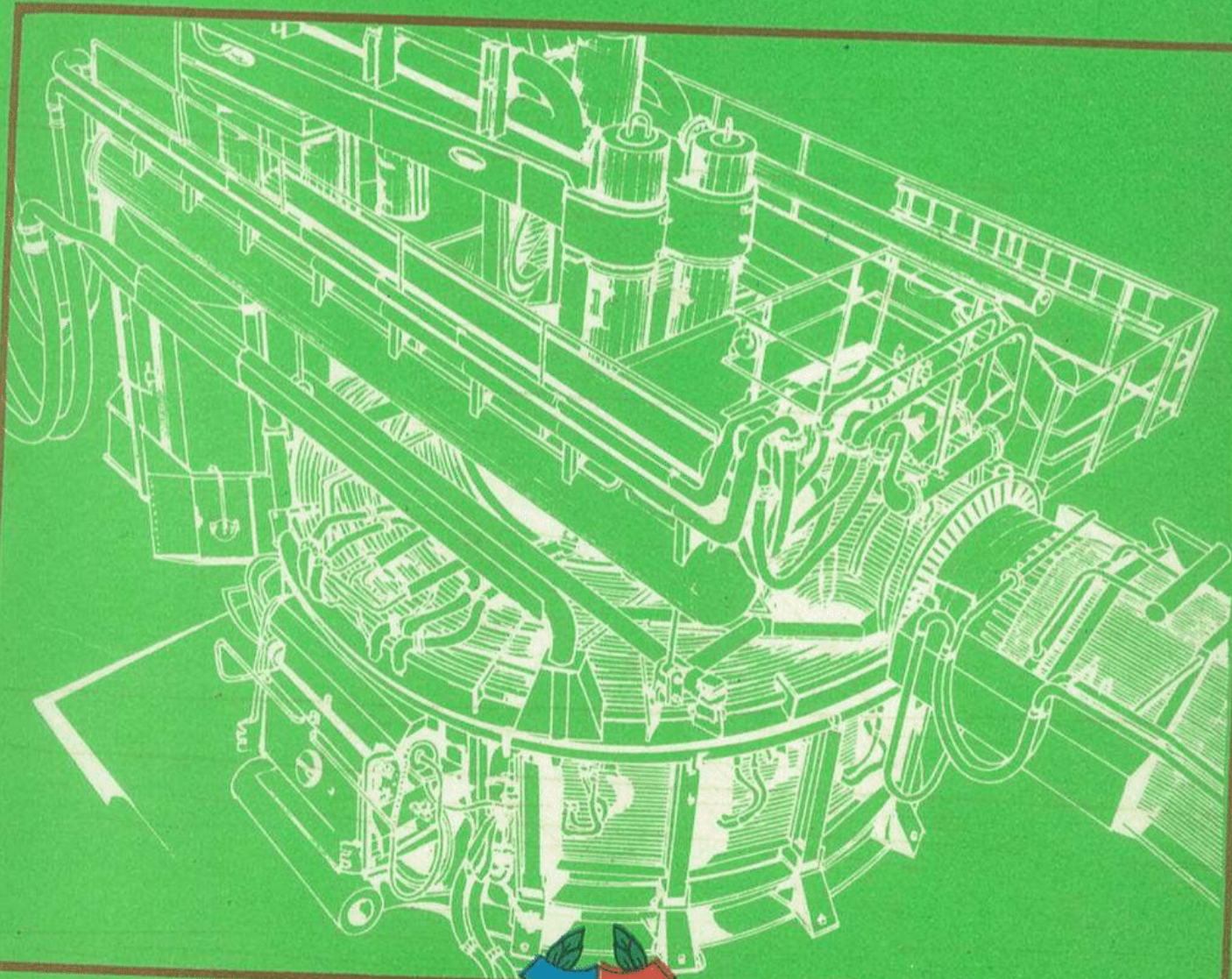


Prof. José Joaquim Cardoso

ELEOTROTERMIA

FORNOS ELÉTRICOS A ARCO

VOLUME I



ESCOLA DE MINAS
DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

JOSÉ JOAQUIM CARDOSO

*Engenheiro Eletricista pela
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
e Professor Adjunto (nível 4) da
Escola de Minas da
Universidade Federal de Ouro Preto*

ELETROTERMIA

FORNOS ELÉTRICOS A ARCO

**Aquecimento Elétrico Industrial
Indústrias Eletrotérmicas, Eletrometalúrgicas e
Eletroquímicas
Fornos Elétricos Industriais
(A Arco Direto ou a Arco Imergido e Arco Plasma)**

VOLUME I

1987

IMPRENSA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Direitos reservados pelo autor e pela Universidade Federal de Ouro Preto, para editar, reeditar, imprimir e comercializar esta obra em língua portuguesa.

Depósito legal na Biblioteca Nacional, conforme Decreto nº 1825, de 20 de dezembro de 1907.

Proibida a reprodução dos textos originais, mesmo parcialmente e por qualquer processo, sem autorização do autor e da editora.

Cardoso, José Joaquim, 1917

C 268e Eletrotermia — Fornos Elétricos a Arco — Indústrias eletrotérmicas, eletrometalúrgicas e eletroquímicas — Fornos elétricos industriais (a arco direto, arco imergido e arco plasma). Ouro Preto, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, 1987.
2 Vol., ilust.,
com bibliografia

CDU-669.187.2 + 621.365

1987

Imprensa Universitária da
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

VOLUME I

Índice Geral

Capítulo I

A Energia Elétrica na Indústria

1.1	A Energia Elétrica na Indústria e o Potencial Energético Hidroelétrico do Brasil	1
1.2	Aquecimento Elétrico — Forno Elétrico	3
1.3	Características do Aquecimento Elétrico	5
1.4	Temperatura e Transmissão do Calor	5
1.5	Condução do Calor	6
1.5.1	Fator de Forma	6
1.6	Radiação do Calor	8
1.7	Convecção do Calor	8
1.8	Bibliografia	9

Capítulo II

A Energia Elétrica na Indústria Química e Indústria Metalúrgica

2.1	As Indústrias Eletroquímicas, Eletrotérmicas, Eletrometalúrgicas, Eletrolíticas e a Energia Elétrica	11
2.2	Classificação dos Processos Eletroquímicos, Eletrotérmicos e Eletrolíticos	11
2.2.1	Processo Eletroquímico	11
2.2.2	Processo Eletrometalúrgico	12
2.2.3	Processo Eletrolítico	12
2.2.3.1	Em Solução Aquosa	12
2.2.3.2	Em Eletrólito Fundido	12
2.2.4	Processo Eletrotérmico	12
2.3	Vantagens Técnico-Econômicas do Forno Elétrico	13
2.4	Comparação entre os Processos à Combustível e a Energia Elétrica	14
2.4.1	Com Processo a Combustível	14
2.4.2	Com Processo a Energia Elétrica	14
2.5	Rendimento da Fabricação de Alguns Produtos Eletroquímicos e Eletrotérmicos	15
2.5.1	Alumínio	15
2.5.2	Magnésio	16
2.5.3	Carboneto de Cálcio	16
2.5.4	Fósforo	16
2.5.5	Fusão e Refino do Aço	17
2.6	Conceito Fundamental para o Projeto de um Estabelecimento Eletroquímico ou Eletrotérmico	17
2.7	Diagrama de Carga	18
2.8	Cálculo dos Critérios Gerais de Implantação da Indústria	19
2.9	Bibliografia	23

Capítulo III

Classificação dos Fornos Elétricos

3.1	Classificação Generalizada dos Fornos Elétricos	25
3.2	Classificação Segundo o Modo de Utilização da Energia Elétrica	25
3.2.1	Fornos por Processo Eletroquímico	25
3.2.2	Fornos por Processo Eletrotérmico	25
3.2.3	Fornos ou Células por Processo Eletrolítico	26
3.3	Classificação Segundo a Natureza da Corrente de Alimentação	26
3.3.1	Fornos de Corrente Contínua	26
3.3.2	Fornos de Corrente Alternada	26
3.4	Classificação Segundo o Sistema de Transformação da Energia Elétrica	26
3.4.1	Fornos a Arco	26
3.4.2	Fornos a Resistência	26
3.4.3	Fornos de Indução	26
3.4.4	Fornos Mistos	26
3.4.5	Fornos a Plasma	27
3.4.6	Fornos Modernos Especiais	27
3.5	Classificação Segundo o Sistema de Alimentação da Energia Elétrica	27
3.5.1	Fornos de Corrente Contínua (CC)	27
3.5.2	Fornos de CC Ligados em Paralelo	27
3.5.3	Fornos de CC Ligados em Série	27
3.5.4	Fornos de Corrente Alternada (CA)	27
3.5.5	Fornos de CA Monofásica	27
3.5.6	Fornos de CA Bifásica	27
3.5.7	Fornos de CA Trifásica	27
3.5.8	Fornos de CA Exafásica	27
3.5.9	Fornos de Corrente Mista, de Plasma e Especiais	27
3.6	Classificação dos Fornos Elétricos a Arco Direto	28
3.6.1	Fornos de Arco Indireto ou Radiante	28
3.6.2	Fornos de Arco Direto	28
3.6.2.1	Forno de Soleira Não Condutora e Arco em Série	29
3.6.2.2	Forno de Soleira Condutora e Arco em Paralelo	30
3.7	Classificação dos Fornos Elétricos a Arco Imerso	30
3.7.1	Fornos Elétricos de Arco Imerso de Aquecimento Direto	30
3.7.1.1	Fornos de Arco Imerso de Resistência da Carga e Ebulição do Produto	31
3.7.1.2	Fornos de Arco Imerso de Resistência da Carga e Produto Fundido	31
3.8	Bibliografia	38

Capítulo IV

Fornos Elétricos a Arco

4.1	Natureza Física do Arco	39
4.2	Estudo do Arco	40

4.3	Considerações Térmicas Básicas	45
4.3.1	Geração do Calor	46
4.3.2	Calor Gerado no Arco	46
4.3.3	Calor Gerado no Eletrodo	49
4.3.4	Efeito de "Skin"	50
4.3.5	Coeficiente do Efeito Pelicular	50
4.3.6	Calor Gerado no Banho	53
4.4	Transmissão de Calor Dentro do Forno	53
4.4.1	Do Suprimento de Calor A	53
4.4.2	Do Suprimento de Calor B	54
4.4.3	Do Suprimento de Calor C	54
4.4.3.1	Na Abóbada	54
4.4.3.2	Na Parede	54
4.4.3.3	No Banho	54
4.5	Perdas de Calor	55
4.6	Capacidade Energética dos Fornos a Arco	57
4.7	Bibliografia	

Capítulo V

Estudo Elétrico do Forno a Arco e a Arco-Resistência

5.1	Estudo Fundamental do Forno a Arco	59
5.2	Potência Máxima e Potência-Limite	63
5.2.1	Potência Absorvida da Rede	63
5.2.2	Potência Máxima Absorvida	64
5.2.3	Potência Útil	64
5.2.4	Potência-Limite	65
5.3	Corrente Máxima e Corrente-Limite	67
5.3.1	Corrente Efetiva de Curto-Circuito	68
5.4	Fator de Potência-Limite	69
5.5	Rendimento Elétrico do Forno	70
5.6	Bibliografia	75

Capítulo VI

Diagramas e Curvas Características

6.1	Diagrama Circular e Curvas Características do Forno a Arco	77
6.2	Curva Característica em Função da Corrente para E e X Constantes	80
6.2.1	Diagrama da Potência Ativa e Reativa	80
6.2.2	Diagrama do Fator de Potência	80
6.2.3	Diagrama do Rendimento	81
6.3	Curva Característica em Função da Resistência para E e X Constantes	81
6.3.1	Diagrama da Potência Ativa e Reativa	82
6.3.2	Diagrama da Corrente	82
6.3.3	Diagrama do Fator de Potência	82
6.3.4	Diagrama do Rendimento	83

6.4	Diagrama Característico de Bergeon	85
6.4.1	Diagrama da Intensidade de Corrente de um Forno em Função do Fator de Potência	85
6.4.2	Diagrama da Potência Absorvida de um Forno em Função da Intensidade e da Tensão	86
6.4.3	Diagrama do Fator de Potência em Função da Potência e da Intensidade Absorvida pelo Forno e da Tensão de Alimentação	87
6.5	Conclusões	87
6.6	Curvas Características Operacionais dos Fornos Elétricos	89
6.6.1	Escolha do "Tap" para o Teste de Curto-Circuito	93
6.7	Diagramas Operacionais e Eficiência	96
6.8	Gráficos de Operação dos Fornos a Arco	107
6.9	Bibliografia	113

Capítulo VII

Bases para o Dimensionamento de Fornos a Arco Direto (ou Aberto)

7.1	Fornos a Arco Direto	115
7.2	Capacidade do Cadinho	117
7.3	Vantagens da Relação Volume do Cadinho/Volume da Câmara	117
7.4	Cargas Posteriores Menos Frequentes	119
7.5	Desvantagens da Relação Volume do Cadinho/Volume da Câmara	119
7.6	Tempo de Fusão	121
7.7	Tempo de Refino	122
7.8	As Dimensões do Forno	124
7.8.1	Relação entre Dimensões do Forno, sua Carga, e sua Potência	125
7.8.2	Espaçamento entre Eletrodos	126
7.8.3	Diâmetro Primitivo e Diâmetro dos Eletrodos	128
7.8.4	Diâmetro Primitivo e Diâmetro do Cadinho	129
7.8.5	Considerações Metalúrgicas	130
7.9	Dimensionamento de Fornos Elétricos a Arco Direto para Trabalhos de Pesquisa ou Investigação Metalúrgica	133
7.10	Dimensionamento de Instalações de Fornos Elétricos a Arco Direto de Grande Porte	135
7.10.1	Combinação das Grandezas Elétricas	136
7.10.2	Influência do Modo de Operação ϕ	137
7.10.3	Influência da Reatância Operacional X_e	141
7.10.4	Limitações da Potência Ativa	142
7.11	Aumento da Produtividade de um Forno Elétrico a Arco Direto com a Alteração de suas Características Operacionais	143
7.12	Bibliografia	149

Capítulo VIII

Bases para o Dimensionamento de Fornos a Arco Imerso

8.1	Principais Parâmetros a Serem Considerados	153
8.2	Influência do Fator "K" no Dimensionamento dos Fornos a Arco Imerso ..	154

8.3	Conclusões e Dados Finais sobre o Dimensionamento de Fornos a Arco Imer-	158
	gido com o Fator "K"	159
8.3.1	Equação de Andreae	159
8.3.2	Equação de Persson	159
8.3.3	Equação de Westly	164
8.4	Diâmetro dos Eletrodos	168
8.4.1	Princípios Gerais do Aquecimento por Resistências	169
8.4.2	Fluxo da Corrente no Forno	170
8.4.3	Cálculo da Resistência Útil	173
8.4.4	Escolha do Tipo de Eletrodo	173
8.4.5	Densidade de Corrente do Eletrodo	177
8.5	Espaçamento dos Eletrodos — Zonas de Reação dos Eletrodos	180
8.6	Diâmetro das Zonas de Reação — Diâmetro do Cadinho do Forno	186
8.6.1	Diâmetro Real do Cadinho do Forno	186
8.7	Diâmetro da Circunferência Primitiva dos Eletrodos	187
8.8	Profundidade do Forno	189
8.9	Balanço Térmico de um Forno a Arco Imergido	198
8.10	Dimensionamento dos Fornos Elétricos a Arco Imergido	200
8.10.1	Dados Fundamentais do Projeto	200
8.10.1.1	Tipo de Produção	200
8.10.1.2	Capacidade de Produção	200
8.10.1.3	Consumo Específico de Energia	200
8.10.1.4	Matérias-Primas à Disposição	200
8.10.1.5	Cinética da Reação Química	201
8.10.1.6	Parâmetros Elétricos do Forno	201
8.10.1.7	Tipo de Forno	201
8.10.2	Dimensionamento e Detalhamento do Projeto	201
8.10.2.1	Grandezas Geométricas	201
8.10.2.2	Grandezas Elétricas	201
8.10.3	Dados Tecnológicos do Projeto	201
8.10.3.1	Granulometria das Matérias-Primas g	201
8.10.3.2	Reações Químicas	201
8.10.3.3	A Corrente Elétrica	201
8.10.3.4	A Distribuição da Temperatura	202
8.10.4	Exemplo de Cálculo de um Forno pelo Sistema "Andreae-Kelly"	202
8.10.5	Exemplo de Cálculo de um Forno pelo Sistema "Morkramer"	202
8.10.6	Exemplo de Cálculo de um Forno pelo Sistema "Westly"	203
8.11	Bibliografia	

Capítulo IX

Modelo Matemático do Forno Elétrico de Redução

9.1	Introdução	207
9.2	O Modelo Reológico	208
9.3	Limitação do Modelo	212
9.4	Modelização Numérica Iterativa	212

9.5	Definição do Modelo e Hipóteses Simplificadas	213
9.6	Utilização do Modelo Numérico	216
9.7	Exame de Alguns Resultados	218
9.8	Conclusões	221
9.9	Bibliografia	222

Capítulo X

Distribuição da Corrente e a Força de Agitação de Auto-Indução no Banho de um Forno a Arco

10.1	Introdução	223
10.2	Processo de Resolução do Problema	224
10.3	Uma Solução Unidimensional	225
10.4	Solução a Duas Dimensões	228
10.5	Aplicações no Forno Elétrico a Arco	230
10.6	Impedância Elétrica no Banho	231
10.7	A Repartição do Campo Magnético	232
10.8	Movimentação Magnética Auto-Indutiva	233
10.9	Repartição da Força de Movimentação	234
10.10	Movimento Devido ao Arco	236
10.11	Discussão	237
10.12	Bibliografia	238

Capítulo XI

Cálculo das Correntes de Curto-Circuito

11.1	Resistências e Reatâncias de um Transformador	239
11.2	Resistência e Reatância Equivalentes de um Transformador	241
11.3	Prova de Curto-Circuito	242
11.4	Circuitos Equivalentes de um Transformador	243
11.5	Reatância e Resistência em Porcentagem	245
11.6	Bibliografia	248

Capítulo XII

Projeto Elétrico do Circuito Externo do Forno

12.1	Circuito Transformador-Forno	249
12.1.1	Disposição do Circuito Externo dos Fornos a Arco Direto	249
12.1.2	Disposição do Circuito Externo dos Fornos a Arco Imerso	250
12.2	Escolha dos Barramentos do Forno a Arco	253
12.3	Barramentos Condutores	255
12.4	Capacidade Térmica	256
12.4.1	Corrente Contínua	256
12.4.2	Corrente Alternada	257
12.5	Resistência Aparente do Circuito Espira-Forno	258

12.5.1	Barramentos Retangulares	260
12.5.2	Barramentos Tubulares	263
12.5.3	Barramentos Flexíveis	264
12.5.3.1	Cabos Multifilares	265
12.5.3.2	Cabos Multifilares Resfriados a Ar ou Água	265
12.6	Reatância e Impedância do Circuito Espira-Forno	268
12.6.1	Influência da Reatância na Distorção da Forma de Onda	277
12.6.2	Resistência das Juntas Elétricas	278
12.6.3	Resistência do Eletrodo	282
12.6.4	Resistência do Cadinho	284
12.7	Esforços Mecânicos entre os Condutores	284
12.8	Bibliografia	287

Capítulo XIII

Eletrodos dos Fornos a Arco

13.1	Eletrodos de Carbono	289
13.1.1	Aspecto Exterior	290
13.2	Carbono	291
13.2.1	Vitrênio	291
13.2.2	Fusênio	291
13.2.3	Durênio	291
13.3	Coque Metalúrgico	292
13.4	Coque de Petróleo	293
13.4.1	Coqueamento Retardado (Delayed Coking)	293
13.4.1.1	Coque Esponja (Sponge Coke)	293
13.4.1.2	Coque Favolar (Honeycomb Coke)	294
13.4.1.3	Coque Acicular ou Agulha (Needle Coke)	295
13.4.2	Coqueamento Fluido (Fluid Coke)	295
13.5	Índice Conradson	295
13.6	Fabricação dos Eletrodos de Carbono	296
13.7	Eletrodos de Carbono Amorfo	298
13.7.1	Eletrodos de Carbono Amorfo Propriamente Ditos	298
13.7.1.1	Calcinação	300
13.7.1.2	Preparação Granulométrica	300
13.7.1.3	Mistura	300
13.7.1.4	Moldagem	301
13.7.1.5	Cozimento	301
13.7.2	Eletrodos de Carbono Amorfo Destinados às Células Eletrolíticas	302
13.8	Eletrodos Söderberg	304
13.8.1	Eletrodos Söderberg de Grandes Dimensões	306
13.8.2	O Equipamento dos Eletrodos Söderberg de Grandes Dimensões	314
13.8.3	Eletrodos Söderberg Furados	322
13.9	Eletrodos de Grafita	324
13.9.1	Limite Superior da Intensidade de Corrente	326
13.9.2	Limite Inferior da Intensidade de Corrente	327

13.9.3 Eletrodos Recobertos	328
13.9.4 Condições Operacionais que Influem no Comportamento dos Eletrodos de Grafita	328
13.9.5 União dos Eletrodos	329
13.9.5.1 Campo Eletromagnético Girante	329
13.9.6 Eletrodos Refrigerados a Água	329
13.9.7 Anéis Economizadores (de Eletrodos)	334
13.10 Grafitização	336
13.11 A Escolha da Utilização dos Eletrodos	337
13.11.1 Qualidade (Carbono Amorfo ou Grafita)	337
13.11.2 Diâmetro (Grande ou Pequeno)	337
13.11.3 Fatores Favoráveis à Utilização de Grandes Diâmetros	338
13.11.4 Fatores Favoráveis à Utilização de Pequenos Diâmetros	338
13.11.5 Fatores Favoráveis à Utilização dos Eletrodos de Grafita nos Fornos Siderúrgicos	339
13.11.6 Fatores Favoráveis à Utilização dos Eletrodos de Carbono Amorfo ...	340
13.11.7 Taxa de Escorregamento	349
13.12 Consumo dos Eletrodos	349
13.12.1 Consumo da Ponta do Eletrodo	352
13.12.2 Consumo Lateral do Eletrodo	357
13.12.3 Efeitos da Temperatura e Velocidade da Atmosfera Ambiente na Oxidação	358
13.12.4 Combinação Linear na Extremidade do Arco e Oxidação da Parede Lateral	360
13.12.5 Outros Fatores de Consumo	363
13.12.6 Consumo de Eletrodos e Fatores Operacionais	363
13.13 Técnicas de Otimização no Consumo dos Eletrodos	368
13.14 Bibliografia	371

Capítulo XIV

Operação dos Fornos Elétricos a Arco

14.1 Considerações sobre a Operação	375
14.2 Produção de Aços Comuns por Fornos a Arco de Ultra Alta Potência	377
14.2.1 Tempos de Fusão	379
14.2.2 Tempos de Refino e Interrupções Sistemáticas	379
14.2.3 Tempos "Tap-to-Tap"	379
14.2.4 Produção Anual	379
14.3 Operação e Desempenho do Forno	381
14.3.1 Fusão e Marcha do Forno	381
14.4 Exigências a que Deve Satisfazer o Forno a Arco	384
14.5 Equilíbrio da Potência (Pontos Quentes)	387
14.5.1 Explicação Teórica do Fenômeno Fase Selvagem e Fase Fria	389
14.5.2 Influência da Potência Assimétrica nos Pontos Quentes	398
14.5.3 Reposicionamento dos Eletrodos	399
14.5.4 Forno a Arco de Eletrodos Inclinados	400

14.6	Interrupções que Afetam a Marcha do Forno	401
14.7	Utilização da Potência Elétrica e sua Influência na Operação do Forno	402
14.8	Teoria das Ultra Altas Potências	408
14.8.1	Níveis de Potência Específica	411
14.8.2	Relação entre Potência Média e Potência Máxima de Fusão	414
14.8.3	Utilização do Tempo	414
14.8.4	Coordenação entre a Potência do Arco e o Comprimento do Arco para as Condições de Transferência de Calor	414
14.8.5	Equilíbrio da Potência Elétrica	416
14.9	Relação Transformador-Forno e Conclusões sobre as UAP	417
14.10	Bibliografia	420

Capítulo XV

Aperfeiçoamentos Introduzidos no Forno a Arco

15.1	Artifícios Usados nos Fornos a Arco para Aumento da Rentabilidade	423
15.2	Carcasas Intercambiáveis na Fabricação do Aço Comum	423
15.3	Agitadores Magnéticos	425
15.3.1	Agitador de Indução Convencional	427
15.3.2	Agitadores de Indução de Comando Eletrônico	430
15.3.3	Princípios de Indução nos Agitadores Magnéticos	434
15.3.3.1	Agitadores Magnéticos Retos	434
15.3.3.2	Geração de um Campo Transversal	434
15.3.3.3	Onda Girante	435
15.3.3.4	Velocidade da Onda Girante	436
15.3.3.5	Equação da Onda Fundamental	436
15.3.3.6	Distribuição do Campo de Força	436
15.3.3.7	Força Agitadora	437
15.3.3.8	Agitação do Metal Fundido	439
15.4	Painéis Metálicos Resfriados por Água em Substituição aos de Revestimentos Refratários Cerâmicos nos Fornos a Arco Direto	440
15.5	Abóbadas de Fornos a Arco Direto com Painéis Metálicos Refrigerados a Água	446
15.6	Vazamento (Colada ou Corrida) do Forno Elétrico a Arco Direto pelo Fundo (Soleira), (CPF)	450
15.7	Vazamento Excêntrico pelo Fundo (EBT) de um Forno Elétrico a Arco Direto	453
15.8	Aspectos Econômicos na Produção de Ligas de Silício	457
15.8.1	Fornos de Redução para Ligas de Silício, Fechados, com Carcaça de Dupla Rotação	458
15.9	Introdução de Carga Quente no Forno de Arco Direto	460
15.10	Alimentação Contínua do Forno	462
15.11	O Forno Elétrico de Fusão Contínua	465
15.11.1	As Matérias-Primas para a Fusão Contínua	467
15.11.2	Utilização da Energia Elétrica na Fusão Contínua	467
15.11.3	A Condução das Operações Metalúrgicas	468