

# MINERODUTO — TRANSPORTE, POR MEIO DE TUBOS, DE FINOS DE MINÉRIO DE FERRO PARA PELOTIZAÇÃO <sup>(1)</sup>

BERNARDINO PINTO CARNEIRO <sup>(2)</sup> LUIZ DE OLIVEIRA CASTRO <sup>(3)</sup>  
HAROLDO LISBOA TAVARES <sup>(4)</sup> PEDRO EDMUNDO AUN <sup>(4)</sup>  
MARCUS T. DE MAGALHÃES <sup>(4)</sup> ÂNGELO ALBERTO MAESTRINI <sup>(4)</sup>

## RESUMO

*Os Autores, engenheiros da Metais de Minas Gerais METAMIG, e do Instituto de Pesquisas Radioativas, dentro da política geral de incremento da exportação de minérios de ferro, procederam a este estudo no qual, em caráter preliminar mas dentro da melhor técnica, encaram o importante problema do transporte por mineroduto de finos de minérios de ferro da região de Belo Horizonte, MG, até o litoral, onde seriam transformados em pelotas e exportados. Estudada a dinâmica do escoamento do fluido água + minério, justificam o emprêgo dos minérios finos e determinam a concentração ótima das partículas sólidas. Com técnica, baseada em métodos radioativos, estudam o desgaste da tubulação. Apresentam dois ante-projetos, dos quais um é de gravidade; estimam os custos de construção e de operação e fazem comparações com instalações análogas.*

## 1. INTRODUÇÃO

As reservas conhecidas de minério de ferro do Quadrilátero Ferífero têm sido avaliadas em 26 bilhões de toneladas<sup>1</sup>, assim distribuídas:

Itabirito brando concentrável . . . . .	23,5 bilhões de toneladas
Hematitas pulverulentas . . . . .	1,7 bilhões de toneladas
Hematitas compactas . . . . .	0,8 bilhões de toneladas

- 
- (1) Contribuição Técnica n.º 536. Apresentada ao XIX Congresso Anual da ABM; São Paulo, julho de 1964.
- (2) Engenheiro da METAMIG S.A.; Belo Horizonte, MG.
- (3) Engenheiro da METAMIG e do Instituto de Pesquisas Radioativas.
- (4) Engenheiro do Laboratório de Engenharia de Radioisótopos do Instituto de Pesquisas Radioativas da EE da UMG; Belo Horizonte, MG.

O teor em ferro de cada um desses minérios é o seguinte:

Itabiritos — Porcentagem de Ferro menor do que 60%, porém normalmente entre 40% e 50%.

Hematitas pulverulentas ou compactas — Porcentagem de ferro maior que 66%.

Uma análise desses dados nos conduz às conclusões abaixo:

- a) A maioria das reservas de minério de ferro é constituída de Itabirito e Hematita pulverulenta rica, correspondendo a 25,2 bilhões de toneladas em 26 bilhões de toneladas.
- b) Para o aproveitamento dos itabiritos, é necessária uma concentração, elevando-se o seu teor de ferro para o mínimo, 66%. Os concentrados serão obtidos pela moagem do minério e posterior separação da sílica, obtendo-se no final um produto de alto teor de ferro, porém de granulometria bastante fina. As hematitas pulverulentas ricas não necessitam de concentração. Esses produtos finos não servem entretanto, para carga direta dos alto-fornos sem antes serem aglomerados.
- c) Um estudo que defina as possibilidades de aproveitamento desses concentrados de itabirito e hematita pulverulenta, representará em sua essência o equacionamento do problema dos finos.

Tendo presente as conclusões expostas e objetivando o aproveitamento das jazidas de hematita pulverulenta para a exportação, vamos, sumariamente, ver alguns fatos sobre os aglomerados:

- a) Sinter — são aglomerados frágeis, que não resistem a transportes;
- b) Briquetes — encontram-se ainda em fase experimental;
- c) Pelotas — são aglomerados de ótima resistência mecânica; suportam sem degradação, os transbordos e os transportes de longo curso.

Vemos assim que as pelotas satisfazem ao fim em vista. Além dessas características mecânicas, as pelotas demonstraram ser a carga ideal para altos fornos, aumentando até o dôbro a sua capacidade diária e diminuindo substancialmente o "coke-rate"<sup>2</sup>. Em face desses resultados, elas promovem no mundo uma verdadeira revolução de conceitos e métodos. Com isso, há uma forte tendência do mercado em consumi-las; em consequência, as usinas de pelletização surgem em número crescente, em várias partes do mundo<sup>3</sup>.

No Brasil, a idéia de pelletização foi inaugurada pela Cia. Vale do Rio Doce, que promove estudo para implantação de uma usina, almejando exportar 3,5 Mt desse aglomerado em 1970<sup>2</sup>.

Também integralizada nas idéias que acabamos de expôr, vem a Metamig S.A. estudando tôdas as possibilidades para um pro-

DIAGRAMA PARA UM PROJETO DE APROVEITAMENTO E EXPORTAÇÃO DA HEMATITA PULVERULENTO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

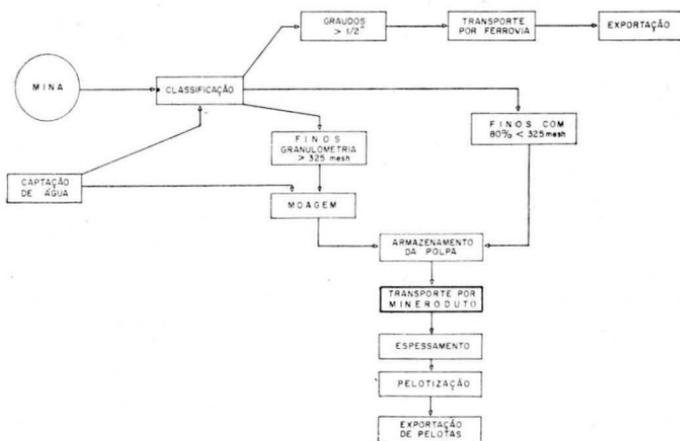


Fig. 1 — Diagrama para um projeto de aproveitamento e exportação da hematita pulverulenta do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais.

grama ambicioso de exportação de minério de ferro sob a forma de pelotas. Com base nos resultados de um estudo preliminar para o aproveitamento dos depósitos de hematitas pulverulentas ricas, obteve-se o esquema para um projeto representado na figura 1. Nêsse esquema procurou-se fundamentalmente adotar tôdas as idéias, mesmo inovações, passíveis de realização prática, com única condição de promoverem a redução no custo da tonelada produzida. Com essa finalidade adotou-se um novo sistema de transporte, que se adapta perfeitamente ao projeto, qual seja o transporte dos finos de minério de ferro na granulometria de  $80\% < 325$  mesh ou de pelotização, misturados com água, por meio de tubos. Observa-se que êsse sistema de transporte sim-

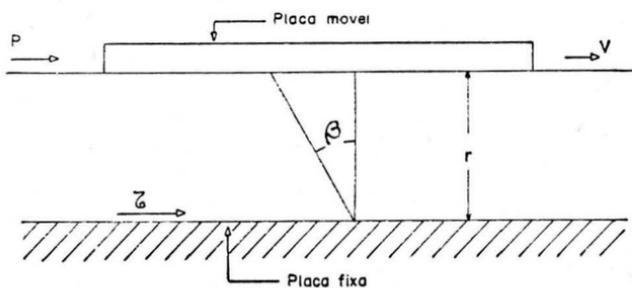


Fig. 2 — Experiência clássica para definir a viscosidade.

plesmente aproveita a necessidade, imposta pelo processo de pelletização, de moer o minério a granulometrias extremamente finas.

Para constatar a viabilidade técnica e econômica desse sistema de transporte, que se passou a chamar de "mineroduto", organizou a Metamig S.A., um "*Grupo de Trabalho do Mineroduto*", que estuda o problema desde fins de 1962. Através de pesquisas bibliográficas, definiram-se os setores a serem estudados em laboratório; com os resultados obtidos pôde-se verificar a economicidade do processo. Estudaram-se em laboratório os seguintes problemas:

- a) Perdas de carga devidas ao escoamento da mistura
- b) Desgaste ou abrasão dos tubos
- c) Tamponamento ou obstrução dos tubos quando há uma paralisação no escoamento da mistura. Continua-se atualmente o estudo dos problemas de tamponamento.

## 2. EXPERIÊNCIA COM MINERODUTOS EM FUNCIONAMENTO NA ATUALIDADE

Na adoção de qualquer processo ou sistema, é fator importante a confiança que êle promova através da experiência já adquirida na sua operação em escala industrial. Apesar da experiência ser inexistente no Brasil, há em vários outros países um grande número de minerodutos em pleno e satisfatório funcionamento, justificando o seu emprêgo na prática. O processo não é novo, havendo exemplo da sua primeira aplicação em 1914. Atualmente êle é cada vez mais utilizado, sempre que a análise, em confronto com os outros meios clássicos de transporte, indica o seu emprêgo. Assim, por exemplo, há vários fatores que conjugados o tornam viável:

- a) Quando o minério fôr transportado em grandes toneladas anuais;
- b) Quando as granulometrias a transportar forem finas e a finura fôr uma exigência do processo posterior de sua utilização industrial;
- c) Quando a topografia a ser vencida for um fator ponderável que possa definir uma decisão favorável à sua construção. Isto porque, no caso de região montanhosa, o mineroduto a atravessará com um custo apenas de uma fração do de uma ferrovia ou rodovia.

O quadro I exemplifica alguns minerodutos em funcionamento no mundo, demonstrando que há experiência suficiente de sua utilização em escala industrial:

QUADRO I

Local	Produto	Comprimento (km)	Diâmetro do tubo (polegadas)
Jamaica .....	Bauxita	36	6-8
Chile .....	Concentrado de Cu	31	6
Utah (US) .....	Gilsonita	130	6
Minnesota (US) .....	Magnetita	36-130	16
Utah (US) .....	Fosfato	135	6-8
Austrália .....	Calcáreo	100	X
Washington (US) .....	Calcáreo	45	6-8
Cadiz-Eastlake (US) .....	Carvão	200	10
Quebec .....	Minério de ferro	3,6	16
Rússia .....	Carvão	60	12
França .....	Carvão	9	16

Parâmetros dos transportes:			
Velocidade — 0,60 m/seg a 4 m/seg			
Granulometria — 200 mesh a $\frac{3}{4}$ "			
Concentração da polpa — 25% a 70%			

Uma observação interessante, comprovada pelo quadro I, é que o mineroduto obteve em muitos casos a preferência técnica e econômica, mesmo em países de intensa competição entre vários meios de transporte, como nos EUA. Como comprovação citamos dois projetos que foram estudados naquele país. O primeiro é um "pipeline" entre West Virginia e a Cidade de New York, com 459 milhas de comprimento em tubos  $\Phi$  18", para o transporte de 9 Mt/ano de carvão, em suspensão aquosa de 60% de concentração <sup>4</sup>. O segundo foi apresentado pelo Eng<sup>o</sup>. Ralph Constantini em Janeiro de 1963 no "AIME Mining Symposium" realizado em Duluth — Minn.. Prevê o transporte de 10 Mt/ano de minério de ferro para pelotização, em suspensão aquosa a 60% de concentração, através de 500 milhas de tubos de 18" <sup>5</sup>.

Em ambos os casos, o frete por mineroduto foi inferior ao ferroviário. Para o mineroduto, os fretes eram, por tonelada-ano, de US\$ 2,66 para o carvão e de US\$ 2,00 para minério de ferro, sendo os ferroviários respectivamente US\$ 4,59 e US\$ 5,00. Um mineroduto pode pois transportar, a baixo custo, grandes toneladas anuais, com tubulação de diâmetros usuais em quaisquer outros pipelines.

## 3. CLASSIFICAÇÃO DAS MISTURAS DE MINÉRIO COM ÁGUA

A) *Misturas homogêneas* — A velocidade de decantação das partículas de minério em água clara é de importância fundamental para definir as características de uma mistura água-sólido pulverulento, tendo em vista o escoamento através de tubos. Uma classificação simples dessas misturas baseia-se no comportamento da fase sólida durante a decantação. Esse comportamento dependerá em última análise do balanço entre as forças de gravidade e de viscosidade que entram em jogo no fenômeno. Assim se as forças de viscosidade do líquido puderem anular ou atenuar bastante as de gravidade, estaremos em presença de uma *mistura homogênea*. Nêsse caso a velocidade de decantação das partículas deverá apresentar valores muito baixos, menores do que 1,5 mm/seg<sup>6</sup>. Para conseguir-se velocidades tão baixas, de tal forma que basicamente a mistura funcione como homogênea, pode-se utilizar um de dois métodos:

a) Seja uma partícula de diâmetro  $d$  que, na água, possuirá uma velocidade de queda  $W_0$ . Sendo  $v$  a viscosidade cinemática da água, pode-se definir o parâmetro  $R$ , denominado o número de Reynolds da partícula, por

$$R = \frac{W_0 d}{v} \quad (1)$$

Para valores de  $R < 1$ , com margem de erro pequena, pode-se usar a fórmula de Oseen para o cálculo de  $W_0$  ou, tendo-se  $W_0$ , obter o valor de  $d$ <sup>7</sup>.

$$W_0 = \frac{1}{18} g \frac{1}{v} \left( \frac{s - \rho}{\rho} \right) d^2 \left( \frac{1}{1 + 0,095R} \right)^2 \quad (2)$$

sendo:

- $s$  a densidade do grão de minério
- $\rho$  a densidade da água
- $g$  a aceleração da gravidade.

Seja, por exemplo, uma partícula de hematita de 400 mesh (0,035 mm), para a qual, pelo método acima descrito, encontra-se  $W_0 = 2,9$  mm/seg. Nêste caso, para se conseguir um valor de  $W_0$  menor que 1,5 mm/seg não se pode usar um pó de hematita com essa granulometria, em baixas concentrações; êle deve ser reduzido a um maior grau de finura. Êsse seria o primeiro método que, entretanto, é anti-econômico e sem possibilidade industrial.

b) Suponhamos agora que no líquido de suporte da mistura, se aumente a concentração do pó. Digamos que se tenha uma concentração  $p$  em pêsos que corresponderá a uma concentração  $Y$  em volume verdadeiro. A essa concentração, a mistura ou polpa possuirá um pêsos específico  $\gamma$ . A relação entre  $p$ ,  $\gamma$  e  $Y$  será:

$$Y = \frac{p\gamma}{s} \quad (3)$$

Um grão de minério de diâmetro  $d$ , possuirá nessa polpa uma velocidade de decantação  $W$ , que se expressa pela fórmula

$$W = K W_0 \quad (4)$$

sendo  $K$  um coeficiente de correção<sup>8</sup>, função da concentração  $Y$  e dado aproximadamente por

$$K = (1-Y) (1-2,5Y) (1-Y^{2/3}) \quad (5)$$

Na realidade os valores experimentais de  $K$  são menores do que os dados por essa relação, conforme exemplos do quadro II seguinte:

Y %	p %	Valores de K	
		Experimental	Fórmula 5
8	3,2	0,50	0,60
12	40	x	0,47
16	49	0,29	0,35
22	60	x	0,11

Conclui-se assim que, com o aumento da concentração, será reduzida substancialmente a velocidade de queda das partículas. Êsse é o segundo método possível. Para exemplificar admitamos uma partícula de 200 mesh (0,74 mm) com  $W_0 = 10,4$  mm/seg. A velocidade de decantação dessa partícula num meio constituído de uma mistura de água e finos de minério numa concentração  $p = 60\%$ , será de

$$W = 0,11 \times 10,4 = 1,14 \text{ mm/seg}$$

valor êste menor do que 1,5 mm/seg, demonstrando que a polpa funcionará como uma mistura homogênea.

O esquema exposto não deve ser encarado com rigor, servindo apenas para explicar algèbricamente o funcionamento do segundo método. Em essência, procura-se apenas obstruir a sedimentação pelo aumento da concentração, produzindo com isso um decréscimo considerável na velocidade de queda de tôdas as partículas, devido à interação entre elas. Êsse efeito é ainda mais notável nas polpas formadas de misturas de partículas de vários tamanhos. Nêsse caso, que é o mais comum, pode-se dizer que as frações mais finas diminuem grandemente a velocidade de sedimentação das frações mais grossas, num processo similar à ação de flutuação em um "líquido pesado". Pode-se assim afirmar que as frações mais finas facilitam o transporte das frações mais grossas. Da constatação dêsse fato, conclui-se que a fixação de quaisquer valores, seja da velocidade de sedimentação, seja do tamanho das partículas, para se obterem misturas homogêneas, não terá nenhum sentido de exatidão para fins práticos, possuindo só uma significação teórica.

Nas misturas homogêneas a viscosidade do líquido — suporte é alterada em função da concentração.

Como o pó a ser transportado será sempre o produto de uma moagem, com partículas desde alguns micra até o limite superior desejado, concluímos que o segundo método para obter-se uma mistura homogênea, é o único possível na prática. Para o caso de finos de pelotização, a granulometria a ser obtida será de 80% abaixo de 325 mesh. Comprovando a explicação algébrica anterior, as experiências de laboratório confirmaram que a polpa obtida com êsses finos funcionará no escoamento como uma mistura homogênea e como tal deverá ser tratada. Portanto, apenas essas misturas vão nos interessar em nossos estudos. Além disso, outros fatores de ordem econômica, referentes ao consumo de energia necessária ao escoamento e à abrasão dos tubos, definem de uma vez por tôdas que sômente elas devem ser consideradas. Por êsse motivo não alongaremos a exposição que se segue sôbre as misturas heterogêneas.

B) *Misturas heterogêneas*<sup>1</sup> — Quando as partículas sólidas ultrapassam um determinado tamanho (o que corresponderá a ultrapassar a velocidade de decantação de 1,5 mm/seg) as misturas formadas com elas serão heterogêneas. O líquido de suporte conservará nêsse caso a sua individualidade e viscosidade. Deve-se notar que o líquido de suporte pode ser uma mistura homogênea, o que facilitará o transporte. Aqui vale também o princípio do líquido pesado, explicado para as misturas homogêneas, isto é, as partículas mais finas facilitam o transporte das mais grossas. Dentro dessa classificação, tendo em vista a lei da velocidade de queda no líquido-suporte, tem-se três tipos de partículas:

- a) que obedecem a lei de Stokes ou da primeira classe;
- b) que obedecem a lei de Rittinger ou da terceira classe;
- c) que obedecem uma lei intermediária entre a de Stokes e de Rittinger ou da segunda classe.

As partículas dessas misturas podem ser transportadas por suspensão total (sem depósito) ou com um depósito imóvel no fundo do tubo. A suspensão total é o modo característico de transporte das partículas de primeira classe; já as da terceira classe só são transportadas por saltação. Na saltação, os grãos sólidos movem-se por meio de uma série de saltos curtos e intermitentes.

#### 4. ESTUDO DAS PERDAS DE CARGA DAS MISTURAS HOMOGENEAS

Uma mistura homogênea em escoamento através de tubos, funciona como um fluido de uma só fase. Assim as leis hidráulicas, tanto para escoamento lamelar ou turbulento, aplicam-se ao cálculo das perdas de carga, conforme sumariamente passamos a ver.

a) *Escoamento em regime lamelar* — Método para determinação da viscosidade aparente.

Demonstra-se experimentalmente que a polpa em regime lamelar funciona como um fluido de Bingham. Na clássica experiência das placas paralelas para o estudo da viscosidade de um fluido colocado entre elas (fig. 2), a placa móvel gera na placa fixa uma tensão de cisalhamento  $\tau$ , que valerá

$$\tau = \mu \frac{dv}{dr} \quad (9)$$

para um fluido newtoniano e

$$\tau = \tau_y + \eta \frac{dv}{dr} \quad (7)$$

para um fluido de Bingham. Nessas expressões os símbolos significam:

$\frac{dv}{dr}$  = gradiente de velocidade transversal do escoamento;

$\mu$  = coeficiente de viscosidade absoluta;

$\tau_y$  = resistência tangencial limite que exprime a coesão que é necessário ultrapassar para produzir um deslocamento;

$$\eta = \frac{\tau - \tau_y}{\frac{dv}{dr}} = \text{coeficiente de rigidez.}$$

As retas das figs. 3 e 4 representam respectivamente as expressões (6) e (7) ou o comportamento de um fluido Newtoniano e um de Bingham, em escoamento lamelar. Vemos que cada ponto da reta da fig. 4 pode ser assimilado ao de um fluido Newtoniano de viscosidade aparente  $\mu'$ .

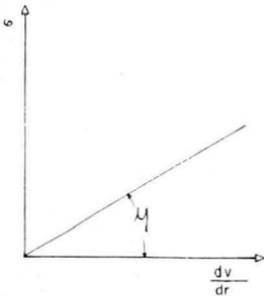


Fig. 3 — Fluido Newtoniano:  $\tau = f\left(\frac{dv}{dr}\right)$

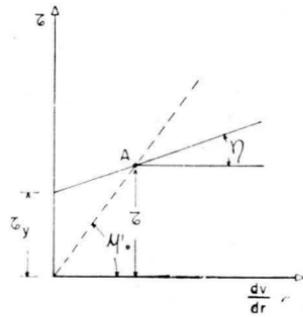


Fig. 4 — Fluido de Bingham:  $\tau = f\left(\frac{dv}{dr}\right)$

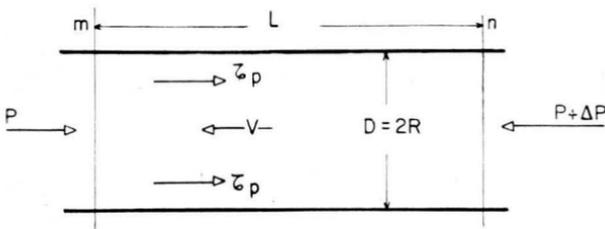


Fig. 5 — Escoamento lamelar. Perda de carga  $\Delta P$  em  $\text{kg/cm}^2$  entre duas secções  $m$  e  $n$  da tubulação.

Supondo um fluido de Bingham escoando em regime lamelar em um tubo de diâmetro  $D$ , (fig. 5) sendo  $v$  a velocidade média de escoamento e  $\tau_p$  a tensão de cisalhamento junto da parede do tubo, demonstra-se que

$$\tau_p = \frac{8v}{D} \eta + \frac{4}{3} \tau_y \tag{8}$$

Essa expressão representada gráficamente (fig. 6) será uma reta.

Da fig. 5, deduz-se

$$\Delta P \times \pi R^2 = \tau_p \times 2\pi RL \quad \text{ou}$$

$$\tau_p = \frac{\Delta P}{L} \times \frac{R}{2} \quad (9)$$

que nos prova ser  $\tau_p$  igual à perda de carga em  $\text{kg/cm}^2$  por metro de tubo multiplicado por uma constante igual à metade do raio do tubo.

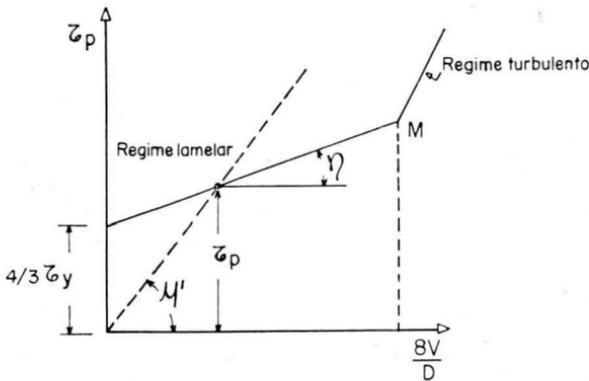


Fig. 6 — Escoamento lamelar. Determinação de  $\eta$  e  $\tau_y$  de uma mistura homogênea.

Como a velocidade média  $V$  do escoamento e a perda de carga  $\Delta P$  entre duas seções  $m$  e  $n$ , podem ser determinadas experimentalmente, com facilidade conclui-se que a reta da fig. 6, equação (8), pode ser traçada sem dificuldades. Portanto a partir de experiências simples de laboratório pode-se obter gráficamente os valores de  $\eta$  e  $\tau_y$ , características fundamentais do fluido em escoamento.

Da fig. 6, equação (8), obtém-se o valor de  $\mu'$  seguinte

$$\mu' = \eta + \frac{4/3 \tau_y}{(8V/D)} \quad (10)$$

Sendo  $\rho'$  a massa específica da polpa e tendo em vista a equação (10), o número de Reynolds,  $R$ , do escoamento, valerá:

$$R = \frac{V D \rho'}{\mu'} = \frac{1}{\frac{\eta}{VD\rho'} + \frac{4/3 \tau_y}{8V^2 \rho'}} \quad (11)$$

A partir das equações (8) e (9), sabendo que  $\Delta P = \gamma H$ , sendo  $\gamma = (\rho' g)$  e  $H$  a perda de carga em altura de mistura, depois de substituições e transformações algébricas evidentes, obtem-se

$$H = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad \text{com} \quad f = \frac{64}{R} \quad (12)$$

Conclui-se que  $H$  fica expresso na forma da lei de Darcy-Weisbach e  $f$  na da lei de Poiseuille, conhecidas da hidráulica, com a única condição de usar-se o número de Reynolds da expressão (11).

Observamos, entretanto, que o número de Reynolds da expressão (11) é geral, pois se

$$\eta = \mu; \tau_y = 0 \text{ e } \rho' = \rho$$

obtem-se o seu valor para um fluido Newtoniano, já que nestas condições a reta da figura 4 transforma-se numa reta idêntica à da figura 3.

b) *Escoamento em regime turbulento* — Definição da velocidade crítica de mudança de regime.

Para os produtos de uma moagem misturados com água, formando uma polpa com uma concentração  $p\%$  em pêso, é difícil manter-se o escoamento lamelar. Nesse caso, pode haver uma sedimentação lenta das partículas sólidas, provocando uma concentração maior de sólidos no fundo do tubo. Acima dêsse depósito, como consequência, estabelecer-se-á uma corrente turbulenta que colocará tôdas as partículas em suspensão, estabelecendo novamente o regime lamelar. O processo se repetirá indefinidamente, obtendo-se um escoamento intermitente de condições de transporte precárias.

Por êsse motivo, justifica-se a adoção exclusiva do escoamento turbulento para o transporte dessas misturas.

Em escoamento lamelar, vê-se pela expressão (8) que as perdas de carga são funções lineares da velocidade  $V$ . Porém a partir de um determinado valor de  $V = V_c$ , chamado velocidade crítica, elas tornam-se funções de  $V^n$ , sendo  $n$  aproximadamente igual a 2. Êsse resultado foi comprovado experimentalmente, para as misturas que desejamos transportar, como mostra o gráfico da fig. 7. Por êle se constata que as perdas de carga em altura de mistura, acima da velocidade  $V_c$ , coincidem com a reta de perda de carga em água clara. Acima da velocidade  $V_c$ , a mistura se escoam em regime turbulento e comporta-se como um fluido Newtoniano.

Assim, em escoamento turbulento, as perdas de carga, expressas em altura de mistura, valem:

$$H = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (13)$$

que é a clássica expressão de Darcy-Weisbach. Essa lei é conhecida já há bastante tempo para as misturas homogêneas. Assim a fig. 7 (a e b) é uma comprovação indireta de que as nossas polpas de minério de ferro, na granulometria de pelotização, escoam-se realmente como uma mistura homogênea.

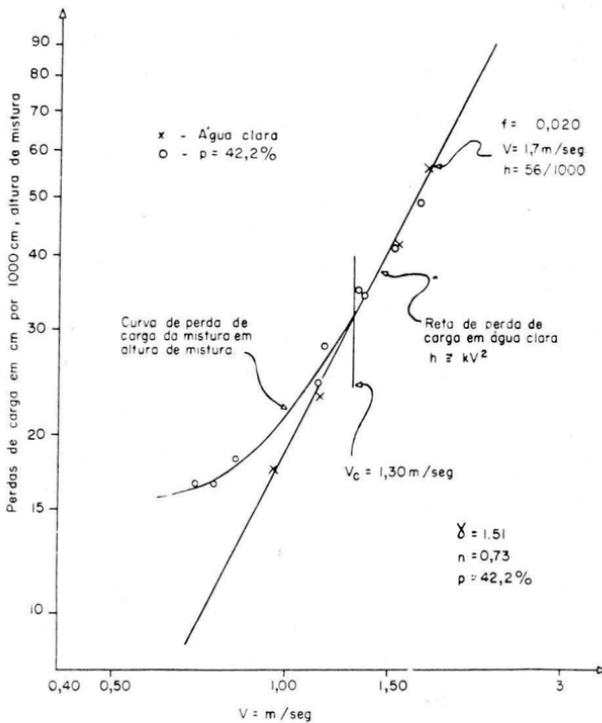


Fig. 7a — Curva de perda de carga para mistura de água e hematita moída em moinho de bolas.  
 Granulometria: 95% < 200 mesh; 80% < 325 mesh.  
 Tubo  $\varnothing$  52 mm: Aço comercial comum.

Uma outra maneira de interpretar a equação (13) e a fig. 7, é que, em escoamento turbulento, as perdas de carga em altura de mistura são idênticas às de água clara. Assim, tôdas as fórmulas para o cálculo das perdas de carga, em água clara, como

por exemplo a de William & Hazen, aplicam-se também às misturas homogêneas em regime turbulento.

Com isso pode-se dimensionar um mineroduto para o transporte de uma determinada polpa, da mesma maneira que se dimensiona uma tubulação forçada para o transporte de água, lembrando-se apenas que as alturas de perda de carga serão em alturas de mistura.

Para um tubo de diâmetro  $D_1$ , a velocidade  $V_c$  é uma característica da polpa a ser transportada e função da sua concentração  $p\%$ . Determinando experimentalmente, conforme gráfico da fig. 7 (a e b), o valor de  $V_c = V_{c1}$ , indica a passagem do regime turbulento para o lamelar, isto é, se  $V > V_{c1}$ , o regime será sempre

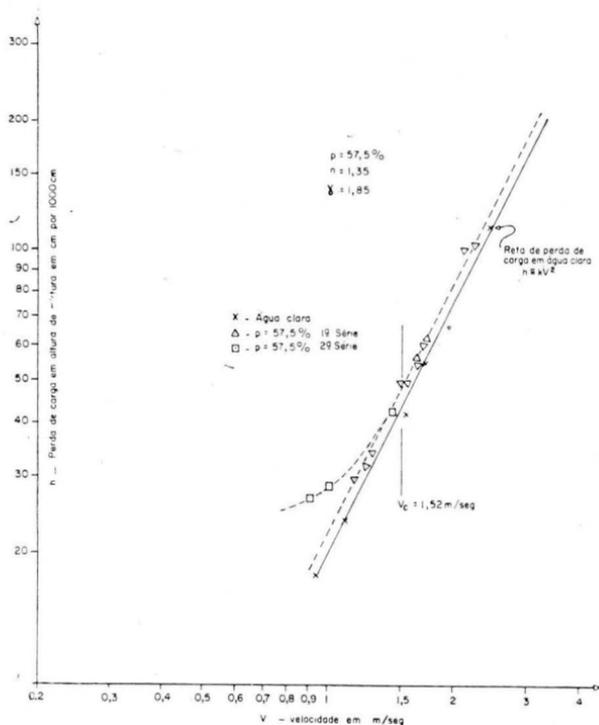


Fig. 7b — Curva da perda de carga para mistura de água e hematita moída em moimho de bola.

Granulometria: 95% < 200 mesh; 80% < 325 mesh.

Tubo  $\varnothing$  52 mm: Aço comercial comum.

turbulento. Para um outro tubo de diâmetro  $D_2$ , pode-se definir o valor de  $V_{c2}$  para a mesma polpa que se escoava no tubo de diâmetro  $D_1$ , para o qual  $V_{c1}$  foi determinado. Com efeito, como a polpa é a mesma, as massas específicas e viscosidade são idênticas. Sabe-se que a mudança de regime se processará sempre

para a mesma turbulência, o que significa que os números de Reynolds, de um caso e do outro, são iguais. Logo devemos ter:

$$\frac{V_{c1} D_1 \rho_1}{\mu_1} = \frac{V_{c2} D_2 \rho_2}{\mu_2}$$

Como

$$\rho_1 = \rho^2 \text{ e } \mu_1 = \mu_2$$

conclui-se que

$$V_{c1} D_1 = V_{c2} D_2$$

donde se obtém

$$V_{c2} = \frac{V_{c1} D_1}{D_2} \quad (14)$$

Nessa expressão (14) conhecem-se todos os termos do segundo membro, permitindo obter o valor da velocidade crítica  $V_{c2}$  para o tubo de diâmetro  $D_2$ .

Esse é um critério simples e que permite definir a velocidade  $V_c$ , sem o conhecimento de  $\eta$  e  $\tau_y$ , para um tubo de diâmetro qualquer a partir de experiências de laboratório com tubos de pequenos diâmetros. Conhecendo-se  $\eta$  e  $\tau_y$  pode-se definir  $\mu'$  e, a partir da condição de  $R = 2000$ , equação (11), obtém-se a velocidade crítica  $V_c$  de passagem do regime lamelar para o turbulento. Deve-se notar entretanto que se  $R < 2000$ , o regime será sempre lamelar. Se  $R > 3000$ , o regime será sempre turbulento. Para  $R$  entre 2000 e 3000, o regime situa-se numa zona de transição, onde pode ser lamelar ou turbulento.

O valor de  $V_c$ , definido a partir do método experimental da fig. 7 (a e b), corresponderá a  $R = 3000$ . Já o valor de  $V_c$  definido a partir de  $\eta$  e  $\tau_y$  corresponderá a  $R = 2000$ .

Para o cálculo de  $V_c$  a partir de  $\eta$  e  $\tau_y$ , basta fazer-se na expressão (11) do número de Reynolds para escoamento lamelar  $R = 2000$  e  $V = V_c$ . Tira-se daí o valor de  $V_c$ .

## 5. ESTUDO SUMÁRIO DAS PERDAS DE CARGA DE MISTURAS HETEROGÊNEAS<sup>1, 9</sup>

As polpas heterogêneas funcionam como misturas a duas fases; assim as leis de perdas de carga dos fluidos de uma só fase não mais se aplicam. No transporte dessas misturas, o diâmetro  $d$  da partícula vai influenciar o valor das perdas de carga.

As propriedades de decantação dessas partículas em água clara podem ser definidas pelo número de Froude de decantação  $F$  ou:

$$\sqrt{C'_x} = \frac{1}{F} = \frac{V \sqrt{gd}}{W} \quad (15)$$

sendo  $\sqrt{C'_x}$  o coeficiente de arrastamento fictício e  $W$  a velocidade de decantação de uma partícula em água clara.

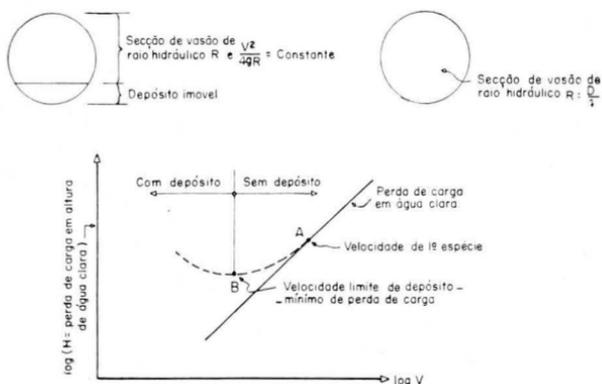


Fig. 8 — Misturas heterogêneas. Lei geral das perdas de carga.

Qualquer que seja o regime de escoamento, é de grande importância para definir o valor das perdas de carga o inverso do número de Froude da decantação e o número de Froude do escoamento.

sendo  $R = \frac{D}{4}$  o raio hidráulico do tubo de diâmetro

$D$  e  $V$  a velocidade média de escoamento, define-se como número de Froude do escoamento, a relação

$$\frac{V^2}{4gR} \quad (16)$$

Consideremos um tubo horizontal no qual circule uma mistura heterogênea de concentração volumétrica  $C\%$ , com uma velocidade de escoamento  $V$ . Suponhamos um outro tubo idêntico ao primeiro no qual circule água com a mesma velocidade  $V$ . Em cada um desses tubos realizemos medidas de perdas de carga por metro. Seja  $J$  a perda de carga no primeiro e  $S$  no segundo.

Sabemos calcular o valor de  $S$  devido ao escoamento de água clara. Se  $J$  é dado em altura de água clara, teremos:

$$J = S (1 + \varphi C) \quad (17)$$

Nessa expressão  $\varphi$  é um fator sem dimensão, função de

$$\frac{V^2}{4gR} \cdot \sqrt{C'_x}$$

Portanto para conhecer-se  $J$ , no transporte de uma determinada polpa heterogênea, basta definir-se o valor de  $\varphi$ , o que pode ser obtido pela lei empírica de Durand-Condolios:

$$\varphi = K \left( \frac{s - \rho}{\rho} \right)^{3/4} \left( \frac{V^2}{4gR} \sqrt{C'_x} \right)^{-3/2} \quad (18)$$

sendo  $K$  uma constante aproximadamente igual a 120.

A figura 8 nos dá a lei geral de perda de carga para uma polpa determinada. Para velocidades maiores do que a do ponto A, as perdas de carga em misturas,  $J$ , são iguais às de água clara, o que impõe ser  $\varphi C_s = 0$  expressão (17).

Inicialmente consideramos um tubo horizontal; se o tubo fôr inclinado de um ângulo  $i$  sobre a horizontal, a lei da expressão (18)

continua a ser válida desde que se divida  $\sqrt{C'_x}$  por  $\cos i$ . Isto nos leva a concluir que para um tubo vertical  $\varphi = 0$  ou que  $J = S$ .

## 6. JUSTIFICATIVA PARA O USO DE POLPAS COMPOSTAS APENAS COM FINOS DE PELOTIZAÇÃO SOB O ASPECTO DAS PERDAS DE CARGA NO TRANSPORTE <sup>1</sup>

Pelo estudo sumário das leis do transporte hidráulico, explicadas anteriormente, pode-se calcular as perdas de carga para alguns tamanhos de partículas, por exemplo:

- a) grãos finos, produtos de uma moagem para pelotização, que como vimos, irão formar com água uma polpa homogênea;
- b) grãos pertencentes à primeira classe das misturas heterogêneas, com um tamanho representativo de 0,061 mm.

Suporemos o transporte de 6.200.000 t anuais de minério de ferro em cada um dos exemplos acima, com uma concentração de polpa  $p = 50\%$  em pêso e a 360 km de distância. O quadro III

resume os resultados dos cálculos e nos fornece, para ambos os casos, os valores das velocidades de transporte e das energias necessárias. Para o exemplo *b*, determinou-se teoricamente o funcionamento no ponto de mínimo consumo de energia <sup>1</sup>.

QUADRO III

Ex.	Tamanho da partícula	Tipo de mistura	Densidade de polpa (t/m <sup>3</sup> )	Diâmetro do tubo D (m)	Velocidade de transporte (m/seg)	Perda de carga para 360 km		Energia total consumida (CV)
						Altura de mistura (m)	Altura de água clara (m)	
a	0,050	homogênea	1,667	0,460	1,41	1875	x	9800
b	0,061	heterogênea	1,667	0,321	2,90	x	14400	45300

Nas misturas heterogêneas, quanto maior o tamanho das partículas da polpa, maiores serão os valores das perdas de carga. Considerando esse fato e analisando-se o quadro III, concluímos que, para o transporte a longa distância, estão excluídas as partículas que, com água, formem misturas heterogêneas. Essa conclusão dispensa justificativas, devido aos altos valores das perdas de cargas.

As velocidades mínimas, sem depósito, também serão tanto maiores quanto maiores sejam os tamanhos das partículas. Assim, para as misturas heterogêneas, as velocidades mínimas serão muito altas criando não só inconvenientes hidrodinâmicos devido aos golpes de ariete, como também promovendo altas abrasões dos tubos e bombas.

Já para as misturas homogêneas, a velocidade, a perda de carga e conseqüentemente a energia total consumida, situam-se em níveis que podem ser classificados como perfeitamente aceitáveis. Além desse fato, as experiências de desgaste dos tubos (citadas adiante) mostraram que as polpas com os finos de pelletização provocam usuras muito baixas em tubos de aço comercial comum.

Justifica-se assim a conclusão de que só as misturas homogêneas devem ser consideradas nos casos de transporte a longas distâncias. As misturas heterogêneas podem ser, e realmente o são, transportadas a distâncias curtas, como por exemplo, nas

minas, nos engenhos de tratamento e em algumas aplicações envolvendo condições peculiares.

## 7. CONCENTRAÇÃO A SER UTILIZADA NO TRANSPORTE

Um parâmetro importante da polpa a ser transportada é a concentração  $p$  de partículas sólidas na mistura. A limitação do seu valor pode ser realizada pelos aspectos seguintes:

- a) Concentração mínima para obstruir a sedimentação e conseguir-se o funcionamento da polpa como uma mistura homogênea. Conforme já vimos, quando tratamos das misturas homogêneas, há necessidade de um valor mínimo para a concentração, de tal maneira que a velocidade  $W$  de decantação das partículas seja igual ou menor do que 1,5 mm/seg. Para as misturas com finos de pelotização, dentro desse critério, o mínimo de concentração é da ordem de 45% em peso.
- b) Concentração máxima para minimizar a quantidade desgastada no tubo durante o transporte, por tonelada anual transportada<sup>11</sup>. Quanto maior a concentração, menor será a relação:  $\frac{\text{usura}}{p}$
- c) Concentração ótima sob o aspecto da energia consumida no transporte, devido às perdas de carga. Demonstra-se que, com o aumento da concentração  $p$ , uma diminuição da relação:  $\frac{\text{energia consumida}}{p}$  até um valor mínimo para  $p$  em torno de 55%.
- d) Limite máximo da concentração, tendo em vista a viscosidade da polpa.

Em ensaios com viscosímetros de rotação, tipo Stormer, nos quais a única variável é a concentração, encontram-se os resultados dos quadro IV<sup>10</sup>. Nesse quadro, a viscosidade é dada como um aumento percentual em relação àquela de  $p = 0$  ou seja em relação à água pura. Analisando-se o quadro, conclui-se que, a partir de  $p = 60\%$ , a viscosidade cresce rapidamente para pequenos acréscimos da concentração.

Considerando que, quanto maior a viscosidade da polpa em relação à água, maiores serão os valores das energias consumidas no transporte, e que há também possibilidade de variações na concentração durante a operação do mineroduto, estabelecemos a condição seguinte:

“A concentração  $p$  deve possuir um valor máximo, de tal forma que até êle a viscosidade da polpa não sofra grandes alterações para ligeiros aumentos da concentração”.

Para satisfazer com segurança essa condição, do quadro IV deduzimos que a concentração p deve ser no máximo igual a 60%.

QUADRO IV

Concentração p	Pêso específico da mistura	Percentagem de aumento da viscosidade em relação à água
29%	1,302	3,8%
42%	1,506	4,8%
50%	1,667	5%
60%	1,923	5,5%
66%	2,119	12,5%
70%	2,300	65 %
73%	2,400	200 %

Da análise que acabamos de expor podemos concluir que se pode usar, para um projeto industrial, o valor  $p = 50\%$ , que estará satisfazendo à condição  $45\% < p < 60\%$  e que estará próximo do ótimo sob o aspecto de consumo de energia.

## 8. ESTUDO DO DESGASTE DO MINERODUTO POR MÉTODO RADIOATIVO

*Considerações Gerais* — Pode-se afirmar que a determinação do desgaste interno da tubulação é um dos problemas fundamentais no estudo da possibilidade econômica de um mineroduto. Além da espessura estrutural da tubulação, deve-se determinar, e lhe acrescentar, uma espessura que será sacrificada durante o tempo de uso do mineroduto.

Os métodos usuais para se conhecer o desgaste envolvem, quando são possíveis, pesagens do sistema antes e após a movimentação do material abrasivo. Isto acarreta longos períodos de circulação, desmontagem do sistema, limpêsa cuidadosa e pesagem de precisão. Além disso, os resultados obtidos não são perfeitamente reprodutíveis. Todos êstes problemas são evitados pelo emprêgo de um método que utilize radioisótopos. O material circulante desgasta uma peça radioativa (pequeno trecho da tubulação experimental), retirando dela partículas que são arrastadas pelo fluxo. Para medir-se o desgaste, basta levar amostras do material circulante a um detetor de radiação. Outro método de medida seria a imersão do detetor no material circulante. Pode-se medir assim 5 microgramas de ferro.

Há vários métodos para obter a peça radioativa a introduzir no sistema:

- a) Bombardeando a peça em acelerador de partículas. Neste caso, pode-se tornar radioativa apenas uma pequena parte do alvo.
- b) Executando eletrodeposição de radioisótopos sobre a peça em estudo. Este processo obriga à suposição de que a camada depositada vai se comportar do mesmo modo que a peça original. Como esta hipótese é sempre duvidosa, o método só é usado em casos extremos.
- c) Adicionando um radioisótopo ao material fundido que vai ser transformado na peça em estudo.
- d) Ativando simplesmente a peça em um reator nuclear.

Utilizou-se este último processo, porque pode-se confiar em que a peça totalmente radioativa se comportará exatamente como outra parte qualquer do circuito, e, além disto, pelas facilidades experimentais de que dispomos.

*Método Geral* — A instalação experimental é constituída por tubos de aço, material estrutural naturalmente indicado, em circuito fechado. Nêle circula, por meio de bombas, uma suspensão aquosa de minério de ferro pulverizado. Um pequeno trecho destes tubos é introduzido em um reator nuclear para fornecer a peça radioativa. Essa irradiação não altera as propriedades físicas e químicas do tubo, no que interessa à nossa experiência.

A determinação do desgaste é feita pela retirada periódica de amostras do material circulante, que são sêcas, colocadas em tubos de polietileno de 10 cm<sup>3</sup> e levadas ao detetor de radiação (cintilador com cristal de poço de NaI (TI) com 1 3/4" × 2"). O método de amostragem permite longas contagens do material estudado (determinação da quantidade de ferro desgastado da tubulação), dando grande precisão estatística. Esta é também melhorada por ser a contagem feita em laboratório afastado da instalação radioativa, diminuindo a radiação de fundo do detetor e evitando a introdução nêle de pulsos provenientes de motores ou outros aparelhos eletromagnéticos.

*Traçador utilizado* — Os principais radioisótopos produzidos pela irradiação do tubo são Fe-55, o Fe-59 e o Cr-51. O primeiro dêles emite radiação de baixa energia, não sendo detetável nas condições experimentais utilizadas. O Cr-51 e o Fe-59 são ambos contados. O mais importante dêles, pela quantidade inicial de material inativo é o Fe-59. Este radioisótopo possui meia-vida de 45,6 dias, isto é, depois dêste período a sua radioatividade cai à metade de seu valor inicial. A meia vida do Fe-59 permite assim a realização de várias experiências empregando um único tubo radioativo, o que é útil para a verificação da coerência dos resultados. O espectro de desintegração do Fe-59 é o seguinte:

Beta 0,27 (46%); 0,46 (54%) e outros (Mev)

Gama 0,19 (2,8%); 1,10 (57%) e 1,29 (43%). Mev.

permitindo, pois, fácil detecção. Tem como desvantagem principal a sua baixa seção de choque para ativação por neutrons, requerendo tempos relativamente longos de irradiação.

*Detalhes experimentais* — Foram três as instalações usadas (fig. 9). A primeira foi utilizada apenas para um dimensionamento do trabalho. Constituiu de tubos de 2" de diâmetro, em ferro fundido, com 44 metros de comprimento. A segunda instalação foi executada com tubos de 1", com 18 m de comprimento. Foram intercalados nestas instalações tubos radioativos. A terceira instalação foi idêntica à segunda, porém sem inclusão de tubo radioativo. Para movimentação da lama usou-se bomba centrífuga de eixo vertical em tôdas as instalações.

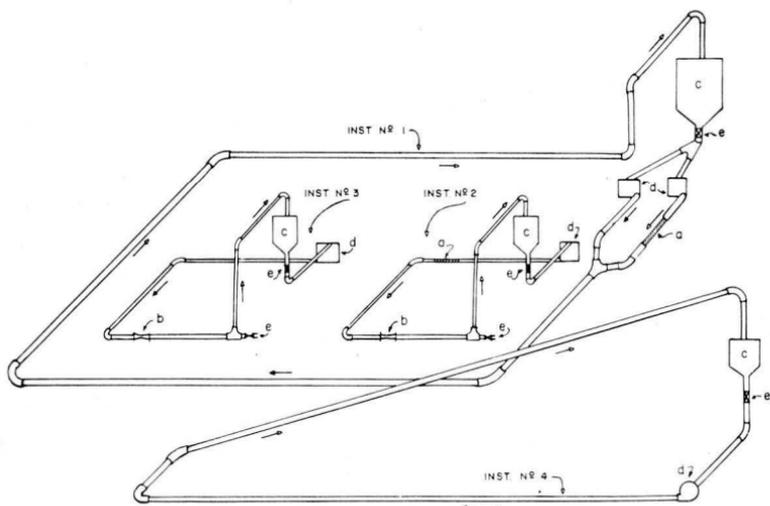


Fig. 9 — Instalações experimentais para determinação do desgaste e tamponamento em tubos transportadores de finos de minério de ferro em suspensão aquosa. a — Tubo radioativo; b — Venturi; c — Caixa de acumulação; d — Bomba; e — Válvula.

Os tubos radioativos foram quatro, com comprimento variáveis entre 56 e 80 cm. Três deles foram irradiados no reator do Instituto de Pesquisas Radioativas e um no Instituto de Energia Atômica em São Paulo, ambos do tipo piscina. As características principais destes tubos estão apresentado no quadro V.

Para se calcular a radioatividade total necessária para a execução das experiências, é necessário um dado inicial sobre o desgaste da tubulação. Esse dado não foi encontrado em artigos

técnicos, obrigando-nos a arbitrá-lo. Nossa hipótese foi de que metade da parede do tubo (de espessura  $\cong 2$  mm) se desgastaria com 5 anos de trabalho. A partir desse valor, calculamos o tempo de irradiação do tubo para dar uma radioatividade tal que pudéssemos retirar amostras do circuito em intervalos de algumas horas. Com o primeiro tubo radioativo e utilizando o circuito n.º 1 realizamos uma experiência que nos permitiu determinar os detalhes necessários. Verificamos que poderíamos tomar amostras com intervalos curtos (30 minutos) e obter respostas crescentes no detector de radiação, sem tempos de contagem por amostra excessivamente longos (10 minutos). Pudemos então irradiar novos tubos e realizar um total de 20 experiências de desgaste, tôdas elas realizadas no circuito 2 e 3.

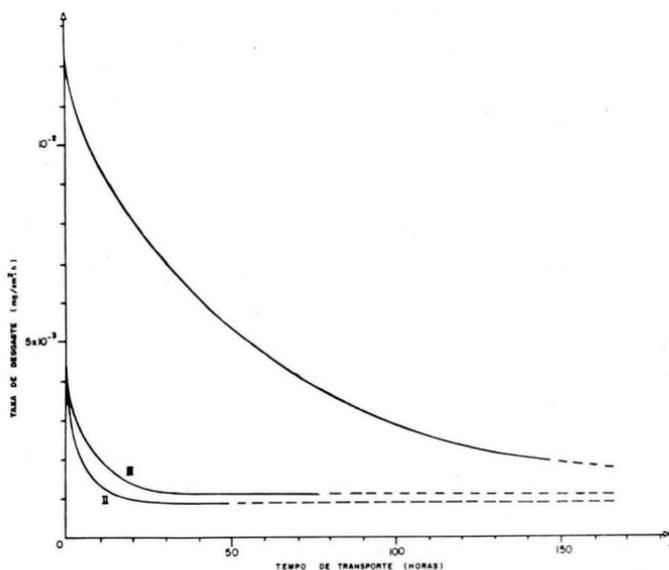


Fig. 10 — Desgaste em tubos transportadores de finos de minério de ferro em suspensão aquosa.

*Irradiação dos tubos* — Devido ao tamanho e à massa dos tubos, a irradiação no reator do I.P.R., de pequena potência de operação (30 kW), requereu certos cuidados. No entanto conseguiram-se resultados satisfatórios.

*Fator padrão* — Dois problemas ainda existiam. O primeiro era reduzir a contagem obtida de cada amostra à massa de aço desgastado. O segundo era corrigir o decaimento radioativo do tubo, para obtenção de dados referentes todos a um único dia de trabalho. Este último problema é dificultado pela existência em cada amostra de outros radioisótopos que não o Fe-59 e, portanto,

de energias e de meias vidas diferentes. Como solução, no interior de cada tubo foram irradiadas aparas obtidas no seu usinamento. Qualquer variação ocorrida durante a irradiação afeta tanto o tubo como as aparas. Após a saída do reator, estas aparas são pesadas e dissolvidas em ácido clorídrico a quente; o volume é levado então a 250 ml com água. Alíquotas de 2 ml da solução resultante são pipetadas e misturadas com minério inativo, dando os "padrões". Conhecendo-se a massa de aço contida em cada padrão e a contagem dêle resultante, uma regra de 3 permite determinar qual a quantidade de aço correspondente à contagem dada por uma amostra.

A correção do decaimento radioativo é feita multiplicando-se a contagem de cada amostra pelo "fator padrão", onde

$$\text{"fator padrão"} = \frac{\text{contagem do padrão no 1.º dia de trabalho}}{\text{contagem do padrão no dia em estudo}}$$

*Resultados* — O desgaste medido pelo processo acima engloba tanto a parte devida à abrasão como a parte produzida pela corrosão química. O desgaste total é evidentemente a soma destas duas parcelas.

A corrosão é um fenômeno complexo, sendo difícil separar seus resultados dos produzidos pela abrasão. No caso, o problema é dificultado pela circulação do minério, impedindo que um teste estático empregando um tubo radioativo seja representativo. Além disso, a instalação funciona em condições mais rigorosas do que as de funcionamento real, já que há introdução contínua de oxigênio no circuito. Procuramos, no decorrer dos trabalhos, manter a taxa de corrosão constante, controlando o pH, e  $E_H$  e o oxigênio dissolvido contido na suspensão. Projetamos adicionar ao circuito em próximas experiências um inibidor de corrosão e verificar sua influência no desgaste.

A abrasão é função de vários fatores

$$A = A (V^3, C, m, t, D, d) \quad \text{onde:}$$

V = velocidade de transporte da suspensão

C = concentração da suspensão

$$\left( \frac{\text{pêso do minério}}{\text{pêso do minério} + \text{pêso da água}} \right)$$

m = material dos tubos

t = tempo de funcionamento

d = dureza dos grãos do minério

D = diâmetro dos grãos do minério.

Considerações citadas no início deste trabalho nos fizeram fixar vários destes parâmetros no decurso das experiências, variando apenas  $D$ , ou seja, o diâmetro do grão.

Verificamos que um aumento do tamanho dos grãos de minério circulante (Hematita) provoca um aumento da taxa de abrasão. No caso em estudo, esta granulometria é fixada pelo fato de se transportar material para pelotização ( $80\% < 325$  mesh).

Além disso, foram feitos testes nos quais o minério era previamente circulado na instalação auxiliar sem tubo radioativo (n.º 3) durante períodos determinados de tempo (48 h). A finalidade destes testes foi determinar porque as curvas de desgaste obtidas apresentavam a forma mostrada na fig. 10, curva I, quadro VI, com uma parte inicial de forte inclinação e uma tendência final à estabilização.

A hipótese feita é que os grãos vão se arredondando durante a circulação até atingirem uma forma aproximadamente estável. De fato, a circulação prévia durante 48 horas (fig. 10, curva II), reduziu a inclinação da parte inicial da curva, chegando-se mais rapidamente à estabilização.

QUADRO V  
CARACTERÍSTICAS DOS TUBOS IRRADIADOS

TUBO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA					COMPR (mm)	PÉSO (g)	DIÂMETRO (mm)		ATIVIDADE ESPERADA $\mu\text{C/g de Fe-59}$	DUREZA (MOHS)
	% C	% Mn	% P	% S	% Si			INTERNO	EXTERNO		
1	—	—	—	—	—	560	654,0	26,3	29,9	3	2 - 3
2	0,21	0,27	0,013	0,020	—	800	667,2	29,5	31,9	5	5
3	0,22	0,48	0,019	0,013	0,27	700	546,0	27,1	29,5	20	5

Dai se conclui que o pipeline terá em seu início duração menor do que em seu final, resultado que pode ter grande importância prática.

Outro teste executado referiu-se ao tipo de moagem empregado para reduzir os grãos à granulometria de pelotização. O minério foi moído a úmido em moinho de bolas e a seco em moinho de disco. Concluímos que a moagem em moinho de bolas é a mais indicada em relação ao desgaste (fig. 10, curvas III e I).

Os valores iniciais da taxa de usura para cada experiência são bem diferentes entre si. No entanto, com o tempo de transporte os valores desta taxa tendem a se aproximar (fig. 10), obtendo-se valores finais dentro de uma faixa estreita.

*Tempo de vida* — De posse da taxa de desgaste, dada em  $\text{mg/cm}^2 \cdot \text{hora}$  (fig. 10), o cálculo da duração da tubulação é simples. Como medida de segurança, utilizamos, para o cálculo da vida da instalação, a taxa máxima de desgaste que é a do

início do transporte. Caso seja desejado, é possível calcular a usura após um percurso qualquer do minério na tubulação, considerando-se a taxa de desgaste no ponto correspondente da curva. Aproximadamente, o decréscimo da espessura da parede do tubo é obtido dividindo a taxa máxima de desgaste pela densidade do material do tubo. (Quadro VI)

QUADRO VI  
CARACTERÍSTICAS DAS EXPERIÊNCIAS

CURVA	GRANULOMETRIA DO MINÉRIO (HEMATITA)	MOAGEM	TEMPO DE PRE-CIRCULAÇÃO HORAS	CONCENTRAÇÃO	VELOCIDADE MÉDIA m/seg	TAXA MÁXIMA DE DESGASTE (mg/cm <sup>2</sup> . h)	DECRÉSCIMO DA PAREDE (mm/g)
I	90% abaixo de 325 mesh	MOINHO DE DISCO	—	55%	2,2	$1,25 \times 10^{-2}$	0,140
	98% " " 200 "						
II	90% " " 325 "	" " "	48	55%	2,2	$4,00 \times 10^{-3}$	0,044
	98% " " 200 "						
III	80% " " 325 "	MOINHO DE BOLA	—	55%	2,2	$4,60 \times 10^{-3}$	0,050
	93% " " 200 "						

Todos os valores de desgaste obtidos mostram que, para o diâmetro usado, a tubulação para transporte de minério de ferro é economicamente viável. O diâmetro real da instalação é, de fato, muito superior ao empregado. Entretanto, os valores do tempo de vida encontrados são muito superiores àquêles que tornam o processo economicamente possível; além disso, não pudemos determinar razões físicas ou químicas que aumentassem grandemente a taxa de desgaste, para diâmetros maiores. Foi possível então um cálculo preliminar da tubulação real baseado nos valores determinados nesta série de testes.

## 10. DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO MÁXIMA PARA O MINERODUTO

A polpa, constituída de minério em pó em suspensão aquosa, comporta-se como um fluido homogêneo durante o movimento de transporte. Havendo uma parada acidental inicia-se imediatamente a decantação das partículas de minério. Quando o tubo está na posição horizontal as partículas decantam apenas com movimento vertical, mas estando o tubo inclinado, haverá, também, movimentação longitudinal, acarretando uma acumulação de sólidos no ponto mais baixo da tubulação ocasionando o seu tampoamento.

Com objetivo de bem conhecer o fenômeno estamos procedendo a experiências que determinam:

- Qual o mecanismo de decantação no mineroduto inclinado;
- Relação entre este mecanismo e a inclinação.

Nestas experiências, fazemos circular a polpa em um circuito especial (fig. 9, instalação 4) constituído por um tubo de 2 polegadas de diâmetro, com uma parte de aproximadamente 22 me-

tros que pode ser colocada na inclinação desejada. Após circulação e parada, são feitas gamagrafias em vários pontos da parte inclinada. Nas chapas reveladas vê-se claramente a variação da altura do depósito de acôrdo com o local. Na parte mais alta o depósito é pequeno aumentando no sentido descendente da tubulação.

Com os resultados dêste estudo, estaremos em condições de prever o que aconteceria no caso de uma parada acidental. O método normal para evitar os problemas acima mencionados é o da continuidade do escoamento e conseqüente limpeza com água, só então realizando a parada.

## 11. PROJETOS PRELIMINARES <sup>1</sup>

Tendo em vista os resultados dos estudos tecnológicos suscintamente relatados nos ítems anteriores, foi possível realizar ante-projetos de minerodutos, que partindo do Quadrilátero Ferífero demandem um ponto na costa atlântica. Para êsse fim, definiram-se as condições topográficas das possíveis locações e as condições altimétricas das jazidas. Uma pesquisa demonstrou que as últimas varam de 700 m a 1700 m; um grande número delas, tôdas boas jazidas, encontram-se entre as cotas 1200 e 1400 m acima do nível do mar.

As direções para o traçado preliminar foram também motivos de estudos, constatando-se:

- Se o traçado demandar para o Sul, a um ponto entre Angra dos Reis e São João da Barra, será necessária a intercalação de estações de bombeamento, devido às Seras da Mantiqueira e do Mar.
- Se o traçado demandar para Leste, as condições serão mais favoráveis por se ter que transpor, somente a Serra da Mantiqueira. Entretanto, essa cadeia de montanhas constitui-se numa verdadeira muralha, elevando-se até a altitude máxima do País, na Serra do Caparaó.
- Na direção Sudoeste, a partir do Quadrilátero, a Serra da Mantiqueira não apenas se aproxima da região de minério, como também apresenta diversas passagens em altitudes relativamente baixas. Ambos os fatos são de molde a facilitar sobremaneira a transposição do obstáculo, até o ponto de permitir inclusive o transporte apenas por gravidade e com um comprimento aceitável para a linha de tubos.
- Já para o Nordeste, embora o Vale do Rio Doce permita uma saída fácil do ponto de vista altimétrico, tem-se a desvantagem de um desenvolvimento exagerado para o mineroduto.

Se bem que o transporte com estações sucessivas de bombeamento seja perfeitamente possível, técnica e economicamente, damos especial destaque ao transporte por gravidade, que aproveita a energia potencial da localização altimétrica das jazidas do Quadrilátero. É dentro desse espírito que fizemos a análise acima.

Contudo, visando mostrar as vantagens econômicas do transporte por mineroduto, o Grupo de Trabalho realizou, em caráter preliminar, dois projetos: um por gravidade, e o outro com estações sucessivas de bombeamento.

a) *Projeto por gravidade* — Realizou-se uma locação preliminar, inclusive com cheques de campo nos pontos críticos, nos seguintes mapas básicos:

- Reconstituições aerofotogramétricas na escala 1:10000 com curvas de nível de 10 em 10 m, abrangendo o Quadrilátero;
- Mapas do Departamento Geográfico do Estado de Minas Gerais na escala 1:100.000, com curvas de nível de 50 em 50m;
- Mapas do IBGE na escala de 1:500.000, com curvas de nível de 100 em 100 m, utilizados para o trecho além da divisa do Estado de Minas.

A fig. 11 esquematiza o traçado em planta e em perfil. O ponto de partida foi tomado na cota 1.330, na Serra do Curral, a poucos quilômetros de Belo Horizonte. O caso estudado é um

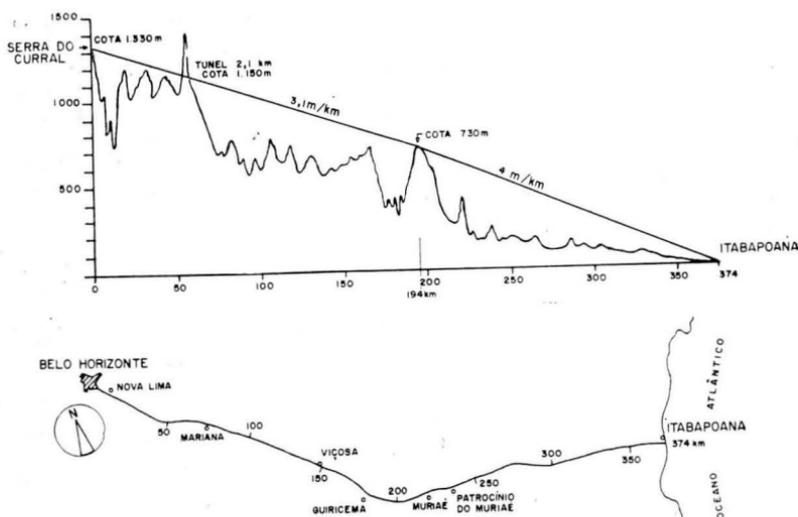


Fig. 11 — Locações preliminares para os ante-projetos do mineroduto. Transporte por gravidade. Escalas: horizontal 1:2.500.000; vertical 1:25.000.

dos menos favoráveis, pois a jazida escolhida está relativamente distante do litoral em relação a outras também possíveis e ainda transpõe a Serra Geral em um ponto particularmente difícil.

Nêsse projeto, a Serra da Mantiqueira é vencida em uma passagem próxima de GUIRICEMA na cota 730. A extensão total do mineroduto será de 374 km, com um único tunel no km 57, de 2,1 km de comprimento. A seguir, damos os dados básicos do projeto e os obtidos depois de cálculos hidráulicos:

— Granulometria do minério .....	Hematita moída para pelotização.
— Produção suposta para o funcionamento a 100% de eficiência ou 365 dias por ano .....	8.000.000 ton.
— Produção para 80% de eficiência ou admitindo 73 dias perdidos por ano .....	6.400.000 ton.
— Concentração de transporte em pêso .....	50%
— Pêso específico da polpa .....	1,667 ton/m <sup>3</sup>
— Vazão da polpa por seg. ....	0,303 m <sup>3</sup> /seg.
— Diâmetro dos tubos .....	22 polegadas
— Extensão da linha .....	374 km
— Espessura de sacrifício a ser acrescida à espessura estrutural das paredes do tubo para a durabilidade de 20 anos .....	0,47 cm
— Pêso de aço necessário para os tubos .....	58.300 ton.

Chamamos, com destaque, a atenção para os seguintes fatos:

- No ponto crítico, em Guiricema, na cota 730, haverá uma estação de quebra de greide hidráulico. (fig. 11)
- A tubulação entre o ponto crítico e o litoral, na extensão de 180 km, poderia ter o seu diâmetro ligeiramente menor. Porém, adotou-se um diâmetro único para toda a linha, por medida de segurança para o orçamento do custo de construção do projeto.
- O mineroduto projetado pode, numa expansão posterior, ter a sua capacidade de transporte aumentada pela intercalação conveniente de uma ou mais estações de bombeamento, que fornecerão energia necessária para os aumentos da velocidade de escoamento e da densidade da polpa.
- As bases admitidas para os cálculos foram bastante conservadoras e seguras. Assim, por exemplo, a concentração de transporte de 50% pode chegar até 60%<sup>9</sup> e a eficiência de operação, em vez de 80%, pode ser admitida como de 90%<sup>4, 9</sup>.

Com êsses valores (concentração 50% e eficiência 90%), encontra-se 10 Mt em vez de 6,4 Mt para a capacidade anual do mineroduto, ainda transportando por gravidade, com os mesmos tubos de 22 polegadas.

b) *Projeto com estações sucessivas de bombeamento* — Para permitir correlações com um caso concreto, principalmente para a análise econômica, admitimos por hipótese, a construção de um mineroduto que adotasse a mesma diretriz e diâmetro dos tubos do oleoduto Rio-Belo Horizonte da Petrobrás, porém com escoamento em sentido inverso. A locação do mineroduto acom-

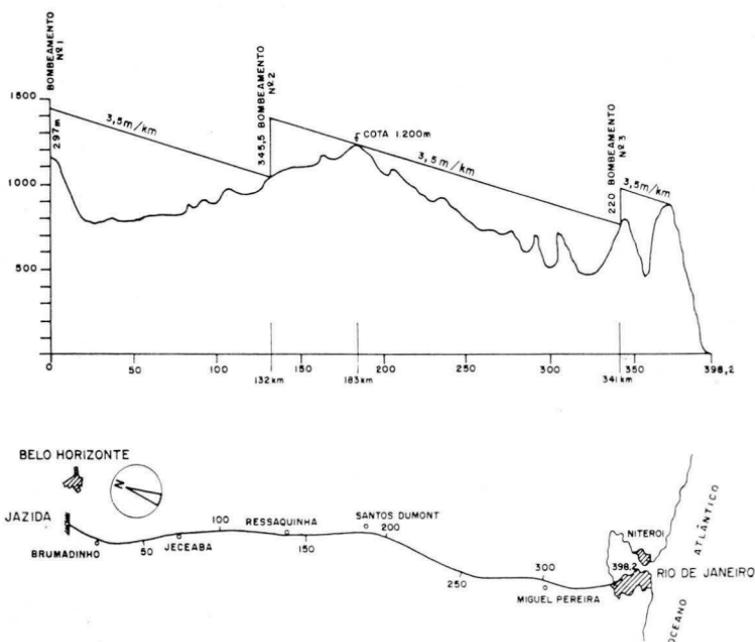


Fig. 12 — Locações preliminares para os anteprojetos do mineroduto. Transporte com bombeamentos. Escalas: as da figura 11.

panha a do oleoduto, apenas com ligeiras modificações para atender à especificação de um greide máximo de 11%. Manteve-se o mesmo terminal na Baía de Guanabara e colocou-se a estação inicial em uma cota de 1.200 m nas proximidades de Betim. Com essas modificações o mineroduto passou a ter 398,2 km ao invés dos 362 do oleoduto. Êsse traçado é classificado como desfavorável, pois não aproveita convenientemente os 1.200 m de energia disponível. A fig. 12 esquematiza em planta e em perfil o projeto.

A seguir damos os dados básicos do projeto e os obtidos depois de cálculos hidráulicos:

Granulometria do minério .....	Hematita moída para pelotização.
Diâmetro dos tubos .....	18 polegadas
Extensão .....	398,2 km
N.º de estações de bombeamento ...	3
Produção ótima a 100% de eficiência ou 365 dias p/ano de funcionamento .....	5.000.000 ton
Produção a 80% de eficiência ou supondo 73 dias perdidos p/ano ..	4.000.000 ton
Concentração de transporte em pêso	50%
Pêso específico da polpa .....	1 667 ton/m <sup>3</sup>
Vasão da polpa por segundo .....	0,191 m <sup>3</sup> /seg.
Energia para as bombas de recalque	5.300 cv
Espessura de sacrifício para durabilidade dos tubos de 20 anos ..	0,47 cm
Pêso total de aço para os tubos ..	58.850 ton

## 12. ESTIMATIVAS ECONÔMICAS <sup>1</sup>

a) *Custo de investimentos* — Supondo preços de dezembro de 1963, confeccionamos um orçamento detalhado para a construção de cada um dos minerodutos propostos. Tendo em vista a fig. 1 e o que expusemos no início deste trabalho, a finalidade do projeto é exclusivamente o transporte de finos para pelotização.

Assim, no custo de investimento, não entram os custos dos itens já exigidos pela pelotização independentes do sistema de transporte. Portanto não orçamos nem a moagem e nem o espessamento da polpa, pois são fases naturalmente exigidas para se chegar à pelota. Já para o mineroduto computamos os custos de todos os seus detalhes procurando obter valores sempre acrescidos de uma margem de segurança e ainda no final aumentamos 10% sobre o total a título de imprevistos.

Supuzemos a fabricação de todos os tubos no Brasil, inclusive com chapas nacionais de fabricação da USIMINAS. Para o projeto por gravidade tôdas as despesas serão em cruzeiros, não havendo necessidade de importação. Só para o projeto com bombeamento haverá necessidade de despêsas em dólares. O quadro VII resume os custos de investimento dos dois projetos.

QUADRO VII

Despesas em:	Por gravidade para Itabapoana		Com bombeamento para o Rio	
	Produção a 80% 6.400.000 t		Produção a 80% 4.000.000 t	
	10 <sup>6</sup> × Cr\$	10 <sup>6</sup> × US\$	10 <sup>6</sup> × Cr\$	10 <sup>6</sup> × US\$
Cruzeiros .....	25.100	×	23.500	×
Dólares .....	×	×	×	0,525
Total em cruzeiros	25.100	×	24.025	×

O dolar em dezembro de 1963 foi considerado a Cr\$ 1.000,00 (hum mil cruzeiros).

b) *Custo da operação* — Para cada um dos itens que compõem o custo de operação consideramos as seguintes hipóteses:

Ia — *Depreciação* — Utilizou-se o método do “sinking Fund” com uma taxa de 10% ao ano. Para o tempo de vida útil, admitiu-se o critério onerante de que todo o custo de construção, excetuando as bombas, deva ser renovado em 20 anos. Para as bombas admitiu-se que esse tempo fôsse de 10 anos.

Ib — *Custo do dinheiro ou juros* — Admitiu-se que 40% do custo de construção fôsse de capital próprio e 60% financiados. Os financiamentos em dólares vencerão juros de 6% ao ano e os em cruzeiros 12% ao ano. Os prazos foram tomados de 10 anos com 2 anos de carência correspondente ao período de construção.

#### II — *Encargos de operação:*

Ila — *Materiais para manutenção e reparação dos tubos, tanques, agitadores, etc.* Tomou-se um fundo anual de 2% do custo global de construção.

Ilb — *Materiais para manutenção e reparação das bombas.* Tomou-se 10% do custo global de instalação para cobrir esta despesa anualmente.

Ilc — *Salários* — Avaliou-se em 200 o número total de funcionários para operação e manutenção. Em dezembro de 1963, tomou-se o salário médio mensal sem encargos sociais de Cr\$ 60.000,00.

Ild — *Desmontagem e transporte dos tubos ao final de sua vida útil.* O custo global desse serviço foi rateado pela produção total durante 20 anos.

Ile — *Capital de giro* — Dimensionou-se o capital de giro necessário e os juros anuais correspondentes foram carregados na produção.

II — *Energia* — O preço da energia por kWh foi tomado a Cr\$ 10,00.

III — *Eventuais* — A soma dos itens anteriores acresceu-se 10% para eventuais.

O quadro VIII resume os custos de operação obtidos para cada um dos projetos estudados.

QUADRO VIII

N.º	Discriminação dos Custos	Eficiência 80%	
		6.400.000 t Por gravidade para Itaba- poana	4.000.000 t Com bombea- mento para o Rio
		Custo inicial 25,10 bilhões	Custo inicial 24,03 bilhões
1.º	Encargos de capital:		
	a) Depreciação das bombas ...	×	8,30
	b) Depreciação dos tubos .....	61,50	91,50
	c) Juros: Financiamentos em dó- lares .....	×	4,60
	Financiamentos em cru- zeiros .....	155,00	232,00
2.º	Encargos de operação:		
	a) Manutenção e reparo das bombas .....	×	13,20
	b) Manutenção e reparo dos tu- bos, tanques, agitadores ...	78,50	119,00
	c) Salários .....	31,90	76,50
	d) Energia .....	×	69,30
3.º	Desmontagem e transporte dos tu- bos no final da vida útil .....	11,20	19,30
4.º	Custo do capital de giro .....	9,20	24,10
5.º	Eventuais .....	34,70	65,90
	Custo do transporte de 1 tonelada em cruzeiros .....	382,00	723,70

Os resultados do custo de operação nos demonstram que o custo da tonelada transportada por mineroduto situa-se em tórno de 1/6 e 1/3 dos fretes ferroviários atuais, para transportes idênticos, respectivamente para os projetos por gravidade e com bombeamentos.

Considerando o dólar a Cr\$ 1.000,00, para dezembro de 63, obtemos os seguintes fretes, por mineroduto:

Projeto por gravidade . . . . . 0,164 cents por ton-milha.  
Projeto com bombeamento . . . . . 0,300 cents por ton-milha.

Nos Estados Unidos da América do Norte tem-se os seguintes fretes médios<sup>12</sup>:

Transporte ferroviário . . . . . 0,25 cents por ton-milha,  
Transporte fluvial e lacustre para  
distâncias maiores do que 300  
milhas (Grandes Lagos) . . . . . 1 cent por ton-milha;

que comparados àqueles do mineroduto, evidenciam o sentido econômico dêsse sistema de transporte, demonstrando a possibilidade dêle concorrer economicamente com o transporte por navios, em navegação interior. Esse fato econômico é ainda mais notável para o projeto por gravidade, conforme comparação dos valores obtidos.

Os resultados dessas estimativas econômicas, aliados aos resultados tecnológicos, nos demonstram a viabilidade do projeto mineroduto encaixado no esquema global (da mina ao terminal de embarque), conforme diagrama da fig. 1. Com êsse esquema avaliou-se que as pelotas produzidas serão no mínimo 2 dólares por tonelada mais baratas do que as produzidas no caso do sistema de transporte adotado ser o ferroviário. Portanto o sistema de transporte poderá reduzir bastante os custos internos, provando que o mineroduto contribuirá decisivamente para que as pelotas produzidas tenham maior poder competitivo no mercado internacional.

#### REFERÊNCIAS

1. LUIZ DE OLIVEIRA CASTRO — BERNARDINO PINTO CARNEIRO — *“Aspectos Técnicos e Econômicos do Transporte de Finos de Minério de Ferro por Mineroduto”* — Parte I e Parte II — Engenharia, Mineração e Metalurgia — Março, Abril, Maio/1964.
2. PAULO BOHOMOLETZ — *Industrialização dos Finos de Minério de Ferro — Pelotização* — Boletim da Associação Brasileira de Metais — n.º 78 — Vol. 19 — Setembro/1963.
3. *“Pelletising Capacity Expands”* — Mining Journal, London — April 17/1964.
4. *“Report to the Panel on Civilian Technology on Coal Slurry Pipelines”* — Department of the Interior — May/1962.
5. RALPH CONSTANTINI — *“A Case Study in Pipeline Transportation of Solids. The Challenge and the Promise with Beneficiated Iron Ore”*. AIME Mining Symposium, Duluth, Minn., January/1963.

6. LUDWIG W. KOCH — "Solids in Pipes" International Science and Technology, February/1964.
7. H. E. ROSE — *The Measurement of Particle Size in Very Fine Powders*. London — Constable & Company Ltd/1953.
8. R. J. TESTU — "Étude Théorique et Expérimentale du Mouvement des Corps Solides dans un Fluide" Révue de l'Industrie Minérale, Décembre/1958.
9. LUDWIG W. KOCH — "Solids Carrying Pipelines. What to consider in their Preliminary Design". Engineering and Mining Journal — Vol. 163, n.º 10 October 1962, pag. 74.
10. S. DE CHAWLOWSKI — Révue de l'Industrie Minérale — pag. 937, n.º Spécial — Décembre/1958.
11. BERGERON, P. — *Deuxième Journées de l'Hdraulique* — Société Hydro-technique de France (1962) 144/163.
12. MAP MR-2 — Iron ore trade Canada and the world — Mineral Resources Division Department of Mines and Technical Surveys — Ottawa, Canadá.