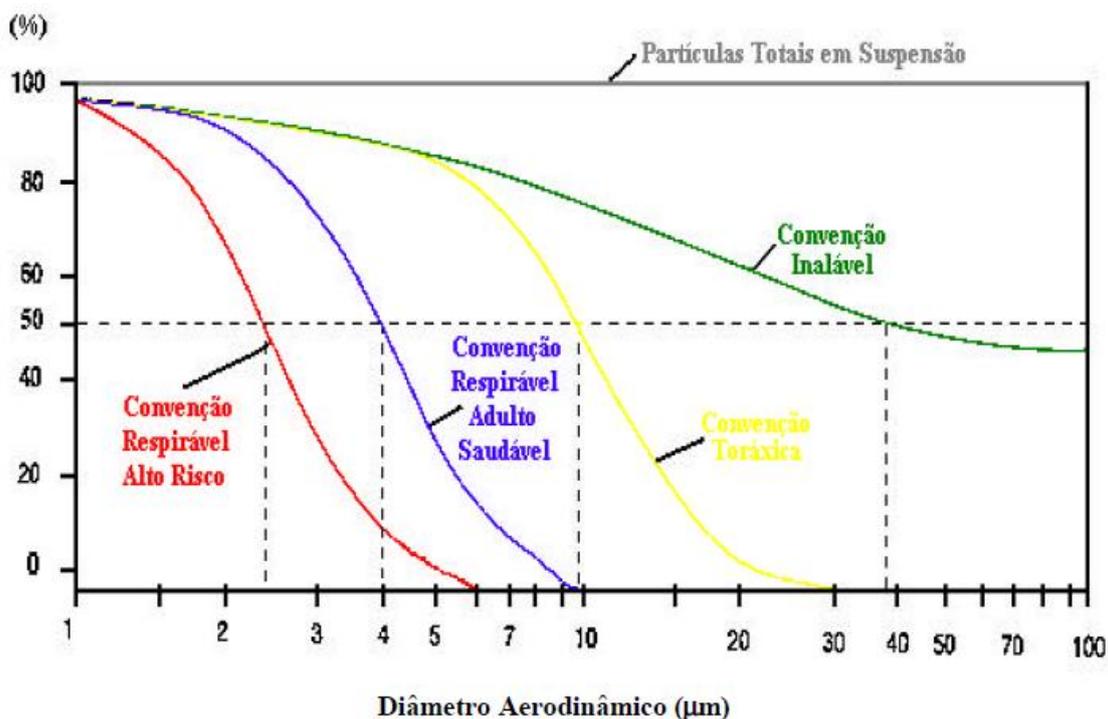
**PM<sub>1</sub>:** Partículas com até 1 µm de diâmetro – Essas partículas são mais perigosas do que as partículas PM<sub>2,5</sub> devido ao fato de se alojarem com mais facilidades nos alvéolos pulmonares.

**UFP:** Partículas com até 0,1 µm de diâmetro – Estas podem ultrapassar diretamente as defesas do organismo que são capazes de lidar com partículas de até 0,5 µm de diâmetro. UFP engloba partículas de até 10 nanômetros de diâmetro. Estas não precisam ser absorvidas pelo corpo através da respiração, pois podem passar através da pele (Miller Jr, 2007).

Análise de partículas inaláveis é feita através de separação inercial ou por filtração.

A figura 5 demonstra a emissão de particulados quanto à sua granulometria e a sua periculosidade, com relação a saúde da comunidade (UNEP/WHO, 1994).

Figura 5 – Periculosidade de Emissão de Material Particulado (UNEP/WHO, 1994).



**Classificação quanto a composição:** Dependendo da fonte de onde o particulado é proveniente, a composição pode variar .

**PTS, PM<sub>10</sub>:** é possível averiguar a presença de materiais que compõem a crosta terrestre como também das atividades provenientes dos processos siderúrgicos. É possível encontrar altas concentrações de alumínio, ferro, cálcio, silício e oxigênio na forma tanto de óxidos como de silicatos.

**PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>1</sub>, UFP:** Nestes casos, a formação é devida a reações químicas provenientes dos processos siderúrgicos, mais presentes em caso de queima incompleta de combustíveis, produzindo partículas muito pequenas de fuligem, geralmente formadas por pequenos cristais de carbono elementar, além de compostos inorgânicos de enxofre e nitrogênio. Estas partículas também possuem metais pesados em sua composição devido aos elementos livres condensados que em altas concentrações são prejudiciais a saúde. São estes: cobre, níquel, manganês, zinco, chumbo, cádmio entre outros que representam teores entre 60 e 75% da concentração total de metais contidos nas partículas inaláveis (WHO, 2003).

A tabela X apresenta a relação dos elementos constituintes do material particulado emitidos pelas plantas de sinterização e de coqueria doravante a produção de uma tonelada de coque e de sinter (Science Direct, 2006). Também consta a emissão de compostos orgânicos que são melhor explicados no subtópico posterior.

Tabela X - Composição do culado proveniente da sinterização e da coqueria (Science Direct, 2006).

Composição do material particulado		
Composição das partículas	Coqueria	Sinterização
	g/ton coque	g/ton sinter
Al	0.05521	0.10158
Ca	0.13995	0.35953
Fe	0.26654	1.17
K	0.16265	3.418
Mg	0.01346	0.03186
Na	0.17164	0.68145
S	1.22	0.90
As	0.00115	0.00157
Ba	0.02423	0.00179
Cd	0.00159	0.02850
Co	-	0.00015
Cr	-	0.00503
Cu	0.00192	0.02393
Mn	0.00171	0.01045
Ni	0.00196	0.01357
Pb	0.00526	0.49366
Sb	0.00007	0.00006
Se	0.00135	0.00852
Sr	0.00079	0.00132
Zn	0.03049	0.09352
F <sup>-</sup>	0.02720	0.07230
Cl <sup>-</sup>	0.16994	3.86
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-	0.00214
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-	0.01954
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	4.62	2.55
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.92149	0.10178
K <sup>+</sup>	0.11164	4.22
Na <sup>+</sup>	0.10775	0.20361
Mg <sup>2+</sup>	0.01143	0.01101
Ca <sup>2+</sup>	0.26795	0.23008
Total HPA's	0.02676	0.01295

Devido a composição diferenciada dos materiais particulados provenientes da coqueria e da sinterização, é possível afirmar que a superioridade de metais pesados contidos na sinterização tornariam esse tipo de particulado mais perigoso. Lembrando que a quantidade de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> E SO<sub>2</sub> liberado pela coqueria é superior ao da sinterização, como pode ser averiguado no próximo capítulo.

## 4.5 Compostos Orgânicos

Essas emissões são provenientes da quantidade de material orgânico presente nos gases liberados por processo de combustão. Esse tipo de poluente encontra-se em maiores quantidades na planta de coqueria e na de sinterização. Os hidrocarbonetos (HC) representam grande parte dos materiais orgânicos devido ao fato de serem constituídos basicamente por átomos de carbono e hidrogênio, dependendo do tipo de composto podem apresentar desde ligações simples e ramificadas até formatos cíclicos.

Os Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPA's) são classificados como poluentes orgânicos prioritários. Alguns são considerados cancerígenos e podem vir a formar tumores em sistemas biológicos (WHO 1983). O transporte dessas substâncias ocorre preferencialmente através da movimentação de particulados finos  $PM_{2.5}$ . Os HPA's mais importantes estão presentes na figura 6, a seguir. A técnica analítica para quantificar este tipo de poluente é CG/EMDI (espectrometria de massa com utilização de técnica de diluição isotópica).

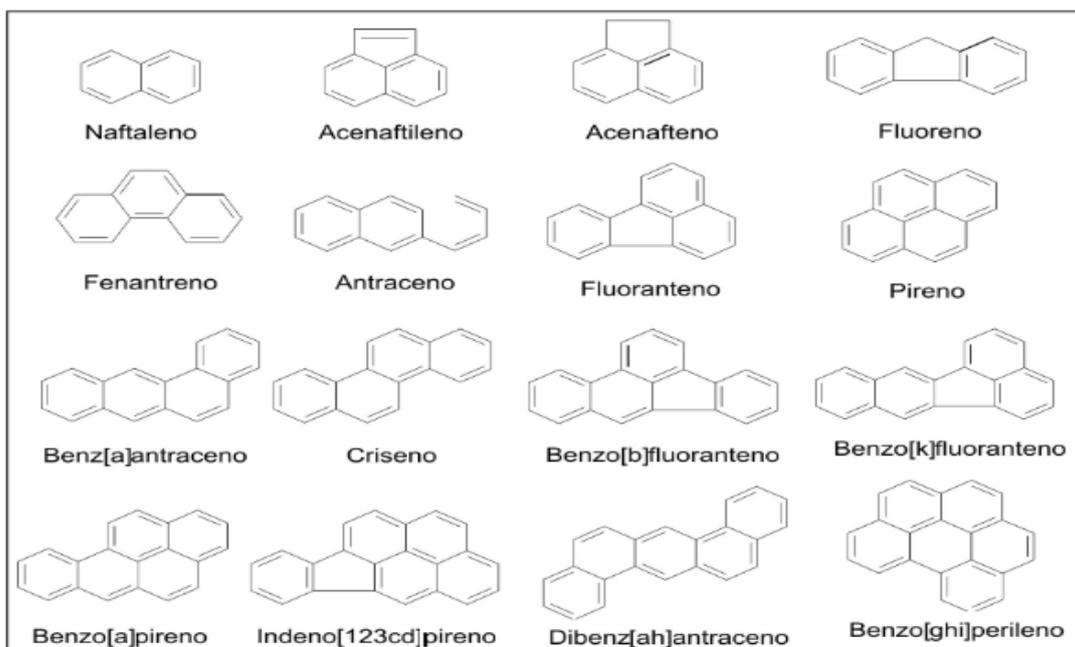


Figura 6- Hidrocarbonetos policíclicos Aromáticos

O benzeno é um hidrocarboneto aromático e funciona como matéria-prima base para formação de compostos orgânicos entre eles plástico, gasolina e borracha sintética. Possui como características o fato de ser inflamável, incolor, incluindo aroma doce e agradável.

A presença de benzeno no ar pode causar tonturas, dor de cabeça, além de ser tóxico e cancerígeno. A permanência deste no ar por longo período pode causar leucopenia. A sua classificação quanto a emissão gasosa encontra-se como sendo PTS (partículas totais em suspensão), melhor descrita no sub-tópico de material particulado.

A figura 7 representa a quantidade de benzeno emitido pela CSN ao decorrer dos anos 1995, 1999, 2001 e 2002 (Ricardo D. C, 2004).

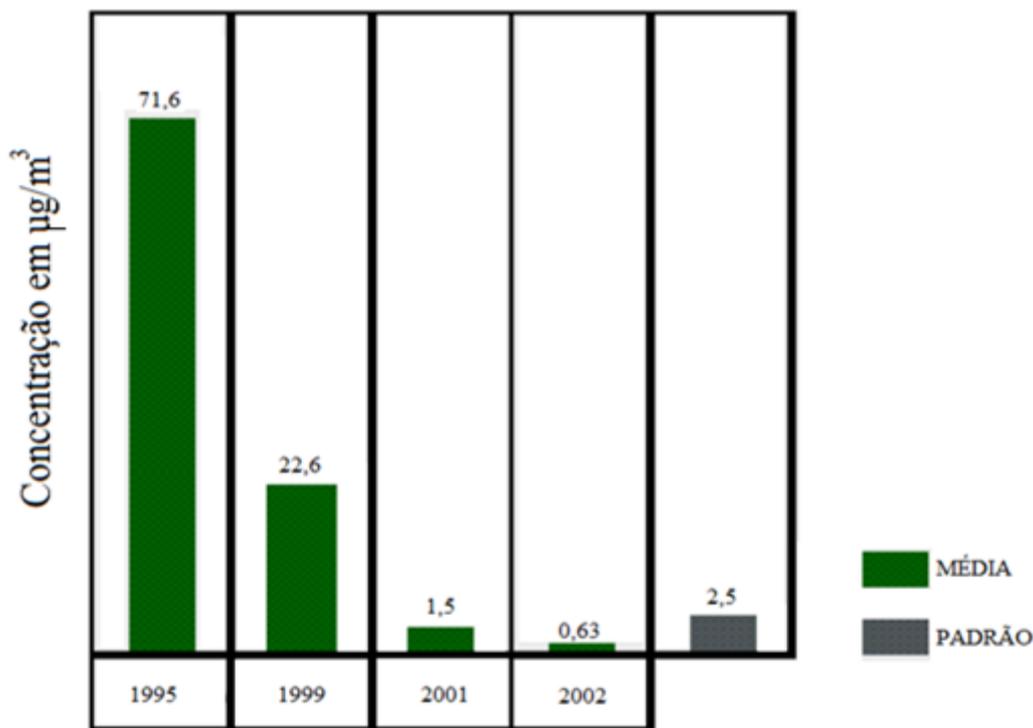


Figura 7 - CSN: Emissão de Benzeno (Ricardo, D. C, 2004).

#### 4.6 Dioxinas e Furanos

A dioxina refere-se a um grupo formado por compostos químicos que compartilham estruturas químicas e características biológicas. A mais importante é a chamada tetraclorodibenzo-para-dioxina; esta é considerada como sendo a mais tóxica das dioxinas. Este tipo de composto pode trazer grandes problemas à saúde como: neoplasias, disrupção endócrina, diabetes, alteração nos níveis hormonais de testosterona e tireóide, danos neurológicos, danos à pele e ao fígado, além de ser considerado como fator de risco para doenças cardiovasculares.

A formação de dioxinas e furanos podem ocorrer devido a processos térmicos e devido a processos industriais químicos.

- Térmicos: formação de moléculas de PCDD/PCDF em processos de combustão na presença de carbono, oxigênio, hidrogênio e cloro, dentro de uma faixa de temperatura entre 200 °C e 650 °C. São estruturas formadas por cadeias de carbono não extraíveis que são muito diferentes do produto final.
- Químicos industriais: necessária a presença de carbono, oxigênio, hidrogênio e cloro dessa vez em temperatura superior a 150 °C com condições alcalinas. Esse

tipo de formação de dioxina não se encaixa no trabalho. Pois a contaminação no ser humano seria via alimentícia, que não é o escopo do trabalho.

A figura 8 apresenta os compostos que formam as dioxinas. A dioxina representada pelo tetraclorodibenzo-p-dioxina (TCDD), enquanto que o furano é representado pelo dibenzofurano (TCDF). São compostos policlorados como é possível observar.

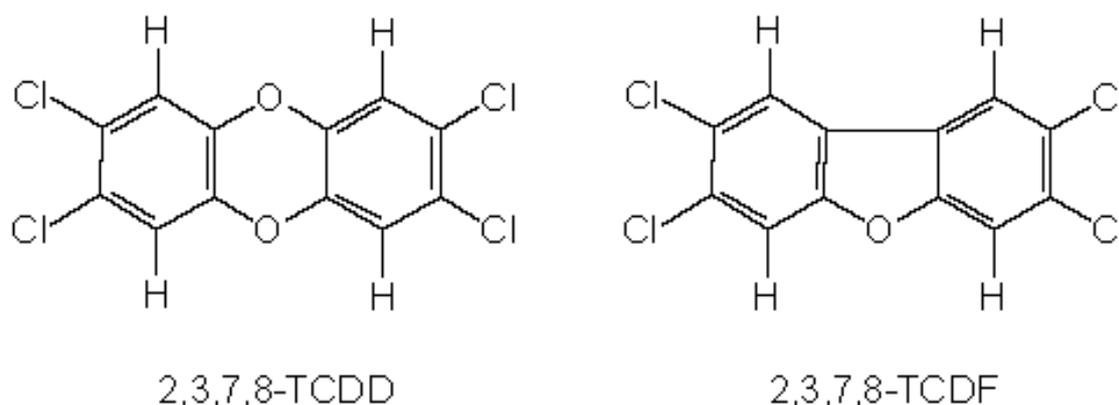


Figura 8 - Estrutura da dioxina e do furano (POP's, 2013).

Os grupos das dioxinas são chamados de PCDDs, enquanto que os furanos são denominados como PCDFs

Tabela XI - Emissão de dioxinas e furanos (POP's, 2013).

Lançamentos Anuais (g TEQ)			
Categoria	Descrição	ar	resíduo
Sinterização	Alta reciclagem de resíduos, incluindo materiais contaminados por óleo	312,5	
	Baixo uso de resíduo, unidade bem controlada	78,1	15,6
	Alta tecnologia, elevada redução de emissão	-	
Coqueria	Sem limpeza do gás	19,4	
	Pós-queimador (remoção de particulado)	0,1	
Alto-forno	Particulado presente no gás de alto-forno	0,3	
Conversor LD	Sucata suja, sucata pré-aquecida: baixo controle	42,4	63,6
	Sucata limpa/ferro-gusa, sucata suja com pós queimador, filtro de tecido	12,7	63,6
Forno Elétrico	Sucata limpa/ferro-gusa, sucata suja com controle de poeira	2,5	2,5

TEQ: Toxicidade Equivalente

FONTE: Ministério do Meio Ambiente, Brasil

A técnica analítica mais utilizada para quantificar esse material é a espectrometria de massa.

A tabela XI apresenta valores da emissão de dioxinas e furanos com relação ao grama da toxicidade equivalente. Que é a soma da quantidade de congêneres perigosos com

valores de toxicidade aguda atribuídas por estudos realizados por um grupo de trabalho da WHO/IPCS (POP'S, 2013).

## 5 Processos e Emissões

As siderúrgicas são consideradas pela sociedade como vilãs, pois são responsáveis pela grande quantidade de poluentes despejados na atmosfera, principalmente o dióxido de carbono, emitido pelas chaminés das usinas, causador de efeito estufa. Portanto existe uma necessidade de minimizar a liberação tanto do dióxido de carbono quanto de outros gases nocivos a saúde dos seres humanos e dos animais, como por exemplo, os óxidos de nitrogênio e enxofre emitidos durante processos recorrentes dentro de uma siderúrgica integrada.

Portanto é importante conhecer os processos decorrentes da produção do aço, de modo que seja possível identificar, quantificar e avaliar a possibilidade de recuperação desses poluentes para que não sejam despejados na atmosfera. Para isso será apresentado o tipo de emissão produzido em cada etapa do processo.

### 5.1 Coqueria



Figura 9 - Foto da Coqueria CST

A figura 9 apresenta uma foto de uma unidade de coqueria. Para obtenção do coque temos a destilação do carvão através de sua queima (pirólise).

A tabela XII apresenta os tipos de carvão presentes na natureza e a sua eficiência energética com relação a uma melhor obtenção do coque:

Tabela XII – Tipos de carvão (Silva, 2008).

Material	Turfa	Linhito	Hulhas	Antracito
Período de Formação	Quaternário	Terciário	Primário	Primários
		2 milhões de anos	350 milhões de anos	350 milhões de anos
Cor	Amarela até pardo	Parda até negra	Negra	Negra
Aspecto	Terroso	Lenhoso	Rochoso	Rochoso
Estrutura	Musgosa & Fibrosa			
Umidade Natural (%)	90	20 a 40	10 a 20	2,0 a 3,5
Umidade Seco ao ar (%)	20 a 25	15 a 25	1,0 a 2,0	2,0 a 3,5
%C	55 a 65	65 a 73	73 a 92	92 a 96
%H	5,5	4,5	5,3	2,5
%O	32	21	8 a 16	4
Teor de Cinzas (%)	8 a 15	6 a 7,5	3,5 a 9,1	2 a 3
Poder Calorífico (kcal/kg)	3000 a 3500	3800 a 4600	5000 a 8200	7200 a 8000

Carvão mineral: Possui como característica ser uma massa compacta e este é obtido através de processos de decomposição de material de origem vegetal (processo leva milhões de anos para acontecer), porém não são todos os carvões minerais que podem ser coqueificáveis. É necessário saber a facilidade que esse tem de sofrer pirólise na ausência de oxigênio, para ocorrer a liberação de materiais voláteis e materiais não condensáveis. O melhor para a produção do coque é a hulha, atualmente denominada de carvão sub-betuminoso.

#### Processo de Coqueificação

O processo de coqueificação é na verdade um processo de destilação do carvão mineral, em ausência de oxigênio.

- Primeiro estágio: Aquecendo o carvão até temperaturas entre 100°C e 120°C acarreta na liberação de parte da umidade contida no carvão;
- Segundo estágio: Resulta na eliminação das matérias voláteis. Ocorre entre as temperaturas de 350°C e 550°C, com a liberação de hidrocarbonetos e alcatrão;
- Terceiro estágio: Chega-se a novos patamares de temperatura que desta vez se encontram entre 450°C e 600°C. A partir desses valores as ligações químicas presentes devido a pontes de hidrogênio são rompidas, tornando o material resultante em uma massa pastosa e fluída;
- Quarto estágio: A pressão dos gases se eleva quando ocorre difusão dentro da estrutura porosa do carvão, uma vez que se encontra pastoso e fluído, provocando um inchamento do material;

- Quinto estágio: Formação do semi-coque, em temperaturas em torno de 700°C. Esse estágio é importante, pois confere a qualidade do coque formado devido ao fato de termos a ressolidificação. Quanto menor a quantidade de fissuras na ressolidificação maior será a resistência mecânica conferida ao coque;
- Sexto estágio: Novo patamar de temperaturas dessa vez entre 850°C e 1300°C. Há liberação de gases, eliminação do restante dos materiais voláteis, especialmente do hidrogênio.

### Operações da coqueria

As operações de uma unidade de coqueria consistem de carregamento, coqueificação, descarregamento, apagamento e preparação de pilhas de coque.

A mistura de carvões é carregada para o interior das câmaras de coqueificação através de um carro de carregamento que se locomove em trilhos no topo da coqueria. Após ser carregado, o carvão passará pelos estágios descritos, resultando em coque metalúrgico.

O desenformamento é realizado por uma máquina que tem como função nivelar a carga por meio de uma barra niveladora, retirar, limpar e recolocar as portas do desenformamento, que consiste em empurrar o coque já pronto para fora do forno. Ao ser retirado do forno, o coque incandescente é conduzido até a estação de apagamento. O apagamento do coque é feito através de jatos de água. Ao sair da estação de apagamento, o coque é levado até a estação de peneiramento para depois ser estocado em silos de armazenamento para posteriormente servir de combustível e redutor no alto-forno.

### Tipo de Emissões

“Open Dust Source”- no caso da coqueria temos emissões referentes a estocagem do carvão, entrada do carvão na câmara de combustão, apagamento do coque, remoção do coque incandescente da câmara e pela estocagem do produto final.

Durante a estocagem do carvão e do produto final, coque tem fugacidade devido aos ventos, carregando o particulado fino da pilha de estoque.

“Process Fugitive Emissions” - dentro da câmara de combustão ocorre a exaustão dos gases de combustão decorrentes do processo de aquecimento dos fornos de coque e da destilação do carvão juntamente com a liberação de material particulado e gases como o SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> que são poluentes e nocivos.

### Tipo de Emissão

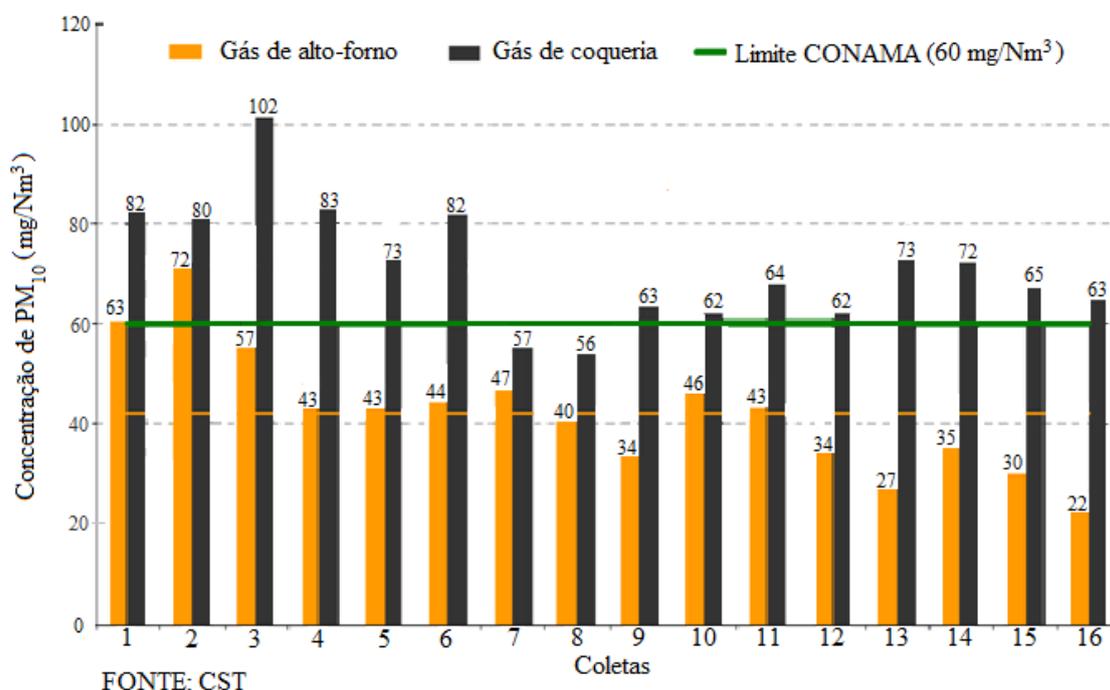
A tabela XIII apresenta as emissões provenientes de unidades de coqueria e a média da quantidade de material particulado emitido por elas.

Tabela XIII – Emissões da coqueria (CONAMA, 2004).

Coqueria	
Fontes	Tipos de Emissões
Estocagem do Carvão	MP
Câmara de Combustão	SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , MP
Enfornamento	MP
Tubulação de exaustão de gases	MP
Desenfornamento	MP
Apagamento do Coque	MP
Estocagem final	MP

Os valores referentes a essas emissões são drasticamente reduzidos, quando utilizadas as tecnologias de controle de emissões. Atingem valor de 0,245 kg de material particulado total emitido por tonelada de coque produzida, ao invés dos 2,34 kg anteriores. Essas tecnologias de controle serão abordadas no capítulo 7.

A quantidade de material particulado emitido pelas coquerias é elevada, a figura 10 mostra a quantidade de material particulado (PM<sub>10</sub>) pelo gás de coqueria e gás de alto-forno emitido pela Usina Siderúrgica de Tubarão (CST).

Figura 10 – Coqueria CST: Concentração de PM<sub>10</sub> em mg/Nm<sup>3</sup> (Instituto do Aço, 2010).

O gás de coqueria após processo de purificação possui em média percentual, a seguinte composição (Araújo, 2005): CO (5,8 – 6,8), CO<sub>2</sub> (1,5 – 2,2), CH<sub>4</sub> (27,2 – 29,2), C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (1,3 – 2,8), O<sub>2</sub> (0,0 – 0,4), H<sub>2</sub> (56,0 – 57,0) e N<sub>2</sub> (1,0 – 4,6).

A melhor visualização do material particulado emitido pela coqueria é possível visualizar através da tabela XIV, onde é realizado um levantamento da granulometria do material particulado emitido por um total de 15 unidades de coqueria espalhadas pelos EUA (EPA 2005).

Tabela XIV – Coqueria: distribuição granulométrica da emissão de particulado – valor médio de 15 unidades distribuídas pelos EUA. (EPA, 2005).

Coqueria			
Fonte	Granulometria (µm)	Massa acumulada passante (%)	Massa acumulada fator de emissão g/t
Carregando o forno	0,5	13.5	1
	1	25.2	2
	2,5	39.1	3
	5	45.8	4
	10	48.9	4
	15	49.9	4
	>15	100	8
Processo de Combustão	0,5	77.4	180
	1	85.7	200
	2,5	93.5	220
	5	95.8	220
	10	95.9	220
	15	96	220
	>15	100	230
Apagamento do Coque	0,5	28	360
	1	29.5	510
	2,5	30	560
	5	30	600
	10	32	690
	15	35	730
	>15	100	2620
Desenformamento	0,5	13.8	10
	1	19.3	11
	2,5	21.4	11
	5	22.8	11
	10	26.4	12
	15	30.5	13
	>15	100	36

## 5.2 Sinterização

O processo de sinterização consiste na aglomeração de partículas com o intuito de reduzir a quantidade de finos dentro do alto-forno e garantir que o material circulante

possua propriedades físicas e químicas necessárias para sua melhor utilização, de modo a aumentar a eficiência do alto-forno através da diminuição do consumo de coque.

É importante notar que a sinterização é na verdade um processo de consolidação do produto durante a sua queima, portanto implica na retração e densificação dos insumos utilizados nessa planta.

### Processos da Sinterização

A planta de sinterização utiliza-se dos finos de minério de ferro, finos de coque e fundentes como insumos, enquanto que o resultado dos procedimentos deve ser um aglomerado dessas partículas, excluindo de forma consistente os materiais indesejáveis presentes nas composições químicas dos insumos.

Este produto da sinterização, o sinter, deve possuir características como granulometria, redutibilidade, porosidade, resistência mecânica e composição química adequada que são importantes quando forem levadas ao alto-forno.

A temperatura não é o único parâmetro responsável pela produção do sinter, também existe a necessidade de um controle rígido da velocidade de aquecimento, tempo de permanência no forno, manutenção da temperatura e atmosfera controlada. A figura 11 apresenta o fluxograma de uma unidade de sinterização.

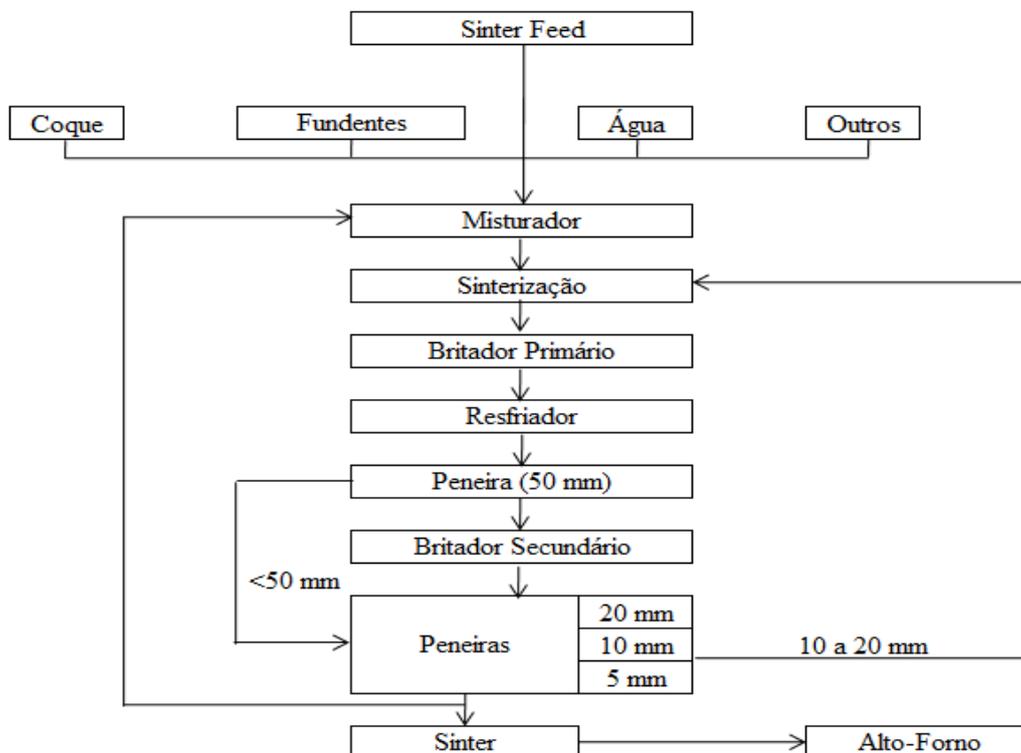


Figura 11 - Fluxograma de sinterização (Freitas, 2012)

Para a formação do sinter é necessário misturar de forma homogênea fundentes, coque, carvão, minério de ferro e água, como é apresentado na figura 12. Depois de feita a

mistura é realizada a combustão do carvão ou coque no patamar de temperatura de 1200°C e 1400°C, para que a umidade presente na mistura evapore e as partículas restantes se unam por caldeamento (fusão incipiente ou superficial) obtendo-se assim o sinter.

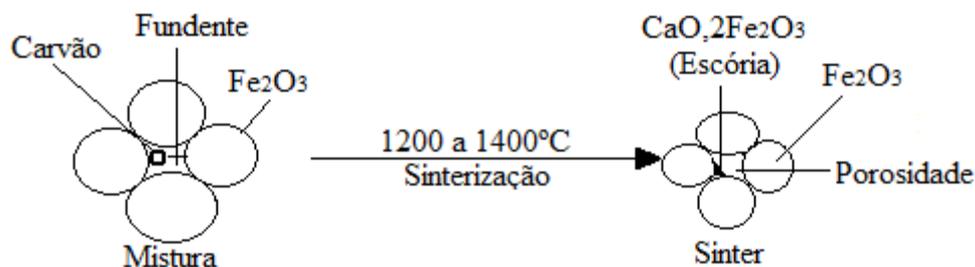


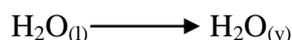
Figura 12 - Processo de formação do sinter.

A ignição do carvão na superfície da mistura é realizada por maçaricos que proporciona a formação de uma zona de combustão atraída para baixo através do sistema de exaustão que puxa o ar até atingir uma falsa grelha, quando a combustão cessa.

Enquanto a frente de combustão desce, a mistura é completamente aquecida à 1200°C, proporcionando a soldagem das partículas por caldeamento o que resulta em um grande bloco de sinter.

Processos que ocorrem durante a sinterização (ABM,2003).

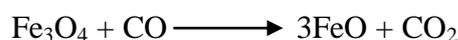
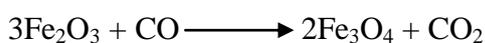
- Primeiro estágio: Secagem – Ocorre vaporização da água livre perto de 300°C.



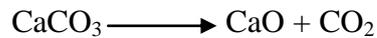
- Segundo estágio: Desidratação – Vaporização da água combinada perto de 500°C.



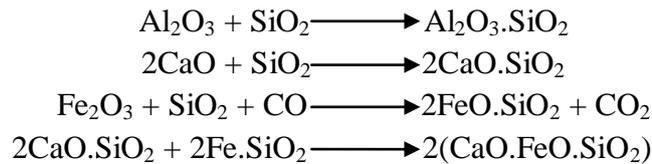
- Terceiro estágio: Redução Superficial do Minério de Ferro



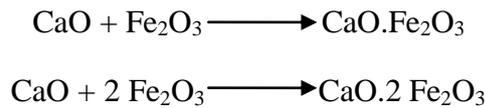
- Quarto estágio: Decomposição de Carbonatos – Dentro da faixa de temperatura de 750°C até 1150°C.



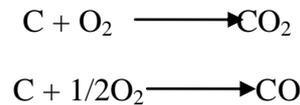
- Quinto estágio: Formação de Silicatos – Entre 600°C e 1300°C.



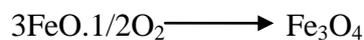
- Sexto estágio: Formação de Cálcio-Ferritas – Ocorre em torno de 600°C até 1300°C.



- Sétimo estágio: Combustão do Coque – Começa em 1300°C.



- Oitavo estágio: Formação da Magnetita



#### Operações da Sinterização

As operações que ocorrem nessa planta são: Carregamento dos insumos em diferentes compartimentos, carregamento de um compartimento contendo uma mistura de todos os insumos de forma homogênea, encaminhamento da mistura para uma esteira com sistema de exaustão acoplado e conectado a um forno de combustão, passando por uma etapa posterior de resfriamento do sinter, finalmente britagem e conseqüentemente peneiramento.

Enquanto a mistura passa pela esteira com o sistema de exaustão, ela acaba passando por certas regiões que contêm zonas úmidas, secagem, resfriamento e uma zona de reação que ocorre com a frente de combustão.

A figura 13 representa as regiões comentadas, pois se trata de um corte longitudinal do leito de uma máquina de sinterização (ABM,2013).

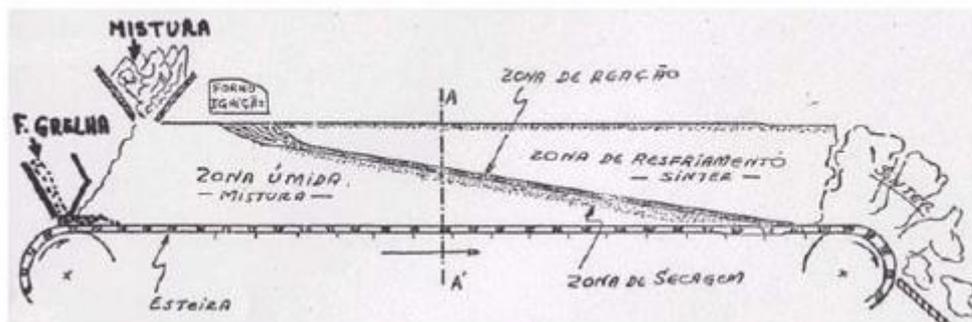


Figura 13 - Corte longitudinal de uma máquina de sinterização.

Inicialmente tem-se que a mistura dos componentes utilizados para formação do sinter é feita de forma homogênea para garantir a composição química final de cada bloco de sinter formado após a combustão do coque.

Contudo após o processo de combustão ter sido realizado, os blocos de sinter não se encontram em temperatura adequada para transporte para o alto-forno, portanto é necessária a realização de uma etapa de resfriamento.

Além dessas etapas também é necessário compreender que o tamanho que o bloco de sinter formado não condiz com o utilizado no alto-forno sendo necessária uma etapa de britagem de modo a reduzir o tamanho desse bloco e fazer um peneiramento de modo a diferenciar os diversos tamanhos obtidos após a britagem.

Entretanto, tamanhos relevantes para utilização do sinter no alto-forno encontram-se na faixa granulométrica de 5 mm a 50 mm, enquanto que tamanhos maiores voltam para a etapa de britagem e as partículas menores voltam para o início da operação.

Como consequência do processo de sinterização, é possível averiguar que parte dos materiais indesejáveis eliminados é convertida em emissões atmosféricas, que podem conter materiais particulados e produtos da combustão como monóxido e dióxido de carbono, óxidos de enxofre e nitrogênio, cujas concentrações vão depender das condições de queima e das características das matérias primas utilizadas no processo.

#### Tipo de Emissões

“Open Dust Source “– Referente a estocagem dos materiais utilizados para a produção do sinter, são estes: Finos de minérios de ferro, finos de coque, carvão e fundentes. A perda ocorre também na estocagem do produto final após o processo de peneiramento,

onde novamente o produto é estocado para reutilização ou no caso de estoque para ser enviado ao alto-forno.

“Process Fugitive Emissions” – Referente ao processo de combustão que ocorre no processo de sinterização ou no processo de resfriamento do sinter, onde temos vapores de monóxido e dióxido de carbono, entre outros gases, como SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> e contendo compostos aromáticos, incluindo dioxinas que são compostos orgânicos polialogenados de elevadíssima toxicidade.

Durante a sinterização ocorre a formação de dioxinas e furanos que podem ter sua formação compreendida devido ao perfil de temperatura presente no processo de sinterização. Dioxinas / furanos se formam quando ocorre a evaporação dos compostos de hidrocarbonetos aromáticos nas regiões superiores do leito de sinterização que envolve carbono e cloreto e, em seguida, ocorre à condensação das dioxinas / furanos no resfriador que dependem da camada de sinter se mover ao longo da linha de sinterização, ou seja, junto com a frente de combustão. A camada de base de calcário pode actuar como um filtro de partículas de fuligem prendendo, e proporcionando, assim, condições adequadas a formação de uma camada de base para a síntese. O processo de volatilização e condensação continua até que a temperatura da carga do refrigerador aumenta suficientemente para evitar a condensação e as dioxinas / furanos que são removidas junto com o gás de combustão.

Apenas ocorre a formação de moléculas PCDD/F na zona de resfriamento. Em suma a dioxina é adsorvida em regiões de mais baixas temperaturas, a temperatura varia muito conforme a frente de combustão vai descendo; quando a temperatura se eleva a dioxina é vaporizada e emitida para atmosfera. A principal emissão de PCDD/F se encontra perto da falsa grelha de sinterização formada por bloco de sinters que possuem de 20 a 35 mm de diâmetro.

As emissões de dioxinas e furanos são mais complicadas de se contornarem devido ao fato de não ser possível misturar a região de alta temperatura da frente de combustão com a de baixa temperatura na zona de resfriamento. Grandes quantidades são emitidas pela planta de sinterização os valores obtidos para Stelco Hamilton Sinter Plant, localizada no Canadá. Em 1998 as emissões 3.849 TEQ/Nm<sup>3</sup>, enquanto que em 2002 esse valor aumentou para 4.100 TEQ/Nm<sup>3</sup>. Lembrando que TEQ significa toxicidade equivalente.

A quantidade de material particulado emitido por plantas de sinterização varia bastante entre 21-209 mg/Nm<sup>3</sup>. Além disso, existe a produção de resíduos que geram alguns desses particulados, para cada tonelada de sinter produzido tem-se 40 kg de resíduos gerados.

Na tabela XV são apresentados os efluentes atmosféricos da sinterização nas diferentes fontes de emissão existentes no decorrer da fabricação do sinter.

Tabela XV – Emissões da Sinterização (CONAMA, 2004).

Sinterização		
Fontes	Descrição das Fontes	Tipos de emissões
Sistema Primário	Captação e tratamento do material Particulado e gases gerados Na máquina de produção de sinter	MP SO <sub>2</sub> NO <sub>x</sub>
Sistema Secundário	Captação e tratamento do material Particulado gerado nos processos britagem, peneiramento e transferência	MP

A tabela XVI informa a quantidade de material particulado emitido pela sinterização utilizando sistema de captação ou não. As tecnologias de captação de material particulado serão apresentadas posteriormente no capítulo 7.

Tabela XVI - Sinterização: Distribuição granulométrica do material particulado (EPA, 2005)

Sinterização			
Fonte	Granulometria (µm)	Massa acumulada passante (%)	Massa acumulada fator de emissão g/t
Abertura descontrolada da Grelha	0,5	4	220
	1	4	220
	2,5	6	280
	5	9	500
	10	15	830
	15	20	1110
	>15	100	5560
Controle por Lavador Venturi	0,5	18	129
	1	25	176
	2,5	33	209
	5	48	219
	10	59	226
	15	69	230
	>15	100	235
Controle por Ciclone	0,5	25	130
	1	37	190
	2,5	52	260
	5	64	320
	10	74	370
	15	80	400
	>15	100	500

### 5.3 Pelotização

A planta de pelotização tem como função fazer uma modificação no tipo de carga que vai ser introduzida no alto-forno. Esta tem como função primária criar um produto homogêneo com propriedades químicas e físicas mais adequadas. Aqui se transforma o insumo do alto-forno em uma massa com formato arredondado com porosidade de tal forma que os gases presentes no alto-forno percolem facilmente por esse produto criado através do processo de pelotização. Portanto a planta de pelotização tem como objetivo aumentar a eficácia da reação de redução presente no alto-forno.

#### Processos da Pelotização

A operação é realizada através de discos de pelotamento com 8 metros de diâmetro com capacidade de processar 120 t/h de polpa retida proveniente de hidrociclones que separam finos do material a ser pelotizado que é uma mistura de minério de ferro, calcário na proporção de 13 kg/t de minério e carvão. A água é filtrada da mistura após a utilização do hidrociclone, com isso é feito o espessamento do material adicionando-se calcário como fundente e cal hidratada como aglomerante.

Os discos de pelotamento são inclinados 48° em relação ao plano horizontal e depois giram por 5,6 rotações por minuto. Quando atingem certo diâmetro, as pelotas caem sobre peneiras que posteriormente são queimadas em temperaturas próximas a 1300°C garantindo o tratamento térmico ideal para adquirirem elevada resistência mecânica.

#### Operações da Pelotização

Antes de realizar a homogeneidade da carga, a mistura de carvão, minério de ferro e calcário passa por hidrociclones e britadores. Conferindo a mistura propriedades iniciais equivalentes.

O processo de queima é realizado em fornos de grelha móvel, onde as pelotas cruas atravessam sucessivas zonas de cozimento, resfriamento e secagem. Aproveita-se o calor sensível do ar no resfriamento para a queima do combustível empregado nos fornos.

#### Tipo de Emissões

“Open Dust Source” – Decorrente da estocagem dos materiais utilizados na produção das pelotas, são estes: Finos de minérios de ferro, cal hidratada, calcário e carvão. As emissões ocorrem durante a estocagem dos insumos em pilhas e após o processo de peneiramento e estocagem das pelotas.

“Process Fugitive Emissions” – Referente ao processo de combustão que ocorre no processo de queima da mistura contendo finos de minério de ferro, além do aproveitamento dos gases aquecidos obtidos durante o resfriamento das pelotas, onde temos a presença de monóxido e dióxido de carbono, entre outros gases, como SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>.

A figura 14 mostra a foto de um disco de pelotamento da empresa Tecnometal.



Figura 14- Tecnometal: Foto de Disco de Pelotamento

A tabela XVII apresenta as emissões provenientes do sistema de exaustão de uma unidade de pelotização.

Tabela XVII - Emissões da Pelotização (CONAMA, 2004).

Pelotização				
Fontes	Descrição das Fontes	Emissões		
Sistema Primário	Chaminé de Exaustão do Forno de Queima	MP	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>

A figura 15 apresenta a emissão referente de material particulado médio emitido por plantas de pelotização (espalhadas pelos EUA).

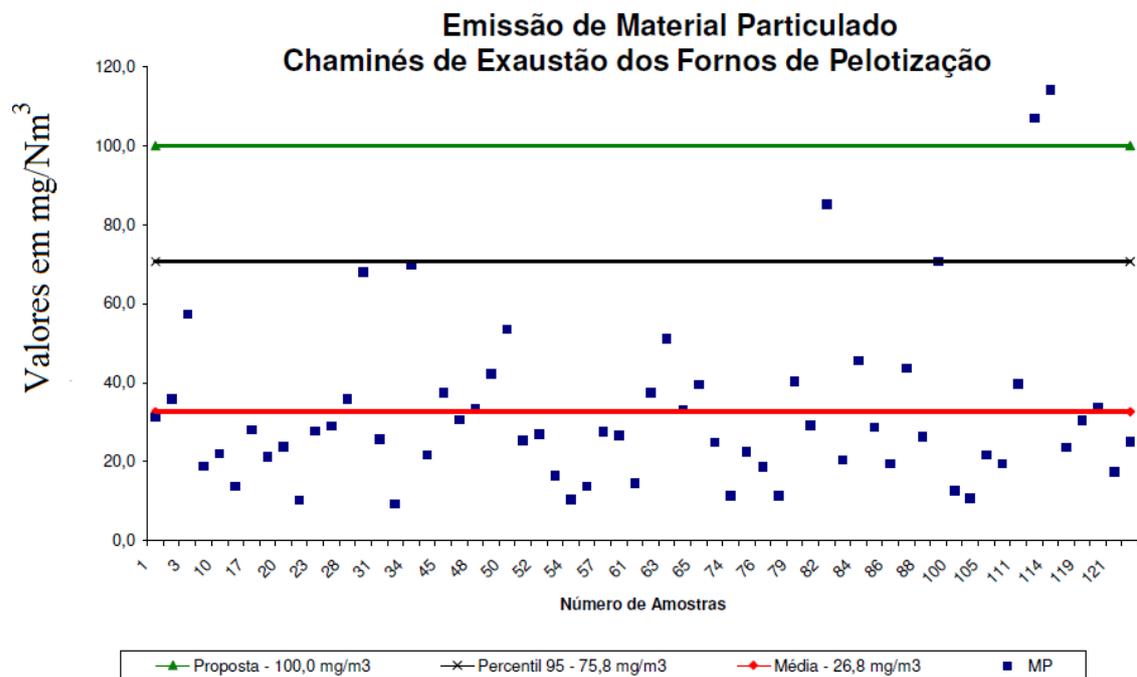


Figura 15 – Emissão de Material Particulado Médio Emitido pela Pelotização (CONAMA, 2004).

#### 5.4 Alto-Forno

O alto-forno é um tipo de forno de cuba, contendo refratários que protegem as paredes do forno conectadas a um sistema de refrigeração á água.

Utilizado na produção de ferro gusa através da fusão redutora de minérios de ferro empregando-se carvão vegetal ou coque, sinter e alguns aditivos denominados fundentes. Durante o seu funcionamento tem-se a percolação de gases ascendentes oriundos da combustão do coque com auxílio de ventaneiras que sopram oxigênio e ar para o alto-forno. O resultado dessa operação é o ferro gusa no estado líquido e como subprodutos a escória e os gases que saem pelo topo do alto-forno.

Dependendo do tipo de material utilizado para a produção do ferro gusa, este vai possuir diferentes composições e propriedades, como por exemplo:

- Carvão vegetal: contêm em sua composição fósforo, portanto o ferro gusa vai possuir um alto teor de fósforo em sua composição, embora uma parte seja eliminada em forma de óxidos pela escória do alto-forno.
- Carvão mineral: contêm enxofre na composição química, portanto vai conferir uma pequena parte para o ferro gusa. Mesmo ocorre nesse caso, onde parte é eliminada em forma de óxidos pela escória do alto-forno e a outra parte deverá ser removida por processo de dessulfuração antes de chegar à aciaria.

A diferença básica com relação as propriedades físicas desses dois tipos de carvão é a seguinte. Enquanto o carvão mineral possui maior resistência mecânica permitindo que

exerça a função de sustentabilidade da carga dentro do alto-forno de modo mais eficaz, o carvão vegetal possui maior quantidade de poros que aumenta a sua eficiência durante o processo de redução do minério de ferro, uma vez que os gases ascendentes do alto-forno possuem maior área de contato com o leito fluidizado.

### Processos no alto-forno

Os processos que ocorrem dentro do alto-forno são diversos, e dependendo da região do forno, este não terá apenas uma temperatura diferenciada, e sim reações químicas distintas para cada nicho de temperatura.

Portanto a abordagem será em cima de cada zona do alto-forno com indicação da devida temperatura relacionada.

A figura 16 representa o interior de um alto-forno.

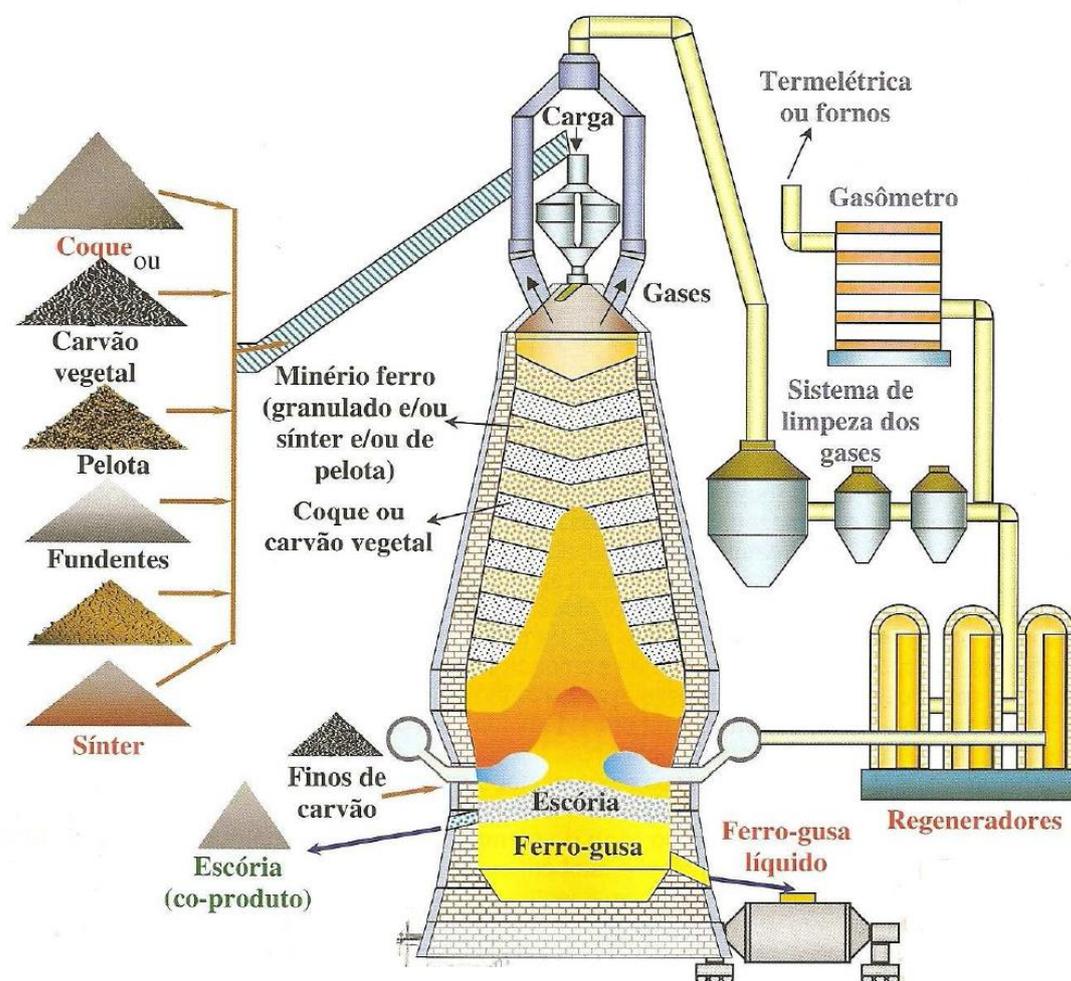


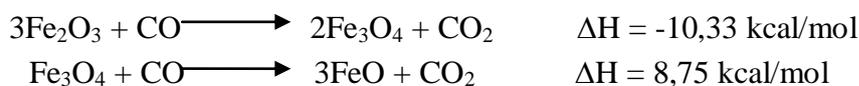
Figura 16 - Representação do alto-forno (Rizzo, 2005).

- Zona Granular: Nesta região temos o minério de ferro e o coque descendo pelo alto-forno como carga sólida, estabelecendo a chamada de região de reserva

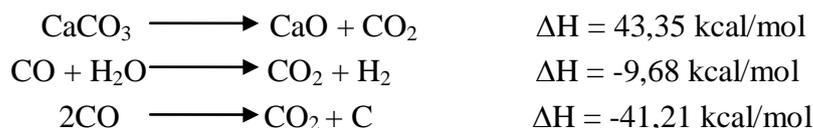
térmica e química. A variação de temperatura desta zona vai de 200°C até 1000°C.

Logo no topo do alto-forno temos o início da redução do minério de ferro, temos a hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) sendo reduzida a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e como redutor temos CO em forma de gás que atua logo após o carregamento do alto-forno. Conforme a magnetita vai descendo ela vai sofrendo outras reações em patamar de maior temperatura próximo a 1000°C, sendo reduzida a wustita ( $\text{FeO}$ ).

Temperatura: 200°C até 950°C – Ocorre preaquecimento da carga e secagem, além de redução indireta dos minérios.



Temperatura: 900°C – Ao alcançar essa temperatura temos a reação de calcinação do calcário.



Temperatura: 950°C até 1000°C – Faixa de temperatura onde se encontra uma zona de reserva térmica e química devido ao equilíbrio termodinâmico.



É importante observar que essas reações são realizadas sem o consumo de carbono e que o gás redutor é proveniente de regiões inferiores.

A reação de Boudouard ( $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$ ) é endotérmica, ou seja, reduz a temperatura, mas a redução de FeO a Fe é levemente exotérmica, evitando que a temperatura caia abaixo de 927 °C. Se a temperatura de sopro na ventaneira for aumentada, mais  $\text{CO}_2$  será produzido, que deverá reagir para formar mais CO, promovendo uma redução da temperatura. Na temperatura de 927 °C a razão CO/ $\text{CO}_2$  é de aproximadamente 2,3.

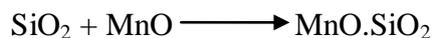
· Zona Coesiva ou Zona de Amolecimento e Fusão: A partir dessa região os minérios começam a amolecer e acabam fundindo, enquanto o coque funciona como sustentador da carga metálica e funciona como uma camada permeável para os gases que vem da parte inferior serem capazes de percolar o leito e alcançar o topo do forno. As faixas de temperatura dessa região se encontram de 1000°C e 1450°C.

Temos nessa região a formação de ferro metálico e o aparecimento de uma escória primária em estado líquido.

Temperatura: 1300°C – Formação da escória primária líquida de baixo ponto de fusão e alto teor de óxido de ferro (FeO) podendo chegar até a 40%. Além disso, ocorre a presença de uma reação muito importante, reação de boudouard, que tem como característica ser endotérmica, que significa que para reduzir o óxido de ferro é necessário consumir maior quantidade de calor e carbono.



Formação da escória primária – Aglomeração de óxidos em estado líquido.



A figura 17 mostra a distribuição da carga dentro da zona de amolecimento e fusão no alto-forno. Fica mais fácil verificar as camadas de minério em contato com as janelas de coque com os gases percorrendo essa mistura de materiais, em cima temos menores temperaturas mostrando o início do amolecimento, enquanto que na parte de baixo onde as temperaturas são maiores ocorre a formação do ferro gusa e da escória primária.

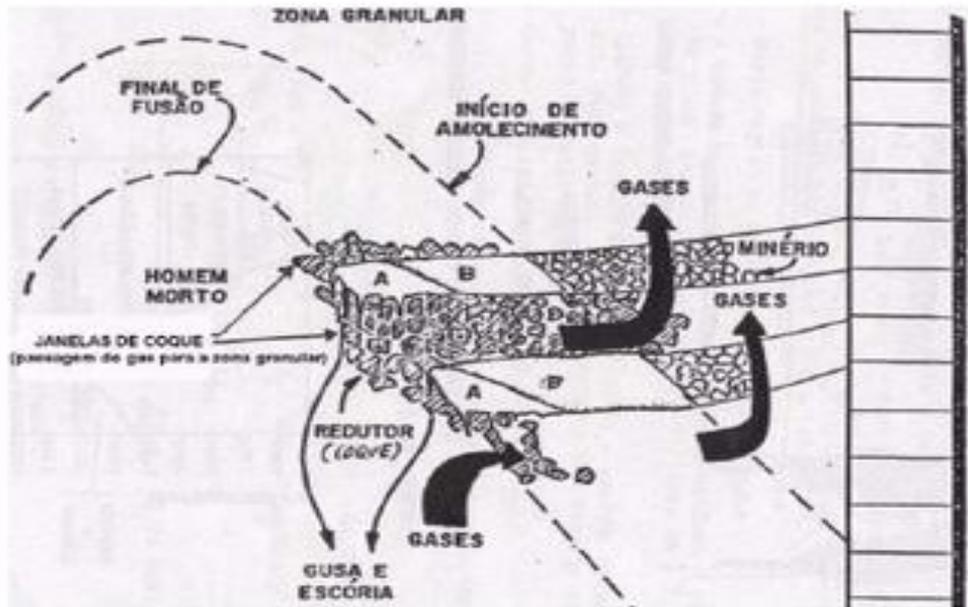
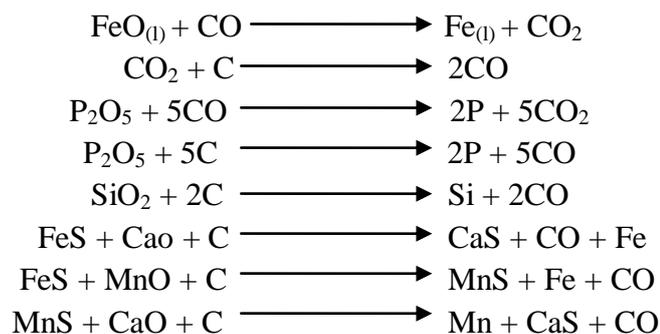


Figura 17 – Zona Granular de um Alto-Forno

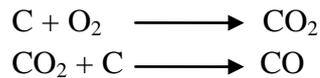
- Zona de Gotejamento: O metal e a escória ambos líquidos continuam a descer dentro do forno atingindo uma camada de coque com cavidade/porosidade suficiente para a movimentação do gás redutor.

Temperatura: 1400°C até 1800°C - temos a redução das impurezas contidas no minério e a formação de uma escória secundária devido a dissolução do CaO, nessa região a quantidade de óxido de ferro presente na escória cai e seu teor pode chegar até 5%.



- Zona de Combustão: A temperatura continua aumentando devido ao sopro de ar quente produzido pelas ventaneiras presente nesta região, além do fato de se ter a combustão do coque que exerce um acréscimo na temperatura local.

Temperatura: 2000°C – Pela presença de quantidades elevadas de carbono, o gás CO<sub>2</sub> resultante da queima do coque com o ar quente, reage com o carbono resultando na formação, de um agente redutor (CO), em forma gasosa. Temos também a formação de uma escória final que vai conter as cinzas do carvão, além de ocorrer a dissolução final do CaO na escória.



- Zona do Cadinho: Nesta região ocorre à transferência do material final para recipientes refratários, que são: gusa-líquido, escória final e o coque.

### Operações do alto-forno

Para o alto-forno existem procedimentos realizados desde a entrada dos materiais circulantes necessários para a produção do ferro gusa, até o carregamento do gusa líquido para a posterior produção de aço.

Inicialmente ocorre o armazenamento do coque, minério de ferro e pelotas, fundentes e sinter em silos. Após o armazenamento tem-se o sistema de carregamento do alto-forno e a sua devida pressurização. A partir desse ponto é realizada a conexão com o anel de vento ligado ao sistema de injeção de ar pelas ventaneiras presentes no alto-forno. Após a produção de gusa-líquido e da escória prossegue o vazamento do forno pelo cadinho que os transporta através de um sistema de casa de corrida e posteriormente ocorre a separação entre eles.

O sistema de carregamento do alto-forno pode ser realizado de diversas maneiras, geralmente utilizam correias transportadoras para que os materiais provenientes dos silos de armazenamento alcancem o topo do alto-forno onde o abastecem através de calhas giratórias ou em formas de cones localizadas no topo do alto-forno.

Depois de realizado o carregamento é necessário avaliar a pressurização do topo do forno, eventualmente ocorre perdas de carga entre as ventaneiras e o topo que acabam por aumentar a velocidade do gás redutor responsável pela redução do minério de ferro, ou seja, promove-se uma diminuição da eficácia do processo devido a perda de carga. Portanto é muito importante verificar a vedação do forno, e para isso conta-se com pressões em torno de 1,5 e 2,5 kgf/cm<sup>2</sup>.

Após vedar o topo do forno averigua-se o anel de vento que se trata de um anel tubular presente ao redor do alto-forno, este recebe o ar quente proveniente dos regeneradores de calor e o distribui para o interior do forno através da sua conexão com as ventaneiras.

O sistema de injeção de ar pelas ventaneiras, apresentado na figura 18, é realizado através de uma tubulação de entrada de ar que passa pela rampa e é conectada ao anel de vento, ainda nesse sistema temos uma tubulação contendo água de resfriamento para diminuir a temperatura de trabalho do equipamento.

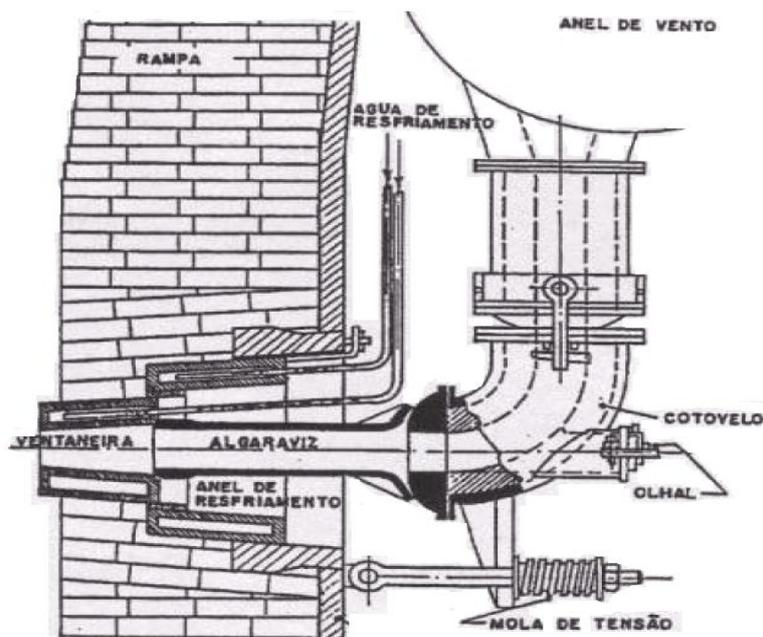


Figura 18 – Esquemática de uma Ventaneira Acoplada ao Anel de Vento.

A temperatura na qual o ar é soprado para dentro do alto-forno é superior a temperatura ambiente devido ao fato desse ar ser pré-aquecido devido a um regenerador de calor. Esse ar na verdade é uma mistura de gás de alto-forno com gás de coqueria que possuem certo poder calorífico com ar, este é queimado dentro de uma câmara de combustão, e posteriormente atravessa os tijolos refratários da câmara de regeneração e tende a trocar de calor com os tijolos a uma temperatura de  $1400^{\circ}\text{C}$  enquanto que o gás fica com  $1500^{\circ}\text{C}$ . Depois este é enviado para o anel de vento onde vai ser puxado pelo sistema de injeção de ar pelas ventaneiras chegando dentro do alto-forno com uma temperatura de  $1200^{\circ}\text{C}$ .

Após termos a redução do minério de ferro pela produção constante de ferro gusa e escória, na região do cadinho, entra em ação a casa de corrida que recebe o vazamento desses dois produtos e tem como finalidade manter o alto-forno vazio para a próxima corrida.

A posterior separação de gusa e da escória é feita pela diferença de densidade existente entre os dois, e realizada pelo canal de corrida principal.

No final da corrida temos a produção de ferro gusa em estado líquido contendo a seguinte composição química (vide tabela XVIII):

Tabela XVIII – Composição típica do ferro-gusa (ABM, 2003)

Ferro Gusa	
Elemento	Composição (%)
Si	0,5 - 3,0
S	0,035 - 0,050
P	0,040 - 0,40
Mn	1,0 - 2,0
C	3,0 - 4,5
Fe	Balanço

Contudo ainda é necessário fazer a remoção do enxofre contido no ferro gusa, essa operação é realizada dentro do carro torpedo onde existem melhores condições para realizar essa tarefa. O enxofre não é totalmente eliminado na escória do alto-forno, pois além de ser necessária uma atmosfera redutora (presença de CO) também se necessita de uma escória básica forte, embora o alto-forno produza uma escória básica ela não é capaz de promover a dessulfuração completa. Portanto adiciona-se calcário e coque para gerar a atmosfera redutora e aumentar a basicidade da escória, e com isso remover o enxofre.

#### Tipo de Emissões

“*Open Dust Source*” – enquanto é feita o armazenamento de minério de ferro, coque, fundentes e sinter nos silos e durante o processo de carregamento do alto-forno, os finos desses materiais podem acabar se perdendo devido à ação de ventos e no vazamento de gusa líquido em carros torpedos que posteriormente será enviada para a aciaria.

“*Process Fugitive Emissions*” – emissões ocorrem decorrentes dos processos de redução do minério de ferro que geram gases que saem pelo topo do alto-forno, resfriamento da escória líquida e regeneração de calor utilizado no ar soprado pelas ventaneiras.

No caso do alto-forno existem diferentes tipos de emissões associados às diferentes operações que ocorrem no alto-forno, as que ocorrem em grande quantidade são de materiais particulados e dióxido de carbono.

Além disso, ainda existe a possibilidade de mudança do tipo de emissão com relação ao tipo de carvão utilizado, lembrando que cada um deles possui diferente composição química e propriedade mecânica.

Para os regeneradores existe também a emissão de óxidos contendo nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), enquanto que em processos como o de dessulfuração que ocorre dentro de carros torpedos ocorre a liberação de óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ).

A tabela XIX apresenta as emissões do alto-forno.

Tabela XIX – Emissões do alto-forno (CONAMA, 2004).

Alto-Forno				
Tipo	Fontes	Descrição das Fontes	Emissões	
Alto-Forno à Coque	Estocagem Silos	Captação e tratamento do material particulado gerados nos processos de transferência, carregamento e descarregamento dos silos de matéria-prima	MP	
	Produção de Gusa	Produção de gusa-líquido	CO <sub>2</sub> , MP	
	Ventaneiras	Regeneração do calor	NO <sub>x</sub>	
	Estocagem Carro Torpedo	Captação e tratamento do material particulado gerado nos processos vazamento do ferro gusa carregamento dos carros torpedo	MP	
	Processo Carro torpedo	Processo de desulfuração	SO <sub>x</sub>	
Alto-Forno à Carvão Vegetal	Estocagem Silos	Captação e tratamento do material particulado gerados nos processos de transferência, carregamento e descarregamento dos silos de matéria-prima	MP	
	Produção de Gusa	Produção de gusa-líquido	CO <sub>2</sub> , MP	
	Ventaneiras	Regeneração do calor	NO <sub>x</sub>	
	Estocagem Carro Torpedo	Captação e tratamento do material particulado gerado nos processos vazamento do ferro gusa carregamento dos carros torpedo	MP	
		Processo Carro torpedo		Processo de desulfuração

Os gases gerados no topo do alto-forno são recuperados e reutilizados de diversos modos, parte dele é reutilizada no próprio regenerador de calor utilizado no alto-forno, enquanto que outra parte é utilizada em forma de combustível em alguma outra planta da siderúrgica.

A diferença entre as emissões do alto-forno a base de coque e a base de carvão vegetal é justamente a quantidade de gás produzido durante a operação de redução do minério de ferro e a presença de fósforo nos particulados a base de carvão vegetal e óxido de enxofre nos particulados a base de coque. A produção de gás do alto-forno fica em torno de 2100 a 2300 Nm<sup>3</sup>/t de ferro gusa produzido tendo concentração de material particulado variando de 5 a 10 g/Nm<sup>3</sup> para forno a base de coque, enquanto que para forno a base de carvão vegetal varia de 16 a 17 g/Nm<sup>3</sup>. Além disso, o forno à base de carvão vegetal produz cerca de 200 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de aço bruto produzido.

No caso da Usiminas a emissão do material particulado está em torno de 1,25 kg/t de aço bruto produzido. A tabela XX informa a quantidade de material particulado médio emitido por unidades de sinterização nos EUA utilizando sistema de captação ou não.

Tabela XX – Alto- forno: distribuição granulométrica da emissão de material particulado (EPA, 2005).

Alto-Forno			
Fonte	Granulometria (µm)	Massa acumulada passante (%)	Massa acumulada fator de emissão (g/t)
Chaminé do alto-forno	0,5	4	10
	1	15	50
	2,5	23	70
	5	35	110
	10	51	150
	15	61	180
	>15	100	300
Emissão do Processo de Redução	0,5	7	40
	1	9	60
	2,5	15	100
	5	20	130
	10	24	160
	15	26	170
	>15	100	650
Dessulfuração	0,5	0	0
	1	2	10
	2,5	11	60
	5	19	100
	10	19	100
	15	21	120
	>15	100	550

A tabela XXI apresenta a distribuição granulométrica dos particulados presentes no gás do alto-forno, essa informação foi obtida de uma siderúrgica de carvão vegetal, Siderúrgica Plantar, localizada em Sete Lagoas.

Tabela XXI - Distribuição granulométrica do gás de alto-forno (Batista, 2009).

Distribuição Granulométrica do Particulado	
Tamanho (µm)	Passante (%)
184	98,7
83,4	86,1
46,2	67,2
23,1	44,4
12,8	28,6
1,2	0,3

## 5.5 Aciaria

Para produzir de aço é necessário fazer uma remoção ainda mais eficaz das impurezas contidas no ferro gusa, contudo para que seja possível aumentar a pureza e obter como produto final o aço é preciso reduzir a quantidade de carbono e criar uma escória que seja capaz de retirar elementos indesejáveis que estão presentes na composição de gusa em estado líquido. A figura 19 mostra o funcionamento de um conversor LD.

Dentro da aciaria existem duas rotas possíveis para a obtenção do aço. A primeira seria a aciaria elétrica, enquanto que a segunda seria a aciaria com o emprego de oxigênio comumente denominado de Basic Oxygen Furnace (BOF), algumas alterações foram realizadas ao longo do desenvolvimento dessa tecnologia. Atualmente o projeto com maior semelhança é o conversor LD.

Como discutido no quarto tópico, as emissões mais perigosas e em maiores quantidades são provenientes da produção do aço através da rota do conversor LD, portanto este trabalho vai apresentar as emissões provenientes dessa rota.

### Processo do conversor LD

Este processo funciona decorrente da utilização de 70% gusa líquido e 30% de sucata com auxílio de oxigênio puro por volta de 99% de pureza que tem como função oxidar os elementos indesejáveis presentes no gusa, principalmente o silício e o carbono. A fonte de calor empregada nesse processo é proveniente das próprias reações de oxidação das impurezas contidas no gusa líquido, portanto não se aplica uma fonte de energia externa.

Quando o oxigênio entra em contato com o silício e com o carbono as reações químicas começam gerando energia suficientemente elevadas para fundir a sucata e oxidar as impurezas. Este processo dura cerca de 45 minutos, durante o qual forma-se uma escória que vai incorporar os óxidos gerados. Além disso, é possível adicionar elementos de liga caso exista o interesse em produzir diferentes tipos de ligas de aço.

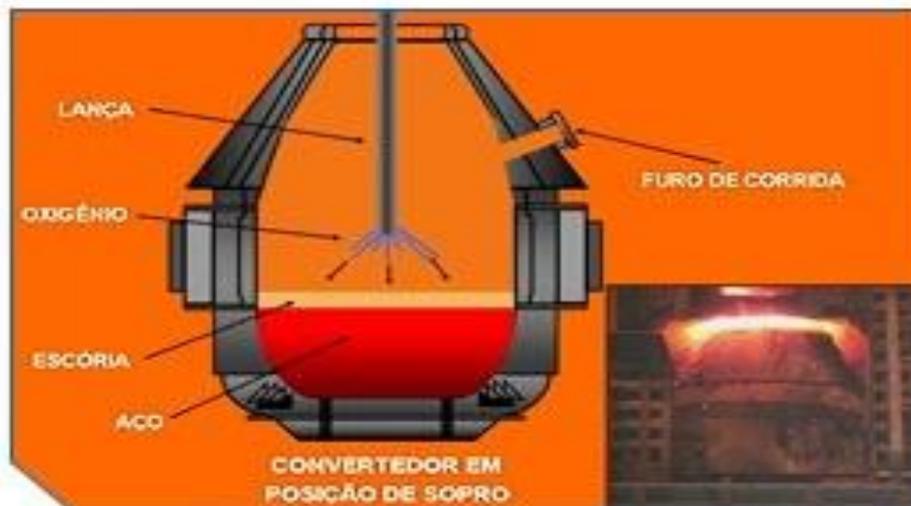
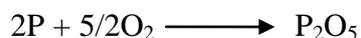
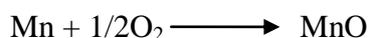
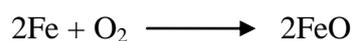


Figura 19 - Conversor LD (ABM, 2003).

As reações químicas mais importantes decorrentes dentro de um conversor LD são:



Conforme ocorre a formação desses óxidos, a segregação destes para a escória sobrenadante no banho de metal líquido é iminente. Quando um ciclo de 45 minutos termina, o metal é vazado e a partir desse ponto temos um aço com alto teor de oxigênio e alta possibilidade de inclusões devido à presença de gases que acabam tendo a solubilidade no aço diminuída quando a temperatura do banho decai.

#### Operações do conversor LD

O ciclo de operação do conversor LD (BOF) começa pelo carregamento da sucata e do gusa sólido, depois acrescenta-se o gusa em estado líquido. Segundo passo utiliza-se uma lança para soprar oxigênio enquanto outra adiciona fundentes/ferro ligas. Deve ser feita uma medição da temperatura com retirada de amostras para avaliação da composição química, quando a composição for ideal deve-se realizar o vazamento do aço e da escória em diferentes recipientes. A figura 20 mostra os processos realizados durante um ciclo de operação do conversor.

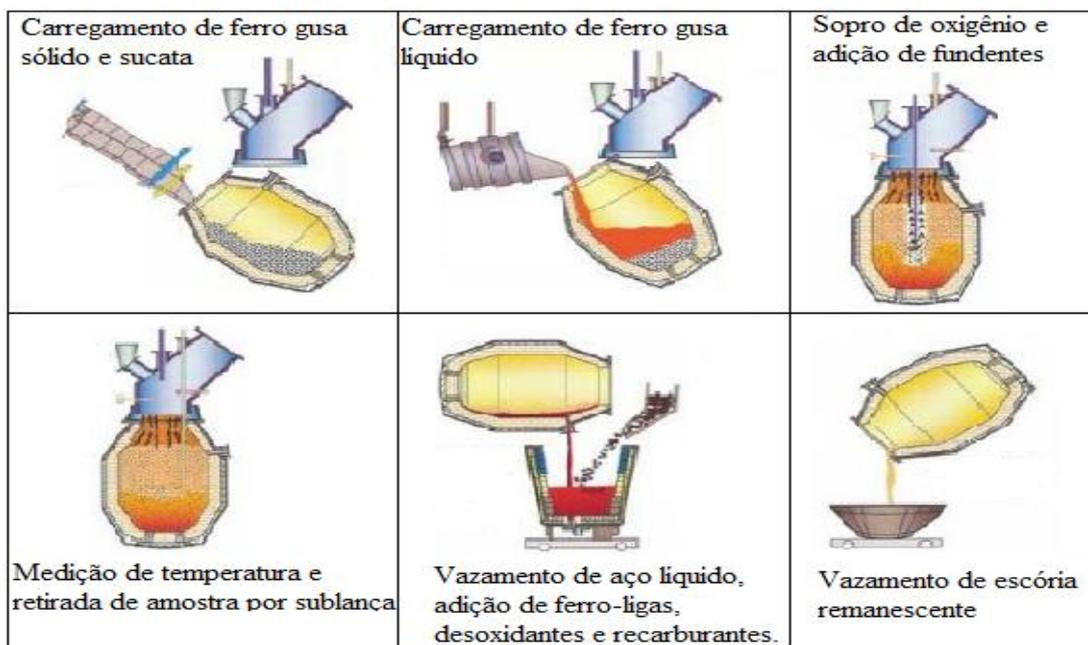


Figura 20 - Processo de funcionamento do Conversor LD (ABM, 2003).

Cada um desses passos possui um tempo certo para que a composição química final do aço seja adequada para utilização em processos futuros.

Pelo fato desses processos serem realizados com frequência é possível observar certo padrão no tempo de cada um desses passos, de modo que o produto final saia conforme previsto. Esse tempo varia conforme a utilização de ferro-ligas para a produção de diferentes tipos de aço. A tabela XXII mostra o ciclo operante do conversor.

Tabela XXII – Ciclo do conversor LD (ABM, 2003)

Conversor LD	
operação	Tempo em minutos
Carga	8
Sopro de oxigênio	18
Tomada de temperatura e Composição química	5
Vazamento do aço	6
Retirada da escória	3

### Tipos de emissões

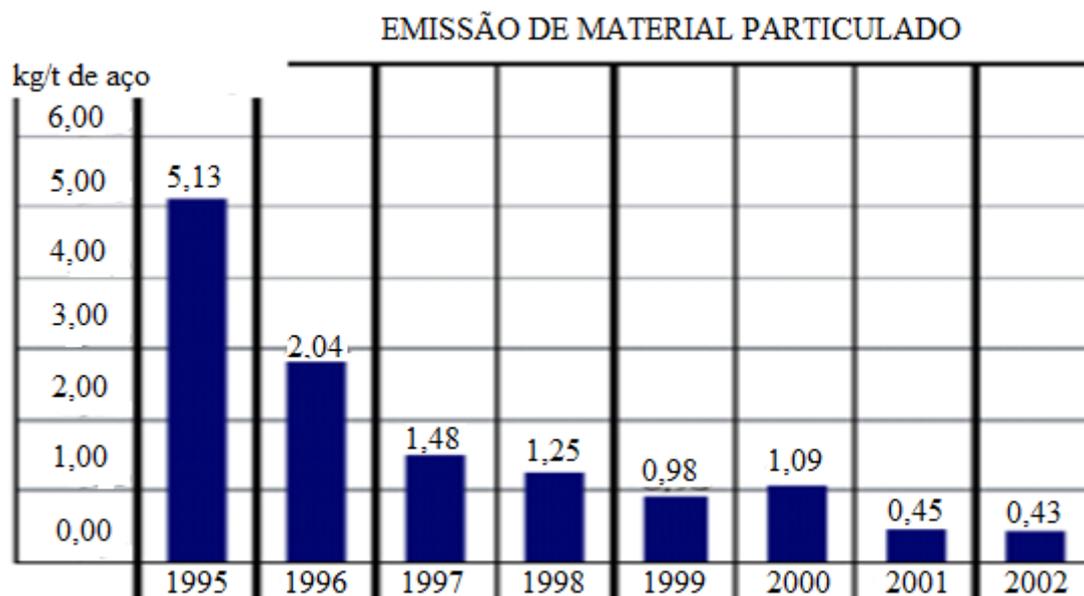
As emissões para o conversor LD estão presentes quando temos a transferência de gusa-líquido para dentro do conversor, do aço e da escória vazados para fora do conversor e devido ao processo de oxidação do gusa que promove a liberação de gases e material particulado.

Existe a formação de gases que em parte fica solubilizada no próprio aço, devido a altas temperaturas, enquanto que o restante segue para atmosfera. Para os processos decorrentes da oxidação temos a presença de monóxido e dióxido de carbono, além de quantidades de nitrogênio e hidrogênio. Enquanto que para a transferência de materiais temos apenas a liberação de material particulado. Os gases que saem para atmosfera pelo processo de oxidação também podem conter material particulado, inclusive de ferro-ligas. A tabela XXIII mostra a composição química dos gases gerados no conversor LD.

Tabela XXIII – Emissões do Conversor LD (CONAMA, 2004).

Conversor LD		
Fontes	Descrição das Fontes	Emissões
Sistema Primário	Captação e tratamento do material particulado gerados nos processos de transferência, carregamento e descarregamento do conversor	MP
Sistema Secundário	Captação e tratamento do material Particulado gerado no processo de oxidação das impurezas do gusa líquido	MP CO CO <sub>2</sub> N <sub>2</sub> H <sub>2</sub>

Os gases gerados pelo processo de oxidação citado como sistema secundário na tabela tem 72,5% CO, 16,2% CO<sub>2</sub>, 8% N<sub>2</sub> e 3,3% H<sub>2</sub>. Enquanto que o volume de gás produzido gira em torno de 50-100 Nm<sup>3</sup> /t aço líquido. A figura 21 representa a emissão de material particulado da CSN.



FONTE: CSN (2002)

Figura 21 - CSN: Emissão de Material Particulado em Kg/t de Aço Produzido (Ricardo, D. C. (2004)).

A tabela XXIV representa a emissão dos particulados provenientes das diversas fontes de um conversor LD.

Tabela XXIV – Conversor LD: distribuição granulométrica da emissão de particulados (EPA, 2005).

Conversor LD			
Fonte	Granulometria ( $\mu\text{m}$ )	Massa acumulada passante (%)	Massa acumulada fator de emissão g/t
Saída dos Gases de Fusão do Conversor	0,5	34	1.2
	1	55	1.9
	2,5	65	2.2
	5	66	2.2
	10	67	2.3
	15	72	2.4
	>15	100	3.4
Carregamento do Conversor	0,5	8	20
	1	12	40
	2,5	22	70
	5	35	100
	10	46	140
	15	56	170
	>15	100	300
Descarregamento do Conversor	0,5	0	0
	1	11	50
	2,5	37	170
	5	43	200
	10	45	210
	15	50	230
	>15	100	460
Processo de Refino após Fusão do Conversor	0,5	45	13
	1	52	15
	2,5	56	16
	5	58	16
	10	68	19
	15	85	24
	>15	100	28

Esses gases gerados são transformados em lamas através da adição de água, com intenção de recuperar parte da perda do processo de redução eliminado por via atmosférica. A tabela XXV apresenta a composição da lama de particulado grosso e de particulado fino. Lembrando que a lama fina contém o particulado mais fino por volta de  $\text{PM}_{2,5}$  e inferior, enquanto que a lama grossa contém particulado grosso acima de  $\text{PM}_{10}$ .

Tabela XXV - Composição química da lama da aciaria (Marcos, 2011)

<b>Elemento (%)</b>	<b>Lama fina</b>	<b>Lama grossa</b>
<b>Zn</b>	4,37	0,51
<b>Fe</b>	50,65	67,61
<b>K</b>	0,0044	0,0210
<b>Na</b>	0,045	0,014
<b>Ca</b>	4,18	4,25
<b>Pb</b>	0,068	<0,010
<b>Si</b>	0,273	0,710
<b>Mg</b>	1,49	2,43
<b>Cd</b>	<0,02	<0,02
<b>Cr</b>	0,023	0,038
<b>C</b>	1,116	0,805

## 6 Controle Ambiental

A demanda pelo aço e seus produtos vem crescendo junto com o aumento populacional e da economia como um todo. Portanto existe a necessidade no aumento de produção para o futuro e com isso a preocupação com a emissão de poluentes atmosféricos cresce de forma vinculada ao crescimento da produção de aço mundial

Na década de 1980 foi instaurada a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) e o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) que era constituído por órgãos que detinham a responsabilidade pela proteção e melhoria da qualidade do ambiente. Além disso, essa lei também instaurava a criação de um conselho chamado de Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) que foi instaurado como um órgão legislador, sendo este responsável pelas diretrizes federais básicas emitidas através de resoluções (MAGRINI et al, 2005).

### 6.1 CONAMA

O CONAMA acaba se transformando em um órgão majoritário e tem como um dos objetivos pré-estabelecer o processo de licenciamento ambiental de empreendimentos. É

responsável também por conferir aos municípios a tarefa de decisão sobre áreas de impactos e se a região do futuro empreendimento vai poder ser utilizada ou não.

Além do licenciamento ambiental o CONAMA também faz Avaliação de Impactos Ambientais (AIA) que é um instrumento da Política Nacional do Meio Ambiente. Encontra-se na resolução CONAMA 001 de 1986 a definição de impacto ambiental que vem a seguir.

Impacto Ambiental é caracterizado pela alteração das propriedades físicas, químicas ou biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que direta ou indiretamente afetam:

1. A saúde, a segurança e o bem estar da população;
2. As atividades sociais e econômicas;
3. A biota;
4. As condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;
5. A qualidade dos recursos ambientais.

Nessa resolução são apontadas diretrizes para a realização de estudos de impactos ambientais (EIA). Seguem listadas essas diretrizes:

- Contemplar todas as alternativas tecnológicas e de localização do projeto confrontando-as com a hipótese de não execução do projeto;
- Identificar e avaliar sistematicamente os impactos ambientais gerados nas fases de implantação e operação da atividade;
- Definir os limites das áreas geográficas a ser direta ou indiretamente afetada pelos impactos, denominada área de influência do projeto, considerando, em todos os casos, a bacia hidrográfica na qual se localiza;
- Considerar os planos e programas governamentais, propostos e em implementação na área de influência do projeto, e sua compatibilidade.

Enquanto que as atividades principais do EIA regulamentadas pela resolução CONAMA 001 de 1986 são:

- Diagnóstico ambiental da área de influência do projeto, com a descrição e análise dos recursos ambientais, de modo a traçar a situação ambiental na área, antes da implementação do empreendimento, e deve considerar os seguintes meios:
  1. Meio Físico – subsolo, águas, ar e clima, com destaques para: recursos minerais, topografia e aptidões do solo, corpos d'água, regime hidrológicas e correntes marinhas e atmosféricas;

2. Meio Biológico e Ecossistemas Naturais – fauna e flora, com destaque para espécies indicadoras da qualidade ambiental, de valor científico e econômico, raras e ameaçadas de extinção e as áreas de preservação permanente;
  3. Meio Sócio-Econômico – uso e ocupação do solo, usos da água e a sócio-economia, com destaques para sítios e monumentos arqueológicos, históricos e culturais da comunidade, as relações de dependência entre a sociedade local, os recursos ambientais e o potencial uso futuro de tais recursos.
- Análise dos impactos ambientais do projeto e suas alternativas, identificando, estimando a magnitude e interpretando a importância dos prováveis impactos. Estes impactos devem ser classificados em: positivos ou negativos, diretos ou indiretos, de curto, médio ou longo prazos, temporários ou permanentes, grau de reversibilidade, propriedades cumulativas e sinérgicas e a distribuição dos ônus e benefícios sociais.
  - Definição das medidas mitigadoras dos impactos negativos, incluindo os equipamentos e sistema de controle de poluição e tratamento de rejeitos, considerando a eficácia de cada um.
  - Elaboração de um programa de monitoramento e acompanhamento dos impactos positivos e negativos, indicando os fatores e parâmetros a serem considerados.

As indústrias siderúrgicas amplamente consideradas como usinas de grande porte que possuem grande influência nos impactos ambientais referentes ao local onde residem, porém é a interação entre a atmosfera e os poluentes emitidos pelas diversas plantas contidas dentro de uma usina siderúrgica que vão definir a qualidade do ar nessa localidade. Dependendo da qualidade do ar, pode haver o surgimento de efeitos adversos na população local.

Os níveis de referência estabelecidos pelo CONAMA tendem a funcionar como uma base para determinar a relação entre emissão de poluentes, a saúde da população e o efeito sobre o meio ambiente, levando em consideração as tecnologias vigentes e disponíveis atualmente para redução dessas emissões. Portanto para cada tipo de fonte existem limites máximos de emissões definidos pelas pela legislação brasileira através da resolução do CONAMA número 382/06 que estabelece limites de emissões para atividades de fontes fixas como: fabricação de aço, geração de eletricidade, refino de petróleo, entre outras.

Como cada tipo de poluente atmosférico possui diferentes tipos de efeitos sobre o meio ambiente e sobre a saúde da população houve uma necessidade de impor diferentes limites para cada tipo de emissão.

A tabela XXVI representa a resolução do CONAMA 003/90 apresentando os padrões de qualidade do ar, levando em consideração a classificação feita por Assunção em 1998.

Tabela XXVI - Resolução CONAMA 003 de 1990 (Magalhães, 2005)

Resolução CONAMA 003/90			
Padrões de Qualidade		Primário	Secundário
		mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>
PTS	MG, anual	80	60
	Média 24 h*	240	150
Fumaça	MA, anual	60	40
	Média 24 h*	150	100
Partículas Inaláveis	MA, anual	50	50
	Média 24 h*	150	150
SO <sub>2</sub>	MA, anual	80	40
	Média 24 h*	365	100
CO	Média 8h*	10000 (9 ppm)	10000 (9 ppm)
	Média 1h*	40000 (35 ppm)	40000 (35 ppm)
Ozônio	Média 1 h*	160	160
NO <sub>2</sub>	MA, anual	100	100

MG - Média Geométrica

MA - Média Aritmética

A tabela XXVII refere-se aos limites de emissão de material particulado, dióxido de enxofre, óxido de nitrogênio e concentração de oxigênio para as plantas presentes dentro de uma usina siderúrgicas integrada, podendo esta ser via alto-forno com carvão vegetal ou coque, e até mesmo a utilização de rotas com conversor LD ou pela preferência de forno elétrico a arco.

Tabela XXVII - Limites de emissão de poluentes atmosféricos na siderurgia (CONAMA, 2006).

<i>Limites de emissão para poluentes atmosféricos gerados na siderurgia</i>					
Unidade de produção	Fontes de emissão pontual	MP <sup>(1)</sup>	SO <sub>2</sub> <sup>(1)</sup>	NO <sub>x</sub> <sup>(1)</sup>	%O <sub>2</sub> <sup>(1)</sup>
Coqueria	Sistema de despoeiramento do desenformamento	40	NA	NA	NA
	Câmara de Combustão dos Fornos de Coque	50	800	700	7%
Sinterização	Sistema Primário de Despoeiramento	70	600	700	NA
	Sistema Secundário de Despoeiramento	70	NA	NA	
Alto-Forno a Coque	Sistema de Depoeiramento da Casa de Estocagem	40	NA	NA	
	Sistema de Depoeiramento da Casa ou Ala de Corrida	40	NA	NA	
Alto-Forno a Carvão Vegetal	Sistema de Depoeiramento da Casa de Estocagem	50	NA	NA	
	Sistema de Depoeiramento da Casa ou Ala de Corrida	50	NA	NA	
Aciaria LD	Sistema Primário de Despoeiramento	80	NA	NA	
	Sistema Secundário de Despoeiramento	40	NA	NA	
	Sistema de Depoeiramento da Dessulfurização de Gusa	40	NA	NA	
	Sistema de Depoeiramento dos Fornos de Cal	100	NA	470	
Aciaria Elétrica	Sistema Primário e Secundário de Depoeiramento	< 50 t/c: 50	NA	NA	NA
		> 50 t/c: 40			
Laminação	Fornos de Reaquecimento de Placas com Queima de Gases Siderúrgicos	60	1000	700	7%
Pelotização	Sistema de Exaustão do Forno de Pelotização	70	700	700	NA
Central Termoelétrica	Caldeira com Queima de Gases Siderúrgicos	60	600	350	5%

<sup>(1)</sup> Os resultados devem ser expressos na unidade de concentração mg/Nm<sub>3</sub>, em base seca e no teor de O<sub>2</sub> explicitado. <sup>(2)</sup> t/c = toneladas de aço/corrida. NA = Não Aplicável.

Fonte: CONAMA (2006)

## 6.2 Organização Mundial da Saúde (OMS)

Além do CONAMA existe também a Organização Mundial de Saúde (OMS) que tem como função criar normas que avaliam os limites de emissões de fontes fixas como sendo rígidos ou não, geralmente estipulam valores mais rigorosos para os limites de emissões como é mostrado a seguir pela tabela XXVIII.

Tabela XXVIII - Diretrizes de qualidade do ar (Chauvet, 2013).

OMS (2006)		
Poluente	Concentração $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Referência Temporal
PM10	50	Média 24h
	20	Média anual
PM2,5	25	Média 24h
	10	Média anual
O3	100	8h em um dia
NO2	200	Máxima 1h
	40	Média anual
SO2	500	10 min
	20	Média 24h

Lembrando que mesmo que as diretrizes se encontrem como sendo função do CONAMA, existe um artigo na Constituição Estadual do Rio de Janeiro de 1989 número – 281 que informa:

“Nenhum padrão ambiental do Estado poderá ser menos restritivo do que os padrões fixados pela Organização Mundial de Saúde.” AMPERJ, 1989

É importante salientar os males que cada um destes materiais emitidos na atmosfera pode danificar de forma consistente a saúde da população, de acordo com o tempo que esse material fica exposto no meio ambiente.

As próximas tabelas representam os malefícios desses materiais emitidos em relação tanto ao meio ambiente quanto ao seres vivos.

A tabela XXIX trata o tipo de material presente na atmosfera e a suas respectivas conseqüências para o meio ambiente de modo geral (CETESB 2010).

Tabela XXIX - Ação dos poluentes no meio ambiente (CETESB 2010).

Poluente	Características	Fontes Principais	Efeitos Gerais ao Meio Ambiente
Partículas Inaláveis (MP <sub>10</sub> ) e Fumaça	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc. Faixa de tamanho < 10 micra.	Processos de combustão (indústria e veículos automotores), aerossol secundário (formado na atmosfera).	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo.
Partículas Totais em Suspensão (PTS)	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc. Faixa de tamanho < 100 micra.	Processos industriais, veículos motorizados (exaustão), poeira de rua ressuspensa, queima de biomassa. Fontes naturais: pólen, aerossol marinho e solo.	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo.
Dióxido de Enxofre (SO <sub>2</sub> )	Gás incolor, com forte odor, semelhante ao gás produzido na queima de palitos de fósforos. Pode ser transformado a SO <sub>3</sub> , que na presença de vapor de água, passa rapidamente a H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . É um importante precursor dos sulfatos, um dos principais componentes das partículas inaláveis.	Processos que utilizam queima de óleo combustível, refinaria de petróleo, veículos a diesel, produção de polpa e papel, fertilizantes.	Pode levar à formação de chuva ácida, causar corrosão aos materiais e danos à vegetação: folhas e colheitas.
Dióxido de Nitrogênio (NO <sub>2</sub> )	Gás marrom avermelhado, com odor forte e muito irritante. Pode levar à formação de ácido nítrico, nitratos (o qual contribui para o aumento das partículas inaláveis na atmosfera) e compostos orgânicos tóxicos.	Processos de combustão envolvendo veículos automotores, processos industriais, usinas térmicas que utilizam óleo ou gás, incinerações.	Pode levar à formação de chuva ácida, danos à vegetação e à colheita.

A tabela XXX representa as conseqüências da presença dos poluentes em diferentes quantidades com relação a saúde humana (CETESB 2010).

Tabela XXX - Ação dos poluentes na saúde humana (CETESB 2010).

Qualidade	Índice	MP <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	CO (ppm)	NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
<b>Boa</b>	0-50	0-50 Efeitos desprezíveis	0-80 Efeitos desprezíveis	0-4,5 Efeitos desprezíveis	0-100 Efeitos desprezíveis	0-80 Efeitos desprezíveis
<b>Regular</b>	51-100	>50 - 150 Pessoas com doenças respiratórias podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço	>80 - 160 Pessoas com doenças respiratórias podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço	>4,5 - 9 Pessoas com doenças cardíacas podem apresentar sintomas como cansaço e dor no peito	>100 - 320 Pessoas com doenças respiratórias podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço	>80 - 365 Pessoas com doenças respiratórias podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço
		>150 e ≤200 Pessoas com doenças respiratórias ou cardíacas, idosos e crianças têm os sintomas agravados. População em geral pode apresentar sintomas como ardor nos olhos, nariz e garganta, tosse seca e cansaço	>160 e ≤180 Pessoas com doenças respiratórias, como asma, e crianças têm os sintomas agravados. População em geral pode apresentar sintomas como ardor nos olhos, nariz e garganta, tosse seca e cansaço	>9 e ≤12 População em geral pode apresentar sintomas como cansaço. Pessoas com doenças cardíacas têm os sintomas como cansaço e dor no peito agravados	>320 e ≤720 População em geral pode apresentar sintomas como ardor nos olhos, nariz e garganta, tosse seca e cansaço. Pessoas com doenças respiratórias e crianças têm os sintomas agravados	>365 e ≤576 População em geral pode apresentar sintomas como ardor nos olhos, nariz e garganta, tosse seca e cansaço. Pessoas com doenças respiratórias ou cardíacas, idosos e crianças têm os sintomas agravados
<b>Inadequada</b>	101-150	>200 e <250 Aumento dos sintomas em crianças e pessoas com doenças pulmonares e cardiovasculares. Aumento de sintomas respiratórios na população em geral	>180 e <200 Aumento dos sintomas respiratórios em crianças e pessoas com doenças pulmonares, como asma. Aumento de sintomas respiratórios na população em geral	>12 e <15 Aumento de sintomas em pessoas cardíacas. Aumento de sintomas cardiovasculares na população em geral	>720 e <1130 Aumento dos sintomas respiratórios em crianças e pessoas com doenças pulmonares, como asma. Aumento de sintomas respiratórios na população em geral	>576 e <800 Aumento dos sintomas em crianças e pessoas com doenças pulmonares e cardiovasculares. Aumento de sintomas respiratórios na população em geral
	151-199	≥250 e ≤350 Agravamento dos sintomas respiratórios. Agravamento de doenças pulmonares, como asma, e cardiovasculares, como infarto do miocárdio	≥200 e ≤400 Agravamento de sintomas respiratórios. Agravamento de doenças pulmonares, como asma, e doença pulmonar obstrutiva crônica	≥15 e ≤22 Agravamento das doenças cardiovasculares, como infarto do miocárdio e insuficiência cardíaca congestiva	≥1130 e ≤1690 Agravamento de sintomas respiratórios. Agravamento de doenças pulmonares, como asma, e doença pulmonar obstrutiva crônica	≥800 e ≤1200 Agravamento dos sintomas respiratórios. Agravamento de doenças pulmonares, como asma, e cardiovasculares, como infarto do miocárdio
<b>Má</b>	200-250	>350 e <420 Agravamento significativo dos sintomas cardiovasculares e respiratórios, como tosse, cansaço, falta de ar e respiração ofegante na população em geral. Risco de mortes prematuras de pessoas com doenças respiratórias e cardiovasculares. Risco de agravos à gestação	>400 e <800 Agravamento significativo dos sintomas respiratórios e dificuldade de respirar na população em geral. Risco de mortes prematuras de pessoas com doenças respiratórias	>22 e <30 Agravamento significativo dos sintomas cardiovasculares, como dores no peito, na população em geral. Risco de mortes prematuras de pessoas com doenças cardiovasculares.	>1690 e <2260 Agravamento significativo dos sintomas respiratórios e dificuldade de respirar na população em geral. Risco de mortes prematuras de pessoas com doenças respiratórias	>1200 e <1600 Agravamento significativo dos sintomas respiratórios e cardiovasculares, como tosse, cansaço, falta de ar e respiração ofegante na população em geral. Risco de mortes prematuras de pessoas com doenças respiratórias e cardiovasculares
	251-299	≥420 Sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Aumento de mortes prematuras em pessoas com doenças cardiovasculares e respiratórias	≥800 Sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias. Aumento de mortes prematuras de pessoas com doenças respiratórias	≥30 Sérios riscos de manifestações de doenças cardiovasculares. Aumento de mortes prematuras de pessoas com doenças cardiovasculares	≥2260 Sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias. Aumento de mortes prematuras de pessoas com doenças respiratórias	≥1600 Sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Aumento de mortes prematuras em pessoas com doenças cardiovasculares e respiratórias
<b>Péssima</b>	≥300					

## 7 Tecnologias de Recuperação

Devido aos grandes danos causados pela emissão de poluentes atmosféricos já discutidos anteriormente, existe uma preocupação contínua com a restrição dessas emissões, portanto, promove-se uma busca por tecnologias capazes de reduzir-las a ponto de atender as exigências feitas tanto pelo CONAMA quanto pela OMS. Embora esta última seja mais difícil de realizar com as tecnologias vigentes no momento.

Atualmente existem algumas tecnologias que já são amplamente utilizadas para controlar essas emissões. As mais empregadas são:

1. Coletores Mecânicos;
2. Filtros Eletrostáticos;
3. Filtros de Manga;
4. Dessulfurização dos Gases;
5. Redução Catalítica Seletiva.

### 7.1 Coletores Mecânicos

São mais empregados para a coleta de poeira, ou seja, material particulado. O Coletor Mecânico mais empregado na indústria siderúrgica é o separador ciclônico ou ciclone.

Com a utilização da força centrífuga, as partículas são removidas de um fluxo gasoso. Existe a formação de uma espiral dupla devido à entrada do gás que forma uma espiral descendente, quando o gás bate no fundo do separador ciclônico, as partículas contidas no gás são aceleradas e impulsionadas contra a parte inferior do equipamento por onde são removidas. Ao retornar para a parte superior do equipamento, o gás forma uma espiral ascendente por onde é liberado. Figura 22 mostra o equipamento.

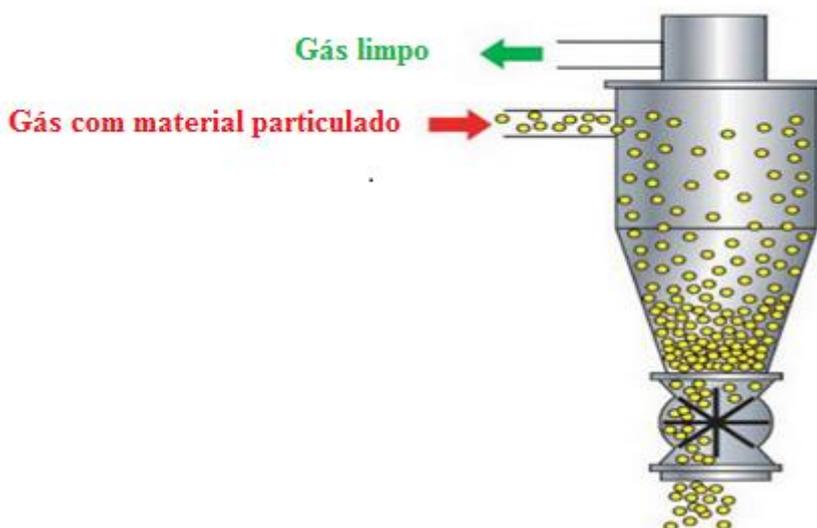


Figura 22 - Funcionamento de Ciclone - Coletor mecânico (Enfil Catálogo, 2000).

A remoção do material particulado é feita através de uma válvula de descarga e selagem. O gás entra com particulados e sai limpo do coletor mecânico.

As vantagens desse equipamento são:

- Baixo custo de operação;
- Baixa potência consumida;
- Não existe temperatura dos gases que limite o seu funcionamento.

As desvantagens desse equipamento são:

- Problema de abrasão;
- Baixa eficiência para coleta de material abaixo de cinco  $\mu\text{m}$  de diâmetro;
- Alta concentração de pós pode contribuir para o entupimento do aparato impedindo assim o seu funcionamento.

Como a eficácia para material particulado abaixo de cinco  $\mu\text{m}$  é relativamente baixa, precisa-se da utilização de outras tecnologias. Portanto os coletores mecânicos funcionam como sendo um equipamento secundário existindo a necessidade de se ter um equipamento principal (lavadores, filtros de manga ou precipitadores eletrostáticos) que possa atender os limites impostos pelas organizações ambientais.

## 7.2 Filtros Eletrostáticos

Para realizar a limpeza do gás esse aparato traz em seu funcionamento o aproveitamento da força elétrica para fazer a remoção de partículas presentes no gás.

Quando o gás percorre condutores carregados com voltagens opostas acaba sendo ionizado. Cerca de 80 % das partículas em suspensão adquirem carga positiva, enquanto que 20% adquirem carga negativa. Após o material particulado ser ionizado, a força elétrica promove a movimentação das partículas carregadas para placa condutora de carga oposta que vai aderir as partículas, como é mostrado pela figura 23, posteriormente será aterrada. Empregam-se batedores para a remoção das partículas fixadas a placa condutora aterrada que caem por tremoras, onde são removidas.

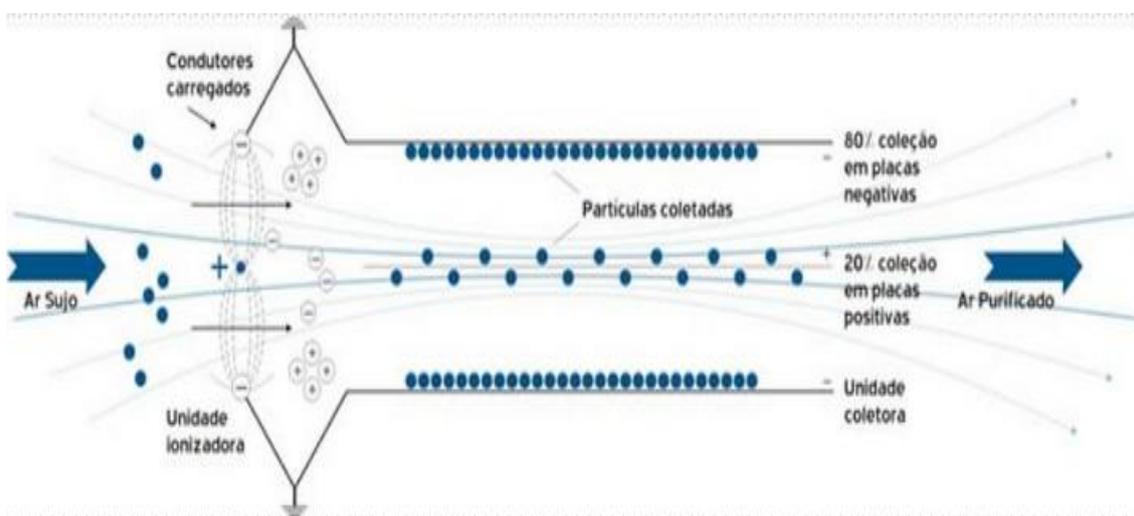


Figura 23 – Esquema de funcionamento de Filtros eletrostáticos (Enfil Catálogo, 2000).

As vantagens da utilização deste equipamento são:

- Baixo consumo de energia;
- Baixa perda de carga;
- Não necessita de muita manutenção;
- Baixos custos em peças sobressalentes;
- Redução de emissões em torno de 70 mg/Nm<sup>3</sup>.

As desvantagens deste equipamento são:

- Alta resistividade de alguns particulados diminui a eficácia do processo;
- Redução da eficácia da captação dos particulados durante batimentos das placas;
- Baixa vida útil do precipitador eletrostático encontra-se por volta de 10 anos.

### 7.3 Filtros de Mangas

Este equipamento tem como função filtrar o material particulado da mistura sólido-gás. O material filtrante utilizado geralmente é feito de mangas de tecido ou feltro.

Conforme o filtro da manga é transpassado pelo gás, as partículas contidas nele ficam retidas tanto na superfície do material filtrante como em seus poros.

Os gases entram em uma câmara de separação, onde as partículas mais pesadas são separadas pela própria ação da gravidade. O gás que contém material particulado vai da parte externa do equipamento até a parte interna contendo inúmeras mangas filtrantes. Depois que o gás percola pelos filtros este é liberado pela parte superior. O funcionamento do equipamento é melhor apresentado pela figura 24.

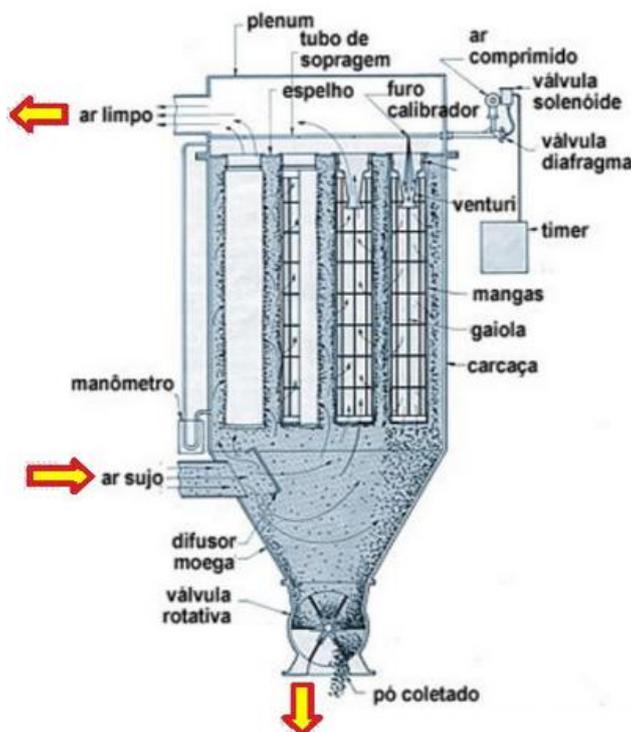


Figura 24 - Funcionamento de Filtro de Manga (Enfil Catálogo, 2000).

Este tipo de equipamento tem aplicações interessantes como:

- Coleta de partículas finas ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ );
- Capaz de capturar metais pesados devido a ação da gravidade que são perigosos a saúde como chumbo, cádmio, zinco, mercúrio e HCl;
- Eficaz na coleta de material particulado (90%), pois garante valores de emissões correspondentes ao limite estabelecido pelo CONAMA que é por volta de  $50 \text{ mg/Nm}^3$ ;

As desvantagens desse equipamento são:

- Temperatura de trabalho não pode ser elevada;
- Elevado teor de umidade presente geralmente devido ao apagamento do coque e outros;
- Material abrasivo pertinente a indústria siderúrgica vai requerer constantes trocas de filtros;
- Entupimento do material filtrante que vai necessitar de limpezas sistemáticas.

Esse equipamento é utilizado geralmente na planta de coqueria, sinterização, alto-forno, aciaria LD e forno elétrico a arco.

#### **7.4 Lavadores**

O funcionamento do lavador é baseado no contato entre particulados/gases com líquidos de lavagem, esta mistura é recirculada até atingir um nível pré-estabelecido de saturação.

Os materiais particulados são precipitados em tanque próprio e posteriormente tratados ou devolvidos ao processo.

A água é adicionada através de uma constrição/gargalo, onde é atomizada. Na seqüência, o ar percorre um separador (ciclone); a água é então separada e reutilizada.

A figura 25 representa o funcionamento de um tipo de lavador.

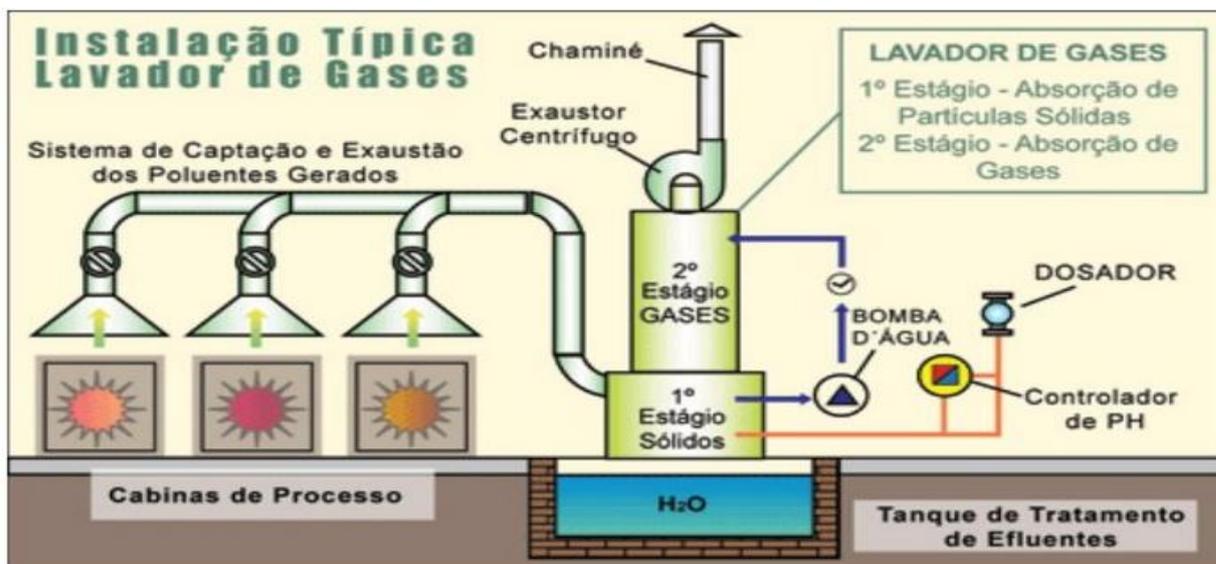


Figura 25 - Funcionamento de lavadores (Enfil Catálogo, 2000).

Se o gás estiver super saturado na região de baixa pressão (região de constrição) ocorrerá condensação das partículas na região de mais alta pressão. Posteriormente a partícula cresce e a sua superfície fica molhada, auxiliando o processo de aglomeração das partículas facilitando assim a etapa de coleta.

As vantagens desse equipamento são:

- Viável em altas temperaturas;
- Boa opção quando material tiver características explosivas ou corrosivas;
- Eficiência dos lavadores está na faixa de 60 até 80 mg/Nm<sup>3</sup>;
- Geralmente utilizada em plantas de calcinação e na coqueria;
- Eficiência do processo em torno de 90%.

As desvantagens desse equipamento são:

- Consumo de energia elevado;
- Alta quantidade de água empregada no seu funcionamento;
- Grande espaço físico exigido.

A tabela XXXI compara as vantagens e desvantagens das tecnologias utilizadas para o controle da emissão de material particulado.

Tabela XXXI - Comparação qualitativa de separadores de particulados (Lora, 2002).

Tecnologias de Redução de Emissão de Material Particulado				
Separador	Coletor Ciclônico	Filtro Eletrostático	Filtro Mangas	Lavador Gás
Forças de Separação	Centrífuga	Eletrostática	Interceptação Direta	Inercial Difusional
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Baixo Custo Capital</li> <li>-Opera em alta Temperatura</li> <li>-Baixo Custo Manutenção</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Alta Eficiência</li> <li>-Separação Seca-Úmida</li> <li>-Baixo Custo Operação</li> <li>-Ampla faixa Temperatura</li> <li>-Baixa Queda Pressão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Alta Eficiência</li> <li>-Separa grande Variedade de Particulados</li> <li>-Projeto Modular</li> <li>-Baixa Queda Pressão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Trabalha com Material Inflamável, Corrosivo e Explosivo</li> <li>-Absorção e Remoção Particulados no Mesmo Equipamento</li> <li>-Variada Eficiência</li> <li>-Resfriamento de Gases</li> <li>-Neutraliza Gases Corrosivos</li> </ul>
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Baixa Eficiência</li> <li>-Alto Custo</li> <li>-Operação</li> <li>-Queda de pressão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Alto Custo Capital</li> <li>-Não Controla Emissões Gasosas</li> <li>-Pouco Flexível</li> <li>-Ocupa Espaço</li> <li>-Depende da Reatividade das Cinzas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sensível à Gases Corrosivos e Alta Temperatura</li> <li>-Não Opera Condições Úmidas</li> <li>-Ocupa Espaço</li> <li>-Risco de Fogo e Explosão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Corrosão</li> <li>-Poluição Secundária Efluente Líquido</li> <li>-Contaminação Partículas (Não Recicláveis)</li> <li>-Alto consumo de energia</li> </ul>

## 7.5 Desulfurização dos gases

Este processo de dessulfurização de gases pode ser feita através de rotas diferentes, seja por via úmida, semi-seca ou seca (Enfil, 2000).

### 7.5.1 Processo úmido com água do mar

A própria salinidade da água do mar é utilizada para absorção do SO<sub>x</sub> como reagente, ou seja, a alcalinidade natural da água é responsável pela eliminação do SO<sub>x</sub> da fase gasosa. Analogamente ao processo com calcário, o sulfito gerado na reação de absorção é oxidado a sulfato, através de aeração. A grande vantagem deste processo é a ausência de subprodutos, ou seja, a água utilizada na lavagem dos gases pode ser descartada no mar novamente. De acordo com a figura 26.

Eficiência de remoção de SO<sub>x</sub>: até 98%

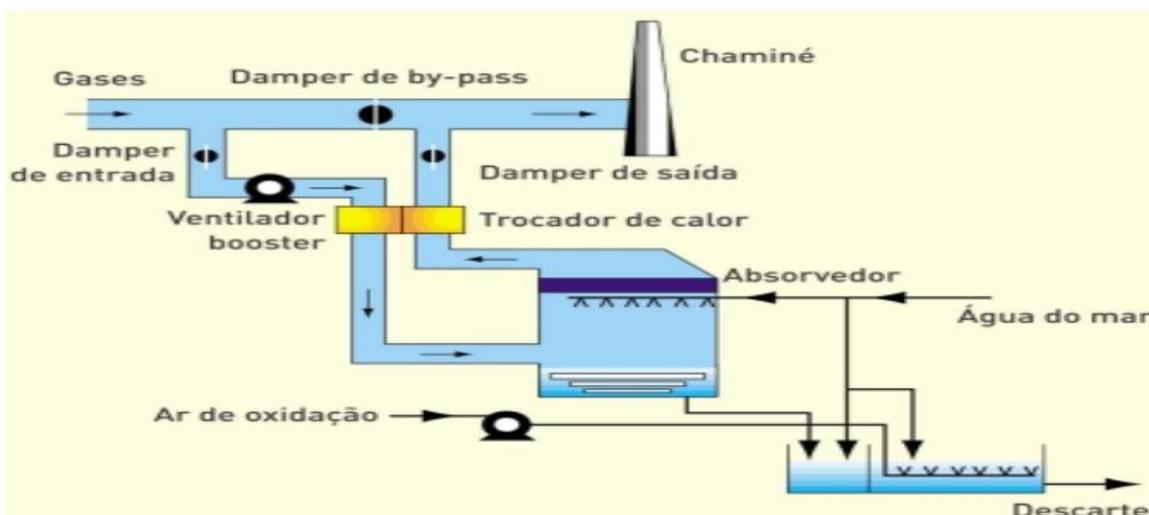


Figura 26 - Desulfurização de gás por processo úmido (Enfil Catálogo, 2000).

### 7.5.2 Processo semi-seco com cal

Diferentemente dos processos a úmido o processo semi-seco não gera efluentes líquidos. Neste processo o reagente, uma suspensão de cal hidratada, é injetada no absorvedor, onde ocorrem simultaneamente a reação de absorção do SO<sub>x</sub> e a evaporação da água da suspensão (processo de secagem). Após o absorvedor, os gases são enviados para um filtro de mangas ou precipitador eletrostático, onde o subproduto de processo, seco, é capturado. Como é apresentado pela figura 27. Este não possui valor comercial.

Eficiência de remoção de SO<sub>x</sub>: até 92%

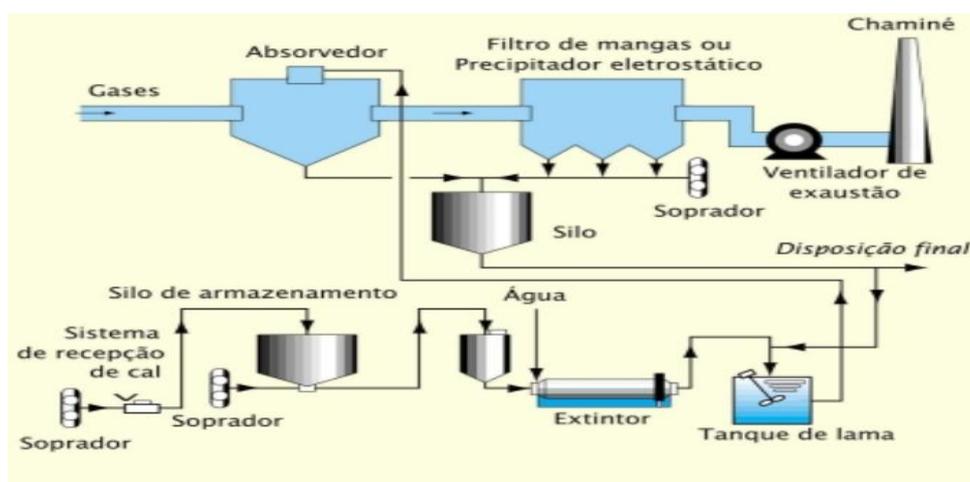


Figura 27 - Dessulfurização de gás por processo semi-seco com cal (Enfil Catálogo, 2000).

### 7.5.3 Processo úmido com calcário

Aplicado basicamente em termelétricas e/ou caldeiras de grande porte. O SO<sub>x</sub> presente no gás é absorvido em suspensão aquosa através da utilização de bicos atomizadores. Os gases ácidos reagem com a suspensão de calcário, formando sulfito de cálcio, posteriormente oxidado a sulfato por meio de aeração. Após desaguamento, o resíduo sólido originado possui valor comercial e pode ser utilizado, entre outros, na construção civil (fabricação de placas de gesso). Figura 28 mostra o processo de dessulfurização de gás pela utilização de calcário.

Eficiência de remoção de SO<sub>x</sub>: até 98%

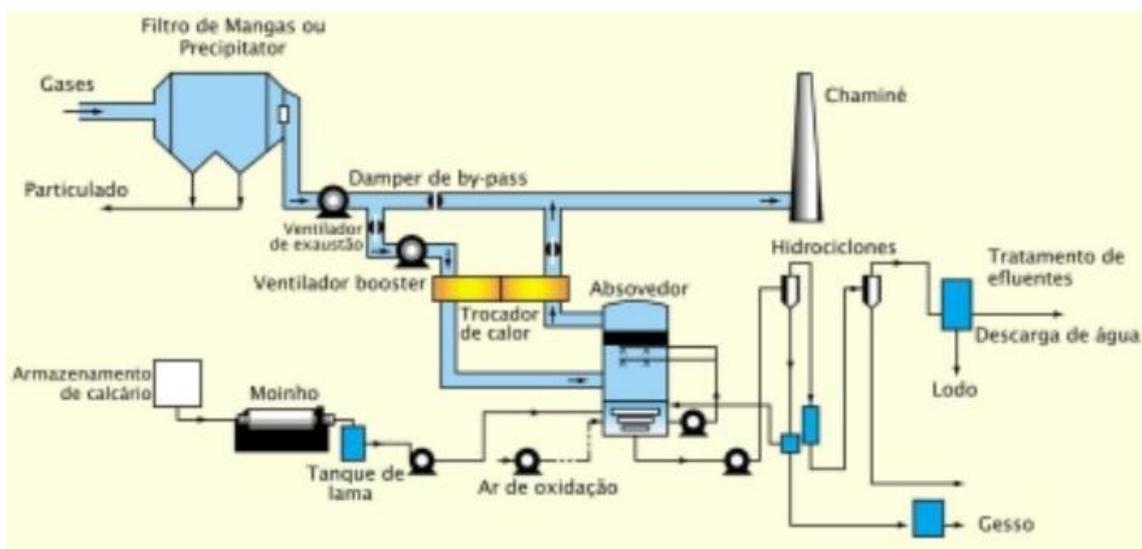


Figura 28 - Dessulfurização de gás por processo úmido com calcário (Enfil Catálogo, 2000).

### 7.5.4 Processo seco com cal hidratada

A figura 29 mostra o processo com cal que ocorre em leito fluidizado de cal hidratada dentro de um reator onde o SO<sub>x</sub> presente no gás é absorvido. Esse tipo de leito fluidizado é mantido através de aceleradores venturís. O reator possui condicionamento a base de injeção de água para regular a temperatura de funcionamento do equipamento.

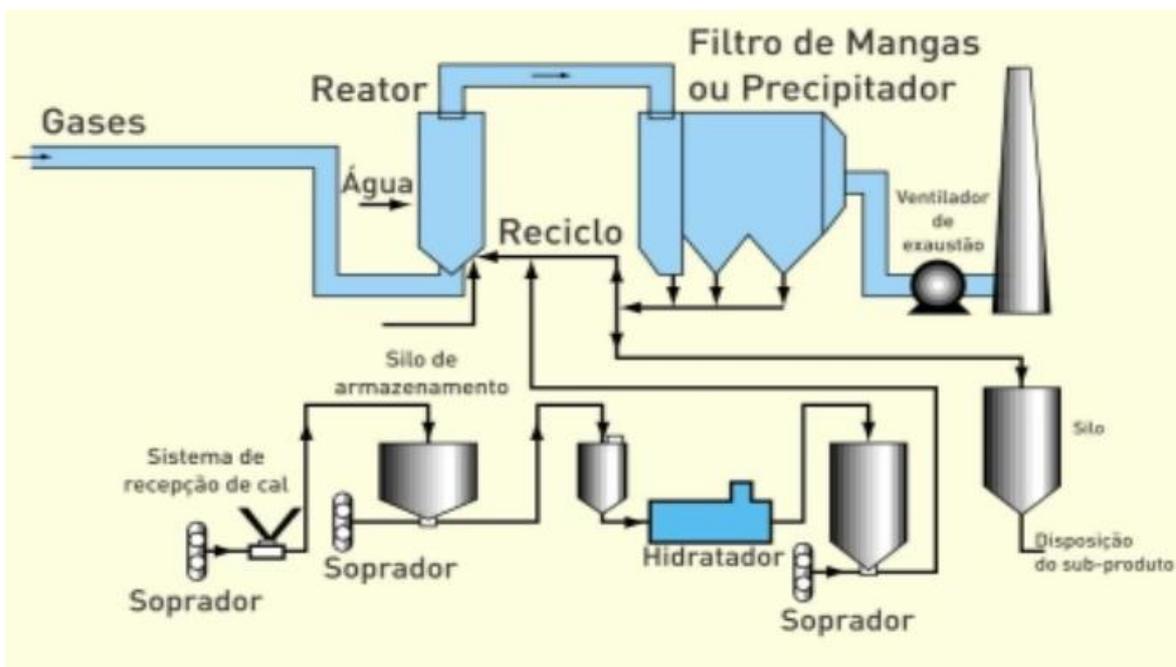


Figura 29 - Dessulfurização de gás por processo seco com cal hidratada (Enfil Catálogo, 2000)

A Cal hidratada, pulverizada, é injetada no absorvedor, onde reage com o SO<sub>x</sub> da fase gasosa. Os gases são encaminhados para um filtro de mangas ou precipitador eletrostático. Parte do material coletado é recirculada e parte descartada.

Eficiência de remoção de SO<sub>x</sub>: até 95%. Para leito circulante contínuo a remoção chega a valores superiores a 96%.

## 7.6 Redução Catalítica Seletiva

Uma das tecnologias empregadas para a remoção de óxido de nitrogênio presente nos gases é a Redução Catalítica Seletiva que é mais conhecida como Selective Catalytic Reduction (SCR) empregada por mais de 20 anos na Europa, EUA e Japão. A figura 30 mostra o funcionamento da redução catalítica seletiva para remoção de óxido de nitrogênio.

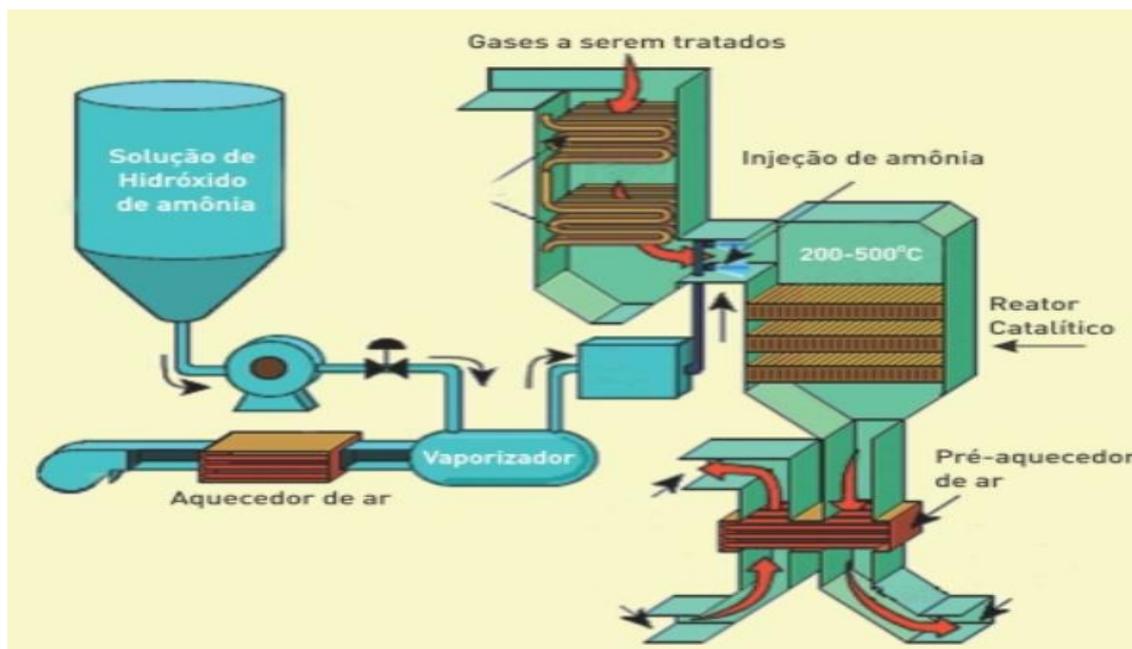


Figura 30 - Processo de Redução Catalítica seletiva (Enfil Catálogo, 2000).

Este processo é decorrente da mistura do gás contendo NOX com compostos de amônia (hidróxido de amônia ou amônia gasosa). Os óxidos de nitrogênio são reduzidos a moléculas de  $N_2$ , inerte e inofensiva, além de água.

Eficiência de remoção de NOx: Superior a 90 % com faixa de temperatura de 200°C até 500°C.

## 7.7 Controle Tecnológico por Tipo de Planta

Para usina pode-ser usado um ou mais tipos de controle de emissões de poluentes. Pode-se averiguar essa afirmação observando a tabela XXXII, além de ser possível observar em cada tipo de planta o sistema mais utilizado para prevenção das emissões.

Tabela XXXII - Tecnologia de redução de emissão na siderurgia (Instituto do Aço, 2010).

Unidade de Produção	Fontes de Emissão	Poluentes	Sistemas de Controle Ambiental
COQUERIA	Câmaras de Combustão	MP; SOx; NOx	Controle de processo/boas práticas
	Sistema de Despoeiramento do Desenformamento da Coqueria	MP	Filtros de Mangas
SIINTERIZAÇÃO	Sistema Principal (Primário)	MP; SOx; NOx	Précipitador Eletrostático
	Sistema Secundário	MP	Précipitador Eletrostático e Filtros de Mangas
ALTO FORNO A COQUE	Casa de Estocagem	MP	Filtros de Mangas
	Casa de Corrida	MP	Filtros de Mangas
ALTO FORNO A CARVÃO VEGETAL	Casa de Estocagem	MP	Filtros de Mangas
	Casa de Corrida	MP	Filtros de Mangas
DESSULFURAÇÃO DO GUSA	Sistema de Dessulfuração de Gusa	MP	Filtros de Mangas
ACIARIA LD	Conversor: Sistema de Despoeiramento Primário	MP	Lavador de Gases
	Conversor: Sistema de Despoeiramento Secundário	MP	Filtros de Mangas
ACIARIA ELÉTRICA	Forno elétrico: Sistema de Despoeiramento Primário	MP	Filtros de Mangas
	Forno elétrico: Sistema de Despoeiramento Secundário	MP	Filtros de Mangas
LAMINAÇÕES	Fornos de Reaquecimento	MP; SOx; NOx	Controle de processo/boas práticas
CENTRAIS TERMELÉTRICAS (CTE)	Caldeiras	MP; SOx; NOx	Controle de processo/boas práticas
PELOTIZAÇÃO	Forno de Queima	MP; SOx; NOx	Précipitador Eletrostático
	Sistema de Peneiramento	MP	Précipitador Eletrostático e Filtros de Mangas

Em termos de eficiência das tecnologias para a captação de material particulado existe uma relação intrínseca com a granulometria do particulado. A tabela XXXIII mostra a eficiência de cada uma das tecnologias empregadas para o controle do material particulado emitido pelas siderúrgicas (CETESB 1997).

Tabela XXXIII - Tecnologias de Captação de Material Particulado (CETESB, 1997).

Tecnologias de Controle de Emissão					
Equipamento	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )				
	0 até 5	5 até 10	10 até 20	20 até 44	acima de 45
Coletor Mecânico	7,5	22	43	80	90
Ciclone baixa pressão	12	33	57	82	91
Cilone de alta pressão	40	79	92	95	97
Multiciclone	25	54	74	95	98
Filtro de Mangas	99	100	100	100	100
Lavador Venturi	95	99,5	100	100	100
Lavador Torre de Spray	90	96	98	100	100

Valores Percentuais

## 8 Discussão

De acordo com as políticas ambientais vigentes é possível averiguar as diferentes proposições referentes aos limites de emissões atribuídos das diversas fontes. O CONAMA avalia de forma menos rigorosa os limites em comparação com os apontados pela OMS. Este fato é decorrente da dificuldade das siderúrgicas de atenderem aos limites estabelecidos pela OMS devido às tecnologias atuais terem dificuldades em atender essas exigências. Seja pela falta de espaço físico requerido para a construção de uma nova tecnologia de controle, ou pela falta de recursos/investimentos necessários para melhorar ou renovar uma antiga e pouco eficaz tecnologia de contenção de emissões que não atendem aos pré-estabelecidos limites impostos pelas agências reguladoras do meio ambiente.

Embora as tecnologias atuais de controle de emissões sejam capazes de remover cerca de 90% das emissões sejam estas referentes ao monóxido de carbono, dióxido de carbono, dióxido de enxofre, óxido de nitrogênio, entre outros. Ainda assim algumas usinas siderúrgicas possuem dificuldade para atender aos limites estabelecidos pela OMS. Portanto pode-se observar que o estipulado pela Organização Mundial da Saúde ainda encontra-se fora de acesso para muitas dessas indústrias.

Em contrapartida os valores propostos pela OMS são estipulados de acordo com a influência dessas emissões presentes na atmosfera. Quanto mais tempo esse material fica exposto no ar mais prejudicial ele se torna, pois maior a quantidade de pessoas que não de sofrer com a sua presença. Os problemas causados são em virtude das vias respiratórias como discutido anteriormente e, portanto a avaliação referente aos limites de emissão de forma segura para a população seria em vista dos valores abordados pela própria OMS.

Contudo ainda existem siderúrgicas que tiveram problemas com a emissão de poluentes e tiveram muitas rigorosas aplicadas pelos órgãos ambientais como é o caso da

Companhia Siderúrgica do Atlântico que foi obrigada a fazer grandes investimentos para atender os limites impostos pela OMS.

Quando o primeiro alto-forno da CSA foi instalado e começou o início da sua produção, a população vizinha fez uma reclamação formal ao INEA (Instituto Estadual do Meio Ambiente) devido à grande quantidade de fumaça emitida pela indústria e pela presença de material metálico contido nela. Em torno de um mês foram aferidos problemas de saúde com efeito sobre as vias respiratórias, irritação nos olhos e presença de dermatites diversas.

A partir das reclamações realizadas, o INEA realizou vistorias na CSA e constatou que o ferro gusa produzido no alto-forno estava sendo despejado em poços de emergência. Estes foram criados para conter as primeiras corridas do alto-forno, devido ao fato de que no início o ferro-gusa produzido não teria pureza suficiente para ser enviado a conversores e nem a laminação. Esse poço de emergência não continha nenhum tipo de tecnologia empregada para impedir emissões atmosféricas, portanto quando o ferro-gusa reduzia a sua temperatura e ficava exposto ao ar acabava gerando assim emissões de material particulado contendo ferro e outros metais presentes no ferro-gusa líquido.

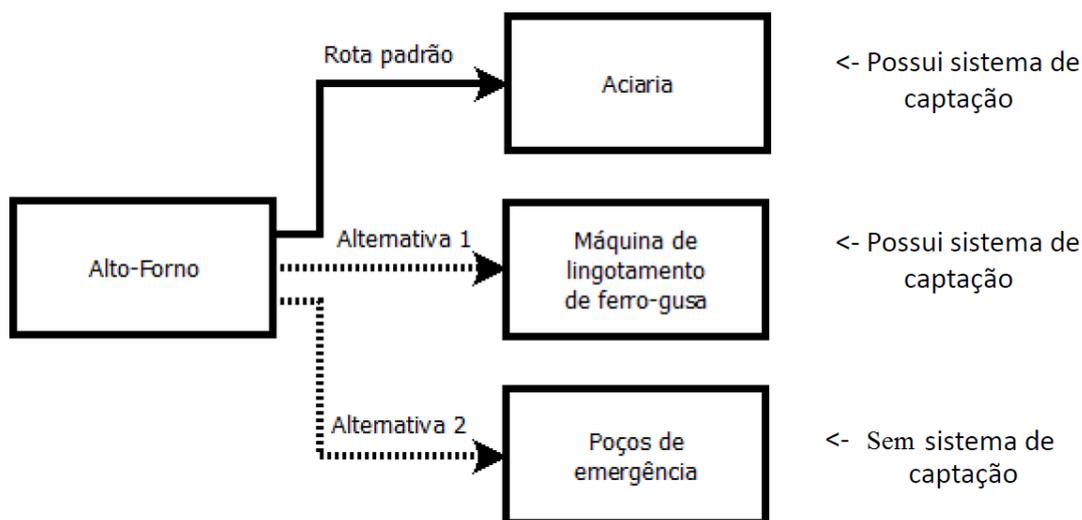


Figura 31 - CSA: Rotas Alternativas Gusa-Líquido (Chauvet, 2013).

Essa rota onde o ferro-gusa é despejado em poços de emergência, como é mostrado pela figura 31, ocorreu também pelo fato das unidades da aciaria e da máquina de lingotamento de ferro-gusa começar o seu funcionamento semanas depois do previsto no cronograma estipulado pela siderúrgica. Portanto os poços de emergência não estavam funcionando como uma terceira opção e sim como opção primária. Devido a este acontecimento foi contabilizado, pelo INEA, 90 mil toneladas de ferro-gusa solidificado que foram estocados em pilhas.

Segundo problema ocorreu durante o início das operações da CSA, quando a máquina de lingotamento de ferro-gusa entrou em operação foi observado que panela que continha o ferro-gusa vinda do alto-forno, não conseguia despejar o seu conteúdo

devido a um erro de projeto. A coifa de captação de particulados impedia o vazamento do ferro-gusa na máquina de lingotamento e, portanto foi desconectada do sistema. Conseqüentemente novas emissões atmosféricas ocorreram com presença de uma grande quantidade de material particulado de aspecto metálico.

Terceiro problema da CSA foi quanto à remoção do ferro-gusa sólido dos poços de emergência, existiam três alternativas para que fosse possível a sua remoção. A primeira seria utilizando uma escavadeira (opção não é sempre viável), a segunda se resume ao método de boleamento (muitas vezes ineficaz) e o terceiro era o emprego do oxicorte. O Oxicorte é responsável por emissões atmosféricas consideráveis.

A CSA tentou usar como medida paliativa nos poços de emergência a distribuição de dez bicos aspersores de água nas paredes dos poços para minimizar emissões durante o despejo do ferro-gusa líquido. Esta medida foi introduzida até a construção definitiva de um sistema de captação.

A figura Número 32 apresenta as emissões de particulado inaláveis ( $PM_{10}$ ) nas regiões no entorno da CSA (INEA, 2010 e Rodrigo,2013)

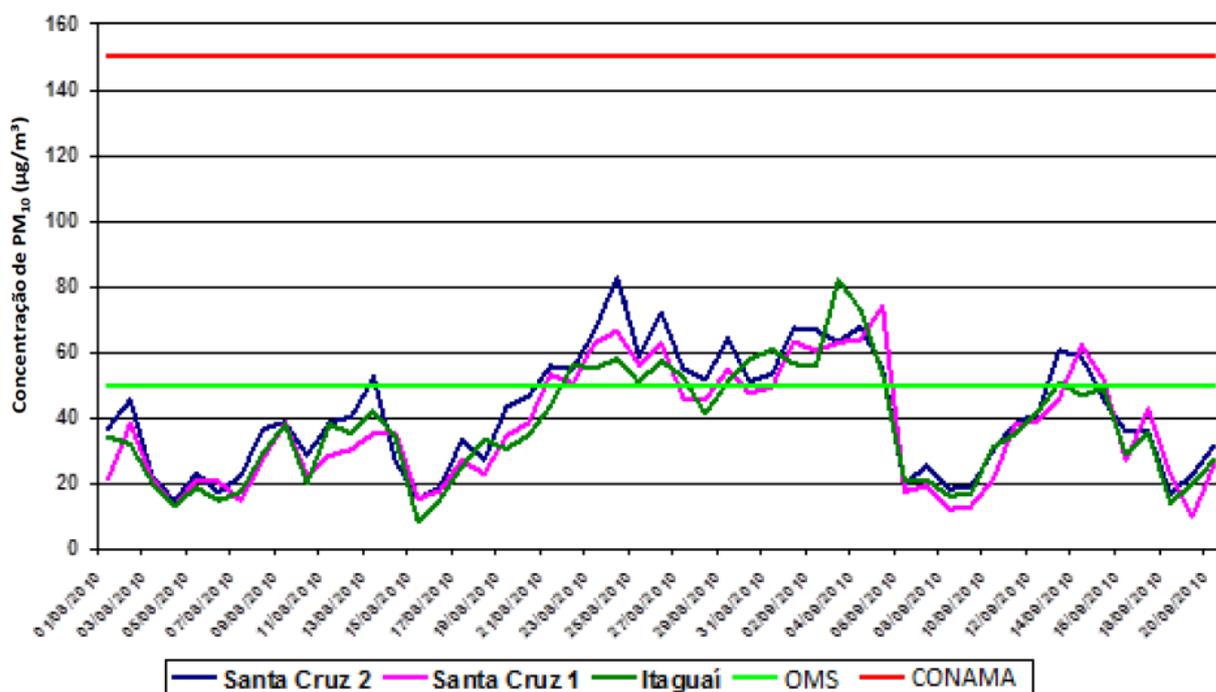


Figura 32 - CSA: Emissão de  $PM_{10}$  (Chauvet, 2013)

Deve-se lembrar que essas emissões são decorrentes não apenas da CSA, pois abrangem toda uma região que possui outras atividades industriais que também corroboram para a emissão de material particulado. Porém os comentários apresentados foram apenas dos problemas relativos ao primeiro alto-forno da CSA.

Após tantos problemas com o primeiro alto-forno, o INEA embargou o funcionamento do segundo alto-forno, sem antes resolver os problemas correlacionados que

acarretaram nas emissões já descritas. Por conta disso a CSA não conseguiu validar o contrato de energia com a ANEEL, onde cederia energia pela produção de gás de alto-forno, por conta desta falha a CSA foi multada em R\$172,8 milhões.

O segundo alto-forno seria capaz de adicionar à termelétrica da usina em torno de 80MW e 150 MW.

O valor dessas emissões teve um acréscimo súbito devido a um problema no segundo alto-forno da CSA, após o início de operação este acabou tendo problemas na casa de corrida e não estava sendo possível separar corretamente o ferro-gusa da escória. Esta complicação impediu que o material fosse transportado para aciaria ou para o lingotamento, devido ao alto grau de impureza, resultando na necessidade de despejo nos poços de emergência. Devido ao somatório dos problemas tanto no primeiro quanto no segundo alto-forno, os poços de emergência começaram a ser utilizados em alta escala gerando fortes prejuízos.

Após o início das operações no ano de 2010 por volta do mês de junho as emissões na região cresceram vertiginosamente como mostra a figura 33.

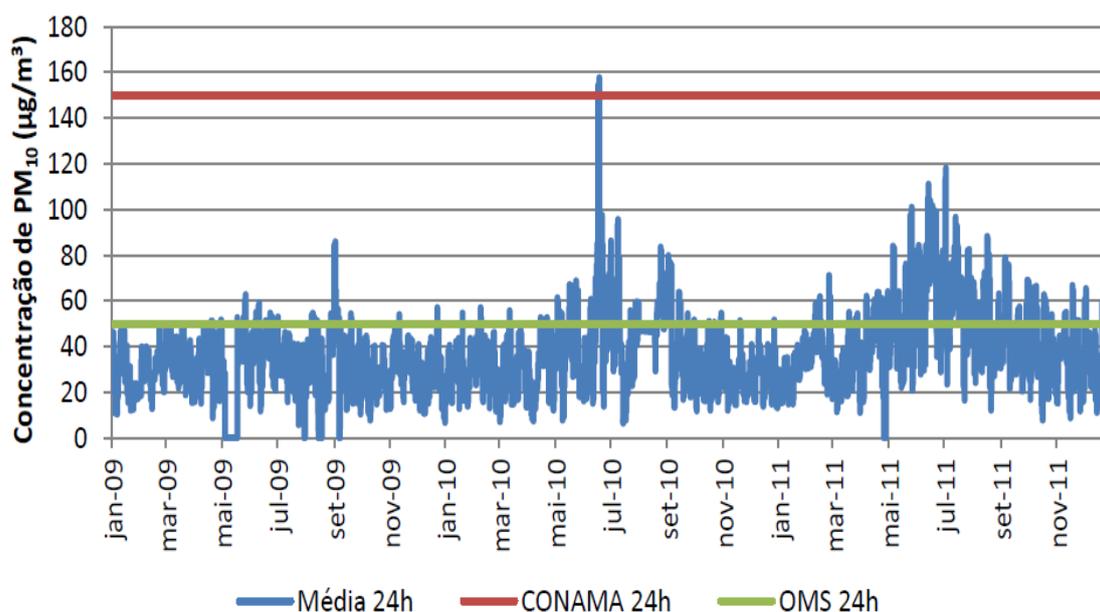


Figura 33 - CSA: Emissão de  $PM_{10}$  após início de operação da usina (Chauvet, 2013).

Os investimentos para financiar tecnologias de redução de emissões são elevados. A tabela XXXIV representa os investimentos em reais e em dólares necessários para a implementação dessas tecnologias.

Tabela XXXIV - - Investimento para redução de emissões (Instituto do Aço, 2010).

DESCRIÇÃO	INVESTIMENTO (R\$)
<b>Alto-forno a Coque: Casa de Estocagem e Ala de corrida</b>	
Adequação do Despoeiramento da Área de Corridas (FM) dos Altos Fornos n.º 1, 2 e 3	39.000.000
Adequação do Sistema de Envio de Minérios e Pelotas para os Altos Fornos	45.000.000
Adequação do Sistema de Envio de Coque para os Altos Fornos	25.000.000
Adequação do Sistema de Envio de Sinter para os Altos Fornos	30.000.000
Adequação do Despoeiramento do Sistema de Envio de Coque para os Altos Fornos	55.000.000
Adequação do Despoeiramento do Sistema de Envio de Sinter para os Altos Fornos	45.000.000
Alto Forno I Casa de Estocagem (Filtro de Mangas)	13.860.000
<b>Sinterização: Sistema de Despoeiramento (1o e 2o)</b>	
Adequação do Precipitador Eletrostático da Máquina de Sinter 1 (aumento do PE e pulse-coromax)	35.000.000
Adequação do Precipitador Eletrostático da Máquina de Sinter 3 (Pulse-coromax)	8.000.000
Sinter I Primário-(Precipitador Elestrostático)	27.475.000
Sinter I Secundário-(Filtro de Mangas)	46.200.700
Substituição do Precipitador Eletrostático secundário da Máquina de Sinter 4	30.000.000
Substituição de placas no Precipitador Eletrostático primário da Máquina de Sinter	1.500.000
Reforma nos Precipitadores Eletrostáticos da Máquina de Sinter	52.500.000
<b>Coqueria: Câmara de Combustão dos Fornos de Coque</b>	
Reforma a Frio do Corpo da Coqueria 2	473.000.000
Reforma Coqueria (manutenção refratária)	17.500.000
Reconstrução de coqueria 4 A/B e 5	950.000.000
<b>Central Termelétrica: Caldeira com Queima de Gases Siderúrgicos</b>	
Substituição de queimadores e outras intervenções	25.000
<b>Laminação: Fornos de Reaquecimento de Placas</b>	
Introdução do consumo de gás natural	11.000.000
<b>Aciaria: Sistema de Despoeiramento (1o e 2o)</b>	
Adequação do sistema de Despoeiramento da Aciaria 2	60.000.000
Adequação do sistema de Despoeiramento da Aciaria 1	50.000.000
<b>TOTAL SETOR (R\$)</b>	<b>2.015.060.700</b>
<b>TOTAL SETOR (US\$ - 1:1,75)</b>	<b>1.151.463.257</b>

## 9 Conclusões

A quantidade de material particulado emitido pelas siderúrgicas é bem elevada e possui diversos efeitos prejudiciais na saúde humana, devido à composição. Como discutido no texto os elementos constituintes do material particulado envolvem desde componentes que causam males à respiração até causadores de tumores cancerígenos.

Como a expectativa de que a produção de aço mundial aumente nas próximas décadas, a tendência de que o rigor para o controle dessas emissões aumente. A necessidade aumenta cada vez mais, e as tecnologias são aprimoradas no intuito de resgatar esses materiais emitidos por essa indústria. As instalações mais perigosas existente nas siderúrgicas são as plantas de coqueria, além de emitir elevadas quantidades de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> ainda emitem significativas quantidades de hidrocarbonetos aromáticos cíclicos e dioxinas. Embora em termos de particulados apenas pode-se dizer que a sinterização emite 5560 gramas de particulado por tonelada de sinter produzido doravante operação de maior emissão, enquanto que a maior emissão da coqueria seja 2620 gramas por tonelada de coque produzido para a categoria de emissão inalável.

Inclusive na região considerada como de alto risco a quantidade emitida pela sinterização ainda é superior à da coqueria, do alto-forno e do conversor LD. Neste quesito também pode ser dito que os problemas ambientais gerados pelos particulados da sinterização são mais prejudiciais em comparação com as outras plantas siderúrgicas. Além de ser mais perigoso, o particulado abaixo de PM<sub>2,5</sub> tende a permanecer na atmosfera por um longo período, enquanto que particulados mais grossos tendem a sedimentar mais rápido, conseqüentemente trazendo menos riscos à população.

As unidades do alto-forno e do conversor LD não produzem toda essa quantidade de material particulado e a sua composição também não é tão crítica quanto as da coqueria e da sinterização. Uma das preocupações atuais é quanto à produção de dioxinas e furanos; embora não seja perfeitamente compreendida, sabe-se que a troca de calor é um fator predominante para que ocorra tal emissão. Portanto não existe uma tecnologia vigente que possa ser empregada para eliminar esse tipo de emissão Alguns métodos utilizados atualmente impõem fundentes específicos que evitem em sua composição o cloro, de modo que a frente de combustão da sinterização não crie compostos clorados formadores de dioxinas e furanos.

Conforme a demanda do aço aumenta, devido ao crescimento populacional, as necessidades de controle dessas emissões tornam-se cada vez mais rígidas, pelos órgãos ambientais. A tendência é de que as novas tecnologias de retenção desses particulados sejam cada vez mais infalíveis, propiciando a formação de uma nova geração de equipamentos ou de controles cada vez mais incisivos por parte do governo, de modo que os problemas ambientais gerados durante a operação da CSA não voltem a acontecer.

## 10 Referências Bibliográficas

Assunção, J. V. Poluição Atmosférica. In CASTELLANO, E. G., Desenvolvimento Sustentado: Problemas e Estratégias. São Paulo, Academia de Ciências do Estado de São Paulo, 1998.

Assunção, J. V. Dispersão Atmosférica. São Paulo, Faculdade de Saúde Pública da USP, 1987. Notas de aula do curso de especialização em saúde pública.

Assunção, J.V. et AL Seleção de equipamentos de controle de poluição do ar. São Paulo, CETESB, 1990.

ABM (2003). Associação Brasileira de Metalurgia. Marcelo L. P. M., Lúcio F. A. Siderurgia Para Não Siderurgistas.

Almeida T. I, (1999). A Poluição Atmosférica por Material Particulado na Mineração a Céu Aberto. Tese de Mestrado. São Paulo: Engenharia. Universidade de São Paulo.

ARAÚJO, L.A., Manual de Siderurgia, Produção -Volume 1, Arte & Ciência, 2ª edição-2005.

ARCELOR (2008). Anne Pons, Alan Ziebel. Quantification Of Diffuse Dust Emissions From Open Source Of an Integrated Steel Plant.

Batista, A. A. M., (2009). Utilização do Gás do Alto-Forno para Produção de Energia na Indústria Siderúrgica de Minas Gerais. Tese de Mestrado. Minas Gerais: Sustentabilidade Sócio-Econômica e Ambiental. Universidade Federal de Ouro Preto.

Cavalcanti, P. M. (Novembro de 2010). Modelo de Gestão da Qualidade do Ar - Abordagem Preventiva e Corretiva. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: PPE/COPPE/UFRJ.

CEFETEES, Marcelo L. P. M.(2006). Redução dos minérios de ferro – fundamentos e aplicação.

CEFETES, Marcelo L. P. M. (2007). Elaboração, Refino e Lingotamento do aço. Vitória: Espírito Santo.

CETESB, C. A. (2010). Relatório de qualidade do Ar no Estado de São Paulo 2009. Série Relatórios. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, Governo do Estado de São Paulo.

CETESB (1997). Implementação de um Programa de Prevenção à Poluição. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, Governo do Estado de São Paulo.

CONAMA, Sub Grupo de Minas Gerais. Proposição de Limites Máximos de Emissão de Poluentes Atmosféricos de Fontes Fixas Para a Indústria Siderúrgica em Nível Nacional. Sétimo Conselho GT. 2004.

Enfil, Catálogo (2000). Soluções para Controle da Poluição Atmosférica.

EPA, Bohn, R. (1978). Fugitive Emissions From Integrated Iron and Steel Plants. Midwest Research Institute.

Freitas, H. L. (2012). Análise Numérica da Eficiência de Separação Gás-Líquido do Lavador de Gás da ArcelorMittal Monlevade. Tese de Mestrado. Minas Gerais: Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais.

INEA. (2010). Avaliação dos dados de qualidade do ar medidos na área de influência direta da CSA. Relatório. Rio de Janeiro: Gerência de Qualidade do Ar.

Instituto Aço Brasil (2010). Proposição de Limites Máximos de Emissão de Poluentes Atmosféricos de Fontes Fixas Existentes para a Indústria Siderúrgica em Nível Nacional. Justificativa Técnica.

IPCC. Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Genebra: United Nations Environment Programme.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change – Guideline for National Greenhouse Gas Inventories” - IPCC/2006

JACOBSON, M. Z. (2002). Atmospheric Pollution – History, Science and Regulation, Cambridge University Press.

Lora, E. E. (2002). Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte. Rio de Janeiro: Interciência.

Magalhães, L. C. (2005). Estudo do Material Particulado Atmosférico e Metais Associados Às Partículas Totais Em Suspensão Na Cidade De Ouro Preto, MG. Tese de Mestrado. Minas Gerais: Engenharia Ambiental, Ouro Preto: Minas Gerais.

Magrini, A., Veiga, L. B., & Barbosa, F. L. (Agosto de 2005). Análise do Processo de Licenciamento Ambiental no Estado do Rio de Janeiro e Análise Comparativa com os Modelos adotados nos Estados de São Paulo, Minas Gerais, Bahia e Rio Grande do Sul. Relatório. Rio de Janeiro: PPE - COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Marcos V. C., (2011). Estudo da Remoção de Zinco e de Álcalis Contidos em Lamas de Aciaria LD. Tese de Mestrado. Minas Gerais: Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais.

Miller Jr, G. T. (2007). Ciência Ambiental. São Paulo: Cengage Learning.

POP's, (2013). Plano Nacional de Implementação Convenção de Estocolmo: Inventário Nacional de Fontes e Estimativas de Emissões de Dioxinas e Furanos.

Ricardo, D. C. (2004). Políticas Ambientais no Setor Siderúrgico e Minerário com Ênfase no Minério de Ferro.

- RIZZO, E.M.S. Introdução aos processos siderúrgicos. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, (2005). 150p. Série: Capacitação Técnica em Processos Siderúrgicos: conhecimentos básicos.
- Rocha, J.C., Rosa , A. H., & Cardoso, A. A. (2009). Introdução à Química ambiental (segunda edição). São Paulo: Bookman
- Chauvet, R. S. (2013). Análise dos Impactos de Emissões Atmosféricas Locais da Indústria Siderúrgica: Um Estudo De Caso no Rio de Janeiro. Tese de Mestrado. Rio de Janeiro: Engenharia Metalúrgica, COPPE/UFRJ.
- Science Direct (2006). Chemical Constituents in Particle Emissions from an Integrated Iron and Steel Facility. Journal of Hazardous Materials ([www.elsevier.com/locate/jhazmat](http://www.elsevier.com/locate/jhazmat)).
- Silva, F. T. Siderurgia. Rio de Janeiro, Escola de Engenharia Metalúrgica da UFRJ, 2008. Notas de aula do curso de siderurgia.
- STAPPA (2006). State and Territorial Air Pollution Program Administrators. Controlling Fine Particulate Matter Under the Clean Air Act: A Menu of Options.
- Steel Industry and the Environment: Technical and Management Issues. Technical Report N° 38. International Iron and Steel Institute (IISI) and United Nations Environment Programme.(UNEP). 1997.
- Unep/Who (1994). United Nations Environment Programs: Gems/Air Methodology Review Handbook Series (Volume 4). Passive and Active Sampling Methodologies for Measurement of Air Quality.
- WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION (1983). Evaluation of the carcinogenic risk of chemicals to humans, Polynuclear Aromatic Compounds, Part 1, chemical environmental and experimental data, 32.International Agency for Research on Cancer, World Health Organization.
- World Bank Group. Pollution Prevention and Abatement Handbook (1998). Iron and Steel Manufacturing.