

CUSTOS DE CAPITAL E OPERACIONAIS DE USINAS DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIOS

São Paulo – 15 de outubro de 2020

Mauricio Guimarães Bergerman

Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo
– Escola Politécnica da USP

SUMÁRIO

2

- Fontes de informação
- Estimativa de capex e opex esperada para cada etapa do projeto
- Estimativa do Capex
- Estimativa do Opex
- Usinas de cobre no Brasil
- Exercício

FONTES DE INFORMAÇÃO

3

- Rudeno, V. The mining valuation handbook, 2012.
- Cost calculator – Infomine - <http://calc2015.costs.infomine.com/welcome.aspx>
- Ausimm, Cost estimation handbook, 2012.
- Mintek, Handbook on the Estimation of Metallurgical Process Costs, 1991.
- Mular, A. L.; Parkinson, E.A. Mineral Processing Equipment Costs and Preliminary Capital Cost Estimation, 1972.
- Fornecedores
- Observação: lembrar que dados da literatura são primeiras aproximações e sempre se referem a data de publicação / coleta dos dados. Considerar também as realidades cambiais de cada país.

ETAPA DO PROJETO

Table 3-1. Level of Project Development and Corresponding Aspects of the Business Case (AACE International, 2011)

Development Phase	Project Definition (%)	Capital Estimate	Capital Estimate Accuracy (%)	Scenario Options	Site Selection	Selling Prices	Input Prices	Operating Parameters
FEL1 Conceptual study	0-2	Screening, ballpark	-20 to +100	Two or more	Country	Generic, annual mean	Historical	Benchmarked
FEL2 Prefeasibility study	10-40	Budget	-10 to +30	One plus trade-off studies	Region	Consensus forecasts	Historical	Benchmarked vendor preliminary specifications
FEL3 Feasibility study	30-70	Definitive	-5 to +20	One	Specific site	Market study	Historical trending to forecast	Vendor specifications
FEL4 Implementation	90-100	Control	-3 to +15	-	-	Actual	Actual contracted input prices	Vendor specifications
Operations startup	100	-	-	-	-	Actual	Actual input prices	Vendor specifications
Operations	100	-	-	-	-	-	Actual input prices	Actual historical

TABLE 1.1
Generic study classification guide.

Terminology used in this handbook		Scoping study – Phase 1	Prefeasibility study – Phase 2	Feasibility study – Phase 3
Front end loading		FEL 1	FEL 2	FEL 3
Different titles that may be used to describe this level of study	Conceptual	Concept	Preliminary feasibility	Final feasibility
	Opportunity assessment	Order of magnitude (OOM)		Basic engineering
		Identification phase	Selection phase	Definition phase
	Screening	Scoping ^a		'Bankable' feasibility
	Scoping (see footnote)			Definitive feasibility
		Capacity factor	Equipment factor	Forced detail
		Preliminary evaluation	Intermediate economic study	
Estimate type (AACE)		Class 5	Class 4	Class 3
Expected accuracy range of capital cost	±35% to ±100% Typically ±50%	±30% to ±35%	±20% to ±25%	±10% to ±15%
Expected estimate contingency range	30% to 75%	20% to 35%	15% to 25%	10% to 15%
Level of definition (% of complete engineering (see Table 4.5))	Minimal, generally based on other operations, or in-house 'database'	1 - 2% Basic general layouts	10 - 15% Preliminary take-offs	15 - 25% Detailed drawings and take-offs
Typical estimating methodologies (but refer Table 4.5 for detail by line item)	Capacity factored Parametric models, judgement or analogy Stochastic estimating methods, including cost-capacity curves, and various factors	Equipment factored or parametric models. Some 'first principles' estimating related to early scope definition	Semi-detailed unit costs, and more deterministic estimating methods Preliminary MTOs (Some) budget pricing	More detailed unit costs and MTOs Budget prices and vendor quotes Higher degree of deterministic estimating methods Line items, and forced detail where definition is lacking

Notes: a. Although the term 'scoping study' can sometimes be used synonymously with a study at a level before FEL1, throughout the rest of this handbook, it is used to indicate a study generally before that of a prefeasibility study (PFS). FEL = front end loading (Independent Project Analysis Institute (IPAI)), MTO = material take-off.

ESTIMATIVA DE CUSTOS

6

- Custos de capital (Capex) e Operacional (Opex)
- Os custos de uma usina dependem de uma série de fatores, como (Rudeno, 2012):
 - ▣ Tipo de mineral;
 - ▣ Mina a céu aberto ou subterrânea;
 - ▣ Infraestrutura existente – energia, cidade, aeroporto, estradas, ferrovia;
 - ▣ Suprimento de água e energia;
 - ▣ Topografia;
 - ▣ Clima – chuva, neve, umidade, temperatura.

ESTIMATIVA DO CAPEX

7

- Regras de dedão:
 - Materiais com pouco processamento (carvão, óleo): custo por tonelada de ROM
 - Material com processamento (metais básicos): custo por tonelada processada na usina.
 - Ouro: custo por unidade produzida (ounce).
 - Observar que os valores variam muito – apenas referência para aproximações iniciais.

ESTIMATIVA DO CAPEX

8

□ Regras de dedão (base 2011 US\$):

Table 8.1: capital costs summary

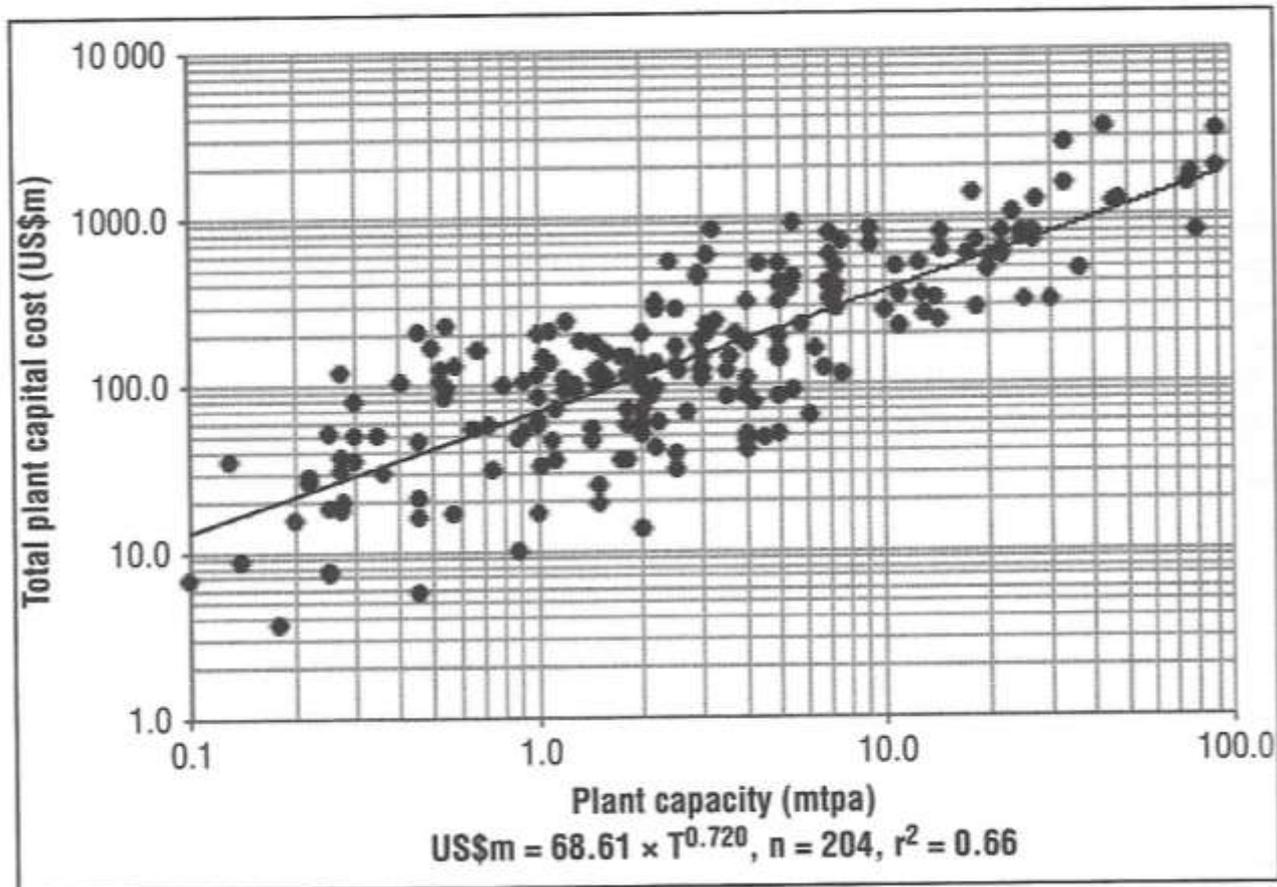
Commodity	Capital costs range/unit of annual production
Black coal	\$10/tonne to \$671/tonne
LNG	\$194/tonne to \$5 000/tonne
Coal seam methane	\$3m/Pj to \$10m/Pj
Copper	\$1833/tonne to \$14 400/tonne
Gold	\$104/ounce to \$2430/ounce
Iron ore	\$13/tonne to \$720/tonne
Lead-Zinc	\$310/tonne to \$3889/tonne
Mineral sands	\$250tonne to \$1233/tonne
Nickel metal	\$1800/tonne to \$59 204/tonne
Uranium	\$91/t to \$313/t

ESTIMATIVA DO CAPEX

9

- Regras de dedão (base 2011 US\$):

Figure 8.4: treatment total plant capital costs



ESTIMATIVA DO CAPEX

10

- Regras de dedão:
 - ▣ Regra dos seis décimos (six-tenths):

$$\frac{\textit{Custo da usina 1 (desconhecido)}}{\textit{Custo a usina 2 (conhecido)}} = \left(\frac{\textit{Capacidade 1}}{\textit{Capacidade 2}} \right)^{0,6}$$

ESTIMATIV

11

- Conceitual: Estimativas por equipamento principais e índices para demais itens

TABLE 1.2
Plant component ratio method (after Mular, 1978).

Notes	Capital cost estimate item	Multiplying factor (range)			Capital cost \$ M
		Min	Max	Factor used	
a.	Total direct cost of major equipment , roads, power line, major buildings, township, airstrip etc.				1000
	'Factored elements', such as:				
b.	Piping	7%	25%	15%	150
c.	Electrical	12%	25%	15%	150
d.	Instrumentation and control	3%	10%	5%	50
e.	Spares	1%	5%	2%	20
f.	First-fill	1%	3%	1%	10
	Infrastructure				
g.	Architectural and auxiliary buildings; minor infrastructue	7%	15%	9%	90
	Total direct cost for the plant				1470
	Indirect costs				
h.	Owners' costs	5%	15%	7%	103
i.	Freight and taxes	3%	10%	4%	59
j.	EPCM	5%	30%	18%	265
k.	Construction camp, temporary facilities, catering, etc	4%	10%	6%	88
	Total indirect cost for the plant				515
l.	Contingency (on direct and indirect)	15%	40%	30%	595
	Total installed capital cost for the plant				2580

- a. As derived by methodologies described in this handbook.
- b. Only for 'small' pipes and piperacks; larger pipes will normally be separately estimated under direct equipment costs.
- c. Electrical cabling; racking; connections; small motors, large and variable voltage variable frequency (VVVF) motors generally part of equipment.
- d. Instrumentation and control for minor aspects, not major capital expenditure (Capex) such as a supervisory control and data acquisition (SCADA) system.
- e. Dependent on project and strategic decisions on spares holding.
- f. Often calculated. Includes reagents and mill balls. Sometimes part of working capital.
- g. Minor buildings only; major buildings are normally separately estimated.
- h. May be very small for junior company, and significant cost for major players.
- i. Country and location dependent.
- j. Dependent on form of contract, complexity of project and location.
- k. Appropriate to the location and size of workforce.
- l. Usually derived on individual line items of direct cost depending on degree of definition. Variable depending upon study phase.

ESTIMATIVA DO CAPEX

12

- A fatoração dos demais custos em função do custos dos equipamentos varia de setor para setor. Exemplo para brita (Chaves, 2014):
 - equipamentos de processo - x
 - equipamentos elétricos - $e = 0,25.x$
 - Instrumentação $i = 0,05.x$
 - Tubulações $t = 0,02.x$
 - montagem mecânica $0,20.x$
 - montagem elétrica $0,25.e$
 - montagem de instrumentos $0,20.i$
 - Engenharia 7% do investimento total
 - Suprimentos 2% do investimento total
 - start up $0,5\%$ do investimento total

ESTIMATIVA DO CAPEX

13

- Pilha:
 - ▣ AU\$ 8 a 10 milhões por 100.000 t estocadas (volume total).
Considera alimentadores, etc.

- Moagem (base 2010)
 - ▣ Barras: 1,5 a 2,5 milhões US\$/MW (moinhos de 1 a 1,5 MW)
 - ▣ Bolas: 2,5 milhões US\$/MW (menores que 1 MW) a 0,8 milhões US\$/MW (maiores que 16 MW)
 - Custo total (prédio, lubrificação, resfriamento, bombas, ciclones, tubulação, elétrica): 2,2 a 3,5 o preço do equipamento (quanto maior o equipamento, menor o fator)
 - ▣ O custo de capital de um circuito completo com Vertimill de 2.3 MW é de aproximadamente A\$12 a 15 M (2012 costs).

ESTIMATIVA DO CAPEX

Table 1 – Rejeito

Tyler Mesh	Microns	Jar Mill Feed	15 Minutes	60 Minutes	90 Minutes	120 Minutes
6	3327	100.0	100.0			
8	2362	99.7	99.9			
10	1651	98.9	99.8			
14	1168	97.3	99.8			
20	833	95.0	99.7			
28	589	90.5	99.7			
35	417	85.0	99.6			
48	295	77.1	99.5			
65	208	66.8	98.4	100.0	100.0	
100	147	52.9	90.6	99.9	99.9	
150	104	41.5	75.6	99.7	99.9	
200	74	30.3	56.2	97.2	99.5	100.0
270	53	21.8	40.9	84.6	95.2	98.6
325	44	17.8	34.4	73.2	89.1	96.3
400	37	14.8	29.0	62.3	79.0	90.3
500	25	9.2	20.9	45.0	63.9	77.2
d80 (microns)		336.2	115.9	49.3	37.7	27.3
VTM Specific Energy (kWhr/mt)		0.00	2.10	8.42	12.62	16.83

Size Analyzes Reported as Cumulative Percent Passing

ESTIMATIVA DO CAPEX

15

□ Separação magnética:

TABLE 12.14
Magnetic equipment description.

Wet separation				
Field strength	Equipment term	Configuration options	Unit capacity	Feed particle size range (µm)
Low intensity 500 - 1 500 (gauss, G)	Wet drum mag separator (LIMS)	Single pass	-	-
		Double pass	15 - 20 t/h/m	20 - 1000
		Either mags or non-mag retreat	-	-
High intensity mag separator 1500 - 15 000 G	Wet high intensity mag separator (WHIMS)	Single pass	-	-
		68 mm width	15 - 25 t/h	20 - 850
		120 mm width rotors	30 - 50 t/h/machine	-
10 000 -12 000 G	SLon (brand)	Single pass	5 - 150 t/h	<13 000

ESTIMATIVA DO CAPEX

16

- Separação magnética:
 - ▣ Custo total: custo dos equipamentos x4

TABLE 12.15
Separation equipment costs – indicative only.

Magnetic separation	Cost ^a of each (A\$)
Low-intensity wet drums (3 m length drums) – double pass	125 000
Wet high intensity mag separator – 16 pile model – narrow rotor width	425 000
Wide rotor width	450 000
Low-intensity dry drums	
Rare earth drums (1 m length rolls) – double pass	90 000
Rare earth rolls (1 m length rolls) – double pass	135 000
Induced roll magnetic separators	150 000
High tension rolls, 250 mm dia, 1524 mm length	
Double pass	40 000
Triple pass	50 000
Electrostatic plates	75 000

a = These costs are included to provide working examples for this text. Prices should be confirmed with equipment suppliers prior to definitive estimates.

ESTIMATIVA DO CAPEX

17

- Flotação:
 - ▣ Aerador / condicionador: +10%
 - ▣ Prédio, tubulação, elétrica: +50%

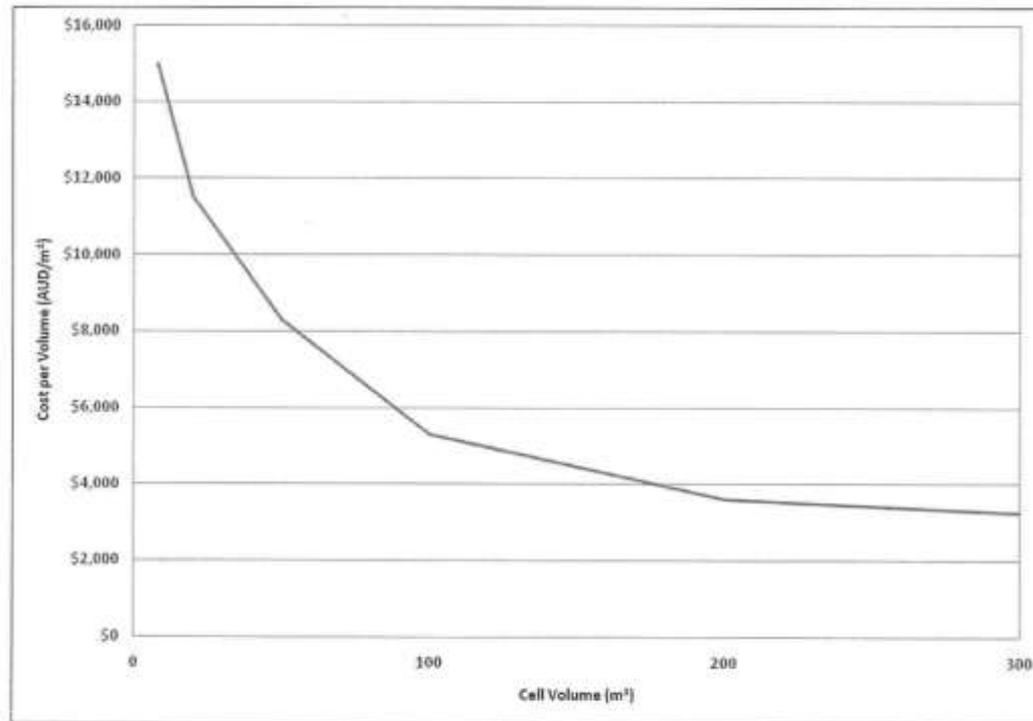


FIG 12.18 - Cost per volume for Outotec flotation cells.

ESTIMATIVA DO CAPEX

18

□ Espessamento:

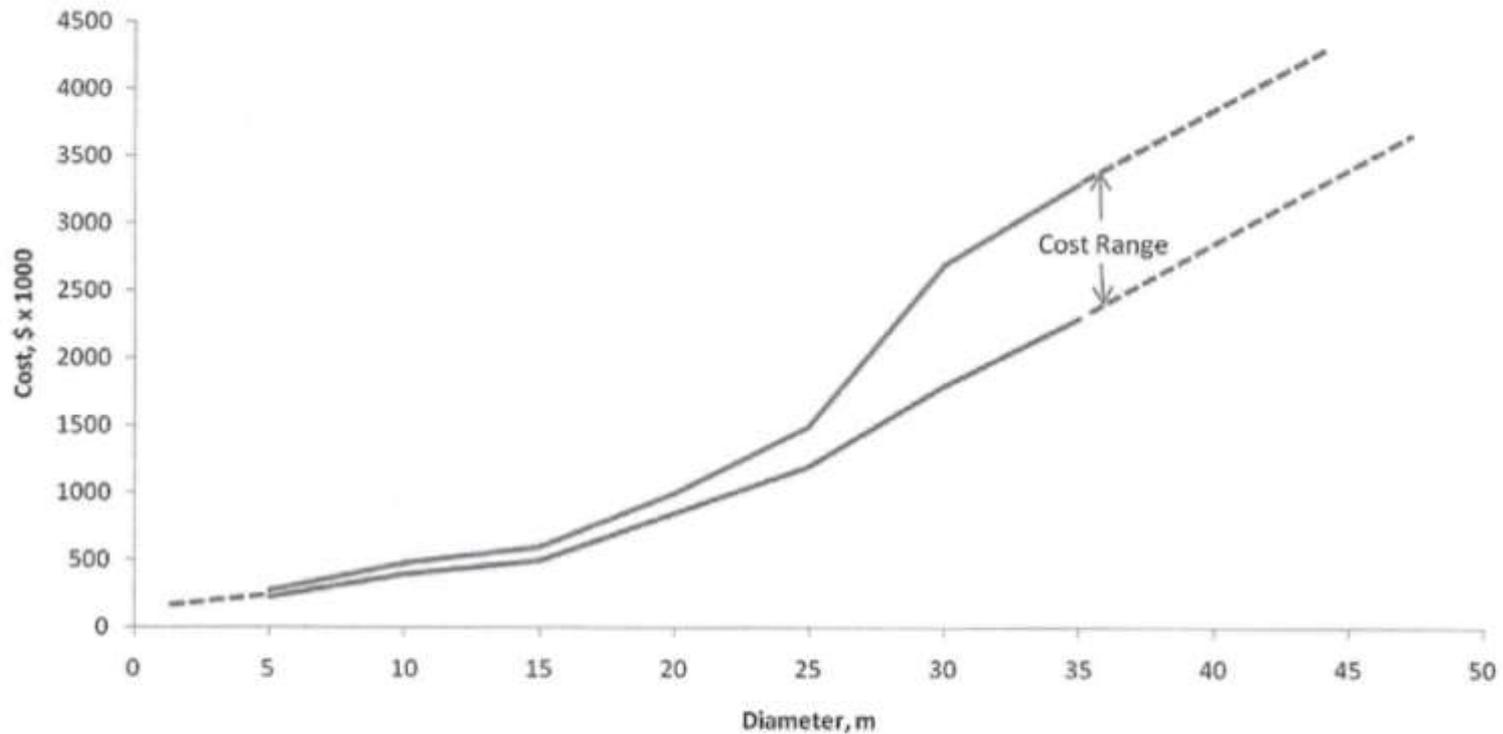


FIG 13.13 - Conventional and high-rate thickener capital cost.

ESTIMATIVA DO CAPEX

19

□ Espessamento:

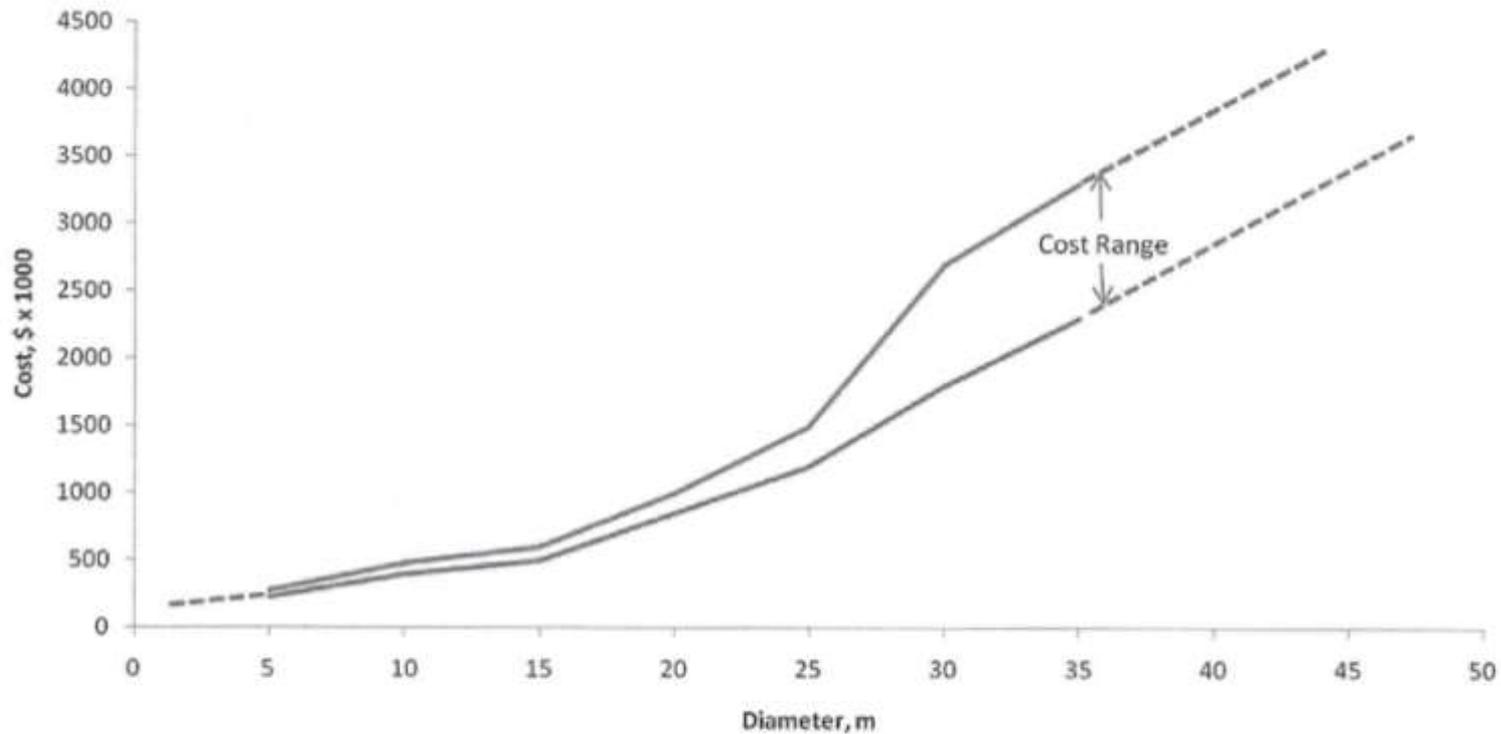


FIG 13.13 - Conventional and high-rate thickener capital cost.

ESTIMATIVA DO CAPEX

20

□ Filtro:

- ▣ Tecidos / placas: +15%
- ▣ Bomba / compressor: +20%

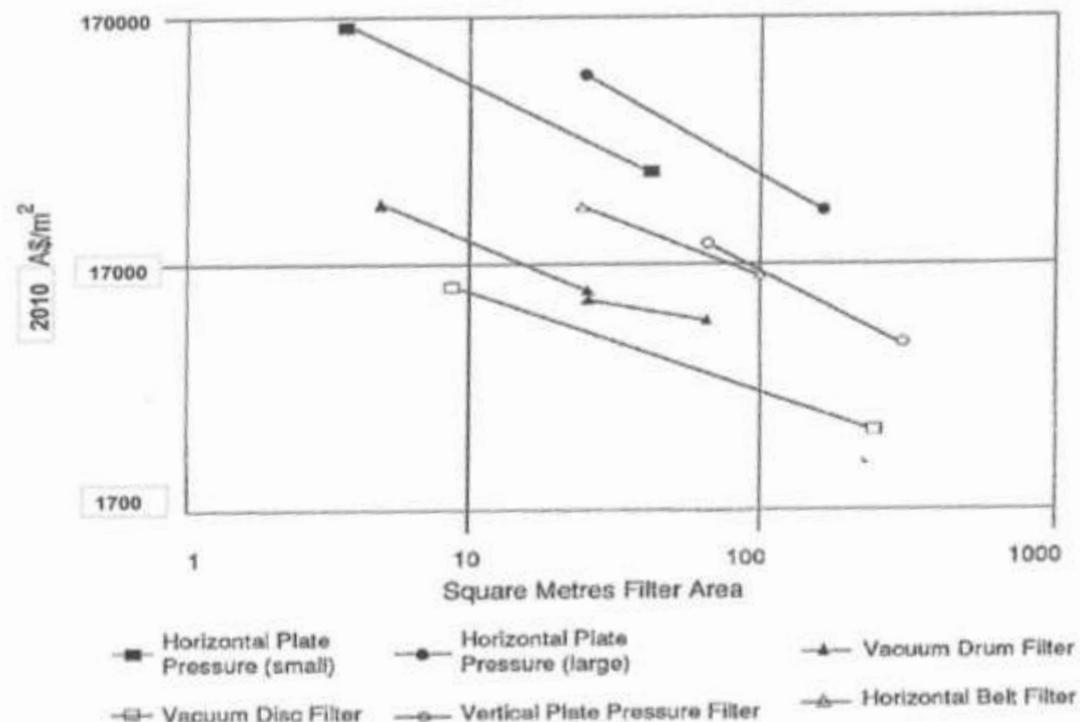


FIG 13.30 - Indicative capital costs of common filter types.

ESTIMATIVA DO CAPEX

21

□ Espessador e filtro rejeito:

Tabela 3 - Resultado dos testes – equipamentos de processo

Resumo das principais equipamentos					
Equipamento	Dimensões	Aplicação	Pontos negativos	Pontos positivos	Resultado
Espessador de rejeito	Ø= 8,2	Rejeito arenoso	Elevada turbidez no OF	- Redução no fator de espuma da polpa. Elevação na conc. de sólidos no UF até 65%.	Aprovado Capacidade = 110 t/h. Área unitária = 0,020 m²/t/dia
Filtro a disco vertical	47m²	Rejeito arenoso	Pequeno orifício no tecido resulta desgaste acentuado na parte interna dos tubos.	- Não há embasamento no tecido. - Vida útil mín. do tecido = 2100h (local não abrigado).	Aprovado Capacidade = 117 t/h. TUF = 2,49 t/h/m²
		Rejeito total (arenoso + ultrafinos)	Queda na capacidade, quando comparado com rejeito arenoso	- Não há embasamento no tecido.	Aprovado 90'10 => TUF = 2,27 t/h/m² 80'20 => TUF 1,53 t/h/m² 70'30 -> TUF - 1,38 t/h/m²
Filtro cerâmico	65 m²	Rejeito total (arenoso + ultrafinos)	- Altamente sensível a presença de ultrafinos; e - Capex alto devido a baixa cap. e valor do equipamento.	- Filtrado isento de sólidos; - Menor consumo de energia (motor da BV de 350 p/ 7,5cv); e - Menor umidade (queda de + ou - 5%).	Aprovado 90'10 => TUF = 1,02 t/h/m² 80'20 => TUF 0,88 t/h/m² 70'30 => TUF = 0,44 t/h/m²
Espessador de pasta	Ø=11 h=16	Rejeito ultrafino	Não atingiu a cap. de projeto (47 t/h). Cap. registrada = 28 t/h	Elevação na concentração de sólidos da lama.	Aprovado Dp no UF = 1,75 a 1,85 t/m² Au =0,141 m³/t/dia
Filtro prensa	1009 m²	Rejeito ultrafino	- Sistema de alimentação subdimensionado => ciclo de filtragem > 90' (projeto = 52') - Sistema de deslocamento das placas subdimensionado. Equip. não ajustado para material coeso, com peso específico (4 t/m³)	Com retirada de gargalos é possível aplicação contínua para lama de minério de ferro, chegando a 120 kg/h/m² e com umidade < 19%	Aprovado Taxa atingida = 60 kg/h/m² Taxa possível (após retirada de gargalos) = 120 t/h/m²
Filtro Gaudfrin - HSVDF	Ø= 6m e 45m²	Rejeito total (arenoso + ultrafino)	SAT - Sem ônus (2º semestre 2019). No entanto é de responsabilidade da Vale os custos com engenharia, montagem, desmontagem e transporte do equipamento.		

ESTIMATIVA DO CAPEX

22

□ Espessador e filtro concentrado:

Utilização dos espessadores nas instalações da Vale

Mina	Qtd	Aplicação	Alimentação		c _{ma} (*)	c _{mu} (**)	Área unitária m ² /t/dia	Diâmetro m	
			t/h	d ₅₀ (mm)	%	%			
Cauê	2	lama	143	0.0061	3.5	40	1.220	73	
	2	pellet feed	55	0.0550	15	60	0.535	30	
Conceição	1	lama	190	0.0064	4.2	35	1.722	100	
	2	pellet feed	600	0.0520	45	65	0.049	30	
Água Limpa	1	lama	42	0.0048	2.3	25	0.344	21	
Brucutu	1	lama	250	0.0043	0.93	25	1.309	100	
	2	pellet feed	1100	0.0670	47	65	0.034	34	
Gongo Soco	1	lama	100	0.0067	6	40	0.131	20	
	1	pellet feed	120	0.0610	47	65	0.027	10	
Alegria	1	alim. flotação	500	0.0440	52	60	0.008	11	
	2	pellet feed	370	0.0490	43	65	0.011	11	
	1	lama	59	0.0045	3.2	35	0.987	42	
	1	lama	57	0.0048	3.2	35	0.521	30	
Fábrica Nova	1	lama	220	0.0056	5.1	45	0.553	61	
	1	pellet feed	800	0.0450	48	65	0.037	30	
Timbopeba	1	pellet feed	520	0.0510	45	65	0.016	16	
Fábrica	2	lama	180	0.0039	4.5	48	0.654	60	
	1	pellet feed	560	0.0390	40	70	0.053	30	
Pico	Usinas: ITMA, B e D	1	lama	230	0.0044	3	30	0.288	45
	ITMA e B	1	pellet feed	192	0.0460	50	70	0.029	13
	ITMD	1	pellet feed	350	0.0460	50	70	0.115	35
	ITMI	1	lama	180	0.0051	3.9	40	0.455	50
		1	pellet feed	670	0.0460	38.8	70	0.060	35
Mutuca	1	lama	340	0.0047		55	0.060	25	
	1	alim. flotação	550	0.0430	66	60	0.029	22	
Vargem Grande	1	lama	450	0.0067	2.5	55	0.147	45	
	1	pellet feed	410	0.0480	42	70	0.039	22	
	2	lama	750	0.0010	18	50	0.279	80	
Carajás	1	lama	450	0.0010	18	50	0.182	50	
	1	lama	75	0.0010	18	40	0.504	34	
	2	lama	295	0.0348	3	60	0.075	26	
		2	pellet feed	295	0.0348	3	60	0.075	26

□ Para o filtro de concentrado considerar 1 t/h/m².

Tabela 1
Espessadores no tratamento de minério de ferro da Vale.

(*) c_{ma} - Concentração mássica de sólidos na alimentação.

(**) c_{mu} - Concentração mássica de sólidos no underflow.

ESTIMATIVA DO OPEX

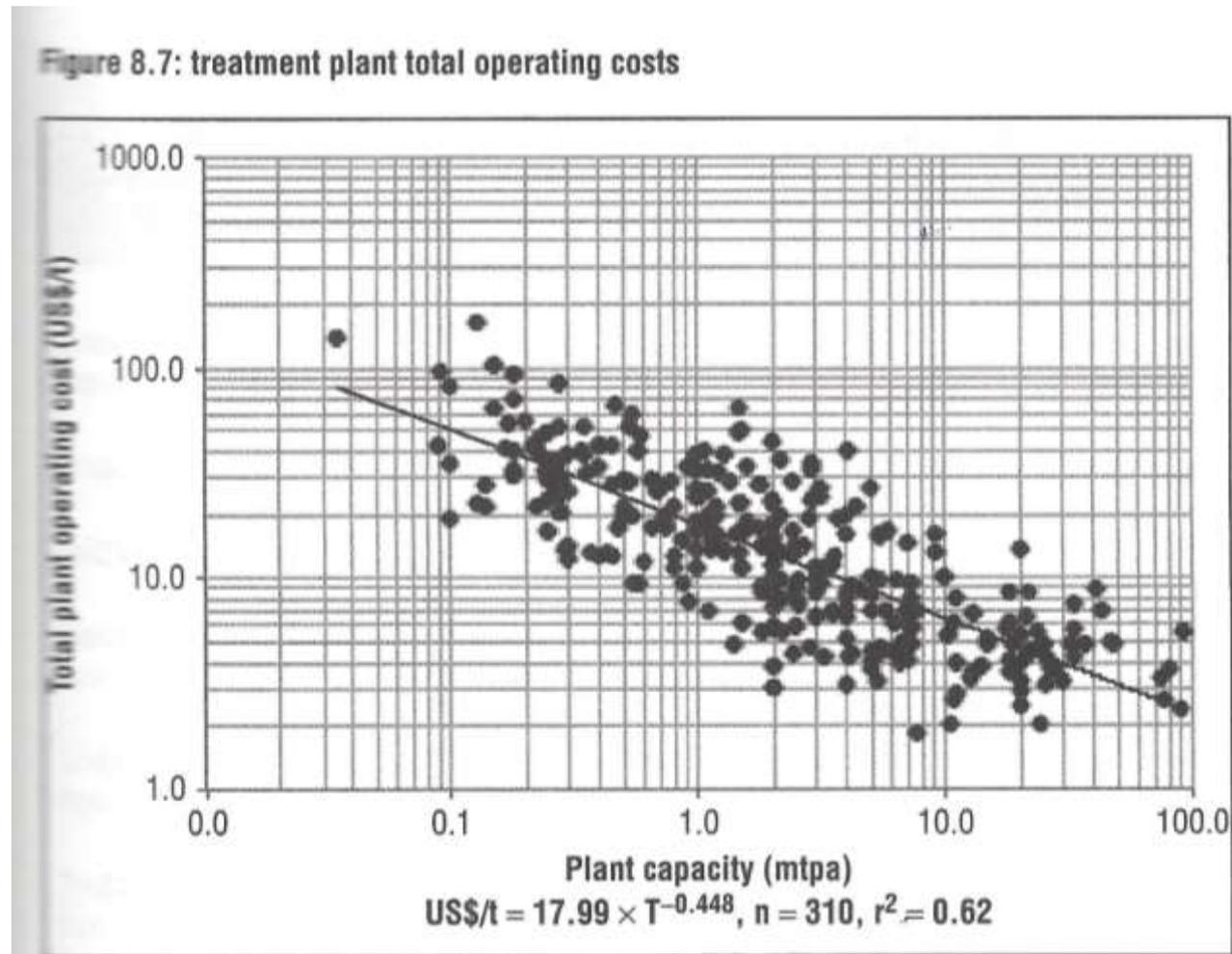
23

- Inclui:
 - ▣ Mão de obra
 - ▣ Consumíveis (reagentes, corpos moedores, revestimentos)
 - ▣ Manutenção
 - ▣ Itens de estoque
 - ▣ Custo de energia
 - ▣ Custo de água
 - ▣ Transporte
 - ▣ Outros: empresa/G&A, treinamento, ramp-up, seguros, financeiro

ESTIMATIVA DO OPEX

24

- Regras de dedão (base 2011 US\$):



ESTIMATIVA DO OPEX

25

- Exemplo cobre:
 - ▣ Mão de obra – 15%
 - ▣ **Consumíveis (reagentes, corpos moedores) – 15%**
 - ▣ Manutenção/revestimentos – 35%
 - ▣ Itens de estoque
 - ▣ **Custo de energia – 35%**
 - ▣ **Custo de água - pesquisar**
 - ▣ Transporte
 - ▣ Outros: empresa/G&A, treinamento, ramp-up, seguros, financeiro

ESTIMATIVA DO OPEX

26

- Outros custos (valores 2015 obtidos informalmente com os fornecedores):
 - Energia: R\$ 300/MWh
 - Corpos moedores Maggoteaux
 - Bolas Alto Cromo: R\$ 5.500,00 / ton
 - Bolas Baixo Cromo: R\$ 4.700,00 / ton
 - Reagentes Flomin (CFR - no porto sem transporte e impostos)
 - amil xantato de potássio - 90% ativo com 100% de amil - Flomin C 3505 - USD 2.05 a 2.20/kg
 - ditiofosfato de sódio - Flomin C 5333 - USD 1.75/kg / Flomin C 2430 - USD 2.15/kg
 - PG - F 650 - USD 2.70 / Flomin F 742 (PG) - USD 3.50 / kg
 - MIBC - Flomin F 500 - USD 2.80/kg
 - Cal virgem – R\$ 500/t
 - SNF Floculante - USD 3,00 a 4,00/kg
 - Filtro (Ausminn, 2011): AUS 2 a 3/t filtrada

 - Como adicional para os consumíveis teriam os impostos (9,25% PIS/COFINS + 4% ICMS + 5% IPI + Frete); O valor do frete vai depender muito dos volumes transportados (como média pode-se utilizar + USD 0,35/kg para quantidades acima de 5,0 tons).

Fontes

- AUSIMM. Cost estimation handbook. Second edition. Monograph 27. The Australian Institute of Mining and Metallurgy. 2012.
- Rudeno, V. The mining valuation hadbook, 2012.
- Torquato, Nilton Carlos; Silva, Washington Pirete da; Ferreira, Marco Túlio Santiago. MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS , p. 456-467. In: 20° Simpósio de Mineração, São Paulo, 2019.
- TORQUATO, Nilton Carlos; LUZ, José Aurélio Medeiros da. Espessadores no beneficiamento de minério de ferro. Rem: Rev. Esc. Minas, Ouro Preto , v. 64, n. 1, p. 91-96, Mar. 2011 . Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672011000100012&lng=en&nrm=iso>. access on 14 Oct. 2020. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672011000100012>.