

VOLUME II

REFRATÁRIOS PARA A ÁREA DE REDUÇÃO NA SIDERURGIA



ALAMAR KASAN DUARTE

Coordenação


COLEÇÃO
DE LIVROS
abm

Blucher

 **abm**
Associação Brasileira de
Metalurgia, Materiais e Mineração

Alamar Kasan Duarte
Coordenação

REFRATÁRIOS PARA A ÁREA
DE REDUÇÃO NA SIDERURGIA

Volume II

Refratários para a área de redução na siderurgia

© 2024 Alamar Kasan Duarte

Editora Edgard Blücher Ltda.

Publisher: Edgard Blücher

Editor: Eduardo Blücher

Pré-produção: Juliana Midori Horie

Coordenação editorial: Rafael Fulanetti

Coordenação de produção: Andressa Lira

Produção editorial: Rosemeire C. Pinto

Diagramação: Know-how Editorial

Revisão de texto: Vânia Cavalcanti

Capa: Laércio Flenic

Imagem da capa: istockphoto

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar

04531-934 – São Paulo – SP – Brasil

Tel.: 55 11 3078-5366

contato@blucher.com.br

www.blucher.com.br

Segundo o Novo Acordo Ortográfico, conforme 6. ed.
do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*,
Academia Brasileira de Letras, julho de 2021.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer
meios sem autorização escrita da editora.

Todos os direitos reservados pela Editora Edgard Blücher Ltda.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Angélica Ilacqua CRB-8/7057

Refratários para a área de redução na siderurgia /
coordenação Alamar Kasan Duarte. -- São Paulo : Blucher, 2024.
284 p. : il. (Coleção de livros ABM, vol II)

Bibliografia

ISBN 978-85-212-2304-7

1. Siderurgia I. Duarte, Alamar Kasan II. Série

24-3235

CDD 669.14

Índices para catálogo sistemático:

1. Siderurgia

CONTEÚDO

1. Refratários para Fornos de Pelotização.....	33
1.1 Introdução.....	33
1.1.1 Rotas de pelotas de alto-forno: Estados Unidos, Europa, China.....	34
1.2 Processo de pelletização.....	36
1.2.1 Forno de grelha móvel.....	36
1.2.2 Forno rotativo.....	37
1.3 Revestimento refratário.....	38
1.3.1 Refratários – zona de queima.....	38
1.3.2 Refratários – zona de resfriamento.....	42
1.3.3 Refratários – principais desafios.....	42
1.3.4 Refratários – tendências.....	44
1.4 Forno grelha – <i>rotary kiln</i>	44
Referências.....	46
2. Refratários para Fornos de Sinterização.....	47
2.1 Introdução.....	47
2.2 Processo de sinterização.....	47
2.3 Mecanismos de desgaste dos refratários.....	52
2.4 Projetos de revestimento refratário.....	52

2.5	Construção de um novo forno	54
2.6	Manutenção refratária.....	58
	Referência	62
3.	Refratários para Coqueria Convencional.....	63
3.1	Introdução.....	63
3.2	Processo de coqueificação.....	63
3.3	Mecanismos de desgaste.....	69
3.4	Materiais refratários.....	69
3.5	Preservação das baterias de coque	71
3.5.1	Diagnose.....	72
3.5.2	Rotina de preservação	73
3.6	Reparo a quente dos fornos	80
3.6.1	Equipamentos provisórios.....	81
3.6.1.1	Demolição dos refratários – sequência.....	86
3.6.1.2	Montagem dos refratários – soleira.....	86
3.6.1.3	Montagem dos refratários – início pelas paredes.....	87
3.6.1.4	Montagem dos refratários – sequência	89
3.6.1.5	Aquecimento.....	89
3.6.1.6	Montagem dos refratários do topo.....	90
	Referências.....	90
4.	Refratários para Coqueria Heat Recovery.....	91
4.1	Introdução.....	91
4.1.1	Processo.....	91
4.1.2	Mecanismo de desgaste dos refratários.....	96
4.1.3	Materiais refratários.....	97
4.1.3.1	Tijolo refratário de alta sílica SiO_2	98
4.1.3.2	Sílico-aluminosos ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$)	99
4.1.3.3	Aluminosos (Al_2O_3) – tijolos densos.....	99
4.1.3.4	Aluminosos (Al_2O_3) – tijolos isolantes.....	100
4.1.3.5	Concretos refratários	101
4.1.3.6	Manta e placas	102
4.1.3.7	Massas de fibra cerâmica	102
4.2	Preservação das baterias de coque	103
4.2.1	Inspeção.....	103
4.2.2	Diagnose.....	105
4.2.3	Reparo a quente dos fornos.....	106
	Bibliografia	107
5.	Refratários para Regeneradores de Altos-Fornos.....	109
5.1	Introdução e processo	109

5.1.1	Definição.....	109
5.1.2	Sistema de insuflação.....	109
5.1.3	Operação – ciclo de combustão.....	111
5.1.3.1	Ciclo de gás ou de encharque de calor nos refratários do <i>checker</i>	112
5.1.3.2	Ciclo de sopro ou de ventilação.....	113
5.2	Mecanismos de desgaste.....	113
5.3	Projetos refratários.....	116
5.3.1	Estrutura dos domos.....	116
5.3.1.1	Câmara de combustão interna – domo apoiado na parede – projeto antigo.....	116
5.3.1.2	Câmara de combustão interna – domo apoiado na parede – projeto novo.....	117
5.3.1.3	Evolução dos projetos dos domos.....	117
5.3.1.4	Domo em forma de cogumelo.....	118
5.3.1.5	Câmara de combustão externa.....	118
5.3.1.6	Câmara de combustão interna – partes do regenerador....	119
5.3.1.6.1	Queimador na base do domo.....	120
5.3.1.6.2	Queimador no domo.....	120
5.3.1.6.3	Queimador cerâmico.....	121
5.3.1.6.4	Queimador metálico.....	121
5.4	Materiais refratários.....	121
5.4.1	Boa estabilidade sob cargas em altas temperaturas.....	121
5.4.2	Distribuição de temperatura nos <i>checkers</i>	122
5.4.3	Capacidade calorífica.....	122
5.4.4	Sílica.....	124
5.4.5	Alumina.....	124
5.6	Construção de um novo regenerador.....	126
5.6.1	Planejamento.....	126
5.6.2	Estruturas auxiliares.....	127
5.6.3	Abastecimento.....	128
5.6.3.1	Montagem do revestimento refratário.....	128
5.6.3.2	Sala de grelhas e empilhamento.....	130
5.6.3.3	Queimador cerâmico.....	132
5.6.3.4	Montagem do domo.....	134
5.6.3.5	Linha de ar quente e anel de vento.....	136
5.6	Reformas de regeneradores – a frio e a quente.....	137
5.6.1	Demolição.....	137
5.6.2	Reparo a quente.....	140

5.6.3	Conforto térmico na área de trabalho.....	146
5.6.4	Instrução para aquecimento do domo.....	146
	Referências.....	147
6.	Refratários para Altos-Fornos.....	149
6.1	Introdução.....	149
6.1.1	Regiões do alto-forno.....	150
6.1.2	Processo de redução e distribuição térmica.....	151
6.2	Fatores que afetam as campanhas dos altos-fornos.....	151
6.3	Mecanismos de desgaste dos refratários dos altos-fornos.....	151
6.4	Sistemas de refrigeração.....	153
6.4.1	Sistemas de refrigeração – cadinho, furos de gusa e ventaneiras.....	153
6.4.2	Sistemas de refrigeração – rampa, ventre e cuba.....	154
6.5	Projetos refratários para o cadinho.....	156
6.5.1	Parede e soleira do cadinho.....	157
6.5.2	Exemplos de refratamento.....	157
6.5.3	Premissas para a elaboração do projeto refratário para o cadinho.....	160
6.5.4	Furos de gusa.....	164
6.5.5	Ventaneiras.....	167
6.5.6	Refratários para fiadas de proteção da soleira do cadinho (<i>ceramic pad</i>).....	169
6.5.7	Refratários para fiada de proteção das paredes do cadinho (<i>ceramic cup</i>).....	171
6.5.8	Monitoramento.....	172
6.6	Projetos refratários para a rampa.....	173
6.6.1	Premissas para a elaboração do projeto refratário para a rampa.....	174
6.7	Refratários para o ventre e a cuba.....	175
6.8	Reforma dos altos-fornos.....	176
6.9	Sequência de trabalhos.....	177
6.9.1	Demolição (AMT).....	177
6.9.2	Inspeções (AMT).....	177
6.9.3	Abastecimento (AMT).....	178
6.9.4	Inspeção em blocos de carbono remanescentes (AMT).....	178
6.9.5	Nivelamento da última fiada de blocos de carbono (AMT).....	179
6.9.6	Montagem de tijolos de grafita rentes à carcaça (AMT).....	180
6.9.7	Montagem dos blocos de carbono na soleira do cadinho (AMT).....	180
6.9.8	Montagem dos termopares na região dos blocos de carbono da soleira (AMT).....	181
6.2.9	Montagem dos blocos de carbono na parede do cadinho (AMT).....	181

6.9.10	Montagem de tijolos de carbono na parede (AMT)	182
6.2.11	Montagem do <i>ceramic cup</i>	182
6.9.12	Montagem de chapas de cobre abaixo dos <i>staves</i> das ventaneiras (AMT).....	183
6.9.13	Montagem do <i>ceramic pad</i> – sem peça central (AMT).....	183
6.9.14	Montagem do <i>ceramic pad</i> – com peça central (AMT)	183
6.9.15	Montagem dos refratários dos furos de gusa – múltiplas peças (AMT)	183
6.9.16	Montagem dos refratários dos furos de gusa – uma peça (AMT)	184
6.9.17	Montagem dos refratários dos furos de gusa – concreto (AMT)	184
6.9.18	Montagem dos refratários das ventaneiras – duas peças.....	184
6.9.19	Montagem dos refratários das ventaneiras em oito peças	185
6.9.20	Montagem dos refratários das ventaneiras em múltiplas (Saint-Gobain)	185
6.9.21	Montagem dos refratários da rampa (AMT).....	185
6.9.22	Aplicação de concreto para proteção da soleira do cadinho durante a partida do forno.....	185
6.9.23	Aplicação de <i>shotcrete</i> na rampa, ventre e cuba.....	186
6.9.24	Montagem de monumento de proteção dos furos de gusa.....	186
6.9.25	Montagem da aranha de aquecimento.....	186
	Referências.....	187
7.	Massa de Tamponamento para Altos-Fornos	189
7.1	Introdução	189
7.2	Projetos de desenvolvimento	190
7.3	Matérias-primas	191
7.3.1	Fontes de Al_2O_3 e SiO_2	192
7.3.2	Fontes de C	193
7.3.3	Fontes SiC e Si_3N_4	193
7.3.4	Pós metálicos.....	194
7.3.5	Ligantes.....	195
7.4	Produção.....	195
7.5	Propriedades	196
7.5.1	Tamponamento	197
7.5.2	Perfuração.....	199
7.5.3	Vazamento.....	202
7.5.4	Proteção.....	203
7.6	Transformações em uso.....	205
7.7	Produtos especiais.....	206
7.7.1	Vedação de trincas.....	206
7.7.2	Recuperação de comprimento de furo	206

7.7.3	Corridas consecutivas.....	208
7.7.4	Controle de pontos quentes.....	208
7.7.5	Ecológica.....	209
7.8	Conclusões.....	209
	Referências.....	210
8.	Refratários para Canais de Corrida de Altos-Fornos	215
8.1	Introdução.....	215
8.2	Projetos de canais de corrida	218
8.2.1	Tipos de canais de corrida.....	219
8.2.2	Projetos de refrigeração.....	222
8.2.3	Escumador (<i>skimmer</i>).....	223
8.2.4	Tampas de canal de corrida.....	224
8.2.5	Canais secundários de escória e de gusa	224
8.2.6	Calhas basculantes.....	224
8.2.7	Canal de dreno	225
8.3	Refratários para canais de corrida.....	225
8.3.1	Revestimento isolante.....	226
8.3.2	Revestimento permanente	226
8.3.3	Revestimento de trabalho	228
8.3.4	Ligantes de concretos refratários para canais de corrida	232
	8.3.4.1 Cimento de aluminato de cálcio.....	232
	8.3.4.2 Sílica coloidal.....	234
8.3.5	Massas de socar.....	236
8.3.6	Escumador (<i>skimmer</i>).....	237
8.3.7	Canais secundários de gusa e escória.....	237
8.3.8	Calha basculante.....	238
8.4	Mecanismos e perfis de desgaste	238
8.4.1	Canal de corrida principal.....	238
	8.4.1.1 Linha de escória	241
	8.4.1.2 Linha de metal/gusa.....	242
8.4.2	Escumador.....	243
8.4.3	Canais secundários de gusa e escória.....	243
8.4.4	Calhas basculantes.....	244
8.5	Técnicas de aplicação e manutenção refratária	244
8.5.1	Reparos a quente.....	246
8.6	Secagem e aquecimento de canais de corrida.....	247
8.6.1	Sistema de aquecimento convencional.....	249
8.6.2	Sistema de aquecimento convectivo	250
8.7	Avaliação de desempenho em canais de corrida.....	251
	Referências.....	252

9. Refratários para o Transporte e o Tratamento do Gusa.....	255
9.1 Introdução.....	255
9.2 Ciclo operacional.....	256
9.2.1 Montagem do revestimento refratário.....	256
9.2.2 Secagem e aquecimento.....	256
9.2.3 Carregamento de gusa.....	257
9.2.4 Dessulfuração.....	257
9.2.5 Termografia.....	260
9.2.6 Escumagem da escória.....	261
9.2.7 Transferência do ferro-gusa.....	261
9.3 Mecanismos de desgaste.....	262
9.3.1 Degradação mecânica.....	262
9.3.2 Degradação térmica.....	262
9.3.3 Degradação química.....	263
9.3.3.1 Corrosão pela escória.....	263
9.3.3.2 Corrosão química pela escória oriunda da dessulfuração..	263
9.3.3.3 Oxidação.....	265
9.4 Revestimento refratário de carros torpedo e painelas de gusa.....	265
9.4.1 Evolução dos materiais refratários.....	265
9.4.2 Materiais refratários atuais dos carros torpedo e painelas de gusa.....	268
9.5 Projeto qualitativo.....	271
9.5.1 Projeto qualitativo do carro torpedo.....	272
9.5.1.1 Zona de impacto.....	272
9.5.1.2 Linha de metal.....	272
9.5.1.3 Linha de escória.....	272
9.5.1.4 Teto do carro torpedo.....	273
9.5.1.5 Boca do carro torpedo.....	273
9.5.2 Projeto qualitativo para painelas de gusa.....	274
9.5.2.1 Bica da painela de gusa.....	274
9.5.2.2 Borda livre.....	274
9.5.2.3 Linha de escória.....	274
9.5.2.4 Linha de metal e fundo da painela.....	275
9.5.2.5 Zona de impacto.....	275
9.6 Técnicas de aplicação do revestimento refratário.....	275
9.6.1 Inspeção da carcaça metálica.....	275
9.6.1.1 Cuidados na aplicação dos materiais formados.....	275
9.6.1.2 Aplicação dos materiais não formados.....	277
9.7 Programa de manutenção.....	278
9.8 Influência da operação na campanha do revestimento.....	280
9.9 Misturadores de ferro-gusa.....	281
Referências.....	283

Capítulo 1

REFRATÁRIOS PARA FORNOS DE PELOTIZAÇÃO

Sérgio Fernando Nunes

Raphael Dias de Medeiros

Maciel Rodrigues Rocha Bianchi

1.1 INTRODUÇÃO

Desde muitos anos, há estudos direcionados para formas de aglomerar os finos do processo produtivo. Mas por que aglomerar o minério?

A aglomeração de finos é benéfica aos processos produtivos posteriores e aos reatores (fornos), pois propiciam um aumento de permeabilidade e, consequentemente, ganho de produção desses reatores.

Os motivos de se aglomerar minério podem ser definidos da seguinte forma:

- Reaproveitamento de finos.
- Permeabilidade da carga dos fornos de redução.
- Escassez de oferta de granulados.
- Composição química e propriedades metalúrgicas conhecidas e controladas.
- Empobrecimento das reservas.

Devido ao empobrecimento das reservas, foi necessário utilizar a moagem para retirar a ganga desses minérios e obter um aproveitamento melhor. Com o minério mais fino, foi extremamente necessário aglomerar o material.

Hoje, o minério é beneficiado (liberação de ganga e impurezas) e concentrado para aumentar o teor de ferro (Fe). Para que a pelota tenha valor de mercado, é necessário que o teor de Fe seja superior a 65%. As rotas em que são utilizadas as pelotas produzidas são o alto-forno e a redução direta (Figura 1.1).

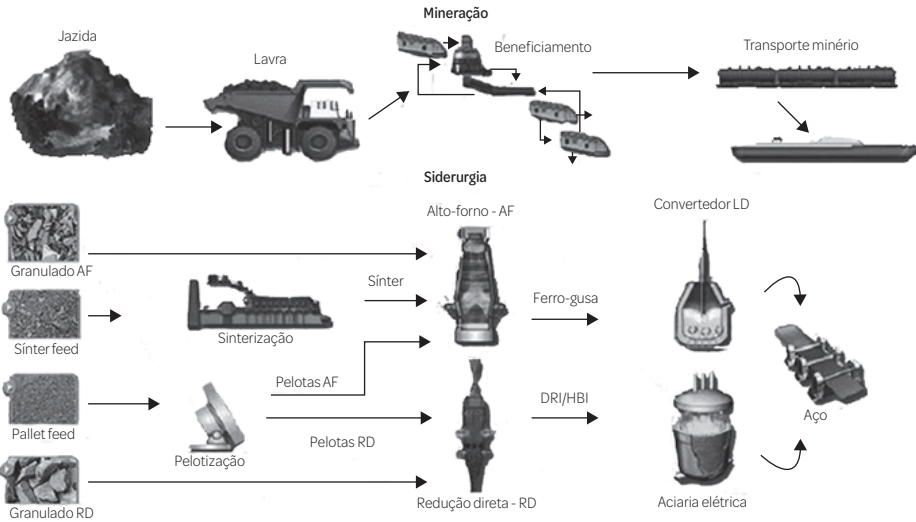


Figura 1.1 A pelotização e a siderurgia.
 Fonte: Adaptada de (4).

As pelotas são produtos do processo de pelotização e podem ser divididas em basicamente dois tipos: pelotas para redução direta; e pelotas para alto-forno (Figura 1.2). No Brasil, não há rotas de redução direta. Essa rota é mais comum no Oriente Médio.

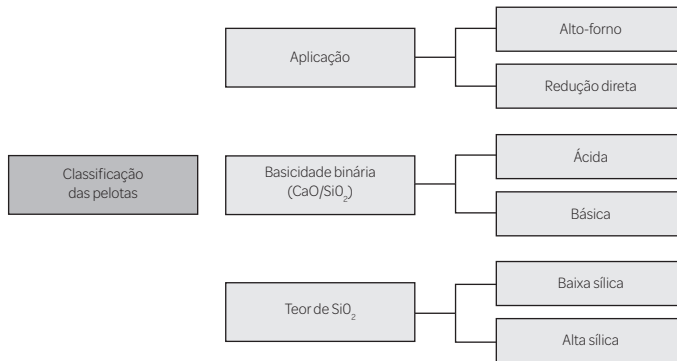


Figura 1.2 Classificação das pelotas.
 Fonte: Samarco (3).

1.1.1 Rotas de pelotas de alto-forno: Estados Unidos, Europa, China (3)

As pelotas de redução direta são de baixa sílica, com sílica menor que 2%. Ou seja, pelotas “mais limpas”, com menos ganga. Acima disso, são pelotas direcionadas para alto-forno.

O Brasil é o maior exportador de pelota de minério de ferro do mundo, com capacidade instalada de 70 a 75 milhões de toneladas de pelota por ano. O Brasil

tem 16 plantas de pelotização, sendo 15 delas da tecnologia grelha móvel com capacidade de 2 a 8 milhões de toneladas.

Há basicamente quatro tipos de tecnologias para produção de pelota: forno rotativo; forno shaft; forno circular; e forno de grelha móvel.

No Brasil, há apenas um modelo em operação de forno rotativo, localizado em Minas Gerais. Já o forno circular foi projetado pelos europeus e, até o momento, só há um modelo recente em operação, localizado na Índia.

Os fornos shaft são de tecnologia mais antiga e de pouca operação no mundo (normalmente na China). São plantas verticais, em geral, construídas para o próprio cliente, consideradas plantas cativas.

A tecnologia de grelha móvel é a mais predominante no mundo, com maior produção e maior consumo de refratário, que pode atingir até 4 toneladas de refratário instalado. Cerca de 60% da produção mundial de pelota é feita nesse tipo de tecnologia.

O século XX foi o divisor de águas para o aperfeiçoamento dos processos de aglomeração de minério, surgindo da inviabilidade de se utilizarem finos de minério de ferro nos altos-fornos. Uma grande instabilidade política mundial fez com que estudos na Alemanha fossem direcionados para aproveitamento de rejeitos, nos processos de sinterização e briquetagem (Figura 1.3). Porém, devido à restrição do aproveitamento de materiais muito finos e dada a baixa resistência mecânica de sínters e briquetes, surgiu a necessidade de estudos no processo de pelotização.



Figura 1.3 Sínter e briquete.

Fonte: Samarco (3).

A pelotização se fortaleceu em praticamente três fases. A primeira, de 1910 a 1937, foi marcada por patentes registradas na Suécia por A. G. Andersson, onde foram feitos testes utilizando minério muito fino, água, aglomerantes, rejeitos submetidos a tratamento térmico. Nessa época, a sinterização seguia forte, porém limitada somente por não conseguir utilizar materiais muito finos (uso somente de fração grosseira, entre 0,15 e 6,3mm).

Em 1926, a Krupp fabricou, na Alemanha, uma planta-piloto com capacidade de 120 t/dia. Porém, em 1937, essa planta é desmontada para se transformar em uma sinterização para a Segunda Guerra Mundial.

A segunda fase da pelotização se inicia em 1940, marcada por uma forte demanda de minério de ferro no norte dos Estados Unidos. Durante a Guerra, as reservas

de qualidade diminuíram significativamente nos Estados Unidos. O minério explorado naquela região era o taconito, que precisava ser moído em frações de até 85% < 325# (unidade de granulometria: *mesh*) para que a magnetita fosse liberada. Esse material se mostrava de sinterização, porém de fácil pelotização em tambores de mistura (segundo estudos da *US Bureau of Mines*).

Em 1943, a Universidade de Minnessota desenvolveu o processo de pelotização baseado em um tambor de pelotamento e um forno de endurecimento, criando o forno do tipo shaft.

Após o fim da Segunda Guerra Mundial, já em 1947, foram retomados os estudos em pelotização. Em 1950, foram comprovados os estudos de viabilidade econômica do processo de pelotização, finalizando-se em 1955 a segunda fase da pelotização.

A terceira fase da pelotização já é marcada com a *startup* de grandes plantas de pelotização, como da Erie Mining Corporation, nos Estados Unidos (1957), com capacidade de 6Mtpa; as plantas da Vale, em 1969 (capacidade 2Mtpa); e Samarco em 1971.

A Samarco aprovou, em 2010, o projeto da quarta pelotização, forno que terminou de ser construído em 2014. Esse forno entrou em operação em 2014, sendo as operações interrompidas em 2015 devido ao acidente do rompimento da barragem de Fundão (Mariana-MG). Retornou às operações em dezembro de 2020. Tem 204m de comprimento e 4m de largura, sendo considerado o maior forno de pelotização do mundo.

1.2 PROCESSO DE PELOTIZAÇÃO

1.2.1 Forno de grelha móvel

De forma bem simplificada, no forno de grelha móvel, há fluxos de gases ascendentes e descendentes que criam regiões separadas no forno para secagem, queima e resfriamento das pelotas. Há um reaproveitamento dos gases em todas essas regiões do forno (Figura 1.4).

A secagem inicia-se com temperaturas de 350°C, utilizando gás proveniente do resfriamento secundário, com o objetivo de reduzir a umidade da pelota. A umidade da pelota é em torno de 10% a 11%, sendo secada na primeira etapa de forma ascendente (gases de baixo para cima). Em seguida, as pelotas passam para a secagem descendente (gases de cima para baixo), com recuperação de gases provenientes da queima. Posteriormente, a pelota entra na pré-queima, com temperaturas em torno de 700 a 1050°C, com função principal de finalizar a secagem e retirar a água interna da estrutura cristalina do minério, além de realizar a calcinação dos compostos presentes na mistura como o calcário.

Logo após, já acima dos 1200°C, inicia-se a queima com função de realizar as reações de escorificação e sinterização, além de conferir resistência física às pelotas. É nessa etapa que o carbono presente na mistura proveniente do carvão ou coque também queima, propiciando poros na pelota.

Após a queima, inicia-se o resfriamento da pelota para, então, dar sequência ao peneiramento (retirada dos finos < 5mm). A pelota é resfriada até atingir 150°C.

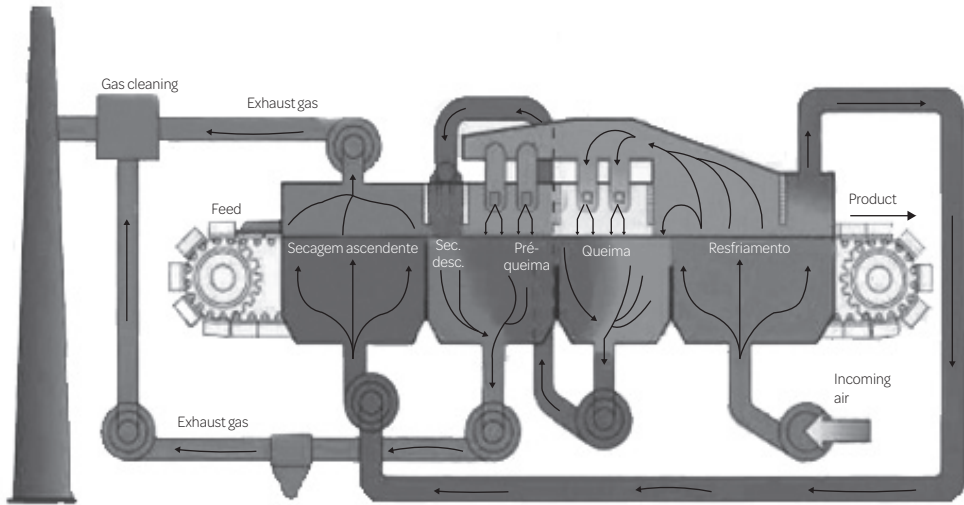


Figura 1.4 Processo de forno de grelha móvel.
Fonte: Samarco (3).

1.2.2 Forno rotativo

O forno rotativo tem um comportamento um pouco diferente, com um tambor onde são feitas a secagem dos materiais e demais preparações (Figuras 1.5 e 1.6). O aquecimento se dá basicamente por irradiação. Após o pelotamento, a pelota crua é adicionada a uma grelha para realizar as etapas de secagem e pré-queima.

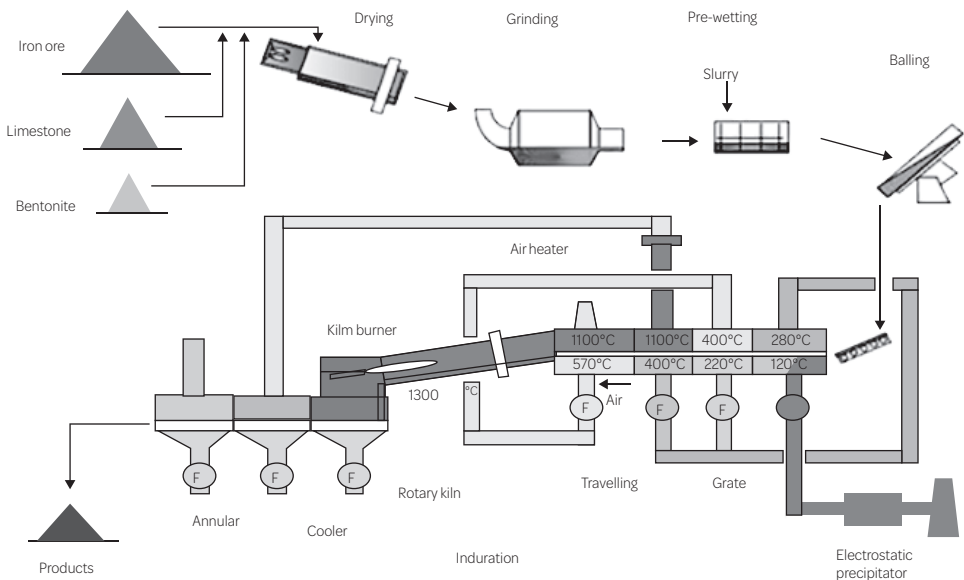


Figura 1.5 Esquemático do forno rotativo.
Fonte: Samarco (3).



Figura 1.6 Visão geral de um forno rotativo.

Fonte: Samarco (3).

As pelotas cruas, então, são direcionadas para um tambor com queimadores, atingindo temperaturas acima de 1300°C com forte presença de irradiação e convecção proveniente da chama. O gás quente atinge o leito de pelota crua, gerando uma zona de grande homogeneidade, refletindo, posteriormente, em uma qualidade melhor do produto.

1.3 REVESTIMENTO REFRAATÁRIO

1.3.1 Refratários – zona de queima

A zona de queima do forno de pelotização de grelha móvel é onde há maior incidência de solicitações térmicas por causa da temperatura de trabalho nessa região. A temperatura da chama pode ultrapassar 2200°C e a face do refratário, em torno de 1700°C . Há um excessivo choque térmico em decorrência de oscilações de temperatura do fluxo de gases, com resfriamento provocado pelo ar do *downcomer* em paradas do forno. Os fornos de pelotização, então, requerem um revestimento refratário apropriado.

O forno IV da Samarco tem 46 câmaras de combustão, com queimadores de 5MW na região da queima (queimadores de alta potência). As temperaturas nas câmaras da queima são altas (acima de 1700°C), causando fusão das partículas ferrosas. Portanto, há ataque de escória/corrosão devido ao contato com as partículas ferrosas fundidas com o refratário (escória líquida no fundo da câmara). Há também erosão provocada pelo arraste das partículas finas provenientes do *downcomer*.

O gás proveniente do *downcomer* causa choques térmicos contínuos no refratário, quando o forno para, por exemplo. Torna-se, então, necessária a aplicação de

alguns testes nos materiais refratários dessa região para que atendam a essas condições. Os testes necessários são de:

- Refratariedade (sobre carga).
- Temperatura máxima de uso (amolecimento e fusão).
- Expansão térmica reversível.
- Temperatura de sinterização.
- Choque térmico.
- Teste de escorificação com pelotas.

O histórico no desenvolvimento de refratários para essa região de queima está descrito na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 Histórico de desenvolvimento de refratários.

Histórico	Tipo material	Processo fabricação	Aplicação
1977 até 1985	Chamote/bauxito	Massa plástica	Moldagem manual
1985 até 1998	Chamote/bauxito	Peças queimadas prensagem manual	Montagem de peças
1998 até 2010	Peças queimadas – mulita sinterizada, mulita eletrofundida e espinélio	Peças queimadas prensagem manual/prensa fricção	Montagem de peças
2011	Peças queimadas – alumina eletrofundida	Peças queimadas prensagem automática	Montagem de peças

Fonte: Samarco (3).

Na Samarco, até a década de 1980, eram utilizadas massa plástica e moldagem manual, porém os fornos dessa época tinham queimadores em menor número e de menor potência. As câmaras de combustão também eram menores. O cilindro é formado de peças encaixadas entre elas, inclusive a parede e o teto (Figura 1.7).

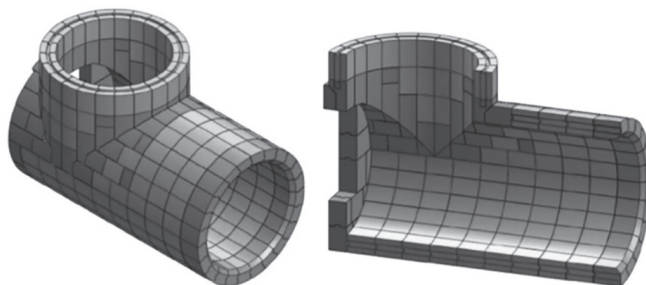


Figura 1.7 Câmara de combustão.

Fonte: RHI Magnesita.

A partir da década de 1980, com os fornos mais novos de câmaras maiores e queimadores de maior potência, foi necessário desenvolver peças queimadas, com alumina acima de 70% (prensagem manual e montagem de peças).

A partir dos anos 2000, foi desenvolvida também mulita sinterizada e eletrofundida, espinélio em alguns momentos (utilizando prensa manual e prensa hidráulica). A partir de 2011, as peças passaram a ser feitas de alumina (alumina eletrofundida, branca, tabular) em prensas automáticas, em função de suas maiores homogeneidade, densidade e resistência ao ataque de escória.

Essa evolução de materiais se deu basicamente na melhora de propriedades como resistência mecânica e resistência a choque térmico. As propriedades e demais características dos materiais testados na Samarco nessa região são ilustrados na Tabela 1.2.

Tabela 1.2 Refratários para o forno 3 da Samarco.

Ensaio	Unidade	Mulita eletrofundida	Espinélio	Alumina eletrofundida		
		Moldagem manual	Vibrado	Moldagem manual	Vibrado	Prensado
Análise química						
SiO ₂	%	22,71	Traços	10,40	7,80	9,56
Al ₂ O ₃		76,23	92,20	89,00	91,40	90,64
Fe ₂ O ₃		0,23	0,10	0,10	0,07	0,04
Na ₂ O + K ₂ O		0,40	0,48	0,40	0,48	0,06
CaO + MgO		0,06		0,10	0,24	0,20
MgO				5,70		
CaO				2,10		
Propriedades físicas						
MEA	g/cm ³	2,63	2,97	2,95	2,90	3,01
PA	%	16,0	19,1	16,7	17,7	14,1
RCTA	MPa	59	47,1	77	94	98
Requeima a 1700°C x 5 horas			-0,06	-0,22	-0,91	-0,15
Choque térmico a 1000°C (água)	Ciclos	> 30	17	> 30	≥ 30	> 30
Escorificação (desgaste + infiltração)	(mm)	25,0	8,2	19,3	19,2	12,3
Atributos						
Laminação		Sim	Não	Sim	Não	Não
Segregação		Não	Não	Não	Não	Não
Trinca		Não	Não	Sim	Não	Não
Núcleo escuro		Não	Não	Sim	Não	Sim

Fonte: Samarco (3).

Foram testados mulita eletrofundida, espinélio, zircônia e outros materiais. Mas o que teve um melhor custo-benefício foi a alumina eletrofundida prensada em prensa automática (alumina alta).

O espinélio obteve melhor resultado de ataque de escória, porém perdeu no resultado de choque térmico (que é crítico na pelotização). No balanço final, a alumina eletrofundida apresentou um resultado melhor. A variação linear dimensional (VLD) também é um parâmetro muito importante, em que a VLD não pode ser maior que 0,5.

Na Figura 1.8, são mostrados exemplos de câmaras de combustão. Podem ser feitas em peças queimadas na parede ou um mix, em que o cilindro seria em peças queimadas e a parede, monolítica (aplicação de *shotcreting*, por exemplo). As juntas de dilatação são muito importantes nas paredes em função da alta temperatura.

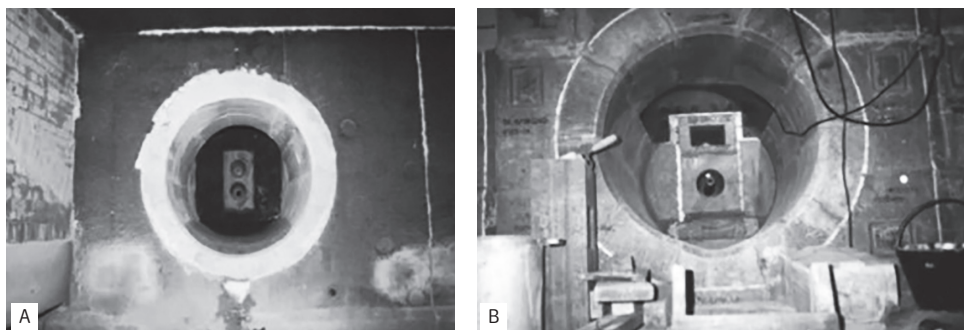


Figura 1.8 A) Câmaras e paredes monolíticas; e B) em blocos.

Fonte: Samarco (3).

Câmaras de combustão e paredes de combustão podem ser monolíticas ou em blocos. São regiões onde a temperatura máxima de uso pode atingir 1700°C, com altos teores de Al_2O_3 (acima de 80%). Portanto, nessas regiões (paredes e cilindro), os refratários são aluminosos. O material costuma apresentar porosidade de no máximo 16% e resistência à compressão acima de 90 MPa. É uma região que necessita de um refratário com alta resistência a choques térmicos e o uso de tijolos queimados permite acelerar a curva de aquecimento do forno posteriormente. Os cilindros das câmaras de combustão costumam ter teores de alumina de cerca de 90%.

Os blocos queimadores têm Al_2O_3 acima de 80%. A Tabela 1.3 exemplifica uma composição típica do refratário dos blocos queimadores.

Tabela 1.3 Composição típica de blocos queimadores.

Classe	Local de aplicação	Al_2O_3 (%)	SiO_2 (%)	CaO (%)	Fe_2O_3 (%)	Álcalis (%)	MEA (g/cm^3)	RCTA (MPa)
AL-2 Prensagem socagem	Blocos de queimadores	73,5	19,3	0,2	1,3	0,7	2,47	50
CONC-4 Alta alumina denso	Fechamento de peças e blocos em regiões críticas	92,0	2,7	2,7	0,6	< 0,2	2,91	50

Fonte: Adaptada de (2).

Os refratários do teto do forno (Figura 1.9) podem ser confeccionados em blocos ou monolítico (bombeado). O teor de Al_2O_3 recomendado desses refratários é acima de 80%. Esse refratário deve apresentar alta resistência mecânica (para suportar o peso do próprio teto), resistência térmica (devido ao gradiente térmico entre a face quente e face fria) e resistência química (por causa do contato do pó de minério carregado pelo gás).

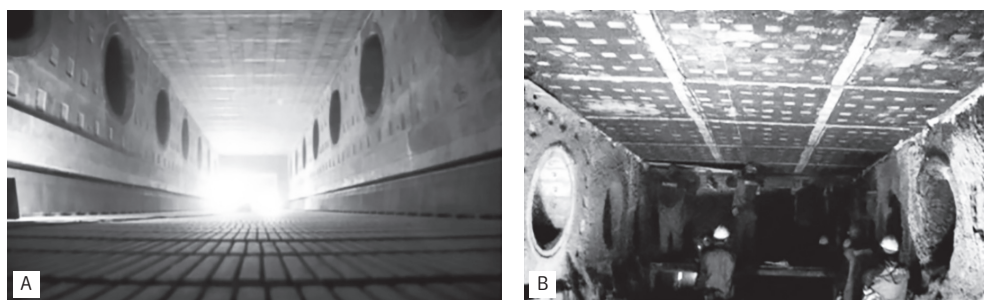


Figura 1.9 A) Refratários do teto em blocos; e B) monolítico.

Fonte: Adaptada de (3).

Portanto, essa região é susceptível ao mecanismo termoquímico: com a formação de fases do FeO do pó de minério e a sílica do refratário, há uma expansão volumétrica do material causando termoclase térmica.

O combustível utilizado nos fornos (óleo ou gás) não mostrou influência diretamente no desgaste de refratários, mas sim no controle da chama (em função da qualidade da chama).

1.3.2 Refratários – zona de resfriamento

O refratário da zona de resfriamento dos fornos de pelletização tem estrutura monolítica, porém de refratários sílico-aluminosos (alumina em torno de 45%). É uma área muito grande e de temperaturas não muito elevadas (máximo 1200°C), porém há uma erosão muito forte em função do material particulado misturado com o gás. Há, então, o uso de painéis refratários além da projeção convencional de materiais sílico-aluminosos.

Nas primeiras caixas da região, há uma zona de alta temperatura em virtude do início do resfriamento das pelotas. A região recebe várias solicitações: choques térmicos decorrentes de oscilação de temperatura no fluxo de gases; ataque de escória (corrosão); erosão (principal problema dessa região) em razão do fluxo gasoso intenso carregando partículas finas; e gradientes de temperatura e pressão.

1.3.3 Refratários – principais desafios

1. No “pé de parede” (console) da zona de resfriamento (Figura 1.10), em função da erosão, há sérios problemas de desgaste (devido à pressão positiva).



Figura 1.10 Início da zona de resfriamento do forno 1 da Samarco.

Fonte: Adaptada de (3).

2. As paredes transversais dos fornos de pelotização tendem a ser secas, ou seja, sem resfriamento com água. São paredes em forma de arco (autossustentável). Porém, no respectivo projeto, ainda há formação de trincas no meio da peça, conforme a Figura 1.11.



Figura 1.11 Parede do forno IV da Samarco.

Fonte: Adaptada de (3).

3. Ataque de escória líquida, no fundo da câmara de combustão.
4. Aparecimento de um *gap* entre a parede da câmara e o primeiro anel, que até hoje não há uma solução efetiva para esse problema (Figura 1.12).
5. Solidificação de escória líquida ao escorrer pela parede de refratários que está mais fria (formação de “bodes”).



Figura 1.12 Gap entre parede e o primeiro anel.

Fonte: Adaptada de (3).

6. Ataque da escória causando termoclase e redução da espessura do teto.
7. Descontroles da chama com desgastes pontuais no cilindro da câmara de combustão.

1.3.4 Refratários – tendências

As paredes transversais com caixas refrigeradas, onde há uma viga refrigerada à água que sustenta a parede de refratários, estão sendo substituídas por paredes autossustentáveis (feitas com refratário). O objetivo é reduzir o consumo de água (ganho ambiental) e de energia, porém há algumas desvantagens como a necessidade de adequação da estrutura metálica da parede em razão do aumento da temperatura na base da parede. Há também a necessidade de um perfeito dimensionamento de juntas no sentido longitudinal, de modo a evitar tensões de dilatação que geram quedas de peças e deformação da estrutura metálica.

As caixas d'água nos pés de parede estão sendo substituídas por caixas secas, pois há riscos de obstrução por impurezas presentes na água, o que compromete o fluxo de água.

Para execução dessa transição de uso para não uso de água na estrutura dos refratários dos fornos de pelotização, é necessário ter atenção a alguns pontos como monitorar o perfil do revestimento, avaliando-se temperaturas de carcaça previstas. Para isso, é necessário um trabalho contínuo de melhorias de modo a aperfeiçoar fluxo térmico, reduzindo a temperatura de carcaça e perdas térmicas.

1.4 FORNO GRELHA – ROTARY KILN

A região inicial do forno rotativo se inicia com uma área reta, que apresenta temperaturas mais baixas (até 1050°C). Na parte superior, há um concreto bombeado e ancorado no teto. Portanto, requer refratários com teor de alumina de 60%.

Já as paredes do forno grelha, geralmente não apresentam desgastes (vida útil elevada).

A região de maior solicitação térmica no forno rotativo (*rotary kiln*) é o cilindro onde se encontra o queimador principal, tornando baixa a vida útil do refratário aplicada nessa região. O indicador de disponibilidade de uma planta rotativa não atinge 340 dias anuais devido a maior necessidade de paradas durante o ano. Nessa região, usam-se materiais monolíticos e peças especiais. No cilindro, não há camada de forramento, como no forno de grelha móvel.

O forno rotativo é revestido de tijolos aluminosos. Os mecanismos de desgaste mais comuns se instalam após fenômenos de colagem de finos agregados aos copos do forno que, após seu desprendimento, provocam ruptura e lascamento dos tijolos (Figura 1.13).

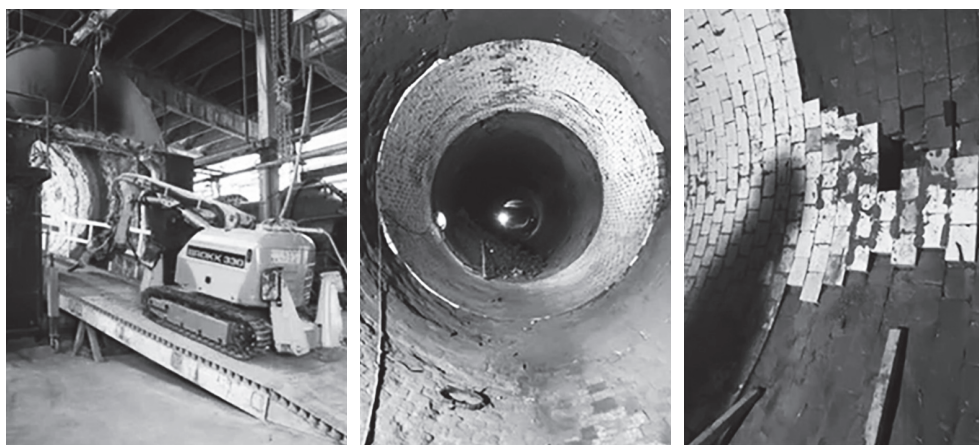


Figura 1.13 Limpeza e desgaste do tambor rotativo.

Fonte: Samarco (3).

O choque térmico também está presente no forno rotativo. Em geral, os fabricantes de refratários indicam curvas de resfriamento e aquecimento adequadas para seus materiais. Em paradas de manutenção programada, recomenda-se o aquecimento com equipamentos específicos para essa finalidade. Contudo, em caso de necessidade de resfriamento não planejado, é comum realizar essas curvas com os equipamentos de operação, com um controle “menos refinado”, causando choque térmico e possíveis danos ao revestimento.

O cilindro costuma esquentar muito e o calor é transferido para a carcaça, gerando alguns problemas como a deformação da carcaça (Figura 1.14).

No resfriador, as solicitações maiores são choque térmico e desgaste por abrasão. O fluxo de ar com particulados nesse equipamento é muito elevado (a energia retirada das pelotas quentes é recuperada e direcionada para os dutos).

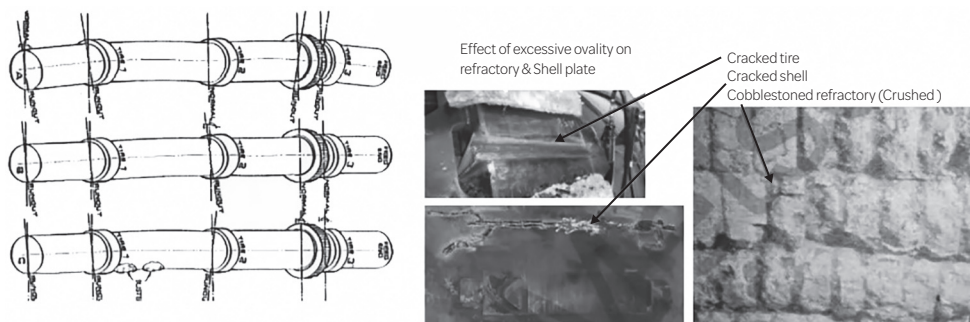


Figura 1.14 Deformação da carcaça do forno.

Fonte: Samarco (3).

A manutenção do revestimento refratário é feita anualmente, por períodos de 15 a 30 dias. Nessas paradas anuais, fazem-se reparos no forno grelha, rotativo e no resfriador. Além da manutenção anual, há pequenas manutenções mensais utilizando projeção (paradas de 24 a 36 horas).



Acesse as imagens coloridas do capítulo.

REFERÊNCIAS

- (1) DUARTE, A. K. *Fundamentos em refratários*. Yamagata Consultoria, Belo Horizonte, 2018.
- (2) D'ÁVILA, et al. *Refratários para pelotização e sinterização de minério de ferro*. In: Curso de refratários para redução. Belo Horizonte: ABM, maio de 2008.
- (3) NUNES, S. F. *Refratário para fornos de pelotização*. In: Seminário Reframax, Vitória-ES, 2012.
- (4) MOURÃO, J. M. *Aspectos conceituais relativos à pelotização de minério de ferro*. Conceitual Consultoria Minerio-Siderúrgica, 2017.
- (5) SILVA, R. L. A. *Refratários para fornos de pelotização*. In: Seminário Reframax, Belo Horizonte-MG, 2011.

Refratários para a área de Redução na Siderurgia é um relevante acervo para os interessados na tecnologia de refratários.

Esta coletânea de três livros sobre refratários para a indústria siderúrgica é uma obra importante para profissionais que lidam com materiais refratários em todas as suas áreas de atuação, passando por Pesquisa e Desenvolvimento, Fabricação, Controle de Qualidade, Comercialização, Assistência Técnica, Manutenção, Instalação e Reciclagem de refratários.

O público-alvo da coletânea são os profissionais da indústria siderúrgica, profissionais da indústria de refratários, fornecedores de matérias-primas para a indústria de refratários, estudantes de engenharia e consultores com interesse em materiais refratários e na indústria siderúrgica.

O segundo volume desta coletânea tem como objetivo tornar o leitor capaz de compreender a tecnologia de materiais refratários para a área da Redução da Siderurgia e sua importância no contexto industrial siderúrgico, conhecer suas propriedades, entender seus mecanismos de desgaste, a tecnologia de manutenção e a de instalação, seus processos de fabricação, as matérias-primas usadas, suas classificações, propriedades e aplicações.

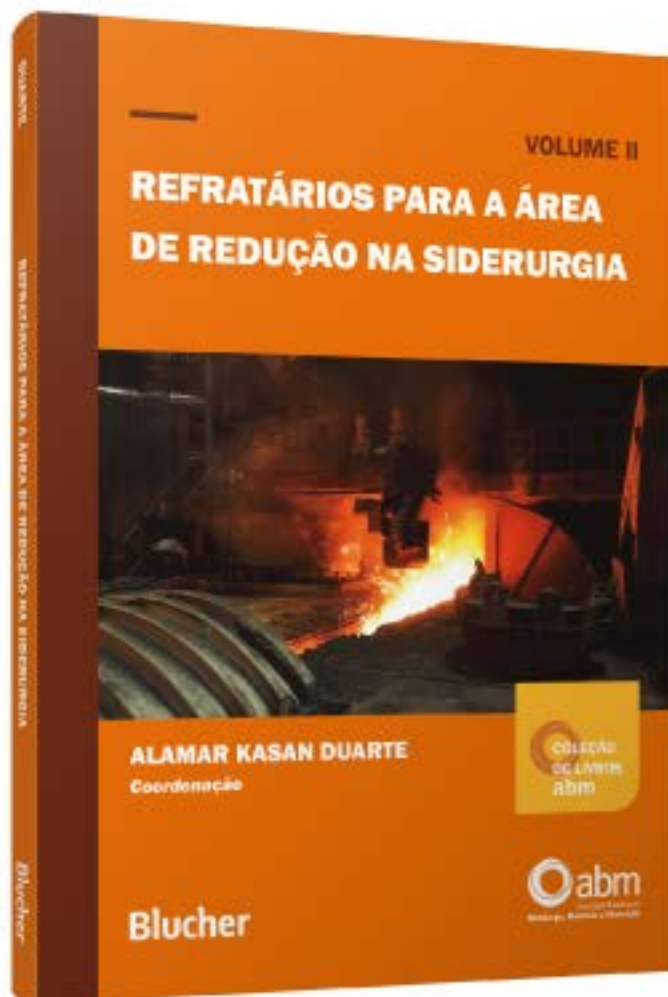
A todos, uma excelente leitura.



www.blucher.com.br



Blucher



Clique aqui e:

[VEJA NA LOJA](#)

Refratários para a área de redução na siderurgia

Alamar Kasan Duarte

ISBN: 9788521223047

Páginas: 284

Formato: 17 x 24 cm

Ano de Publicação: 2024
