

2ª Edição revisada e ampliada

EDITORES: ADÃO BENVINDO DA LUZ & FERNANDO A. FREITAS LINS

ROCHAS & MINERAIS INDUSTRIAIS

usos e especificações



SUMÁRIO

PARTE I: INTRODUÇÃO GERAL

01. PANORAMA DAS ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS NO BRASIL 3
Fernando A. Freitas Lins

02. DESEMPENHO FUNCIONAL DOS MINERAIS INDUSTRIAIS: 25
DESAFIOS TECNOLÓGICOS, FERRAMENTA DE MARKETING E ESTRATÉGIA DE VALORIZAÇÃO
Renato R. Ciminelli

PARTE II: ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS: USOS E ESPECIFICAÇÕES

03. AGALMATOLITO 69
Adão Benvindo da Luz, Paulo Tomedi e Rodrigo Martins

04. AMIANTO 79
*Normando Claudino Moreira de Queiroga, William Bretas Linares, Joselito Dasio da Silva
e Adão Benvindo da Luz*

05. AREIA INDUSTRIAL 103
Adão Benvindo da Luz e Fernando A. Freitas Lins

06. AGROMINERAIS - ENXOFRE 125
*Gildo de Araújo Sá C. de Albuquerque (in memoriam), Ronaldo Simões L. Azambuja (in memoriam.)
e Fernando A. Freitas Lins*

07. AGROMINERAIS - FOSFATO 141
Francisco E. Lápido Loureiro, Marisa Bezerra de Mello Monte e Marisa Nascimento

08. AGROMINERAIS - POTÁSSIO 175
Marisa Nascimento, Marisa Bezerra de Mello Monte e Francisco E. Lápido Loureiro

09. AGROMINERAIS - ROCHAS SILICÁTICAS COMO FONTES MINERAIS 205
ALTERNATIVAS DE POTÁSSIO PARA A AGRICULTURA
*Éder de Souza Martins, Claudinei Gouveia de Oliveira, Álvaro Vilela de Resende e Marcello
Silvino Ferreira de Matos*

10. ARGILA - ATAPULGITA E SEPIOLITA 223
Adão Benvindo da Luz e Salvador Luiz M. de Almeida

11. ARGILA - BENTONITA 239
Adão Benvindo da Luz e Cristiano Honório de Oliveira

12. ARGILA - CAULIM	255
<i>Adão Benvindo da Luz, Antônio Rodrigues de Campos, Eduardo Augusto de Carvalho, Luis Carlos Bertolino e Rosa Bernstein Scorzelli</i>	
13. BARITA	295
<i>Adão Benvindo da Luz e Carlos Adolpho Magalhães Baltar</i>	
14. BAUXITA	311
<i>João Alves Sampaio, Mônica Calixto de Andrade e Achilles Junqueira Bourdot Dutra</i>	
15. BERILO	339
<i>Marcelo Soares Bezerra e Júlio de Rezende Nesi</i>	
16. CALCÁRIO E DOLOMITO	363
<i>João Alves Sampaio e Salvador Luiz Matos de Almeida</i>	
17. CIANITA REFRACTÁRIA	389
<i>Caroline Meira Lopes de Castro Joffily e Claudinei Gouveia de Oliveira</i>	
18. CROMITA	403
<i>João Alves Sampaio, Mônica Calixto de Andrade e Paulo Renato Perdigão Paiva</i>	
19. DIAMANTE	427
<i>Mario Jorge Costa e Adão Benvindo da Luz</i>	
20. DIATOMITA	451
<i>Silvia Cristina Alves França, Adão Benvindo da Luz e Paulo Francisco Inforçati</i>	
21. FELDSPATO	467
<i>Adão Benvindo da Luz, Fernando A. Freitas Lins e José Mario Coelho</i>	
22. FLUORITA	487
<i>João Alves Sampaio, Carlos Adolpho Magalhães Baltar e Mônica Calixto de Andrade</i>	
23. GIPSITA	505
<i>Carlos Adolpho Magalhães Baltar, Flavia de Freitas Bastos e Adão Benvindo da Luz</i>	
24. GRAFITA	527
<i>João Alves Sampaio, Paulo Fernando Almeida Braga e Achilles Junqueira Bourdot Dutra</i>	
25. HALITA	551
<i>Paulo Roberto Cabral de Melo, Renato Senna de Carvalho e Dorival de Carvalho Pinto</i>	

26. LÍTIÓ	585
<i>Paulo Fernando Almeida Braga e João Alves Sampaio</i>	
27. MAGNESITA	605
<i>Luís Rodrigues Armôa Garcia, Paulo Roberto Gomes Brandão e Rosa Malena Fernandes Lima</i>	
28. MANGANÊS	633
<i>João Alves Sampaio, Mônica Calixto de Andrade, Achilles Junqueira Bourdot Dutra e Márcio Torres Moreira Penna</i>	
29. MICA	649
<i>Carlos Adolpho Magalhães Baltar, João Alves Sampaio e Patrícia Maria Tenório Cavalcante</i>	
30. NEFELINA SIENITO	663
<i>João Alves Sampaio, Sílvia Cristina Alves França e Paulo Fernando Almeida Braga</i>	
31. QUARTZO	681
<i>Pedro Luiz Guzzo</i>	
32. RMIS: ROCHAS E MINERAIS PARA CERÂMICA DE REVESTIMENTO	723
<i>Mônica Calixto de Andrade, João Alves Sampaio, Adão Benvindo da Luz e Alberto Buoso</i>	
33. RMIS: ARGILA PARA CERÂMICA VERMELHA	747
<i>Marsis Cabral Junior, José Francisco Marciano Motta, Amilton dos Santos Almeida e Luiz Carlos Tanno</i>	
34. RMIS: ARGILA PLÁSTICA PARA CERÂMICA BRANCA	771
<i>José Francisco Mariano Motta, Adão Benvindo da Luz, Carlos Adolpho Magalhães Baltar, Marcelo Soares Bezerra, Marsis Cabral Júnior e José Mario Coelho</i>	
35. TALCO	793
<i>Ivan Falcão Pontes e Salvador Luiz Matos de Almeida</i>	
36. TERRAS-RARAS	817
<i>Simon Rosental</i>	
37. TITÂNIO: MINERAIS DE TITÂNIO	841
<i>Carlos Adolpho Magalhães Baltar, João Alves Sampaio, Mônica Calixto de Andrade e Dorival de Carvalho Pinto</i>	
38. VERMICULITA	865
<i>José Fernandes de Oliveira Ugarte, João Alves Sampaio e Sílvia Cristina Alves França</i>	
39. ZEOLITAS NATURAIS	889
<i>Nélio das Graças de Andrade da Mata Resende, Marisa Bezerra de Mello Monte e Paulo Renato Perdigão Paiva</i>	
40. ZIRCONITA	917
<i>Luiz Carlos Bertolino, Nely Palermo, João Alves Sampaio e Sílvia Cristina Alves França</i>	

PARTE III: OS MINERAIS E O MEIO AMBIENTE

41. MINERAIS APLICADOS À TECNOLOGIA AMBIENTAL: MINERAIS VERDES 933
Silvia Cristina Alves França, José Fernandes de Oliveira Ugarte e Adriana de A. Soeiro da Silva
42. EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL E AMBIENTAL A POEIRAS DE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS 961
Zuleica Carmen Castilhos, Reiner Neumann e Olívia Bezerra

GLOSSÁRIO

CAPÍTULO 18

Cromita

João Alves Sampaio¹
Mônica Calixto de Andrade²
Paulo Renato Perdigão Paiva³

1. INTRODUÇÃO

O químico francês, Louis Valquelin, descobriu o elemento cromo em 1797, quando estudava o mineral crocoíta: $PbCrO_4$. O nome do elemento vem do grego, *kchroma*, que significa cor e foi isolado em 1854, por Busen. Somente a partir do século XX, o metal foi utilizado de modo intenso nas indústrias metalúrgicas e de refratários.

A cromita é usada tanto como mineral metálico quanto não-metálico, sendo considerado um dos mais importantes minerais industriais em todo o mundo. Os minérios de cromita são empregados como fonte de cromo para as indústrias metalúrgicas, química, de refratários e, mais recentemente, como areia nos processos de fundição. A indústria metalúrgica desponta como o maior consumidor dos produtos de cromita, comparada às demais.

O cromo destaca-se como o quinto elemento metálico após o ferro, manganês, alumínio e cobre. Ainda assim, o homem só veio a usar a cromita como fonte de cromo no final do século XVIII, primeiro como pigmento e, mais tarde, como mordente na indústria têxtil. Somente no início do século XIX, descobriu-se que o cromo proporciona propriedades inoxidáveis às ligas de aço. Mesmo assim, tal propriedade só foi posta em prática na segunda metade daquele século. Com o crescimento da indústria metalúrgica, no início de século XX, a cromita e outros minerais tornaram-se importantes como *commodities* e, mais ainda, a difusão dos aços inoxidáveis fez do cromo um produto vital na indústria metalúrgica (Maliotis, 1996).

¹Engº de Minas/UFPE, D.Sc. em Engenharia Metalúrgica/COPPE-UFRJ, Tecnologista Sênior do CETEM/MCT.

²Engª Química/UFRJ, D.Sc. em Engenharia Metalúrgica/COPPE-UFRJ, Professora do IPRJ/UERJ.

³Engº Metalurgista/UFOP, M.Sc. em Engenharia Metalúrgica/COPPE-UFRJ, Bolsista do CETEM/MCT.

Similarmente, a utilização de vários processos metalúrgicos de temperaturas elevadas converteu o cromo num constituinte indispensável aos produtos refratários. Entrementes, houve uma expansão das aplicações químicas tanto da cromita como dos compostos de bicromatos, o que fez do metal uma matéria-prima essencial para uma variedade de produtos na indústria química.

As maiores reservas mundiais de cromita encontram-se assim distribuídas: Cazaquistão (26,1%), África do Sul (15%), Índia (3,2%) e outros países (59%) (Gonçalves, 2007).

O total das reservas brasileiras (medidas mais indicadas) é de 15 milhões de toneladas, que equivale a 4.992 mil toneladas de Cr_2O_3 contido, distribuídas entre os estados (Gonçalves, 2007):

- (i) Bahia (79,7%), nos municípios de Campo Formoso, Andorinha, Uauá e Santa Cruz;
- (ii) Amapá (7,2%), no município de Mazagão;
- (iii) Minas Gerais (3,1%), no município de Alvorada de Minas.

2. MINERALOGIA E GEOLOGIA

Mineralogia

A cromita é o único mineral de cromo economicamente aproveitável. O cromo é encontrado em vários minerais nas formas de óxidos e silicatos e não há conhecimento da ocorrência de cromo metálico na natureza. Isso se deve ao carácter oxidante da atmosfera e à elevada reatividade do cromo metálico com o oxigênio. A composição teórica da cromita ($\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$) contém 68% de Cr_2O_3 e 32% de FeO . Entretanto, estes valores nunca são encontrados nos minerais naturais, em decorrência das impurezas. O magnésio e o alumínio ocorrem na estrutura da cromita, substituindo parcialmente o ferro. A Tabela 1 ilustra as faixas de teores dos óxidos que ocorrem com maior frequência nesse mineral. Óxidos de titânio, zinco, níquel, manganês, vanádio e cobalto também podem ser encontrados, todavia em pequenas quantidades.

Tabela 1 – Variações dos teores dos principais óxidos na estrutura cristalina da cromita.

Óxidos	(%)	Óxidos	(%)
Cr ₂ O ₃	18 – 62	Al ₂ O ₃	0 – 33
FeO	0 – 18	Fe ₂ O ₃	2 - 30
MgO	6 – 16	-	-

Fonte: (Bacellar e Leal, 1973).

Sob o aspecto cristalográfico, a cromita é um óxido com a estrutura dos espinélios, cuja forma geral consiste em XY₂O₄, na qual os quatros átomos de oxigênio estão associados aos cátions X e Y. Na estrutura cristalina do espinélio, o elemento X pode ser: Fe, Mg, Mn, Ni ou Zn. Os elementos ilustrados por Y podem ser Al, Cr e Fe. Na Tabela 2, constam as séries dos espinélios, as quais incluem as séries:

- (i) do espinélio baseada no alumínio;
- (ii) da cromita baseada no cromo;
- (iii) da magnetita baseada no ferro.

O termo espinélio refere-se a uma estrutura genérica da série alumínio. A série da cromita forma uma solução sólida incluindo FeO.Cr₂O₃ (cromita) e MgO.Cr₂O₃ (cromita magnesianas).

Tabela 2 – Série dos espinélios, série cromita e a série magnetita.

Séries	Elemento Básico	Mineral	Fórmula Química
Cromita	Cromo	Cromita	FeO.Cr ₂ O ₃
		Magnesiocromita	MgO.Cr ₂ O ₃
Espinélio	Alumínio	Espinélio	MgAl ₂ O ₄
		Hercinita	FeAl ₂ O ₄
		Gahnita	ZnAl ₂ O ₄
		Galaxita	MnAl ₂ O ₄
Magnetita	Ferro	Magnetita	FeFe ₂ O ₄
		Magnesiocromita	MgFe ₂ O ₄
		Franklinita	(Fe,Zn,Mn)-(Fe,Mn) ₂ ZnFe ₂ O ₄
		Jacobsita	MnFe ₂ O ₄
		Trevorita	NiFe ₂ O ₄

Fonte: Bacellar e Leal, 1973.

Geologia

Os depósitos de cromita resultam da cristalização do mineral no processo de resfriamento do magma. A origem de muitos deles foi discutida por Stowe (1987) e Petrascheck (1988), citados por Papp (1994). Dessa forma, os dois tipos de depósitos de cromita compactas conhecidas são os estratiformes e os podiformes (do inglês *podiform*).

Os estratiformes, como o próprio nome indica, são tabulares, ocorrem em leitos de intrusões ígneas e são responsáveis por mais de 90% das reservas de cromo conhecidas em todo o mundo. Essas intrusões são formadas em escudos, e aqueles que contêm depósitos econômicos de cromita possuem idades superiores a 1,9 bilhão de anos. Os minérios encontrados nesses depósitos são, predominantemente, de alto teor de ferro (grau químico). A exceção é o depósito de Great Dyke, no Zimbábue, onde o minério é tipicamente de alto teor de cromo (grau metalúrgico). Por serem lentiformes e com regularidade nas suas formas, esses depósitos oferecem facilidades à prospecção e à mineração (Papp, 1994).

Os depósitos podiformes são tipicamente lentiformes a pouco tabulares, todavia alguns são muito irregulares. Em termos de reservas, variam desde poucas dezenas de quilogramas a vários milhões de toneladas. A maior parte da produção é derivada de depósitos contendo cerca de 100 mil toneladas de minério. Os depósitos com milhões de toneladas são raros. Paradoxalmente, são depósitos com elevado teor de cromo, grau metalúrgico, além de constituir fonte mundial de minério com grau refratário. Esses depósitos têm como características a granulometria grossa intensamente deformada e recristalizada (Papp, 1994).

3. LAVRA E PROCESSAMENTO

Lavra

Os métodos de lavra empregados nos minérios de cromo são variados em decorrência das formas irregulares dos corpos mineralizados das jazidas, as quais são lavradas a céu aberto e via subterrânea, com predomínio desse último.

Na lavra a céu aberto, emprega-se o desmonte mecânico em bancadas com alturas e bermas que variam de acordo com a mecânica da rocha encaixante. Assim, para a rocha fresca, minério compacto, a altura das bancadas atinge

valores de 20 m, com bermas de 8,0 m. No caso dos minérios friáveis, a altura e bermas chega, no máximo, a 7,0 m.

Na lavra subterrânea são empregados vários métodos, dependendo da forma do corpo mineralizado. Resumidamente, são utilizados os seguintes métodos: sub-nível (*sub-level*), câmaras e pilares.

Variantes desses métodos são utilizados de acordo com a forma dos corpos mineralizados. Assim, o método de corte e enchimento (*cut and fill*) caracterizado por elevada recuperação, baixa diluição, porém com custo elevado por tonelada, é empregado quando a forma do corpo mineralizado é irregular. O método *shrinkage stoping* baseia-se na utilização temporária do minério desmontado como enchimento e suporte das paredes. Esse método é aplicado nos minérios consistentes e há elevada inclinação das paredes. O custo do método é baixo, porém com baixa recuperação e elevada diluição do minério (Maliotis, 1996).

No caso da mina de Ipueira, estado da Bahia, emprega-se a lavra subterrânea totalmente mecanizada e com o emprego do método *sublevel caving*, que consiste na abertura de galerias de produção no *footwall* da camada, com desmonte em recuo e abatimento do teto. Os painéis alcançam, em média, 14 a 25 m de altura, e a perfuração é efetuada no sentido ascendente e em leque. O método proporciona uma recuperação da ordem de 80%, com diluição de 10 a 35% de estéril no *run of mine*, segundo Gonçalves (2003).

Processamento

Consiste no enriquecimento do minério de cromo, a fim de elevar o teor de Cr_2O_3 aos níveis exigidos pelo mercado consumidor. Em resumo, a finalidade do beneficiamento é prover o minério de características físicas e químicas adequadas ao tratamento posterior.

Antes de esboçar os principais processos de beneficiamento dos minérios de cromo, é importante salientar as suas características físicas mais importantes. A primeira delas é que os minérios de cromo são sempre monometálicos, isto é, não há subprodutos no seu processamento. Com raras exceções, ocorrem platinas ou minerais pesados. Outra característica consiste na diferença significativa entre a densidade da cromita e dos minerais de ganga.

Para satisfazer uma gama de exigências na utilização dos concentrados de cromita, os mesmos chegam ao mercado em faixas granulométricas que variam desde os concentrados *lump* até os concentrados de granulometria fina. Também são exigidas determinadas especificações químicas, marcadamente definidas pelo teor de Cr_2O_3 , de acordo com uso final do produto.

Os minérios de cromita ocorrem nas formas compacta e disseminada, com variações significativas no grau de liberação do mineral e na composição mineralógica. Em decorrência disso, há uma variedade de técnicas e/ou métodos utilizados no processamento desses minérios. A utilização desses métodos ainda varia conforme outros fatores, dentre os quais a natureza do minério, a qualidade do produto final e as dimensões do empreendimento mineiro. Assim, são obtidos “produtos de cromita” por meio de lavra seletiva, catação manual (*hand sorting*), meio denso, separação gravítica, separação magnética e, em alguns casos, flotação. O fluxograma da Figura 1 ilustra as principais operações unitárias empregadas no processamento dos minérios de cromo (Papp, 1994).

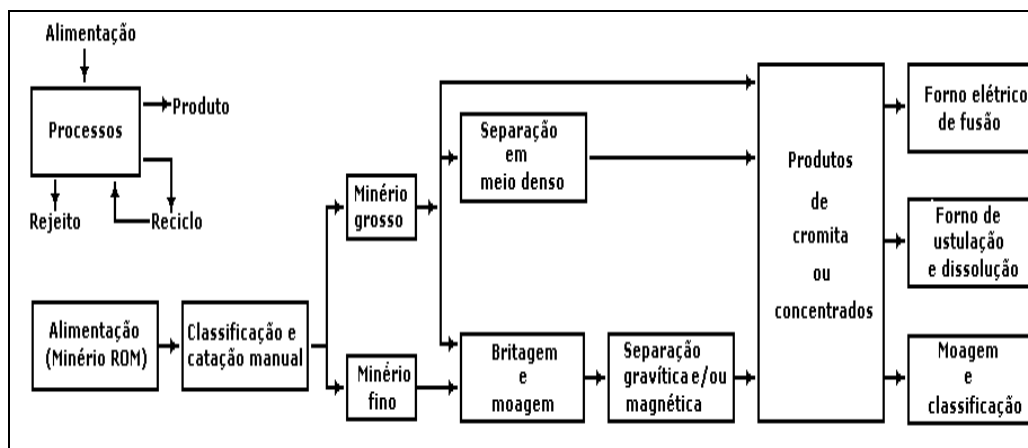


Figura 1 – Fluxograma representativo da obtenção de produtos de cromo, incluindo o beneficiamento e os processos metalúrgicos (Papp, 1994).

A catação manual e a separação em meio denso são métodos utilizados apenas para o minério compacto de granulometria grossa. Nos países industrializados, o método de separação em meio denso, que opera com a fração grossa (-120 +12 mm), é utilizado em substituição à catação manual.

O minério disseminado possui uma granulometria de liberação mais fina e por isso, requer um processo de moagem também mais fino, o que, torna impraticável o método de catação manual ou de meio denso. Assim, a viabilidade técnica define a utilização de processos mecanizados, ou seja, separações gravítica e/ou magnética com intensidade de campo acima de 1,0 T.

Os métodos convencionais de separação gravítica são, universalmente, os mais utilizados na concentração de cromita. Neste caso, os equipamentos mais empregados incluem tambores e ciclones de meio denso, jigues, mesas vibratórias e espirais. Vale registrar:

- (i) a elevada densidade do mineral em relação aos minerais de ganga e sua granulometria de liberação adequada ao processo;
- (ii) o fato de os métodos convencionais de separação gravítica possuírem flexibilidade operacional, exigirem pequeno investimento de capital e baixo custo operacional, com vantagem adicional de não gerarem efluentes agressivos ao meio ambiente.

A recuperação de minerais valiosos contidos em frações finas constitui uma dificuldade no processamento mineral, particularmente quando se trata de métodos convencionais de separação gravítica (Richards *et al.*, 2000; Çiçek e Cöcen, 2002). Quando a granulometria do minério está abaixo de 100 µm, a força associada ao fluxo d'água torna-se dominante sobre aquela associada à gravidade. Em decorrência disso, uma grande parte de minerais valiosos contidos nas frações finas não são recuperáveis por métodos convencionais de separação gravítica. Para contornar essa dificuldade, vários métodos de separação gravítica e equipamentos foram desenvolvidos nas últimas décadas. Assim, espirais para concentração de finos e o concentrador centrífugo, *multi-gravity separator* (MGS), são apenas exemplos destas tecnologias emergentes que despontam como um potencial capaz de separar eficientemente espécies minerais até o limite granulométrico de 20 µm (Richards *et al.*, 2000; Çiçek e Cöcen, 2002, Tarore *et al.*, 1995). Com essa finalidade, já se observa a utilização desses equipamentos em algumas minas de cromita, para recuperação desse mineral contido nas frações finas, não recuperado pelo método convencional.

Em alguns casos, a elevada susceptibilidade magnética da cromita em relação aos seus minerais de ganga encoraja a utilização do método da separação magnética como processo adicional de concentração. Dessa forma, a cromita contida nas frações finas, não recuperada por processos gravíticos convencionais, pode ser aproveitada por separação magnética com intensidade de campo

superior a 1,0 T. Associados à cromita encontram-se, entre outros, a serpentina e a olivina, que também exibem susceptibilidade magnética; contudo, a cromita sempre possui maiores valores desse índice em relação aos seus minerais de ganga. Tal fato, deve-se à composição química da cromita, que encerra maior teor de ferro que os demais minerais (Maliotis, 1996).

A obtenção de concentrados ou produtos de cromita para a indústria de refratário, química ou metalúrgica compreende as etapas de britagem, moagem e concentração. Os processos de ustulação e fundição em fornos elétricos são etapas subsequentes na cadeia de obtenção dos produtos de cromo.

O processo de flotação é empregado na concentração da cromita com granulometria fina, não recuperada pelos processos gravíticos. Entretanto, são registrados poucos casos que utilizam tal processo (Sysila *et al.*, 1996; Wesseldijk *et al.*, 1999; Guney *et al.*, 1999).

Obtém-se areia de cromita mediante o emprego de processos convencionais de separação gravítica. Inicialmente, procede-se à lavagem do minério para remoção das lamas e, em seguida, à etapa de concentração gravítica, utilizando-se jigsawes, mesas vibratórias ou espirais. Na etapa seguinte, o concentrado é desaguado e segue para um processo de secagem, seguida de classificação. Eventualmente, dependendo do minério, utiliza-se a separação magnética com o fim de remover os minerais não-magnéticos contidos nos concentrados obtidos por processos gravíticos. Finalmente, o produto é acondicionado para expedição.

O fluxograma da Figura 2 ilustra a seqüência do beneficiamento dos minérios de cromo, indicando a faixa granulométrica de cada etapa do processamento.

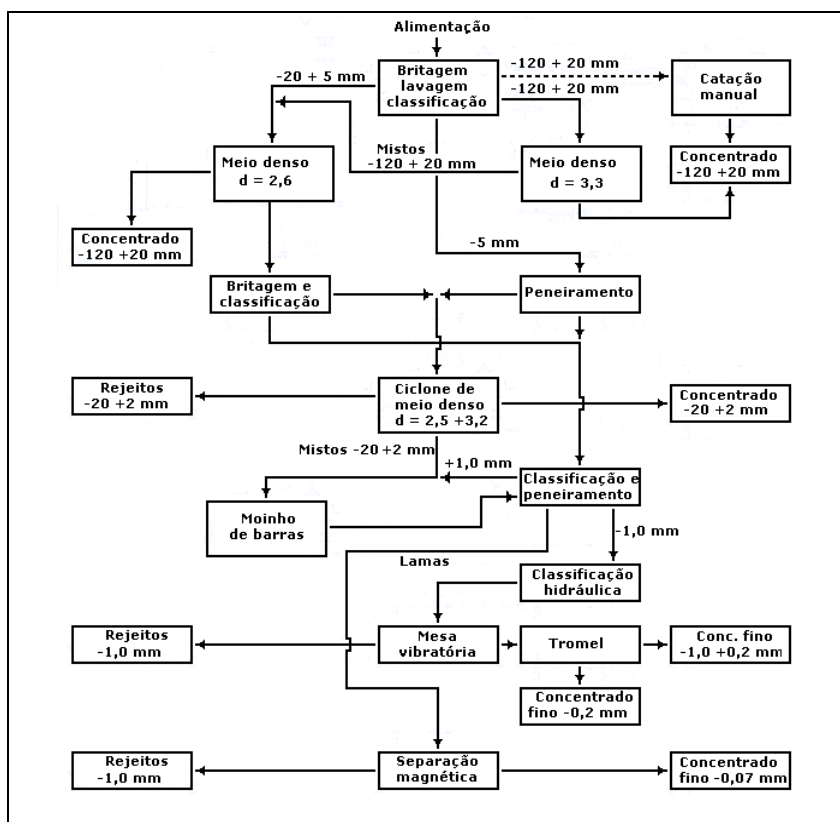


Figura 2 – Fluxograma típico do beneficiamento dos minérios de cromo, indicando as faixas granulométricas de cada etapa (Maliotis, 1996).

Processamento de Minérios de Cromo no Brasil

A FERBASA - Companhia de Ferro e Ligas da Bahia S/A responde por 70% de toda a produção nacional de cromita e 100% da produção de ligas de ferro-cromo no Brasil. Suas principais minas estão localizadas nos municípios de Andorinhas e Campo Formoso, BA.

Nas duas minas, a concentração do minério, que segue métodos convencionais de separação gravítica, permite obter produtos para as indústrias metalúrgicas, químicas e de refratários. A FERBASA também produz areia de cromita destinada às indústrias de fundição. O fluxograma da Figura 3 ilustra o circuito de concentração do minério de cromo da mina de Ipueira, no município de Andorinhas, onde ocorre a maior produção da empresa (Sampaio, *et al*, 2001).

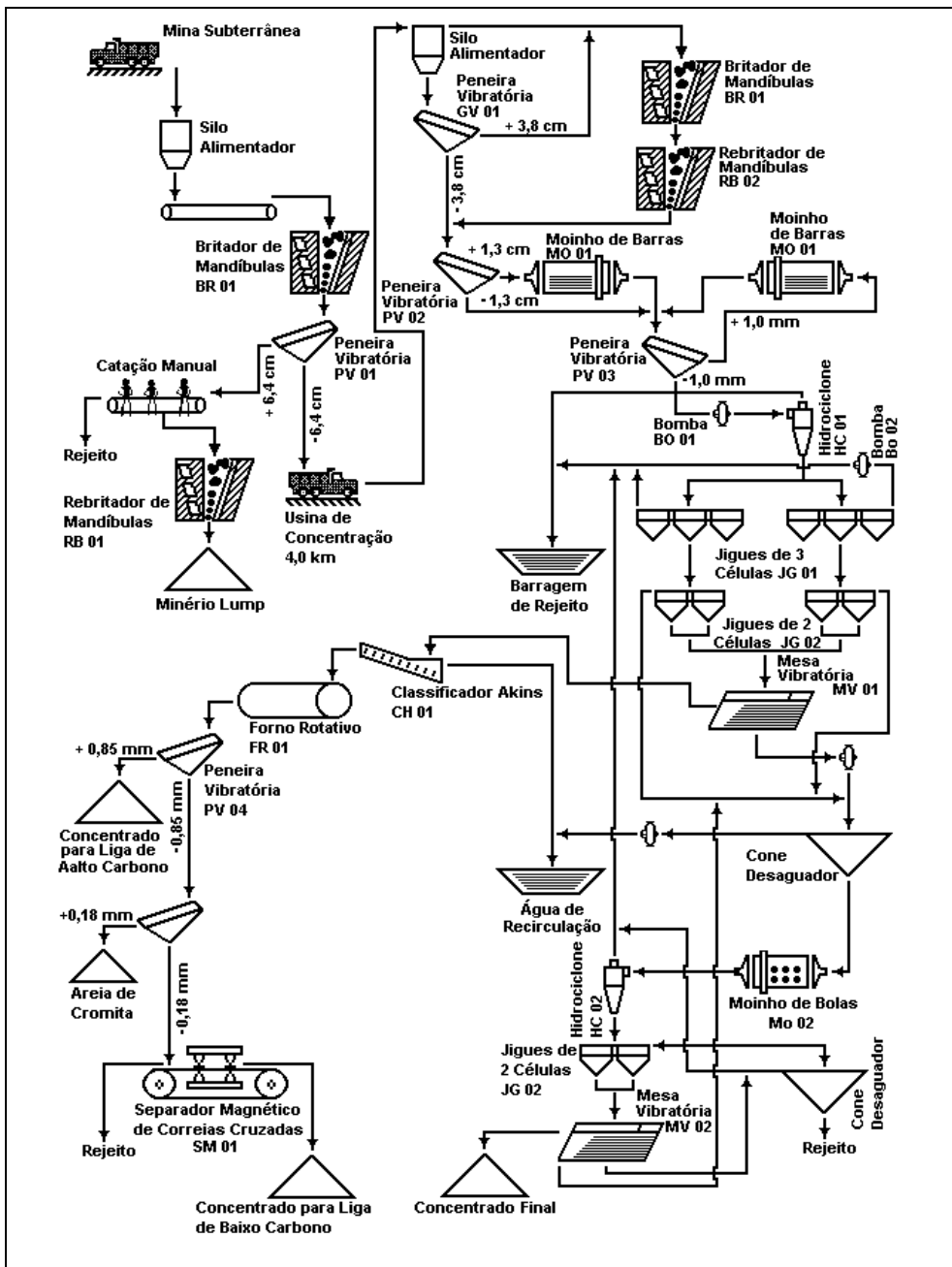


Figura 3 – Fluxograma de beneficiamento de minério de cromita da mina Ipueira, FERBASA. (Fonte: Sampaio *et al.*, 2001).

4. USOS E FUNÇÕES

Os concentrados de cromita podem ser agrupados nos tipos grau metalúrgico grau químico e grau refratário. A classificação baseia-se no teor de Cr_2O_3 e na relação Cr/Fe. A Tabela 3 ilustra os detalhes dessa classificação evidenciando a inter-relação entre os diversos usos dos produtos de cromita, como fonte do metal cromo. É essencial esclarecer a diferença entre o consumo do metal cromo e do mineral cromita. O primeiro envolve, além do consumo da própria cromita, as ligas do metal e substâncias químicas, enquanto o segundo inclui apenas o concentrado de cromita.

Tabela 3 – Principais tipos de concentrados de cromita de várias origens com suas respectivas especificações (Papp, 1994).

Grau	Valores Mínimos (%)			Valores Máximos (%)				
	Cr/Fe	Cr_2O_3	$\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$	Fe	S	P	CaO	SiO_2
Metalúrgico	3/1	48	-	-	0,8	0,04	-	8
Químico	2,0	44	59,28	20,16	0,002	0,004	0,24	5
Refratário	-	47	61,53	19,82	0,002	0,003	0,2	0,95

O fluxograma da Figura 4 ilustra o uso dos produtos de cromo ao longo de toda a seqüência de beneficiamento do mineral, isto é, processos, produtos e usos finais.

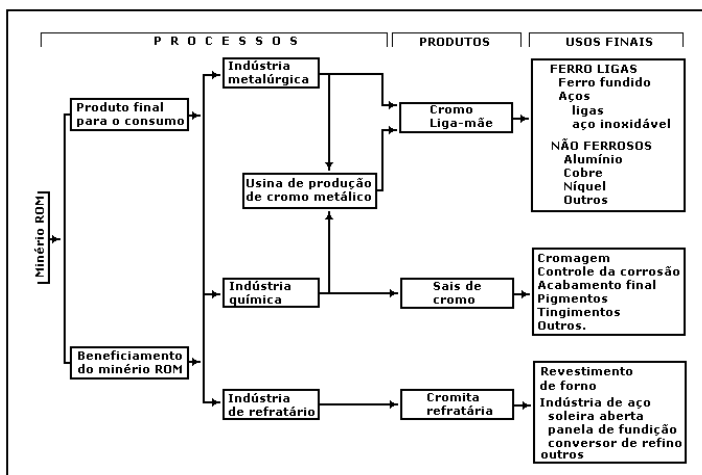


Figura 4 – Fluxo dos produtos de cromo desde o minério até o uso final do metal (Papp, 1994).

Indústria Metalúrgica

Este setor da indústria responde por 80% do consumo mundial de cromita compacta ou concentrado de alto teor de Cr_2O_3 , que são utilizados principalmente para obtenção de ligas de ferro-cromo, fonte básica para obtenção de aço inoxidável e ligas especiais. Assim, são fabricadas as ligas com ferro, silício e carbono. Na fabricação de aços especiais, o cromo tem a função de proporcionar às ligas tratáveis termicamente as seguintes propriedades: elevada temperabilidade, dureza e tenacidade. A maior demanda na indústria metalúrgica acontece na fabricação de aço inoxidável, que contém, em média, 18% de cromo, e proporciona à liga elevada resistência à oxidação e aos ataques químicos.

Os aços inoxidáveis são ligas à base de ferro, cujo principal elemento é o cromo, participando nestes materiais com, no mínimo, 10,5% em peso. Porém, dependendo do tipo de aço, sua participação isolada pode, freqüentemente ultrapassar 30%. Nestes casos, os aços têm por finalidade resistir aos ambientes muito corrosivos. O cromo, em solução sólida, possibilita a obtenção de um óxido de cromo com espessura da ordem de dezenas de Å na superfície metálica. Este óxido é estável na maioria dos meios industriais e domésticos e, por isso, reduz a taxa de corrosão a valores insignificantes, tornando-o seguro para aplicações nas indústrias farmacêuticas, nucleares, alimentícias, de arquitetura, dentre outras (<http://www.nucleinox.org.br>).

O cromo usado nas ligas de níquel confere às mesmas elevada resistência ao calor e à eletricidade. Já nas ligas com cobalto, o cromo reforça sua alta resistência à corrosão em temperaturas elevadas.

Constata-se também elevada utilização do metal no revestimento de placas metálicas, basicamente nos processos de cromagem nas indústrias automobilística, e de eletrodomésticos, entre outras.

Indústria de Refratários

A indústria de refratários responde por 11% do consumo mundial de cromita. Neste caso, o cromo participa como componente básico na manufatura de tijolos refratários, no refinamento de ligas de metais não-ferrosos, na fabricação de vidros etc.

Entende-se por refratários, os materiais usados para resistir aos efeitos térmicos, químicos e físicos que ocorrem nas indústrias metalúrgicas, químicas, cerâmicas, dentre outras. Estes materiais podem ser ácidos, básicos, neutros e,

também, super-refratários. Os refratários são utilizados na forma de tijolos refratários de sílica, magnesita, cromita, cromita-magnesita ou cromita-zirconita. Os produtos refratários fabricados com magnesita não suportam temperaturas elevadas. Contudo, esta dificuldade é superada mediante a adição de cromita na composição do refratário de magnesita. Na preparação dessa mistura ponderada, ou blendagem, ora há predominância de magnesita, denominado refratário magnesita-cromita, ora ocorre predominância de cromita, resultando no refratário cromita-magnesita. Esses refratários são usados em fornos elétricos de fusão metálica, na zona de queima dos fornos de cimento e nas coberturas de diversos fornos de reverberação para metais não-ferrosos. Os tijolos de cromita-magnesita possuem muitas propriedades físicas importantes, em virtude da sua composição especial, da granulometria dos seus constituintes, da elevada pressão de prensagem e da alta temperatura de queima.

Na indústria de refratários, o produto de cromita é também utilizado na fabricação de tijolos unidos ao caulim, bauxita, magnesita ou outros materiais. O produto deve conter elevado teor de alumínio ($\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 = 58\%$) e conteúdo de Cr_2O_3 entre 31 e 34%. Quando o minério contém elevado teor de serpentina na rocha portadora de cromita, a resistência de seus produtos às altas temperaturas diminui. Nesses casos, são indicados processos de concentração adequados para remoção dos minerais de ganga.

Os materiais refratários resistem à degradação quando expostos ao aquecimento, e a cromita possui essa característica. Ao contrário das indústrias metalúrgica e química, em que a cromita é processada para extrair o cromo, o mesmo mineral é usado na indústria de refratários na sua forma química inalterada. De um modo geral, os refratários são classificados em argilosos e não-argilosos. Entre os refratários não-argilosos, predomina a sílica, mas também se incluem a cromita, a zirconita, a bauxita, a grafita, a dolomita, a mulita e a pirofilita. Refratários básicos são do tipo não-argilosos, assim designados, porque se comportam quimicamente como bases. Esses materiais são obtidos com base em dolomita, magnesita ou de várias misturas ponderadas de magnesita e cromita.

Os maiores consumidores dos refratários de cromita são as indústrias de cimento, cobre, vidro, níquel e aço. Os refratários básicos são usados nos fornos para processamento de cobre e níquel. Na indústria de vidro, os refratários de cromita são usados nos regeneradores de tanques de vidro e, na indústria de cimento, são aplicados primariamente nas zonas de transição dos fornos.

Os refratários básicos são empregados, tipicamente, nos fornos com soleira aberta para fabricação de aço e, também, nos fornos elétricos a arcos.

Indústria Química

O cromo é usado na indústria química para fabricar uma variedade de produtos, incluindo: catalisadores, inibidores de corrosão, cromagem, produtos de acabamento, pigmentos, compostos de tingimento, dentre outros. Para fabricar esses produtos, a indústria química consome 8% da produção mundial de cromita e, de início, utiliza o metal como pigmento e compostos de tingimento. No começo do século XX, iniciou-se o emprego do cromo na eletrodeposição, na qual se utiliza o metal de uma solução de ácido crômico. Já o uso mais recente do cromo está relacionado à fabricação de produtos para conservação de madeira, protegendo-a do intemperismo e da ação dos insetos.

A cromita também é usada na indústria química para produzir dicromato de sódio, do qual outros produtos químicos são manufaturados. A cromita pulverizada é misturada com carbonato de sódio (barrilha) e um diluente que, em geral, pode ser óxido de cálcio (cal). A mistura é ustulada em forno rotativo para produzir um composto contendo cromato de sódio, que é, subsequente, lixiviado e tratado com ácido para produzir dicromato de sódio a ser purificado. Muitos produtos químicos de cromo são manufaturados com base no dicromato de sódio. O cromo metálico ou cromo puro pode ser obtido por eletrólise de solução de sulfato de cromo e ácido crômico. No fluxograma da Figura 5, encontram-se listados vários desses produtos e seus usos finais.

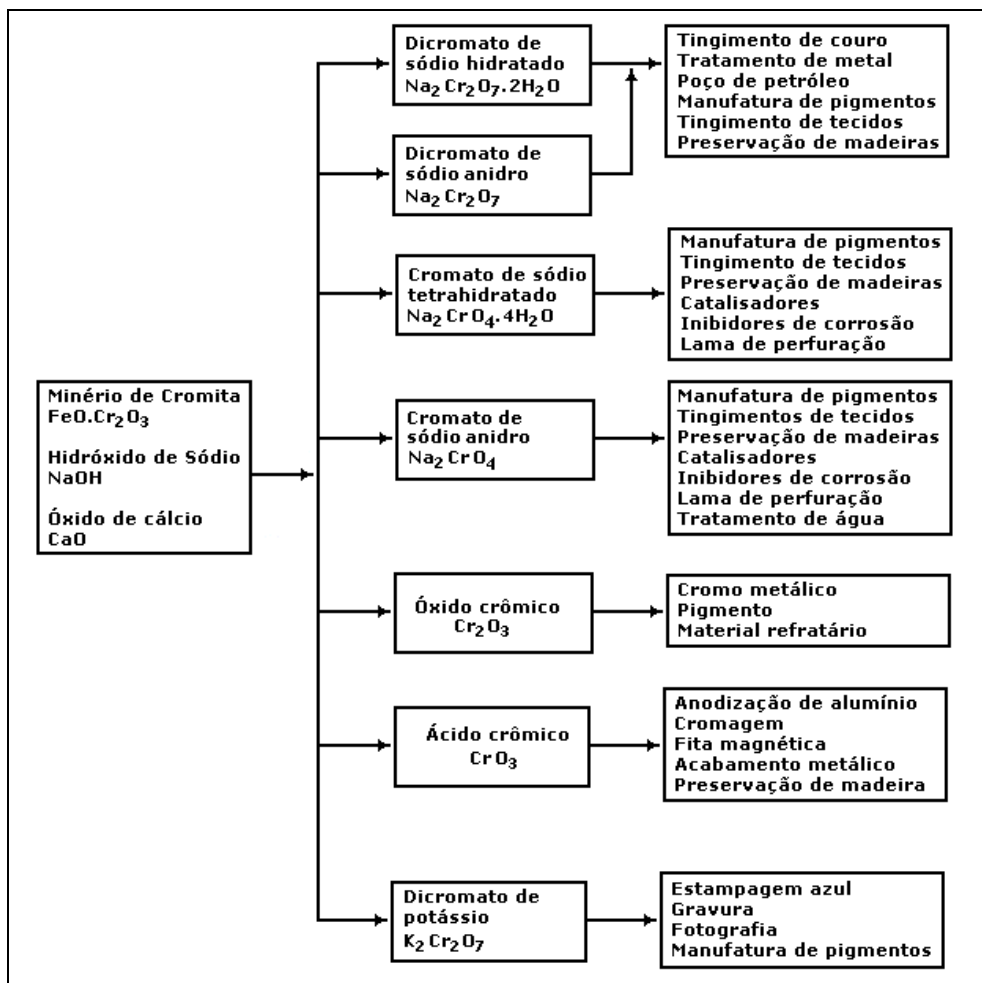


Figura 5 – Produtos químicos de cromo e seus usos finais. (Fonte: Papp, 1994).

Indústria de Fundição

Uma moderna aplicação da cromita acontece com a areia de fundição, na qual esse produto é empregado para enformar o metal fundido até que o mesmo se solidifique. A areia usada nas indústrias de fundição deve ser de baixo custo, lavada, seca, com granulometria e especificações químicas padronizadas (Tabela 5). A areia de quartzo, muito usada na fundição, é mais abundante e de baixo custo, razão pela qual é a preferida pelos consumidores. Entretanto, quando a fundição exige condições físicas e químicas especiais, outras areias são escolhidas, tais como as areias de cromita, zirconita, magnesita, bauxita, entre outras.

O termo areia de fundição, conferido à matéria-prima utilizada na fundição de metais, pode ser entendido como material de granulometria fina constituído de um grupo de minerais, não necessariamente quartzo. Com o avanço da tecnologia de fundição, areias naturais compostas, predominantemente, de cromita e zirconita tornam-se materiais alternativos, propiciando melhor acabamento superficial aos fundidos. Embora com custos bem superiores aos das areias de quartzo, essas areias são classificadas em duas categorias básicas: areia de quartzo e areia não-quartzosa. Esta possui menor dilatação volumétrica que as de quartzo, permitindo a produção de fundidos com maior controle dimensional das peças fundidas (Kotzin, 1994).

A natureza das matérias-primas e os processos de produção das areias de fundição podem revelar variações na forma, superfície e distribuição granulométrica das partículas que as compõem. Além disso, outros fatores, como composição química, ponto de sinterização, expansão térmica, permeabilidade de gases e reatividade química com metal, dentre outros, constituem as premissas básicas para seleção de uma areia de fundição.

A areia de cromita é compatível com os processos de fundição de aço. Ela usufrui da vantagem técnica sobre a areia de quartzo, na fundição das ligas de aço austenítico de manganês, em que o produto de cromita não reage com o manganês existente no aço. A cromita e a zirconita possuem um ponto de fusão mais elevado que o do quartzo, por isso são escolhidas quando a temperatura de fundição excede àquelas aceitáveis para a areia de quartzo.

A África do Sul foi o primeiro país a utilizar o produto de cromita como areia de fundição. Isso aconteceu na década de 1950 e, somente na segunda metade da década seguinte, o produto foi difundido em todo o mundo.

Na África do Sul, há disponibilidade de cromita fina, com baixo custo, que está associada à produção de cromita grau químico, refratário e metalúrgico.

A carência no suprimento e o elevado preço da areia de zirconita favoreceram o uso da areia de cromita na indústria de fundição, quando as areias de quartzo não atendem aos requisitos de ordem técnica. Além disso, o produto de cromo possui características especiais que garantem o seu uso na indústria de fundição, entre as quais destacam-se:

- (i) estabilidade térmica, o que reduz as variações dimensionais do molde;
- (ii) difusibilidade térmica, o que permite menor tamanho do grão metálico;
- (iii) relativa impermeabilidade aos metais fundentes, o que assegura melhor acabamento superficial dos aços;
- (iv) resistência à penetração dos metais sob solidificações;
- (v) elevado ponto de fusão, o que possibilita fundir metais refratários;
- (vi) quimicamente não reativa, que impede reações indesejáveis como a descarbonetação de aço.

Suas desvantagens, comparadas à areia de zirconita, incluem: maior expansão térmica e presença ocasional de minerais hidratados, como impurezas e reatividade química com os ligantes. Devido ao seu custo, é frequentemente empregada como areia de faceamento conjugada à de quartzo para enchimento ao molde.

A recuperação da areia utilizada na fundição é uma atividade comum na maioria das indústrias desta área. O aproveitamento da areia compreende operações mecânica, pneumática, processos a úmido e térmico, além de uma combinação dessas operações e/ou processos. Desta forma, é possível recuperar mais da metade da areia utilizada nas indústrias de fundição. Igualmente, após a sua recuperação, a areia de cromita pode ser reciclada como areia de cobertura em moldes com areia de quartzo para revestimento. A separação da areia de cromita em misturas com areia de quartzo e de zirconita é possível por intermédio de espirais ou por separação magnética com campos superiores a 1,5 T. Essa rota técnica é possível devido à susceptibilidade magnética do quartzo e da zirconita, inferior à da cromita.

Em alguns casos, a areia de fundição degrada-se durante a operação, em virtude da incorporação de escória e/ou metal. Cabe recordar, que a areia degradada, resultante dos processos de fundição, tende a aderir ao material fundido. Neste caso, não há possibilidade de recuperação do produto. Finalmente, a utilização da areia de cromita faz parte do emprego de processos adequados de reaproveitamento do produto, o que é prática na maioria das empresas de fundição. Tal comportamento resulta do fator econômico ligado ao processo e, melhor ainda, numa redução significativa na emissão dos efluentes para o meio ambiente.

5. ESPECIFICAÇÕES

As especificações física e química dos produtos de cromita variam entre os consumidores e produtores. Há disponíveis no comércio quatro tipos de concentrados de cromita baseados no uso dos produtos: metalúrgicos, químicos, refratários e de areias de fundição. Os três primeiros são referenciados como alto cromo, alto ferro e alto alumínio, respectivamente. A cromita compacta, que contém quantidade não expressiva de material de ganga, é preferida pelas indústrias metalúrgica e de refratários. Todavia, o produto para a indústria de fundição deve obedecer as exigências de teores de, no mínimo, 45% de Cr_2O_3 e distribuição granulométrica padronizada. A granulometria interfere na percolação de gases gerados durante a solidificação, que origina porosidade e também na rugosidade superficial dos fundidos, pois a interface metal-refratário será mais regular. Igualmente, o produto industrial, após secagem, com granulometria entre 0,85 e 0,18 mm, é fornecido ao mercado, geralmente, acondicionado em sacos de papel.

Nas jazidas de minério de cromo, é comum tanto o teor de Cr_2O_3 como a relação entre cromita e os minerais de ganga variarem consideravelmente, mesmo nas pequenas distâncias no interior da jazida. Por essa razão, para se chegar a uma determinada especificação, os produtores costumam fazer uma blendagem de diversos produtos de cromita.

Em geral, os consumidores não revelam detalhes sobre as especificações dos produtos de cromita. No entanto, há entre os produtores um grupo de especificações típicas que são submetidas aos consumidores. Tais especificações, basicamente químicas, de vários produtos de cromita estão ilustradas na Tabela 4. No Brasil, as especificações praticadas pela FERBASA estão ilustradas na Tabela 5.

Tabela 4 – Especificações químicas dos produtos de cromita para as indústrias químicas, de fundição e de refratários.

ORIGEM	ESPECIFICAÇÕES													
	Cr ₂ O ₃	FeO	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	V ₂ O ₅	CaO	Ni	P	S	Cr/Fe
Cromita para a Indústria Metalúrgica														
Brasil														
Vila Nova	≥49	-	17/19	≤3	11-13	-	5-7,5	-	-	0,1	-	-	-	≥1,7
Cromita para a Indústria Química														
Brasil														
Vila Nova	≥49	-	17/19	≤3	11-13	-	5-7,5	-	-	0,1	-	-	-	≥1,7
África do Sul														
Elandstrifit	46,3	25,4	-	1,2	15,4	-	9,8	0,55	0,36	0,33	0,08	0,005	0,000	-
Hernic	46	-	26,0	1,0	15,2	-	8,7	0,54	0,43	0,26	-	0,002	0,003	1,6
L.D.C.														
Dilokong	46,9	26,1	-	0,9	14,6	-	9,8	0,6	-	0,2	-	-	-	1,6
RAND MINES														
H. G.	46	26,5	-	1,0	15,5	-	9,8	0,5	0,4	0,3	-	0,003	0,002	1,5
Winterveld	45	24,7	-	2,5	15,8	-	11,4	0,4	0,3	0,2	-	0,005	0,002	1,6
Samancor														
Tweetein	46,8	27,0	-	0,5	15,2	-	9,23	-	-	0,2	-	-	-	1,5
Areia de Cromita para a Indústria de Fundição														
África do Sul														
Elandstrifit	45,9	25,4	-	1,3	15,4	-	9,8	0,6	0,4	0,3	0,08	0,005	0,000	-
RAND MINES														
H. G.	46,2	26,5	-	1,0	15,5	-	9,8	0,5	0,4	0,3	-	0,003	0,002	-
Millsell	46	25,2	-	1,0	14,7	-	10,2	0,6	0,4	0,2	-	0,003	0,002	-
Winterveld 1	46,6	25	-	0,8	15,2	-	11,2	0,5	0,3	0,2	-	0,003	0,002	-
Winterveld 2	46,3	25	-	0,9	15,2	-	11,2	0,5	0,3	0,2	-	0,003	0,002	-
Samancor	47,1	25,8	-	0,7	14,8	-	10,8	0,7	-	0,05	-	-	-	1,6
Cromita para a Indústria de Refratários														
África do Sul														
ANGLO	AMER													
Marico	48,3	20,7	-	0,9	17,2	-	12,4	0,4	-	0,01	-	-	-	2,1
RAND MINES														
Winterveld 1	46,6	24,9	-	0,7	15,4	-	11,5	0,5	0,3	0,25	-	0,003	0,002	-
Winterveld 2	46,5	24,5	-	0,8	15,6	-	11,5	0,5	0,3	0,25	-	0,003	0,002	-
Winterveld 3	46,9	24,5	-	0,3	15,6	-	11,5	0,5	0,3	0,25	-	0,003	0,002	-
Samancor	47,1	25,8	-	0,6	14,8	-	10,8	0,7	-	0,05	-	-	-	1,6
Filipinas														
BENGUET	CORP.													
Masinloc 1	31,6	-	11,3	5,9	-	58,8	-	-	-	-	-	-	-	-
Masinloc 2	32,2	-	10,8	5,4	-	60,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Masinloc 3	33,9	-	10,8	3,3	-	62,2	-	-	-	-	-	-	-	-
Masinloc 4	35,8	-	12,5	1,7	-	63,5	-	-	-	-	-	-	-	-

L.D.C.- Lebowa Development Corporation H.G - Henry Gould

Fonte: Papp, 1994.

Tabela 5 –Especificações dos produtos da FERBASA, obtidos com os minérios da mina de Ipueira (BA)*.

Especificações dos Produtos (%)					
Elementos ou Compostos	Limites de Teores	Produtos			
		Areia de Cromita Tipo 01	Areia de Cromita Tipo 02	Concentrados	
				Metalúrgico	Lump
Cr ₂ O ₃	Max	99,00	100,0	100,0	95,00
	Min	43,00	43,00	40,00	38,00
	Típico	44,00	44,50	42,00	38,50
SiO ₂	Max	3,30	3,50	8,00	12,00
	Típico	3,10	2,90	6,00	10,00
FeO	Max	18,00	18,00	18,00	17,00
	Típico	17,50	17,80	17,00	15,70
MgO	Max	15,50	15,50	16,00	18,00
	Típico	14,70	14,80	15,10	16,80
Al ₂ O ₃	Max	20,00	20,00	20,00	17,00
	Típico	19,50	19,00	19,00	15,70
CaO	Max	1,00	1,00	2,00	1,00
	Típico	0,12	0,11	0,30	0,40
P	Max	0,008	0,008	0,015	0,010
	Típico	0,006	0,006	0,012	0,007
Cr/Fe	Min	2,10	2,10	1,96	1,97
	Típico	2,22	2,20	2,17	2,16
Aberturas (mm)		-0,50	-0,50	-0,50	9,52 -101
A. F.S.	Malha	45-65	65-85		
A. F.S.	Típico	50,00	71,00		

* Cortesia da FERBASA – Companhia de Ferro e Ligas da Bahia S.A.

6. MINERAIS E MATERIAIS ALTERNATIVOS

Na indústria química, o cromo tem uma variedade de aplicações, decorrentes das diferentes propriedades do metal. A primeira, provavelmente a mais importante, é a habilidade de formar compostos trivalentes e atuar como um mordente e formar compostos estáveis com as fibras têxteis, polímeros sintéticos, ligantes no tratamento de couro ou ligninas na madeira, dentre outras. Como resultado, é difícil assumir que o mercado dos produtos químicos de cromo possa sofrer algum tipo de substituição, mesmo levando-se em conta as emissões de efluentes e os perigos que o metal pode provocar à saúde, problemas superados pelos modernos manuseios do metal nos diversos processos industriais.

Os substitutos da cromita na produção de ligas de ferro-cromo são praticamente inexistentes. Na fabricação de aços inoxidáveis, não há substituto para o metal, o que garante o uso estratégico do cromo. Os produtos capazes de substituir o cromo na fabricação de ligas, produtos químicos e refratários são de custo elevado e de aplicações restritas.

Embora haja vários substitutos para o cromo em muitos usos do metal (o titânio e alumínio, por exemplo, o substituem em certas ligas inoxidáveis e a magnesita nos revestimentos de fornos), tais alternativas ainda não se consolidaram como adequadas na maioria das aplicações práticas.

Igualmente, na indústria metalúrgica, o cromo consagrou-se como elemento de base, principalmente na obtenção de aços inoxidáveis, o que praticamente inviabiliza qualquer ameaça de substituição do metal.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração dos profissionais: Ivan Napoleão Bastos, D.Sc. (Prof. do IPRJ/UERJ, Nova Friburgo, RJ) e Bartolomeu F. da Fonseca (Técnico da FERBASA).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [HTTP://WWW.NUCLEOINOX.ORG.BR](http://www.nucleoinox.org.br) (2003). Consulta à internet, Mercado, Núcleo de Aço Inox. Acesso em fevereiro/2003.
- BACELLAR, G. A. e LEAL, G. R. N. (1973). Perfil analítico da cromita, Boletim nº 10, DNPM.
- ÇIÇEK, T.; e CÖCEN, I. (2002). Applicability of Mozley multigravity separator (MGS) to fine chromite tailings of Turkish chromite concentrating plants. *Minerals Engineering*, nº 15, p. 91-93.
- GONÇALVES, M. de M. (2003). Cromo. Balanço Mineral Brasileiro 2001, DNPM.
- GONÇALVES, M. de M. (2007). Cromo. Sumário Mineral, DNPM.
- GÜNEY, A.; ÖNAL, G. e ÇELİK, M.S. (1999). A new flowsheet for processing chromite fines by column flotation and the collector adsorption mechanism. *Minerals Engineering*, vol. 12, nº 9, p. 1041-1049.
- KOTZIN, E. L. (1994). Foundry sands. In: *Industrial Minerals and Rocks*, 6th Edition, D. D. Carr (Senior Editor), Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, Colorado, p. 685- 691.
- MALLOTIS, G. (1999). Chromium: Uses & Markets, Published by Industrial Minerals Information Ltd, Worcester, England, p. 1-161.
- PAPP, J. F. (1994). Chromium. In: *Industrial Minerals and Rocks*, 6th Edition, D. D. Carr (Senior Editor), Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, Colorado, p. 209-228.
- RICHARDS, R. G.; MACHUNTER, D.M.; GATES, P. J. e PALMER, K. (2000). Gravity separation of ultrafine (-0,1 mm) minerals using spiral separators. *Minerals Engineering*, vol. 13, nº 1, p. 65-77.
- SAMPAIO, J. A.; CARVALHO, E. A. e FONSECA, B. F. (2001). Cromita. In: *Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil*. SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B. da e LINS, F. F., Editores. CETEM/MCT, p.139-147.

- SYSILA, S.; LAAPAS, H.; HEIISKANE, K. e RUOKONEN, E. (1996). The effect of surface potential on the flotation of chromite. *Minerals Engineering*, vol. 9, nº 5, p. 519-525.
- TARORE, T.; CONIL, P.; HOUOT, R. e SAVA, M. (1995). An evaluation of the Mozley MGS for fine particle gravity separation. *Minerals Engineering*, vol. 8, nº 7, p. 767-778.
- WESSELDIJK, Q. I.; REUTER, M. A.; BRADSHAW, D. J. e HARRIS, P. J. (1999). The flotation behaviour of chromite with respect to the beneficiation of UG2 ore, *Minerals Engineering*, vol. 12, nº 10, p. 1177-1184.