

## AValiação DA DESLAMAGEM DE UM MINÉRIO SULFETADO UTILIZANDO DIFERENTES GEOMETRIAS DE HIDROCICLONES

COUTO, H.J.B.<sup>1a,1b</sup>, FRANÇA, S.C.A.<sup>2</sup>

<sup>1a</sup>CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. hcouto@cetem.gov.br

<sup>1b</sup>IFRJ – Instituto Federal do Rio de Janeiro. hudson.couto@ifrj.edu.br

<sup>2</sup>CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. sfranca@cetem.gov.br

### RESUMO

Os hidrociclones são equipamentos que possuem vasta aplicação na área de processamento mineral, das quais podemos citar: classificação em circuitos fechados de moagem, deslamagem de minérios para a flotação e espessamento/desaguamento de polpas minerais para eliminação de água e remoção de partículas menores que 10 µm. O objetivo do presente trabalho foi avaliar diferentes geometrias de hidrociclone (diâmetro do *ápex* e da parte cilíndrica) na deslamagem de um minério sulfetado de níquel, para posterior concentração por flotação em colunas. Diversos ensaios de hidrociclonagem foram realizados com a finalidade de determinar a melhor configuração hidrociclone/*ápex* para deslamagem do material de estudo. Com este propósito, foram utilizados dois hidrociclones da marca AKW, de 1,5" e 2" de diâmetro da parte cilíndrica, e três diferentes geometrias de *ápex* para cada hidrociclone. Os melhores resultados de deslamagem para os hidrociclones de 2" e 1,5" de diâmetro foram obtidos para os maiores valores de diâmetro de *ápex* utilizados, sob pressões de 150 kPa e 100 kPa, respectivamente. A medida de eficiência foi avaliada com base na quantidade de finos passantes em 20 µm remanescente na corrente de *underflow* e na quantidade de finos passantes nas correntes de *overflow*. Os resultados de eficiência total e eficiência total reduzida de separação foram da ordem de 84% e 82%, respectivamente, para a melhor condição avaliada.

**PALAVRAS-CHAVE:** deslamagem; hidrociclones; recuperação de finos.

### ABSTRACT

Hydrocyclones are devices that have wide application in mineral processing, as follow: classification in closed grinding circuit, desliming for minerals flotation, and thickening/dewatering mineral slurries to eliminate water and removal particles smaller than 10 µm. The aim of this study was to evaluate different hydrocyclone geometries (apex and cylindrical section diameter) on desliming efficiency of a nickel sulphide ore for subsequent concentration by flotation. Several assay were performed in order to determine the best hydrocyclone/apex configuration for desliming the particle pulp. For this purpose, two AKW hydrocyclones, with 1.5 and 2.0 in diameter, and three apex geometries for each hydrocyclone, were used. The best desliming results were obtained for larger values used apex diameter at 150 kPa and 100 kPa pressures, to the hydrocyclones with 2" and 1.5" diameter, respectively. The efficiency was evaluated based on the amount of fine particles, passing in 0,020 mm sieve diameter, remaining in the underflow stream and the amount of fine particles below 0,020 mm in overflow stream. The best desliming result, of overall efficiency and reduced total efficiency, was 84% and 82%, respectively.

**KEYWORDS:** desliming; hydrocyclones; fine particles recovery.

## 1. INTRODUÇÃO

O equipamento mais utilizado nos processos de classificação na indústria mineral é o hidrociclone, por reunir vantagens em relação a outros equipamentos como grande versatilidade e capacidade de classificar minérios em uma ampla faixa de tamanhos, incluindo-se a separação de partículas ultrafinas. Está incluída em diversas áreas da indústria minero-metalúrgica, a exemplo e indústrias de petróleo, química, alimentícia e cerâmica. Com relação a sua vasta aplicação na área de processamento mineral pode-se citar seu uso nos circuitos fechados de moagem, na remoção de partículas menores que 10  $\mu\text{m}$ , na operação de desaguamento e na deslamagem de minérios para posterior flotação (Correia, 2010).

Os hidrociclones são equipamentos simples e de fácil construção, sendo basicamente constituídos de uma parte cilíndrica acoplada a uma base cônica. As dimensões geométricas de cada parte são importantes no processo de separação, pois estão relacionadas à capacidade e ao poder de classificação destes equipamentos. A parte cilíndrica possui uma entrada tangencial através da qual a suspensão de partículas é alimentada e forma um *vórtex* primário ao longo da superfície interna das paredes cilíndrica a cônica, com direção ao ápice do cone. No estrangulamento do cone, denominado *ápex*, somente uma parte do líquido é descarregada na saída inferior, denominada *underflow*, arrastando as partículas grossas e pequena parte das partículas finas. A maior parte do líquido, transportando partículas finas, é forçada a deixar o ciclone através da saída superior, denominada *overflow*, devido à formação de um *vórtex* secundário interno que gira em torno do eixo em movimento ascendente. No centro do hidrociclone cria-se uma baixa pressão que recolhe todo o ar introduzido sob a forma de bolhas ou dissolvido na água de alimentação (Tavares *et al.*, 2002, Svarovsky, 1990).

O objetivo deste trabalho foi avaliar diferentes geometrias de hidrociclone (diâmetro do *ápex* e da parte cilíndrica) na deslamagem de um minério sulfetado de níquel, para posterior concentração por flotação em colunas. Diversos ensaios de hidrociclonagem foram realizados com a finalidade de determinar a melhor configuração hidrociclone/*ápex* para deslamagem do material de estudo. Com este propósito, foram utilizados dois hidrociclones da marca AKW, de 1,5" e 2" de diâmetro da parte cilíndrica, e três diferentes geometrias de *ápex* para cada hidrociclone.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Minério de estudo

Foi estudado um minério sulfetado de níquel, proveniente do estado de Minas Gerais, após etapa de moagem em moinho cilíndrico tradicional, utilizando barras de aço inox como corpo moedor. A moagem foi realizada de forma a se obter um produto com  $P_{90}$  em 0,105 mm, gerando cerca de 24% de finos (partículas passantes em 0,020 mm), da qual foi utilizado nos ensaios de deslamagem.

### 2.2. Ensaios de hidrociclonagem (deslamagem)

Diversos ensaios de hidrociclonagem foram realizados com o propósito de determinar a melhor configuração hidrociclone/*ápex* e condição operacional (pressão de alimentação) para deslamagem do material moído de estudo. Os ensaios de deslamagem, utilizando hidrociclones da AKW com 1,5" e 2" de diâmetro da parte cilíndrica e diferentes geometrias de *ápex*, foram realizados conforme esquema experimental apresentado na Figura 1, de acordo com o procedimento experimental descrito por Sampaio *et al.* (2007), e aparato ilustrado na Figura 2.

Para o hidrociclone de 2" os diâmetros de *ápex* utilizados foram os seguintes: 12 mm (*ápex* 1), 7 mm (*ápex* 2) e 5 mm (*ápex* 3). Já para o hidrociclone de 1,5" os diâmetros foram os seguintes: 7 mm (*ápex* 1) e 6 mm (*ápex* 2).

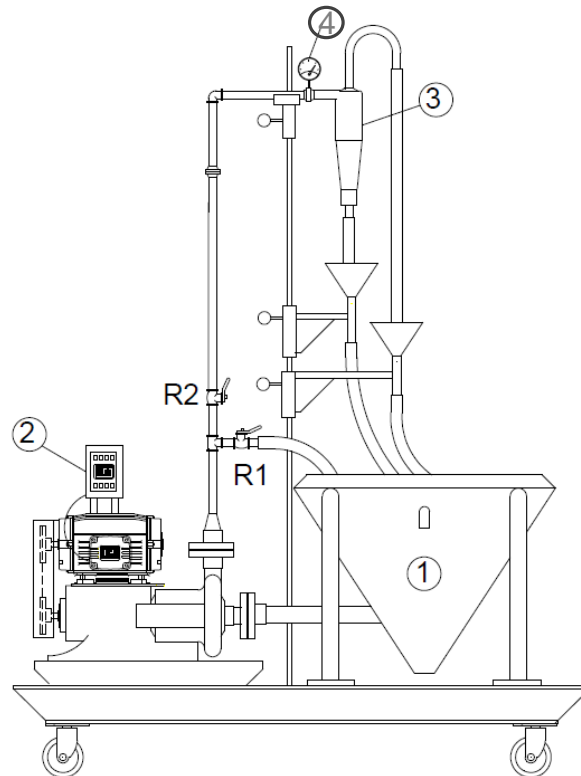


Figura 1. Desenho esquemático do circuito fechado de hidrociclonação utilizado: 1- Tanque de polpa; 2- Inversor de frequência; 3- Hidrociclone; 4- manômetro; R1- Registro de atalho; R2- Registro de alimentação (Sampaio *et al.*, 2007).



(a)



(b)

Figura 2. Aparato experimental utilizado nos ensaios de deslamagem: (a) vista geral com tanques de preparo de polpa e de armazenagem do *underflow* e (b) detalhe do hidrociclone AKW utilizado

### 2.2.1. Procedimento experimental

Inicialmente, ajustou-se a porcentagem de sólidos em 25% no tanque de alimentação e, com o sistema mecânico de agitação ligado, iniciou-se a circulação de polpa em circuito fechado, mantendo o registro R1 totalmente aberto e o R2 totalmente fechado (Figura 1). Deu-se início a alimentação de polpa no hidrociclone, fechando o registro R1 e, ao mesmo tempo, abrindo o registro R2, de forma lenta e gradativa até estabilizar o valor da pressão de alimentação da polpa no manômetro de acordo com o programado para cada ensaio. Os fluxos do *overflow* e do *underflow* foram redirecionados à caixa de bomba do tanque de alimentação do hidrociclone, trabalhando-se com o circuito fechado.

Depois de um cerca de cinco minutos, com o circuito em equilíbrio e polpa de alimentação homogênea, foram realizadas as amostragens simultâneas das correntes de *underflow* e *overflow* para cada valor de pressão pré-estabelecido. As amostragens foram realizadas de forma sistematizada e em curtos intervalos de tempo com o propósito de não perturbar e descaracterizar a polpa de alimentação. As amostras coletadas foram encaminhadas para a realização de análises granulométricas, de balanços de massa, determinação de percentagens de sólidos, densidade de polpa, dentre outros, visando à determinação da eficiência do processo de deslamagem.

### 2.3. Análises granulométricas e de massa específica do sólido

#### 2.3.1. Determinação da distribuição de tamanho das partículas

As análises granulométricas das amostras de polpa advindas da alimentação, do *underflow* e do *overflow* do hidrociclone foram realizadas, segundo o procedimento clássico de peneiramento a úmido e utilizando uma série de peneiras *Tyler*, com aberturas de telas variando de 0,020 a 0,210 mm (635 a 65 *Mesh*).

#### 2.3.2. Determinação da massa específica das amostras

A massa específica das amostras sólidas ( $\rho_p$ ) foi determinada pela técnica de picnometria a gás hélio, utilizando-se o picnômetro Micromeritics, modelo AccuPyc 1330.

### 2.4. Avaliação da eficiência dos hidrociclones

A avaliação da eficiência de separação dos hidrociclones foram calculados por meio da Equação 1 (Svarovsky, 1990). A eficiência total ( $E_T$ ) do hidrociclone, dada pela Equação 1, fornece a taxa de sólidos recuperados no *underflow* ( $W_{su}$ ).

$$E_T = \frac{W_{su}}{W_{sa}} \quad (1)$$

em que:

$W_{su}$  é a vazão mássica de sólidos do *underflow*;

$W_{sa}$  é a vazão mássica de sólidos da alimentação.

Um hidrociclone, mesmo que não esteja separando as partículas em campo centrífugo, ele serve como um divisor de vazões dividindo a corrente alimentada em duas (Efeito T). A razão de líquido

( $R_L$ ), dada pela Equação 2, é a relação entre as vazões de líquido no *underflow* e na alimentação, ou seja:

$$R_L = \frac{Q_u \cdot (1 - c_{vu})}{Q_a \cdot (1 - c_{va})} \quad (2)$$

na qual:  $Q_u$  e  $Q_a$  são respectivamente as vazões volumétricas no *underflow* e alimentação e  $c_{vu}$  e  $c_{va}$ , respectivamente, as concentrações volumétricas das mesmas correntes.

Ao considerar apenas a eficiência proveniente da força centrífuga deve-se subtrair a razão de líquido da eficiência total, conforme Equação 3, obtendo-se desta forma a eficiência total reduzida ( $E'_T$ ) a seguir (Svarovsky, 1990). Assim, a eficiência total reduzida considera apenas a recuperação dos sólidos coletados no *underflow* pelo efeito do campo centrífugo.

$$E'_T = \frac{E_T - R_L}{1 - R_L} \quad (3)$$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Resultados dos ensaios de hidrociclonação (deslamagem)

Na Tabela I constam os resultados de partição em volume e em massa, de porcentagem de sólidos e variação de massa específica para as correntes de *overflow* e *underflow* relativos aos ensaios realizados com o hidrociclone AKW de 2" em diferentes pressões de alimentação e configurações de *ápex*. Na Tabela II relacionam-se os mesmos resultados obtidos com o hidrociclone AKW de 1,5", da mesma forma que o primeiro, variando-se a pressão de alimentação da polpa e a geometria do *ápex*.

Tabela I. Resultados utilizando o hidrociclone AKW de 2" com diferentes pressões e *ápex*.

Ensaio	Apex	P (kPa)	Corrente	$Q_p$ (L/h)	$W_p$ (kg/h)	$W_s$ (kg/h)	% $W_s$	% sol.	$\rho$ (kg/L)	$\Delta\rho_{(u-o)}$ (kg/L)	$E_T$ (%)	$R_L$ (%)	$E'_T$ (%)
1	2	50	overflow	2287,4	2478,3	275,4	39,6	11,11	1,083	0,83	60,4	8,0	56,9
			underflow	318,1	609,7	419,4	60,4	68,78	1,917				
			alimentação	2605,5	3088,0	694,9	100,0	22,50	1,185				
2	2	100	overflow	3783,5	3948,0	237,5	27,9	6,02	1,043	0,87	72,1	7,0	70,0
			underflow	465,2	891,0	612,2	72,1	68,71	1,915				
			alimentação	4248,7	4839,0	849,7	100,0	17,56	1,139				
3	2	150	overflow	5287,2	5580,0	422,6	28,2	7,57	1,055	0,87	71,8	8,5	69,2
			underflow	806,9	1555,8	1076,9	71,8	69,22	1,928				
			alimentação	6094,1	7135,8	1499	100,0	21,01	1,171				
4	2	200	overflow	7182,2	7566,5	554,7	28,5	7,33	1,054	0,91	71,5	7,7	69,2
			underflow	1007,8	1976,7	1393,1	71,5	70,48	1,961				
			alimentação	8190,1	9543,3	1948	100,0	20,41	1,165				
5	3	50	overflow	2412,2	2632,5	317,9	61,5	12,08	1,091	0,82	38,5	3,8	36,0
			underflow	152,3	290,6	198,8	38,5	68,41	1,908				
			alimentação	2564,6	2923,1	516,7	100,0	17,68	1,140				

6	3	100	overflow	4747,5	5278,3	766,1	70,0	14,51	1,112	0,81	30,0	3,2	27,7
			underflow	248,5	477,3	329,0	30,0	68,93	1,921				
			alimentação	4995,9	5755,5	1095,1	100,0	19,03	1,152				
7	3	150	overflow	6477,0	7170,0	1000,2	69,3	13,95	1,107	0,85	30,7	2,9	28,6
			underflow	321,9	630,2	443,3	30,7	70,34	1,958				
			alimentação	6798,9	7800,2	1443,5	100,0	18,51	1,147				
8	1	50	overflow	2302,9	2446,8	207,7	25,8	8,49	1,062	0,71	74,2	13,6	70,1
			underflow	534,7	949,3	596,1	74,2	62,80	1,775				
			alimentação	2837,6	3396,1	803,8	100,0	23,67	1,197				
9	1	100	overflow	2985,2	3169,6	266,0	26,0	8,39	1,062	0,90	74,0	9,9	71,2
			underflow	551,4	1079,4	759,1	74,0	70,33	1,957				
			alimentação	3536,7	4248,9	1025,1	100,0	24,13	1,201				
10	1	150	overflow	4552,1	4824,9	393,6	23,0	8,16	1,060	0,93	77,0	10,6	74,2
			underflow	927,7	1843,0	1316,1	77,0	71,41	1,987				
			alimentação	5479,8	6667,8	1709,7	100,0	25,64	1,217				

**Legenda:** P - pressão de alimentação da polpa;  $Q_p$  - vazão volumétrica de polpa;  $W_p$  - vazão mássica de polpa;  $W_s$  - vazão mássica de sólido; %  $W_s$  - partição mássica de sólidos; % sol. - porcentagem de sólidos de cada corrente;  $\rho$  - massa específica de cada corrente;  $\Delta\rho_{(u-o)}$  - diferença da massa específica do *underflow* e *overflow*.

**Tabela II. Resultados utilizando o hidrociclone AKW de 1,5" com diferentes pressões e ápex**

Ensaio	Apex	P (kPa)	Corrente	$Q_p$ (L/h)	$W_p$ (kg/h)	$W_s$ (kg/h)	% $W_s$	% sol.	$\rho$ (kg/L)	$\Delta\rho_{(u-o)}$ (kg/L)	$E_T$ (%)	$R_L$ (%)	$E'_T$ (%)
1	2	50	overflow	1079,3	1171,5	133,0	38,1	11,36	1,085	0,74	61,9	10,1	57,6
			underflow	181,9	332,1	216,0	61,9	65,04	1,826				
			alimentação	1261,2	1503,6	349,0	100,0	23,21	1,192				
2	2	100	overflow	1561,2	1721,5	231,3	44,9	13,44	1,103	0,76	55,1	8,6	50,8
			underflow	227,2	424,3	283,3	55,1	66,78	1,867				
			alimentação	1788,5	2145,7	514,6	100,0	23,98	1,200				
3	2	150	overflow	2141,0	2363,1	320,6	49,0	13,57	1,104	0,80	51,0	7,0	47,3
			underflow	255,6	487,7	333,7	51,0	68,42	1,908				
			alimentação	2396,6	2850,8	654,4	100,0	22,95	1,190				
4	2	200	overflow	2645,5	2943,6	430,4	60,9	14,62	1,113	0,83	39,1	4,6	36,2
			underflow	204,8	397,2	276,7	39,1	69,66	1,940				
			alimentação	2850,2	3340,8	707,0	100,0	21,16	1,172				
5	1	50	overflow	681,8	712,2	43,8	14,8	6,15	1,045	0,49	85,2	27,3	79,6
			underflow	326,9	501,6	251,2	85,2	50,09	1,535				
			alimentação	1008,7	1213,7	295,0	100,0	24,31	1,203				
6	1	100	overflow	1319,6	1370,8	73,8	15,5	5,39	1,039	0,81	84,5	13,7	82,0
			underflow	329,3	609,5	402,9	84,5	66,11	1,851				
			alimentação	1648,9	1980,3	476,7	100,0	24,07	1,201				
7	1	150	overflow	2136,0	2215,4	114,6	15,8	5,17	1,037	0,92	84,2	11,0	82,3
			underflow	445,6	871,1	611,8	84,2	70,23	1,955				
			alimentação	2581,6	3086,4	726,3	100,0	23,53	1,196				
8	1	200	overflow	2287,6	2372,7	122,9	16,3	5,18	1,037	0,94	83,7	10,3	81,9
			underflow	451,2	891,0	632,3	83,7	70,97	1,975				
			alimentação	2738,8	3263,7	755,2	100,0	23,14	1,192				

De uma forma geral, observa-se um aumento da diferença de massa específica com o aumento da pressão de alimentação de polpa e também verifica-se uma maior partição em massa no *overflow*

(massa perdida como lama) com uma diminuição do diâmetro do *ápex* dos hidrociclones, corroborando com trabalhos da literatura (Correia, 2010, Sampaio *et al.*, 2007).

As melhores condições para deslamagem do material moído foram obtidas para o hidrociclone de 2" utilizando o *ápex* 1, sob pressão de alimentação de 150 kPa (ensaio 10 da Tabela 1) e para o hidrociclone de 1,5", também utilizando o *ápex* 1, sob pressão de alimentação entre 100 e 150 kPa (ensaios 6 e 7 da Tabela 2), obtendo-se resultados de eficiência total e eficiência total reduzida de 77% e 74% para o hidrociclone de 2", respectivamente, e de 84% e 82% para o hidrociclone de 1,5" de diâmetro da parte cilíndrica.

As Figuras 3a e 3b, trazem as análises granulométricas das correntes de *overflow*, alimentação e *underflow* dos melhores resultados obtidos, encontrados para os ensaios E10 do hidrociclone de 2" (Tabela I) e ensaios E6 do hidrociclone de 1,5" (Tabela II), respectivamente.

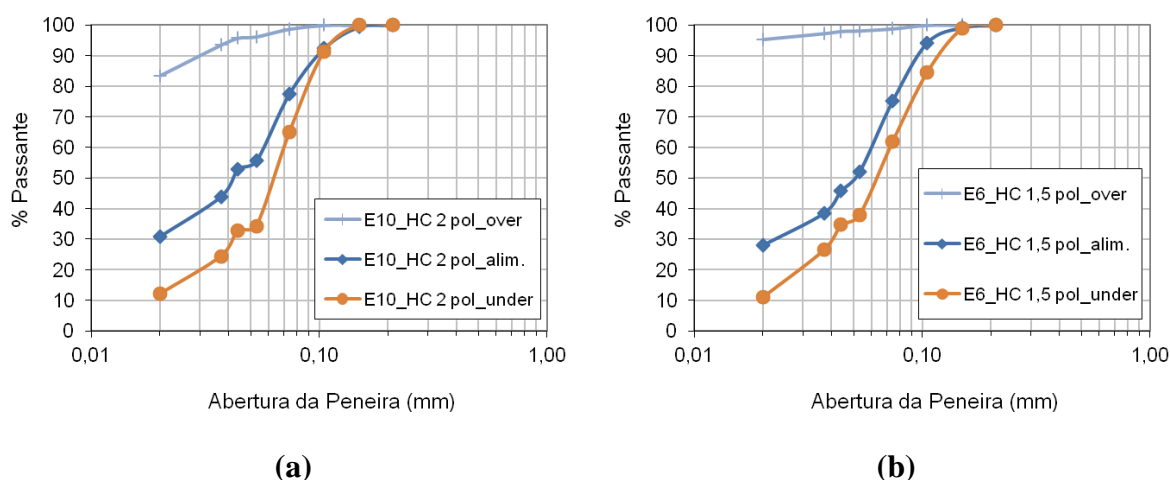


Figura 3. Análises granulométricas das correntes de *overflow*, alimentação e *underflow* dos testes T10 da Tabela I (a) e T6 da Tabela II (b).

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia utilizada na avaliação do desempenho dos hidrociclones avaliados mostrou-se eficaz e de grande utilidade para otimizar circuitos de deslamagem de polpa mineral, visando à remoção de partículas finas prejudiciais ao processo posterior de flotação.

Com base na quantidade de finos (partículas passantes em 0,020 mm) remanescente na corrente de *underflow* e na quantidade de finos passantes nas correntes de *overflow* de todos os ensaios avaliados, aliados aos dados de eficiência total e total reduzida de separação, o melhor resultado foi obtido para o hidrociclone de 1,5" de diâmetro da parte cilíndrica com *ápex* de 7 mm de diâmetro, utilizando uma pressão de alimentação de polpa de 100 kPa.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Ao CETEM por toda infraestrutura disponibilizada para a realização das atividades experimentais (laboratórios e usina piloto) e pelo apoio de recursos humanos.

## 6. REFERÊNCIAS

CORREIA, J.C.G., Classificação e Peneiramento. In: Tratamento de Minérios (Luz, A. B., Sampaio, J. A., França, S. C. A., Editores), CETEM/MCTI, 5a Edição, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.

TAVARES, L.M., SOUZA, L.L.G., LIMA, J.R.B., POSSA, M.V. Modeling classification in small diameter hydrocyclones under variable rheological conditions. Minerals Engineering, v. 15, p. 613-622, 2002.

SVAROVSKY, L. Solid-Liquid Separation. 3rd Ed, Butterworths, London, p. 198., 1990.

SAMPAIO, J.A., OLIVEIRA, G.P., SILVA, A.O., Ensaio de Classificação em Hidrociclone. In: João Alves Sampaio; Sílvia Cristina Alves França; Paulo Fernando de Almeida Braga. (Editores), Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, p. 138-154, 2007.