

FABRICAÇÃO DE AÇO EM FORNOS ELETRICOS

RUBENS CORRÊA DA SILVEIRA



RUBENS CORRÊA DA SILVEIRA

FABRICAÇÃO
DE AÇO EM
FORNOS
ELETRICOS



Ouro Preto
1997

Obra publicada pela Universidade Federal de Ouro Preto

Reitor: Dirceu do Nascimento

Vice-Reitor: Marco Antônio Tourinho Furtado

Conselho Editorial

Presidente: Geraldo Antônio Batista

Membros: Leonardo Barbosa Godefroid, Rinaldo Cardoso dos Santos, Jorge Carvalho de Lena, Guiomar de Grammont, Rosa Maria Esteves Arantes, Solange Ribeiro de Oliveira e Rosângela Maria Zanetti

Revisão: Rosângela Maria Zanetti, Magda de Magalhães Machado Salmen, Andréa Gonçalves Rodrigues e Valéria Maria Lopes Rodrigues

Projeto Gráfico e Capa: Alvimar Ambrósio

Editoração Eletrônica e Diagramação: Cláudio Lopes de Oliveira

Normalização Bibliográfica: Maristela Sanches Corrêa Lima

Impresso no Brasil/Printed in Brazil

ISBN: 85-288-0021-0

Copyright © 1997 by Rubens Corrêa da Silveira

Editora UFOP

Campus Universitário

35400-000 – Ouro Preto – MG

Tel.: (031) 559-1491

Reservados todos os direitos de publicação total ou parcial à Editora UFOP.

Ficha Catalográfica

S587

1997 SILVEIRA, Rubens Corrêa da.

Fabricação de aço em fornos elétricos/
Rubens Corrêa da Silveira. – Ouro Preto:
UFOP, 1997.
264p.: il.

1. Metalurgia. I. Título

CDU 669.1

Catalogado pela Coordenadoria de Bibliotecas da UFOP

Depósito legal efetuado junto à Biblioteca Nacional conforme Decreto nº 1825 de 20 de dezembro de 1907.

SUMÁRIO

PREFÁCIO	17
-----------------------	-----------

INTRODUÇÃO	19
-------------------------	-----------

1

EQUIPAMENTO MECÂNICO DOS FORNOS	21
--	-----------

1.1 O Invólucro Metálico ou a Carcaça	21
---	----

1.2 Abóbada	22
-------------------	----

1.3 Anéis de Vedação	23
----------------------------	----

1.4 Porta de Escória	25
----------------------------	----

1.5 Furo de Vazamento	26
-----------------------------	----

1.6 Cabeçote do Eletrodo	29
--------------------------------	----

1.7 Sistema de Movimentação dos Eletrodos	31
---	----

1.8 Mecanismo de Basculamento	32
-------------------------------------	----

1.9 Base do Forno	33
-------------------------	----

1.10 Água de Refrigeração	33
---------------------------------	----

1.11 Carregamento	34
-------------------------	----

1.12 Cesta de Carregamento	35
----------------------------------	----

1.13 Mecanismo de Rotação do Banho	36
--	----

1.14 Depuração dos Gases	37
--------------------------------	----

2

REVESTIMENTO REFRAATÁRIO DOS FORNOS A ARCO	39
--	-----------

2.1 Refratários	39
-----------------------	----

2.2 Revestimento da Soleira do Forno a Arco Básico	40
--	----

2.3 Revestimento da Parede do Forno a Arco Básico	40
---	----

2.4 Revestimento da Abóbada do Forno a Arco Básico	42
--	----

2.5 Revestimento do Forno a Arco Ácido	42
--	----

2.6 Secagem e Sinterização do Cadinho	42
---	----

2.7 Durabilidade do Revestimento do Forno	43
---	----

2.8 Painéis de Refrigeração	46
-----------------------------------	----

3	ELETRODOS, ARCO ELÉTRICO E EQUIPAMENTO ELÉTRICO DO FORNO	49
3.1	Os Eletrodos	49
3.2	Arco Elétrico	55
3.2.1	<i>Ponto Catódico</i>	<i>55</i>
3.2.2	<i>A Zona Catódica da Coluna do Arco</i>	<i>56</i>
3.2.3	<i>A Coluna de Descarga Positiva</i>	<i>56</i>
3.2.4	<i>A Região Anódica</i>	<i>56</i>
3.2.5	<i>Ponto Anódico</i>	<i>56</i>
3.3	Equipamento Elétrico do Forno	59
3.4	O Circuito Elétrico do Forno	69
3.5	Determinação das Condições Elétricas Ótimas para o Forno	
a	Arco	78
3.5.1	<i>Curvas Características dos Fornos Elétricos</i>	<i>78</i>
3.5.2	<i>Diagrama do Círculo</i>	<i>82</i>
3.5.3	<i>Equilíbrio da Potência</i>	<i>87</i>
3.5.4	<i>Estudo Experimental de um Circuito</i>	<i>89</i>
3.5.5	<i>Índice de Desgaste dos Refratários</i>	<i>90</i>
3.5.6	<i>Previsão do Consumo de Energia para uma Fase Determinada do Processo</i>	<i>93</i>
3.5.7	<i>Influência do Fator de Potência e da Qualidade do Aço sobre o Valor de α.....</i>	<i>97</i>
3.5.8	<i>Correlação entre o Rendimento Térmico da Potência Aplicada (α) e o Índice de Erosão dos Refratários (RF).....</i>	<i>99</i>
3.5.9	<i>Os Parâmetros Elétricos durante o Período de Fusão</i>	<i>100</i>
3.5.10	<i>Os Parâmetros Elétricos durante os Períodos de Oxidação e Refino.....</i>	<i>101</i>
3.5.11	<i>Trajetória Elétrica no Diagrama do Círculo de uma Corrida de Aço Elaborada em Forno Elétrico a Arco</i>	<i>103</i>
3.5.12	<i>Regulação</i>	<i>104</i>
3.5.13	<i>Oscilação sobre a Rede ("Flicker").....</i>	<i>104</i>
3.6	A Utilização do Tempo nos Fornos a Arco	105

4	PARÂMETROS DE PROJETO DOS FORNOS ELÉTRICOS A ARCO	113
	4.1 Forma e Dimensões do Banho	114
	4.2 Dimensões da Câmara de Reação	116
	4.3 Potência do Transformador e Produtividade do Forno	118

5	FÍSICO-QUÍMICA DA FABRICAÇÃO DO AÇO EM FORNOS ELÉTRICOS A ARCO	131
	5.1 Oxidação do Carbono	131
	5.2 Oxidação do Fósforo	136
	5.3 Dessulfuração do Aço	138
	5.4 Reações do Oxigênio com Elementos Dissolvidos	141
	5.5 Inclusões Não Metálicas	148
	5.6 Hidrogênio e Nitrogênio no Aço	150

6	MATÉRIAS-PRIMAS E SUA PREPARAÇÃO	153
	6.1 Matérias-Primas para Fabricação do Aço em Forno	
	Elétrico a Arco	153
	6.1.1 <i>Sucata de Aço</i>	153
	6.1.2 <i>Ferro-Esponja</i>	154
	6.1.3 <i>Sucata de Aço Ligado</i>	154
	6.1.4 <i>Ferro Fundido</i>	154
	6.1.5 <i>Gusa</i>	155
	6.1.6 <i>Formadores de Escória</i>	155
	6.1.7 <i>Oxidantes</i>	156
	6.1.8 <i>Desoxidantes e Adições de Liga</i>	157
	6.1.9 <i>Carburantes</i>	157
	6.2 Preparação da Carga	158

7	FUSÃO DE CARGA DE AÇO-CARBONO NO FORNO ELÉTRICO BÁSICO	159
	7.1 Reparo do Forno	159
	7.2 Carregamento do Forno	161
	7.3 Fusão da Carga	165
	7.4 Oxidação	167
	7.5 Período de Redução	175
	7.6 Processo com uma Escória	185

7.7 Métodos para Encurtar o Período de Redução.....	186
7.7.1 Tratamento do Aço em Escórias Sintéticas na Panela.....	187
7.7.2 Aplicação de Materiais Pulverizados.....	188
7.7.3 Tratamento do Metal com Argônio	190
7.8 Noções de Controle de Processo.....	191

8

FUSÃO DA CARGA DE SUCATA LIGADA	193
8.1 Corrida de Aço Estrutural com Sopros de Oxigênio	194
8.2 Oxidação de Manganês, Cromo e Tungstênio em Corridas Sopradadas com Oxigênio com Carga de Sucata Ligada	195
8.3 Refusão de Sucata de Aço Inoxidável com o Uso de Oxigênio ...	197

9

ELABORAÇÃO DE AÇO EM FORNO ELÉTRICO A ARCO ÁCIDO	201
9.1 Fusão	201
9.2 Oxidação	202
9.3 Cal em Corridas Ácidas	204
9.4 Desoxidação Final no Processo Ácido	204
9.5 Uso de Oxigênio em Fornos com Revestimento Ácido.....	205
9.6 Aplicações dos Fornos Ácidos.....	206

10

UTILIZAÇÃO DE GASES INDUSTRIAIS NOS PROCESSOS DE PRODUÇÃO DO AÇO EM FORNO ELÉTRICO A ARCO	207
--	------------

11

POSSIBILIDADE DE MELHORIA DOS ÍNDICES TÉCNICO- ECONÔMICOS NA FABRICAÇÃO DE AÇO EM FORNO ELÉTRICO A ARCO	225
11.1 Tendências no Uso dos Insumos.....	225

12

ELABORAÇÃO DO AÇO EM FORNO A ARCO A VÁCUO	235
12.1 Projeto do Forno a Arco a Vácuo de Eletrodo Consumível	235
12.2 Fundição de Lingotes em Fornos a Arco a Vácuo	240

13	DESGASEIFICAÇÃO A VÁCUO DO AÇO LÍQUIDO	241
	13.1 Desgaseificação na Panela	241
	13.2 Método D-H	244
	13.3 Método R-H	246
	13.4 Desgaseificação a Vácuo no Jato	247
14	REFUSÃO ‘ELECTROSLAG’	251
15	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	261