

ESTUDO DA REDUÇÃO CARBOTÉRMICA DE RESÍDUOS NIQUELÍFEROS¹

*John Bernardo Vilca Neira²
Marcelo Breda Mourão³
Cyro Takano³
Dener Martins dos Santos⁴*

Resumo

O resíduo sólido estudado é produto da extração de níquel pelo processo Caron. Este resíduo possui teores significativos de Fe, além de óxidos de Ni, Cu, Co passíveis de recuperação. Este trabalho estuda a redução carbotérmica de pelotas auto-redutoras de resíduo niquelífero, sob diferentes ciclos térmicos, permitindo-nos avaliar os possíveis mecanismos controladores atuantes para recuperar os citados metais. A pelota auto-redutora foi composta pelo resíduo niquelífero, coque de petróleo e CMC (carboxi-metil-celulose). O comportamento de redução foi determinado por perda de massa. Foram avaliados quatro tipos de pelotas, em diferentes temperaturas e tempos de redução. As pelotas reduzidas foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura-EDX, fluorescência de raios X, difração de raios X e porosimetria. Observou-se a formação de compostos silicatados que impedem a redução completa dos óxidos nas condições experimentais estudadas.

Palavras-chave: Resíduo niquelífero; Redução carbotérmica.

STUDY OF THE CARBOTHERMIC REDUCTION OF NICKELIFEROUS RESIDUE

Abstract

The solid residue studied is the product of the nickel extraction by the Caron process. This residue possessed significant Fe content, and also oxides of Ni, Cu, Co subject to recuperation. The aim of this work is to study the carbothermic reduction of self-reduction pellets of nickeliferous residue, under different thermal cycles, permitting to evaluate the possible mechanisms that control to recuperate the cited metals. The self-reduction pellets were composed of nickeliferous residue, petroleum coke and CMC (carboxi-metil-celulose). The behavior of reduction was determined by weight loss. They were evaluated using four kinds of pellets, in different temperatures and times of reduction. After the reduction, the pellets were analyzed by microscopy electronic of scan-EDX, X-ray fluorescence, X-ray diffraction and porosity. It was observed the formation of composed silicates that impeded the complete reduction of the oxides in the experimental conditions studied.

Key words: Nickeliferous residue; Carbothermic reduction.

¹ *Contribuição técnica ao 39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 10º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 22 a 26 de novembro de 2009, Ouro Preto, MG.*

² *Eng., Msc. do Depto. Eng. Metalúrgica e de Materiais da EPUSP.*

³ *Membro da ABM - Livre Docente – Professor Associado do Depto. Eng. Metalúrgica e de Materiais da EPUSP.*

⁴ *Membro da ABM, Engenheiro Metalúrgico, Dr. Eng., Pós-graduando EPUSP.*

1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores interesses em metalurgia extrativa consiste no aprimoramento dos processos hidro-metalúrgicos e piro-metalúrgicos para o tratamento de diferentes tipos de minérios, além do desenvolvimento de novas tecnologias. Uma vertente destas pesquisas se caracteriza pelo reaproveitamento dos diversos resíduos gerados nas operações metalúrgicas, visando à recuperação dos metais de interesse econômico. Contudo, essas operações desenvolvem-se cumprindo as exigências relacionadas à legislação ambiental.^(1,2)

O resíduo de estudo utilizado neste trabalho é originário do processo Caron.⁽³⁻⁵⁾ Este processo no Brasil é comumente chamado lama negra, contendo pequenos teores desses metais, que é armazenado em barragens de rejeito. Ao longo dos anos, um grande volume deste material (aproximadamente 30 milhões de toneladas) foi acumulado, de modo que o valor econômico do níquel e cobalto presentes tornou-se substancial, justificando estudos de viabilidade técnica da recuperação desses valores.

Este estudo pretende conhecer o comportamento de redução das pelotas auto-redutoras compostas por coque de petróleo como redutor e CMC como aglomerante, que foi exposta nas temperaturas de 1.423 K, 1.473 K, 1.523 K e 1.573 K, para diferentes tempos de ensaio,⁽⁶⁾ assim como avaliar os possíveis mecanismos controladores atuantes nas pelotas auto-redutoras ensaiadas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Neste estudo foram utilizadas as seguintes matérias-primas para a elaboração das pelotas auto-redutoras:

- resíduo niquelífero;
- coque de petróleo;
- carboxi-metil-celulose (CMC); e
- cal hidratada.

O resíduo niquelífero foi fornecido pela empresa Votorantim Metais, e constitui a matéria-prima principal para o desenvolvimento desta pesquisa.

2.1.1 Caracterização dos Materiais

- **Resíduo niquelífero**

A sequência dos ensaios de caracterização do resíduo é mostrada na Figura 1. A caracterização completa do resíduo niquelífero é mostrada por Neira.⁽⁷⁾

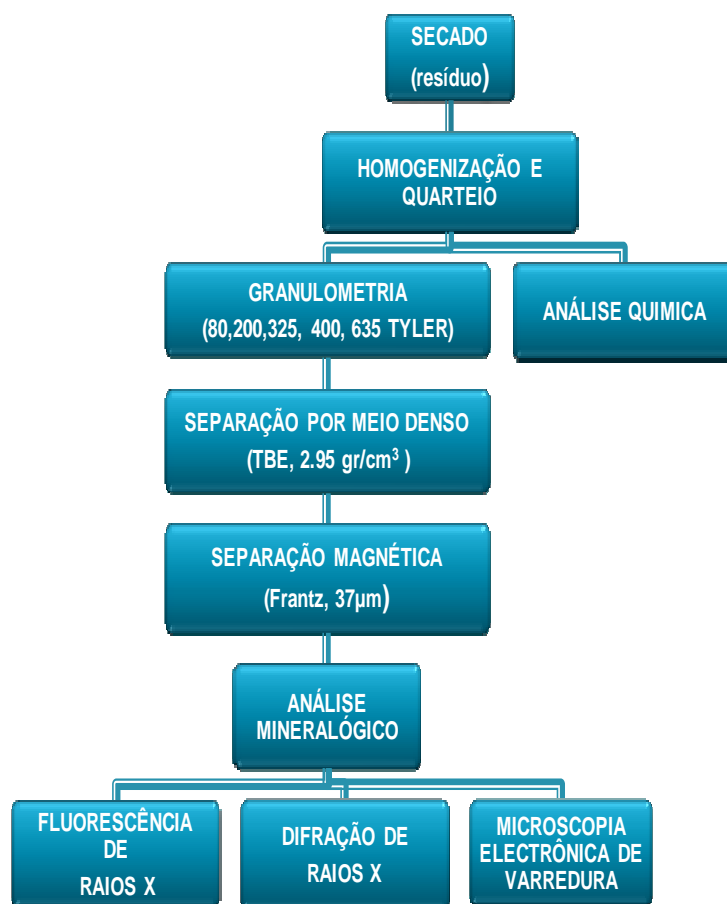


Figura 1. Fluxograma do processo de caracterização do resíduo níquelífero.⁽⁸⁾

A análise química indicou que o resíduo está composto basicamente de ferro, cromo, níquel, cobalto e cobre como elementos reduzíveis.

Na Tabela 1 pode-se observar a composição química do resíduo.

Tabela 1. Composição química do resíduo níquelífero⁽⁸⁾

Componente	Fe	Ni	Cu	Co	Cr	Mn	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO
Resíduo (% em massa)	29,70	0,54	0,13	0,07	2,00	0,70	30,00	7,50	6,50	0,80

Da caracterização do resíduo níquelífero pode-se concluir que 75 a 80% do níquel encontram-se na forma de silicatos de magnésio e ferro, que mais de 60% das partículas são menores que 44 µm, e que a concentração física do resíduo não é economicamente viável.⁽⁸⁾

- **Coque de petróleo**

O coque de petróleo empregado foi fornecido pela empresa Unimetal (produtos carbonosos). Análise química é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2. Análise do coque de petróleo⁽⁶⁾

Componentes	C _{FIXO}	Cinzas	Matéria Volátil	Enxofre
Coque de petróleo (% em massa)	88,8	0,4	10,0	0,8

- **Aglomerante**

Foi utilizado o composto orgânico carboxi–metil–celulose de sódio, também chamado de celulose glicolato de sódio, designado comercialmente como CMC. O CMC foi usado como aglomerante da mistura, obtendo boa resistência mecânica a frio.⁽⁹⁾

2.2 Equipamentos

Os principais equipamentos utilizados no desenvolvimento dessa pesquisa foram:

- Forno Vertical Lindberg/Blue para os ensaios termogravimétricos;
- Balança digital Ohaus Precision Plus;
- Balança para secagem Ohaus MB 200;
- Misturador Turbula da WAB;
- Cadinhos de alumina; e
- Fio de resistência 70%Cr / 30%Ni, 1 mm de diâmetro.

2.3 Metodologia

2.3.1 Calculo do redutor

A partir da composição química do resíduo e do redutor realizou-se um balanço de massa para definir as quantidades de redutor utilizado.⁽¹⁰⁾ O cálculo foi baseado na remoção total de oxigênio dos óxidos: Fe₃O₄, NiO, CoO e CuO.

2.3.2 Composição das pelotas auto-redutoras

Quatro composições específicas de mistura auto-redutora foram desenvolvidas. As quatro referidas composições tinham como matérias principais o resíduo niquelífero, coque de petróleo e CMC.⁽¹⁰⁾

As duas pelotas iniciais, PARN1 e PARN2, com 8% e 12 % de coque de petróleo respectivamente. A primeira, PARN1, apresentou uma falta de 12,1% de carbono fixo à redução total (estequiométrico) e a segunda, PARN2, contem 37,92% de excesso de carbono fixo sobre o estequiométrico.

Para a elaboração das outras duas composições de mistura (B-1 e B-2), foram mantidas a composição da mistura da pelota PARN2, adiciona-se cal hidratada até alcançar uma basicidade (CaO/SiO₂) igual a 1 (B-1) e basicidade igual a 2 (B-2). As composições são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3. Composição das pelotas (% em massa) ensaiadas e o estequiométrico⁽⁶⁾

Componente	Estequi.	PARN1	PARN2	B-1	B-2
Resíduo	90,50	91,50	87,50	67,39	54,15
Coque	9,00	8,00	12,00	9,24	7,43
CMC	0,50	0,50	0,50	0,39	0,31
Cal Hidratada	0,00	0,00	0,00	22,98	38,12
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

2.3.3 Fabricação das pelotas auto-redutoras

Cada tipo de pelota auto–redutora foi secada separadamente em estufa, por um intervalo de 1.440 minutos a 393 K. Posteriormente foram introduzida em um

recipiente, o qual foi colocado em um misturador para homogeneização por um tempo de 30 minutos, a uma rotação de 96 rpm. O material homogeneizado é posteriormente pelotizado manualmente, obtendo um diâmetro de ~12 mm, padronizado por um gabarito, tendo um peso médio de 2,4 g. A pelota auto-reutora foi seca à temperatura ambiente por 28 dias.⁽⁶⁾

2.3.4 Experimento termogravimétrico

Antes da realização dos ensaios, a pelota foi seca novamente em uma estufa, por um intervalo de tempo de 120 minutos a 393K.

A pelota auto-reutora foi pesada em balança digital antes e depois de cada ensaio termogravimétrico. A pelota foi depositada em um cadinho de alumina, o qual foi conectado no teto da plataforma por um fio de Ni-Cr, para logo ser centralizado no centro do forno de resistência. As experiências foram interrompidas com uma atmosfera controlada de argônio (2 Lt/min.).

A perda de massa foi calculada pela seguinte relação:^(11,12)

$$Fr = \frac{M_i - M_t}{M * M_i} \quad (1)$$

Onde: Fr = Fração de reação;
Mi = Peso inicial da pelota (g);
Mt = Peso da pelota no instante t (g);
M = Fração correspondente a perda de peso máxima teórica.

A fração de perda de peso das pelotas auto-reutoras, em cada temperatura e tempo foi calculada com valores experimentais. Foram tomados valores máximos teóricos de redução, M, para cada tipo de pelota (PARN1 e PARN2).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaio Termogravimétrico

A Figura 2A mostra a fração de reação em função do tempo para os dois tipos de pelotas auto-reutoras submetidos à redução carbotérmica em diversas temperaturas (PARN1 e PARN2).

A partir do cálculo de fração de reação versus tempo, obteve-se o valor de fração de reação para 45 minutos, para 1.523 K, nas pelotas PARN1 e PARN2 (Figura 2) de 63,5% e 69 %, respectivamente. As análises são reforçadas pelas análises de microscopia e composição química dos produtos de redução obtidos.

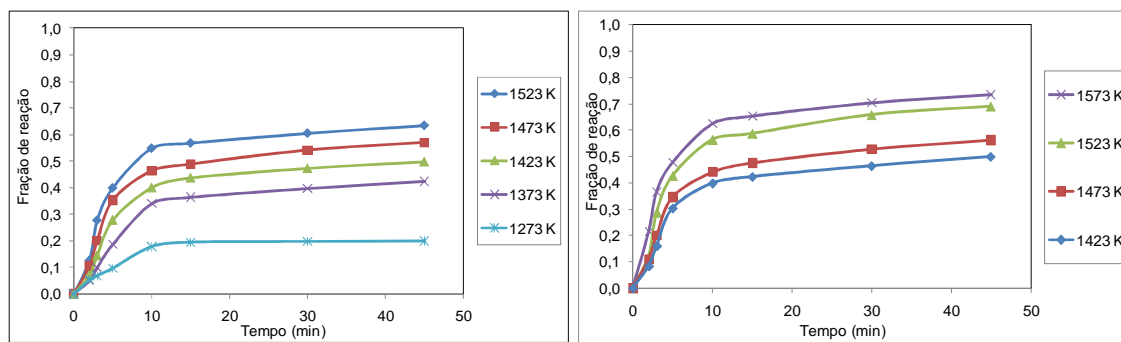


Figura 2. Fração de reação versus tempo; PARN1 (A) e PARN2 (B).

3.2 Análise Micro-estrutural

3.2.1 Análise micro-estrutural das pelotas PARN1 e PARN2

A morfologia dos produtos de reação obtidos após 5 minutos de redução carbotérmica a temperatura de 1523K para as pelotas auto-redutoras PARN1 e PARN2 é mostrada na Figura 3. Análise de EDS realizada na amostra descrita na Figura 3A indicou a presença de três fases (descritas pelas letras A, B e C). A composição de tais fases é mostrada na Tabela 4. No ponto (A) observou-se que se tratava de um composto constituído principalmente por oxigênio, silício e ferro. Desta forma, se tratou de óxidos oriundos do resíduo niquelífero. No ponto (B) partículas metálicas com teores de Fe, Ni, Cu e Co foram observadas. E, por fim, o ponto (C) caracterizou-se por um composto de silicato de ferro e alumínio (Fe, Al)SiO₄.

No caso da morfologia do produto de reação de redução da pelota auto-redutora PARN2 observou-se a presença bastante pronunciada de partículas metálicas (Tabela 5-fases A) e teor metálico presente na fase silicatada B, como mostradas pela Figura 3B. Essa característica foi diferente para aquele proveniente de pelota PARN1 para o mesmo tempo e temperatura de redução. Possivelmente o coalescimento da fase metálica se desenvolveu sobre uma matriz enriquecida de silicatos de ferro e alumínio, como elementos metálicos de maior quantidade.

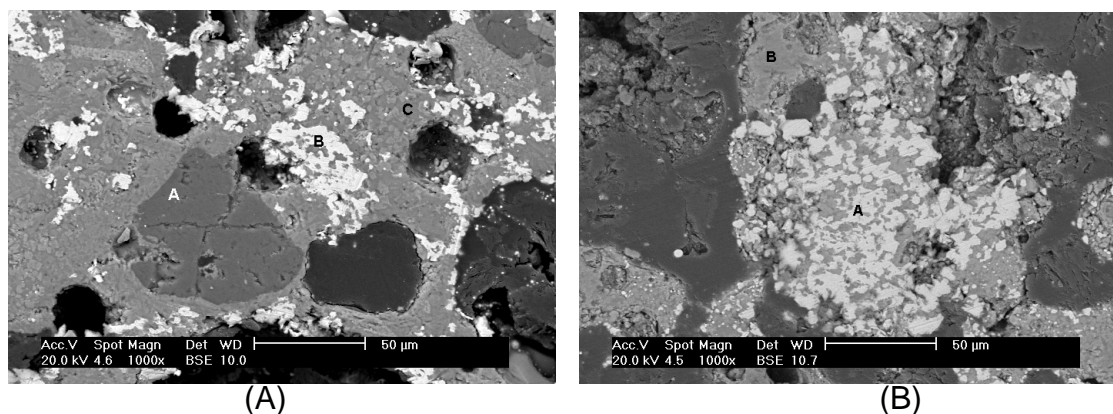


Figura 3. Imagens de elétrons retro-espalhados, 1000x. Microestruturas produto da redução a 1.523 K (1.250 °C) para um tempo de 5 minutos: (A) PARN1; (B) PARN2.

Tabela 4. Resultados das análises por dispersão de energia (EDS) realizada nas diferentes fases indicadas no produto de reação descrito na Figura 3A (% massa)

Fases	O	C	Mg	Al	Si	P	S	Ca	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu
A	20,26	0,00	0,13	0,59	75,05	0,61	0,43	0,19	0,09	0,00	2,47	0,00	0,18	0,00
B	0,00	0,00	0,23	0,22	0,52	0,45	0,36	0,15	0,23	0,11	95,16	0,68	1,61	0,28
C	16,90	0,00	2,48	8,64	49,29	0,64	1,25	1,91	0,65	3,08	13,28	0,64	0,57	0,67

Tabela 5. Resultados das análises por dispersão de energia (EDS) realizada nas diferentes fases indicadas no produto de reação descrito na Figura 3B (% massa)

Fase	O	C	Mg	Al	Si	P	S	Ca	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu
A	0,00	0,00	0,00	0,37	0,93	0,96	0,36	0,00	0,57	0,56	95,02	0,00	0,46	0,76
B	19,13	0,00	1,59	9,12	39,62	2,24	1,22	0,45	0,66	2,07	16,41	5,87	0,90	0,70

Tanto nas Figuras 4A e 4B, que apresentam imagens obtidas de amostras tratadas a 1.523 K por 45 minutos observaram-se a coalescência da fase metálica e a tendência de homogeneização da fase silicatada. Contudo, no produto de reação da redução da pelota PARN2 (Figura 4B), este apresentou maior coalescimento que aquele proveniente da pelota PARN1 (Figura 4A). Devido à maior presença de carbono na pelota. Este comportamento também foi detectado através de análises de fração de reação dos dois tipos de pelotas depois de decorrido um intervalo de 45 minutos de redução a 1.523K. A pelota PARN1 apresentou menor fração de redução e menor coalescimento, possivelmente devido a uma menor quantidade de gás redutor (CO). As Tabelas 6 e 7 descrevem, em ordem, a composição das fases presentes em ambos produtos de reação descritos pelas Figuras 4A e 4B. Tais fases foram indicadas por letras nas citadas figuras. Fase silicatada com a presença de óxido metálico sem reduzir (fase C) foi observada na Figura 4A, assim como a presença de cromita (fase A), a qual mantêm sua forma inicial, em todos os pontos descritos nas Figuras 4A e 4B.

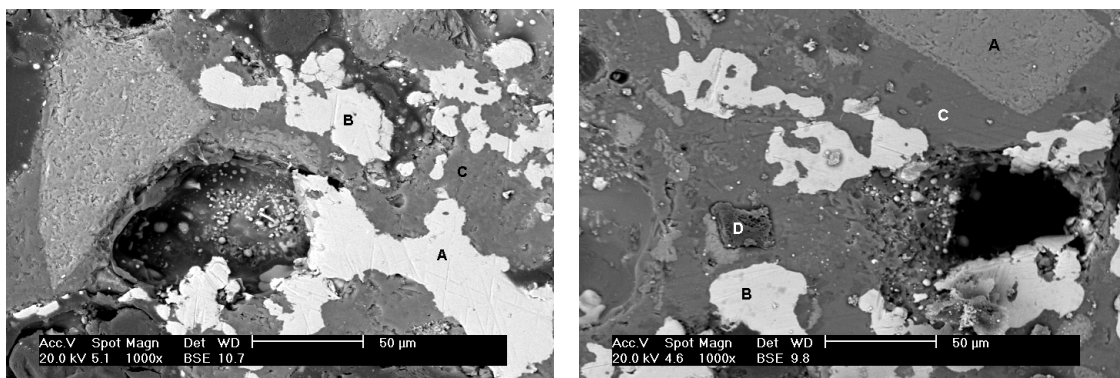


Figura 4. Imagens de elétrons retro-espalhados, 1000x. Microestruturas produto da redução a 1.523 K (1.250 °C) para um tempo de 45 minutos: (A) PARN1; (B)PARN2.

Tabela 6. Resultados das análises por dispersão de energia (EDS) realizada nas diferentes fases indicadas no produto de reação descrito na Figura 4A (% massa)

Fases	O	C	Mg	Al	Si	P	S	Ca	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu
A	11,78	0,00	10,62	26,78	1,05	1,03	0,59	0,29	24,02	0,50	22,25	0,32	0,52	0,25
B	0,00	0,00	0,17	0,30	0,72	0,70	0,37	0,05	0,27	0,37	93,63	0,69	2,24	0,49
C	16,35	0,00	6,53	13,14	44,04	0,76	0,60	2,73	1,30	2,62	11,00	0,23	0,41	0,29
D	11,74	0,00	14,50	8,92	43,45	3,18	4,52	1,98	3,29	2,30	2,40	0,56	1,96	1,20

Tabela 7. Resultados das análises por dispersão de energia (EDS) realizada nas diferentes fases indicadas no produto de reação descrito na Figura 4B (% massa)

Fase	O	C	Mg	Al	Si	P	S	Ca	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu
A	0,00	0,73	0,00	0,39	0,80	1,32	0,53	0,16	0,32	0,30	91,73	1,48	1,80	0,42
B	0,00	0,85	0,00	0,00	0,35	0,82	0,38	0,22	0,48	0,28	94,67	0,89	1,06	0,00
C	15,77	0,00	8,84	10,43	40,12	1,22	0,69	2,00	0,58	3,52	19,43	0,47	0,54	0,37

3.2.2 Análise micro-estrutural das pelotas B1 e B2

Na Figura 5A para 45 minutos observou-se a formação de partículas metálicas coalescidas (A) e (D). No ponto (C) observou-se a formação de uma fase metálica sobre uma matriz de cromita, fenômeno não encontrado nos outros tipos de pelotas analisadas (PARN1 e PARN2). O ponto (B) representa um composto silicatado de cálcio. A fase escória (B) tem uma presença preponderante na superfície da pelota, contendo nela ainda consideráveis teores de ferro e níquel como mostrados na Tabela 8.

Na Figura 5B pode-se observar uma maior coalescência da partícula metálica (C e D) sobre uma matriz silicatada (B). No ponto E observou-se a formação de fase metálica sobre uma matriz de cromita. Os resultados são mostrados na Tabela 9.

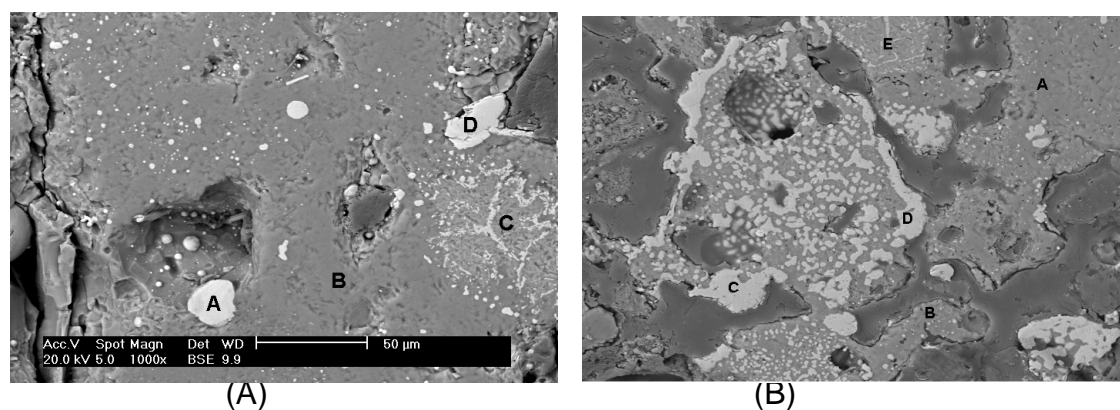


Figura 5. Imagens de elétrons retroespalhados, 1000x. Microestruturas produto da redução a 1.523 K (1.250 °C) para um tempo de 45 minutos: (A) B-1; (B) B-2.

Tabela 8. Resultados das análises por dispersão de energia (EDS) realizada nas diferentes fases indicadas no produto de reação descrito na Figura 5A (% massa)

Fases	O	C	Mg	Al	Si	P	S	Ca	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu
A	0,00	0,00	0,14	0,40	2,48	1,53	0,58	0,39	3,10	1,12	87,00	1,29	1,26	0,73
B	8,99	0,00	7,34	13,14	33,48	2,81	1,50	27,41	0,64	2,22	0,89	0,52	0,67	0,39
C	2,87	0,00	5,25	10,36	4,35	1,69	0,64	5,56	24,19	2,36	40,79	0,89	0,57	0,49
D	0,00	0,00	0,11	0,17	0,41	1,21	0,39	0,38	27,65	1,06	67,63	0,50	0,32	0,17

Tabela 9. Resultados das análises por dispersão de energia (EDS) realizada nas diferentes fases indicadas no produto de reação descrito na Figura 5B (% massa)

Fases	O	C	Mg	Al	Si	P	S	Ca	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu
A	19,19	0,00	1,18	2,32	67,15	1,99	0,66	5,05	0,18	0,29	1,83	0,17	0,00	0,00
B	19,50	0,00	1,15	7,25	46,04	0,85	0,68	13,52	0,17	1,51	7,40	0,67	0,78	0,48
C	0,00	1,77	0,68	0,90	1,64	1,71	0,59	0,61	1,24	0,84	86,93	0,78	1,84	0,46
D	0,00	1,69	0,69	0,79	1,71	1,66	0,59	0,46	1,39	0,77	87,83	0,79	0,90	0,73
E	9,18	0,00	7,56	12,71	1,05	1,21	0,49	0,60	39,00	1,25	25,91	0,43	0,32	0,33

3.3 Análise Cinética

Os valores calculados das constantes de velocidade de reação para cada estágio, descrito pelas retas mostradas nas Figuras 6A e 6B, permitiu calcular a energia de ativação aparente através da equação de Arrhenius (equação 2)

$$k = k_0 x e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (2)$$

Onde k = Constante cinética aparente (min^{-1});

k_0 = Fator pré-exponencial (min^{-1});

E_a = Energia de ativação aparente (J/mol);

R = Constante universal dos gases (J/mol.K);

T = Temperatura absoluta (K).

Na Figura 6A (PARN2) o coeficiente angular da reta representa a constante de velocidade de redução, k , para cada estágio avaliado, isto serviu para ambos os tipos de pelotas auto-redutoras. Dois estágios distintos durante a redução foram observados, e estes se correlacionaram a mudança de inclinação da reta.

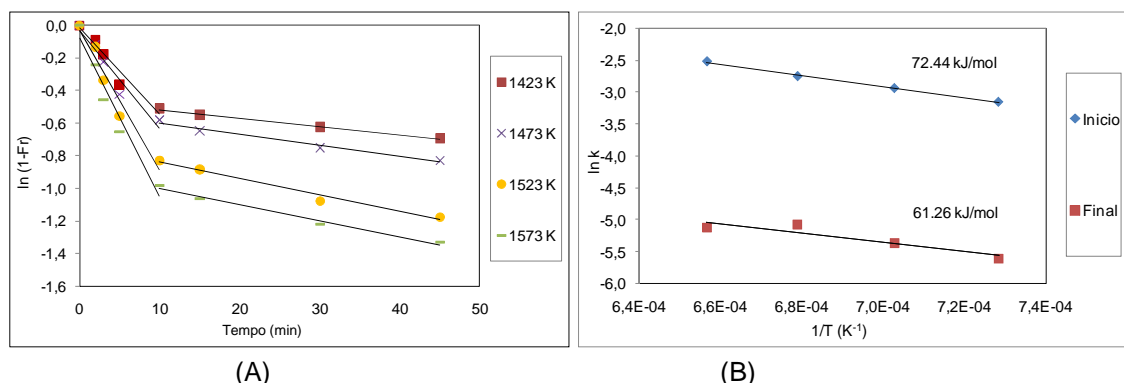


Figura 6. Cálculo das constantes cinéticas de velocidade de reação para cada temperatura de análise: (A) PARN2. Cálculo da energia de ativação aparente, da pelota PARN2 nas temperaturas de 1.273 K a 1.523 K (B) para os dois estágios observados: Inicial (0 minutos a 10 minutos) e Final (10 minutos a 45 minutos).

Os valores de energia de ativação aparente para as pelotas tipo PARN1 e PARN2 em seus dois estágios de análise são mostrados na Tabela 12. O conjunto de análise dos resultados efetuados (reduzibilidade, micrografias e energia de ativação aparente) permitiu descrever algumas hipóteses que auxiliaram na proposição de possíveis mecanismos atuantes no processo de auto-redução para os dois estágios descritos

Tabela 10. Resultados dos cálculos cinéticos das pelotas tipo PARN1 e PARN2

Cálculo	Tipo	Estagio	Temperatura (K)	Ea (kJ/mol)	R ²	Possível etapa
Fração de reação	PARN1	Inicial	1273-1523	72.44	0,9813	Transferência de calor
		Final	1273-1523	61.26	0,8679	Transferência de massa
	PARN2	Inicial	1423-1573	80.73	0,9523	Transferência de calor
		Final	1423-1573	88.04	0,8962	Transferência de massa

Pelos valores de energia de ativação aparente dos dois tipos de pelotas PARN1 e PARN2, pode-se descartar a presença dos mecanismos de reação química e Boudouard como possíveis mecanismos controladores.

Observou-se que no primeiro estágio (0 minutos a 10 minutos) para as PARN1 e PARN2, a velocidade de reação foi mais intensa, obtendo neste intervalo as energias de ativação aparente de 72.44 kJ/mol a 80.73 kJ/mol para os tipos de pelota PARN1 e PARN2. Estes dados reforçaram a hipótese de que o transporte de calor foi o mecanismo preponderantemente controlador.

Observou-se no segundo estágio (10 minutos a 45 minutos) uma energia de ativação aparente entre 61.26 kJ/mol a 88.04 kJ/mol para as pelotas PARN1 e PARN2. O comportamento descrito pela curvas de redução, descrito nas Figuras 2A e 2B mostrou a mudança de comportamento com relação ao primeiro e segundo estágio. Esta mudança de comportamento foi possivelmente devido à fusão incipiente do material estéril (escória-silicato de magnésia), observado em micrografias pelo MEV (Figuras 4A e 4B). Outro fator possível é a diminuição do material redutor e óxidos presentes. Os fatores observados indicam que o possível mecanismo controlador seja por transferência de massa.

4 CONCLUSÕES

A análise micro-estrutural mostrou que a pelota tipo PARN2, a 1.473 K, nos tempos de 5 minutos e 45 minutos, apresenta uma evolução favorável, com aumento na formação de fase metálica.

Nas micrografias a 1.523 K para PARN1 e PARN2, para 5 minutos, observou-se uma maior presença de fase metálica na pelota PARN2 com teores de ferro de 95,2% e 0,46% de níquel.

Nas mesmas condições para 45 minutos de redução observou-se uma maior coalescência da fase metálica da pelota PARN2 alcançando tamanhos maiores a 50 μm .

As fases silicatadas da pelota PARN2 a 45 minutos, contem ainda um alto teor de ferro de 11% a 19% de ferro e 0,5% de níquel, aproximadamente.

Pode-se observar que o níquel encontra-se distribuído em todas as fases presentes na caracterização do resíduo antes da redução, bem como em todas as fases obtidas após a redução.

Nas pelotas com basicidade modificada B-1 e B-2 observou-se que a adição de CaO facilitou a redução do ferro na fase cromita.

Observou-se nos tempos de 45 minutos nas pelotas B-1 e B-2 a formação de compostos silicatados de cálcio, encontrando-os também nas demais fases em menores quantidades.

Conclui-se a existência de dois mecanismos controladores o primeiro de 0 minutos - 10 minutos por transferência de calor e o segundo de 10 minutos a 45 minutos por transferência de massa

Independentemente do tipo de pelota, temperatura e tempo observou-se que o composto silicatado com alto conteúdo de magnésia dificulta a redução de metais presentes nela.

Os resultados obtidos mostram que, nas condições estudadas, não é possível a redução total dos elementos ferro, níquel e cobalto, que permanecem parcialmente na fase não-metálica.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES—instituição de apoio ao desenvolvimento de Pesquisa, agradecemos também à escola politécnica da Universidade de São Paulo, pelo suporte e apoio para a realização de este estudo.

REFERÊNCIAS

- 1 TAKANO, C. et al. A reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos. In: Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais, Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. São Paulo, p. 1-13, 2000.
- 2 NASCIMENTO Jr, R. C., Uma análise microestrutural sobre pelotas auto-redutoras. Tese de Doutorado 18/11/94, EPUSP. Orientador José D. Trani Capocchi.
- 3 BURKIN, A.R., Extractive Metallurgy of Nickel. The Society of Chemical Industry, 1987.
- 4 ASHOK, D. et al. The past and the future of nickel laterite. in International Convention, Trade Show & Investors Exchange. Ontario-Canada, 2004.
- 5 DE GRAAF, J.E., The treatment of lateritic nickel ores - a further study of caron process and other possible improvements. Hydrometallurgy. v. 5, p. 47-65, 1979.

- 6 NEIRA, J. B. V. Estudo da recuperação de metais contidos no resíduo níquelífero do processo Caron. Dissertação de mestrado, EPUSP, 2009. Orientador Marcelo Breda Mourão.
- 7 NEIRA, J. B. V.; MOURÃO, M. B.; TAKANO, C. Caracterización de residuos de la producción de níquel. In: 7^{mo} Congreso Nacional de Minería, ed. Colegio de Ingenieros del Perú. Trujillo, Peru, 2008.
- 8 Companhia Níquel Tocantins. Caracterização em resíduo do processo piro/hidrometalúrgico-barragem Jacuba níquel laterítico de Niquelândia. Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) da Escola Politécnica da USP. v.1, p. 45, 2006.
- 9 LIMA, J. R. B. Estudo da carboxi-metil-celulose como aglomerante para pelotização. Tese de Doutorado, 1991, EPUSP. Orientador: Arthur Pinto Chavez.
- 10 NEIRA, J. B. V.; ZAMBRANO, A. P.; MOURÃO, M. B.; TAKANO, C. IV Estudio de reducción de residuos sólidos de la producción de níquel por reducción carbotérmica de pelotas auto-reductoras. In: Congreso internacional de metalurgia de transformación, ed. Colegio de Ingenieros del Perú. Lima-Peru, 2008
- 11 SANTOS, D. M. Auto-redução & fusão redução de pelotas contendo óxido de ferro. Teses de Doutorado, 2002, EPUSP. Orientador: Marcelo Breda Mourão.
- 12 NEIRA, J. B. V. et al. Nickel recovery by carbothermic reduction from sludge generated during nickel production, in 7th Japan–Brazil Symposium on Dust Processing–Energy–Environment in Metallurgical Industries–ABM. São Paulo, Brazil, 2008