

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP

Departamento de Engenharia de Minas



ISSN 0104-0553

BT/PMI/048

**Efeito das Dimensões de
Provetas no Dimensionamento
de Espessadores**

**Eldon Azevedo Masini
Arthur Pinto Chaves**

São Paulo - 1996

895768

O presente trabalho é uma versão abreviada da tese de doutorado apresentada por Eldon Azevedo Masini, sob a orientação do Prof. Dr. Arthur Pinto Chaves "Efeito das Dimensões de Provetas no Dimensionamento de Espessadores", com defesa realizada em 08/11/95.

A íntegra da tese encontra-se à disposição dos interessados com o autor e na Biblioteca do Depto. de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da USP.

Masini, Eldon Azevedo

Efeito das dimensões de provetas no dimensionamento de espessadores / E.A. Masini, A.P. Chaves.
-- São Paulo : EPUSP, 1996.

16p. -- (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Minas, BT/PMI/048)

1. Espessadores 2. Desaguamento 3. Separação sólido-líquido 4. Espessadores - Ensaios I. Chaves, Arthur Pinto II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas III. Título IV. Série

ISSN 0104-0553

CDU 66.063.94
66.049
66.040.26
66.063.94

Eldon Azevedo Masini

Arthur Pinto Chaves

EFEITO DAS DIMENSÕES DE PROVETAS NO
DIMENSIONAMENTO DE ESPESSADORES

Edição abreviada da tese
apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de
Doutor em Engenharia de Minas

Depto de Engenharia de Minas da EPUSP
São Paulo
1995

RESUMO

As diversas alternativas de dimensionamento de espessadores são analisadas frente ao estado atual da teoria da sedimentação. As teorias e as técnicas utilizadas para avaliar a capacidade de espessadores, a partir de ensaios de espessamento, são aqui examinadas e comentadas. Ensaios de espessamento de magnesita em provetas de 1000 e 2000 ml foram realizados com o propósito de estudar o efeito das dimensões desses vasos no dimensionamento de espessadores. Concluiu-se que as dimensões das provetas não afetam as predições fornecidas pelas diversas alternativas. Os resultados indicaram, ainda, que polpas não floculadas podem apresentar curvas de espessamento com configurações diferentes daquelas prognosticadas pela teoria de Kynch, o que afeta os resultados para a razão de espessamento. Este comportamento se deve à fenômenos de compressão da polpa e do regime de sedimentação por canalização, identificados nos ensaios com concentração inicial acima de 0,320 g/ml.

"ABSTRACT"

Different methods of thickener design are analysed in the light of current sedimentation theories. Theories and techniques used for the estimation of thickener capacities from batch test results are analysed and discussed. Batch tests with magnesite ore were performed with 1000 and 2000 ml cylinders, at constant initial pulp height, to study the effects of settling vessel dimensions on thickener sizing. It was concluded that cylinder dimensions do not affect the prediction of the thickener size. The test results also have shown different behavior from those predicted by Kynch's theory, when the initial concentration of slurry is higher than 0.320 g/ml. This is understood as a result of slurries compressibility and of channelling at concentrations between *zone settling* and *compression* stages. It affects the value of the settling rate.

1. INTRODUÇÃO

O espessamento é uma operação de separação sólido/líquido, baseada no fenômeno da sedimentação. Tem como principal objetivo a formação e a remoção de polpas concentradas de sólidos a partir de polpas relativamente diluídas. Apresenta como atributos principais a concentração final requerida para a polpa e o comportamento da velocidade de sedimentação da polpa.

Dimensionar um espessador para uma dada aplicação é uma técnica, ainda hoje, não totalmente dominada. Historicamente, foi a partir de meados da década de 20 que o dimensionamento de espessadores deixou de ser uma decisão intuitiva, de caráter individual, baseada apenas na larga experiência de técnicos no trato com polpas de minérios e operações de espessadores. Este avanço se deve ao trabalho de COE e CLEVINGER (1), publicado em 1916. Segundo ROBERTS (2), foi o marco da passagem da ciência de espessamento para o campo da engenharia. Outro evento de grande importância no desenvolvimento desta ciência é relacionado ao trabalho do matemático KYNCH (3) publicado em 1952, reconhecidamente tido como base da era moderna da pesquisa sobre espessamento.

Os principais métodos de dimensionamento de espessadores requerem ensaios experimentais em escala piloto (contínuos) ou em escala de bancada (descontínuos). Os métodos com experimentos de sedimentação em bancada são vistos como os de maior interesse na indústria mineral. Tal interesse se deve ao fato de requererem aparelhagem simples de laboratório, amostra de tamanho reduzido e principalmente por serem, na maioria das vezes, o único meio que se pode dispor para avaliar a operação de espessamento. Os ensaios experimentais de sedimentação em bancada são denominados de ensaios descontínuos de sedimentação ou ensaios de sedimentação em batelada.

Os principais métodos de dimensionamento de espessadores, via ensaios descontínuos de sedimentação, têm por base o modelo proposto por COE e CLEVINGER (1) e a teoria da sedimentação desenvolvida por KYNCH (3).

Embora a técnica de dimensionamento de espessadores tenha sofrido modificações e refinamentos, à medida que se avançou no conhecimento da matéria, o problema da predição de dimensões requeridas para um espessador, via ensaios em bancada, parece ainda não ter sido satisfatoriamente resolvido. FITCH (4), em 1966, comenta: "Do ponto de vista da engenharia, a teoria moderna do espessamento não trouxe resposta ao problema não resolvido por Coe e Clevenger, sobre este aspecto, não estamos muito mais avançado que eles".

Tendo-se em consideração a enorme importância do espessamento na indústria mineral-metalúrgica, o presente trabalho mostra o comportamento da velocidade de sedimentação de polpas aparentemente não floculadas em provetas de 1000 e 2000 ml, bem como as implicações desse comportamento nos resultados de dimensionamento de espessadores.

2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES

A maneira clássica de avaliar o comportamento da polpa à sedimentação vem sendo realizada através de ensaios experimentais. Os ensaios são realizados em tubos longos ou em provetas transparentes graduadas, onde uma coluna de partículas sólidas em suspensão, inicialmente com concentração uniforme, é deixada decantar. O processo de separação pode ser observado através do movimento descendente da interface entre o líquido clarificado sobrenadante e a polpa. É prática usual intervir no fenômeno com eletrólitos ou polímeros orgânicos, para favorecer o processo (coagulantes e floculantes).

Os ensaios de sedimentação em bancada realizados com o objetivo de analisar o comportamento de polpas ao espessamento são denominados ensaios de espessamento. Estes ensaios são realizados em provetas transparentes graduadas de 1000 onde uma coluna de polpa, inicialmente com concentração uniforme e no regime de espessamento, é deixada decantar. O ensaio consiste em registrar, a intervalos de tempos sucessivos, a posição da altura (h_i) da interface e o tempo (t_i).

Tradicionalmente, os resultados dos ensaios são apresentados através da denominada curva de espessamento ou curva de subsidência da interface sólido/líquido. Trata-se de um diagrama, onde são lançados em ordenadas os valores que indicam as posições ocupadas pela interface (h_i) durante o ensaio, e em abscissas o tempo (t_i) decorrido dos diversos pontos considerados.

Há muito tempo a curva de espessamento vem sendo analisada com o objetivo de formular teorias de espessamento, métodos de dimensionamento e controle de operações de espessamento. COE e CLEVENGER (1) foram os primeiros a utilizarem parâmetros característicos da curva para avaliar o comportamento de polpas frente a operações contínuas de espessamento.

3. ANÁLISE DOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO

Os métodos de dimensionamento de espessadores foram inicialmente investigados com o objetivo de identificar e analisar os conceitos, critérios e parâmetros utilizados na sua concepção. A pesquisa procurou abranger os procedimentos de execução dos ensaios e o tratamento dado aos parâmetros proveniente de experimentos. Embora o trabalho tenha sido orientado visando analisar os fatores que afetam a avaliação da velocidade de sedimentação da polpa, objeto principal da tese, o mesmo propiciou o levantamento de informações que não poderiam deixar de ser relatadas e discutidas aqui.

A bibliografia consultada mostra que os diversos métodos de dimensionamento de espessadores utilizam o modelo concebido por Coe e Clevenger, combinado ou não com conceitos da teoria Kynch, para avaliar a operação contínua de espessamento.

Analisando os procedimentos de aplicação dos métodos de dimensionamento, mais particularmente, aqueles que tratam do cálculo de áreas de espessamento, não é difícil concluir que existem, entre os pesquisadores, pontos de vista diferentes sobre a condição crítica da operação contínua de espessamento para uma determinada operação. Tal divergência

permite estabelecer duas classes de métodos de dimensionamento de espessadores: uma, reunindo os métodos que requerem a identificação do ponto crítico de Coe e Clevenger para calcular a concentração limitante da operação. Nestes métodos, os autores entendem que a condição crítica da operação se manifesta em regime de sedimentação livre. Os métodos que não requerem a identificação do ponto crítico comporiam a outra classe, para a qual a concentração limitante depende do valor da concentração da polpa no final do espessamento.

Por outro lado, é de conhecimento de todos que as polpas de minérios raramente se comportam, nos ensaios de espessamento, de acordo com a teoria da sedimentação de suspensões concentradas de partículas sólidas de Kynch. Deve-se observar ainda, que o próprio ensaio de espessamento não reproduz exatamente determinadas premissas assumidas na concepção do modelo. Assim, diversos tipos de discrepâncias sempre foram observadas nos resultados dos ensaios de espessamento. Estas anomalias, isto é, afastamentos do comportamento teórico esperado da polpa ideal nos ensaios de espessamento, podem levar usuários a cometerem erros extremamente grosseiros, principalmente quando os métodos de dimensionamento são aplicados sem uma análise criteriosa dos resultados dos ensaios de espessamento.

Apesar da complexidade do processo é possível, com base nos conceitos teóricos e nos conhecimentos experimentais e práticos, apresentar uma relação dos pontos mais relevantes sobre a aplicação dos métodos de dimensionamento de espessadores, tendo em vista o bom uso desses recursos.

Dentre as diversas técnicas de avaliar a operação contínua de espessamento, as concebidas por Coe e Clevenger e TALMAGE e FITCH (5) continuam sendo as mais utilizadas para o dimensionamento de espessadores.

Segundo FITCH e STEVENSON (6), dados industriais, de maneira geral, mostram que o método de Coe e Clevenger superestima os fluxos de sólidos no espessador, acarretando um subdimensionamento em área. Por outro lado, o método de TALMAGE e FITCH (5) que associa interpretações da teoria de Kynch, subestima os fluxos críticos e levam a super dimensionamento.

Investigações realizadas por SCOTT (7), envolvendo os métodos de Coe e Clevenger, Talmage e Fitch e polpas flocculadas, indicam que o método de Talmage e Fitch fornece resultados mais próximos da realidade.

A bibliografia consultada mostra, também, discordância sobre a aplicação das técnicas usuais de avaliação da velocidade de sedimentação em função da concentração. Esta bibliografia revela inclusive, divergências sobre quais regimes de sedimentação tais técnicas teriam validade.

4. METODOLOGIA E PLANEJAMENTO DOS ESTUDOS

A metodologia estabelecida para realização do trabalho levou em consideração os conceitos e técnicas utilizadas pelos diversos métodos de dimensionamento de espessadores, assim como a experiência pessoal

acumulada pelos Autores em 25 anos de atividade. O plano de trabalho procurou resguardar a simplicidade do modelo idealizado por Coe e Clevenger e não se afastar dos recursos tradicionalmente ao alcance dos usuários de métodos de dimensionamento de espessadores.

O estudo procurou abranger ainda o seguinte aspecto: a bibliografia consultada mostra que as investigações acerca de comportamentos anômalos de polpas frente a ensaios de espessamento, foram realizadas com polpas floculadas e/ou constituídas de partículas sólidas de dimensões inferiores a 40 μm , de suscetibilidade elevada à formação de flocos. No entanto, para a indústria mineral, tem um papel de igual importância nas unidades de tratamento o espessamento de polpas constituídas de particulados de composição granulométrica grosseira até 175 μm , geralmente de fraca ou nenhuma tendência à formação de aglomerados. Assim, a pesquisa foi conduzida para ser realizada com uma polpa de composição granulométrica grosseira, que aparentemente não indicasse tendência à floculação, com o propósito de verificar a possibilidade de polpas não floculadas exibirem manifestações anômalas nos ensaios de espessamento.

Os trabalhos de laboratório foram planejados para serem realizados em duas fases. A primeira, de caráter exploratório, visando familiarizar a equipe com o comportamento do minério e, especificamente, verificar a possibilidade de observar as seguintes manifestações: ocorrência de interface entre o líquido clarificado sobrenadante e os sólidos em decantação, tendência à formação de flocos e formação de ondulações e/ou formas vulcânicas na superfície do sedimento, indícios típicos do regime de sedimentação por canalização. A segunda, devidamente programada, com o objetivo de levantar os dados necessários para caracterizar o comportamento da polpa em diferentes concentrações.

Os ensaios foram realizados com uma amostra de minério de magnesita da região de Brumado-BA, fornecida ao Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para estudos de concentração. Todos os ensaios foram realizados nos laboratórios deste Departamento.

A composição química da amostra utilizada no presente trabalho é apresentada na tabela 1.

Tabela 1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA AMOSTRA UTILIZADA (%)

p. fogo	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO ₂	P ₂ O ₅
48,82	5,66	0,84	2,15	1,72	89,9	0,15	0,049

As dimensões das provetas cilíndricas graduadas utilizadas nos ensaios estão relacionadas na tabela 2.

Tabela 2 - DIMENSÕES DAS PROVETAS

Volume (ml)	Diâmetro Interno (cm)	Altura (cm)
1000	5,17	40,4
2000	8,35	39,9

5. RESULTADOS DOS ENSAIOS

5.1 Resultados da caracterização física da amostra

A análise da distribuição de tamanho das partículas que compõem a amostra foi feita por um analisador Malvern baseado na técnica de espalhamento de luz laser e difração de Fraunhofer. De forma simplificada a tabela 3 mostra um resumo dos resultados da caracterização física da amostra utilizada.

Tabela 3 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA MAGNESITA UTILIZADA

Densidade (g/cm ³)	Distribuição granulométrica % passante. (mm)	Área superficial específica (m ² /g)
2,99	d ₂₅ 0,024	0,82
	d ₅₀ 0,057	
	d ₇₅ 0,107	

5.2 Resultados dos ensaios de espessamento

Foram realizadas 19 experiências, cada uma constituída de dois ensaios de espessamento (provetas de 1000 e 2000 ml) levados a efeitos simultaneamente e na mesma concentração inicial. Dezenove concentrações diferentes foram analisadas; desde a mais diluída (0,080 g/ml), para a qual a interface pudesse ser observada, até a mais densa, a princípio, assumida como sendo a concentração média da camada de polpa sedimentada resultante dos ensaios exploratórios (1,250 g/ml).

A sequência de valores de alturas (h_i) e tempos (t_i) correspondentes, de cada ensaio, foi obtida a partir da observação do movimento da interface sólido/líquido, seguindo as recomendações de COE e CLEVENGER (1). O acompanhamento dos ensaios foi feito de forma contínua até que nenhum movimento da interface fosse notado. Todos os ensaios tiveram a duração de 24 horas. A concentração final da polpa (C_∞), nos ensaios, foi assumida como sendo a concentração média da camada sedimentada de altura h_∞ resultante do ensaio.

As figuras 1 e 2 ilustram curvas típicas de espessamento obtidas com o minério de magnesita em provetas de 1000 e 2000 ml, respectivamente.

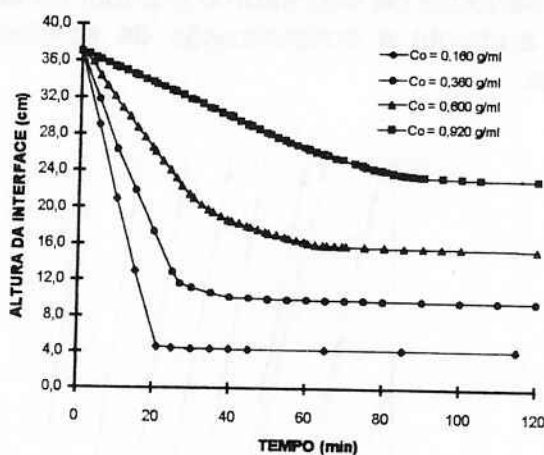


Figura 1 - Curvas típicas de espessamento de magnesita em provetas de 1000 ml.

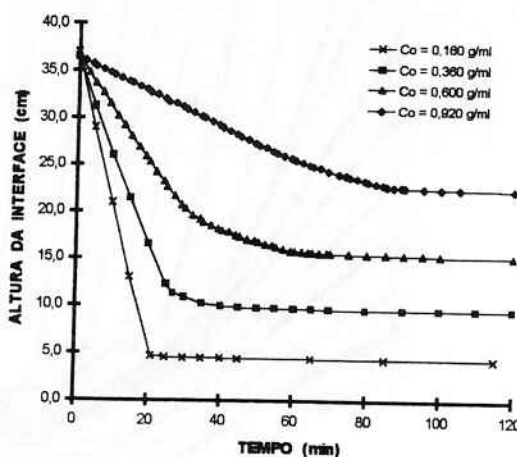


Figura 2 - Curvas típicas de espessamento de magnesita em provetas de 2000 ml.

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 Comportamento das polpas de magnesita frente aos ensaios de espessamento

As figuras 3 e 4 mostram as curvas de sedimentação geral resultantes das experiências realizadas em provetas de 1000 e 2000 ml, respectivamente. Os resultados foram assim figurados para comparar qualitativamente o comportamento da polpa de magnesita com o comportamento da polpa ideal de Kynch.

Observando estas figuras, constata-se que as famílias de curvas de espessamento obtidas experimentalmente em provetas de 1000 e 2000 ml apresentam configurações semelhantes. As curvas experimentais exibem

claramente trechos iniciais retilíneos, característicos de polpas sedimentando no estágio inicial do ensaio com velocidade constante e trechos curvilíneos que indicam períodos de decréscimo gradual da velocidade de sedimentação à medida que aumenta a concentração de sólidos na interface com o líquido sobrenadante.

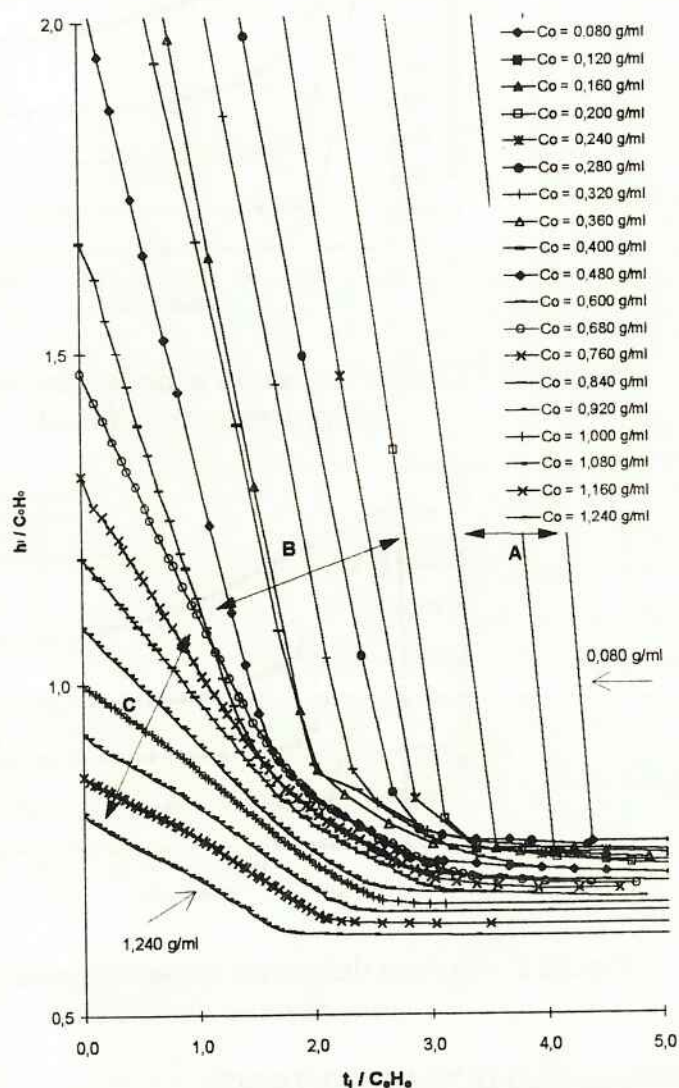


Figura 3 - Curva de sedimentação geral de polpas de magnesita em proveta de 1000 ml.

Através da forma como os trechos retilíneos se interligam com os trechos finais das curvas experimentais, é possível subdividir a família de curvas obtida em proveta de 1000 ml, bem como a família em proveta de 2000 ml, em três grupos diferentes de curvas de espessamento, como mostram as letras A, B e C nas figuras em referência.

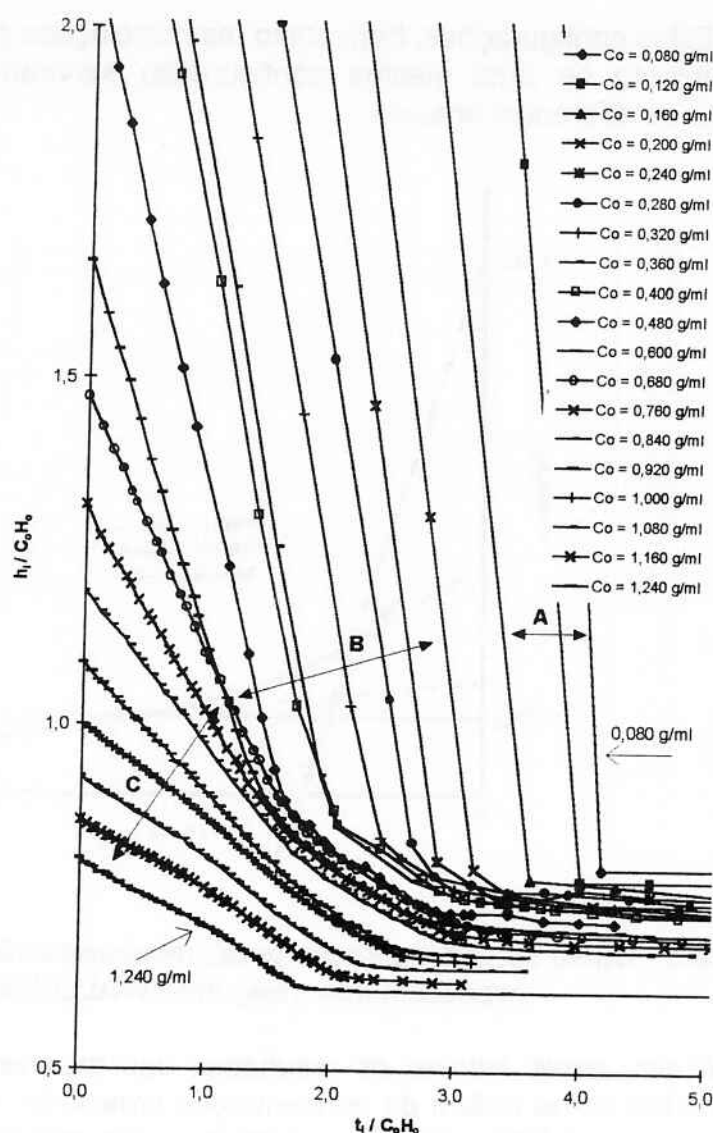


Figura 4 - Curva de sedimentação geral de polpas de magnesita em proveta de 2000 ml.

Como é de conhecimento, as diferentes configurações das curvas de espessamento da suspensão ideal de Kynch podem ser identificadas através da sua curva de sedimentação geral. WALLIS (8), na figura 5, exemplifica três configurações típicas de curvas de espessamento da polpa ideal de Kynch, identificadas por Tipo I, II e III. As curvas de configuração Tipo I representam resultados de ensaios que mostram uma descontinuidade nítida entre a concentração inicial (trecho inicial retilíneo) e a zona de concentrações crescente, trecho curvilíneo da curva geral. As curvas do Tipo II, não apresentam tal descontinuidade e as curvas de configuração Tipo III apresentam uma outra descontinuidade, desde o início do ensaio, entre a concentração inicial e a final do ensaio.

Estas configurações, bem como, as correlações comuns das curvas de espessamento de uma mesma configuração serviram de referência para comparar os diferentes ensaios.

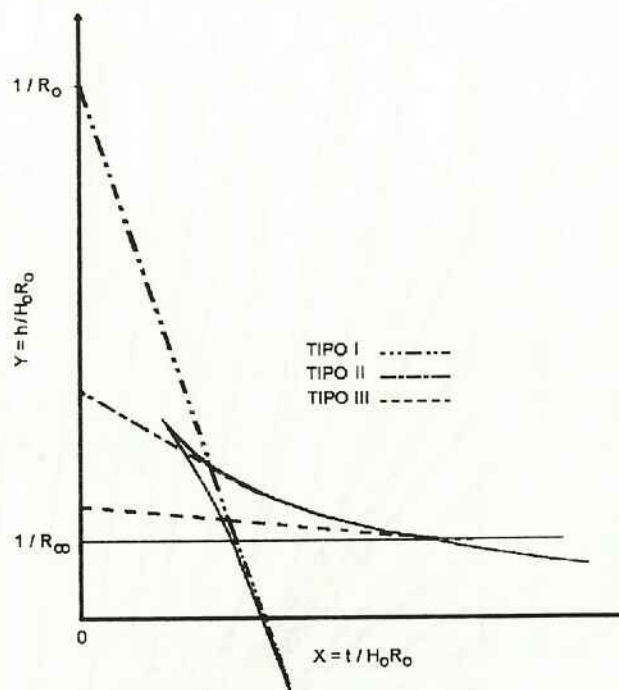


Figura 5 - Curva de sedimentação geral, mostrando três tipos de curvas de espessamento. (Segundo WALLIS (8)).

Assim, analisando-se os resultados das experiências em provetas de 1000 e 2000 ml na ordem de concentração crescente, nota-se que as curvas dos ensaios de 0,080 a 0,160 g/ml mostram ter determinadas características em comum. Apresentam no ponto de interligação, há pouco referido, uma descontinuidade brusca típica de polpas em transição de um regime de sedimentação para um estado de aparente estagnação. Indicam, ainda, que a concentração média da polpa no final dos ensaios é praticamente a mesma e, que durante todo o período de sedimentação, a velocidade de subsidência da interface sólido/líquido é constante, alta e decresce à medida que a concentração inicial dos ensaios aumenta. Correlações como estas indicam que as curvas experimentais deste intervalo de concentração se ajustam às curvas dos modelos de sedimentação de Kynch que predizem, durante todo o período de sedimentação, a concentração inicial do ensaio se alterando subitamente para a concentração final do ensaio.

As curvas experimentais dos ensaios realizados no intervalo de concentração 0,200 a 0,600 g/ml, mostram que a interligação do trecho retilíneo com o trecho final de cada curva continua sendo feita de forma descontinua, típica de uma súbita alteração de concentração da polpa para um valor maior. Nota-se agora, que após a súbita alteração da concentração na interface com o líquido sobrenadante, as curvas mostram um período contínuo de concentrações crescentes antes de atingir a concentração final do ensaio.

A velocidade de sedimentação no início dos ensaios é constante, alta e decresce com o aumento da concentração inicial dos ensaios. No trecho curvilíneo, isto é, durante o período de concentrações crescentes a mesma é baixa. Os resultados mostram, ainda, as curvas experimentais com concentração até 0,360 g/ml tendendo a se ajustarem numa única curva de concentrações crescentes, indicando que a concentração média da polpa no final do ensaio não depende da concentração inicial do ensaio. Entretanto, para o intervalo de concentrações 0,400 a 0,600 g/ml as curvas mostram os trechos curvilíneos cada vez mais afastado uns dos outros à medida que a concentração inicial dos ensaios cresce. As correlações observadas indicam que apenas os ensaios realizados até a concentração de 0,360 g/ml resultam em curvas experimentais com características que se ajustariam às curvas dos modelos de sedimentação de Kynch.

No intervalo de concentração de 0,680 a 1,240 g/ml as curvas continuam tendo em comum um período inicial de velocidade constante, seguido por um período de decréscimo gradual da velocidade de sedimentação. Nota-se que a descontinuidade no ponto de interligação desaparece e que o trecho curvilíneo e a velocidade de sedimentação se mostram cada vez menores à medida que aumenta a concentração inicial do ensaio, características também típicas da família de curvas de uma polpa ideal. Porém, os trechos curvilíneos, da mesma forma que no intervalo de concentração 0,400 a 0,600 g/ml, não apresentam tendência a se ajustarem numa única curva. A concentração média da polpa no final dos ensaios, cresce com o aumento da concentração inicial do ensaio se afastando dos modelos de fluxo de sedimentação da teoria de Kynch.

Os resultados desta análise levam a concluir que, apenas no intervalo de concentração 0,080 a 0,360 g/ml, as polpas de minério de magnesita apresentam correlações qualitativas em concordância com a teoria de Kynch. O comportamento das polpas de magnesita no intervalo de concentração 0,360 a 1,240 g/ml mostrou-se típico de polpas floculadas, retratando a presença de um regime de transição entre a sedimentação por zonas e por compressão e um sedimento compressível, não ajustado às correlações da polpa ideal de Kynch.

6.2 Discussão dos resultados de avaliação da velocidade de sedimentação

Por serem métodos independentes de avaliação de velocidade de sedimentação, as técnicas de multi-ensaios de Coe e Clevenger e das tangentes de Kynch foram utilizadas para investigar o comportamento da velocidade em função da concentração em provetas de 1000 e 2000 ml.

Os gráficos da figura 6, traçados a partir dos resultados das 19 experiências realizadas em provetas de 1000 e 2000 ml, mostram o comportamento da velocidade de sedimentação de polpas homogêneas de magnesita em função da concentração, segundo a técnica de Coe e Clevenger. Como estabelece a técnica destes autores, estas velocidades representam as velocidades de subsidência da interface ao longo dos ensaios de espessamento que permanecem por mais tempo constante, relacionadas à concentração inicial dos respectivos ensaios.

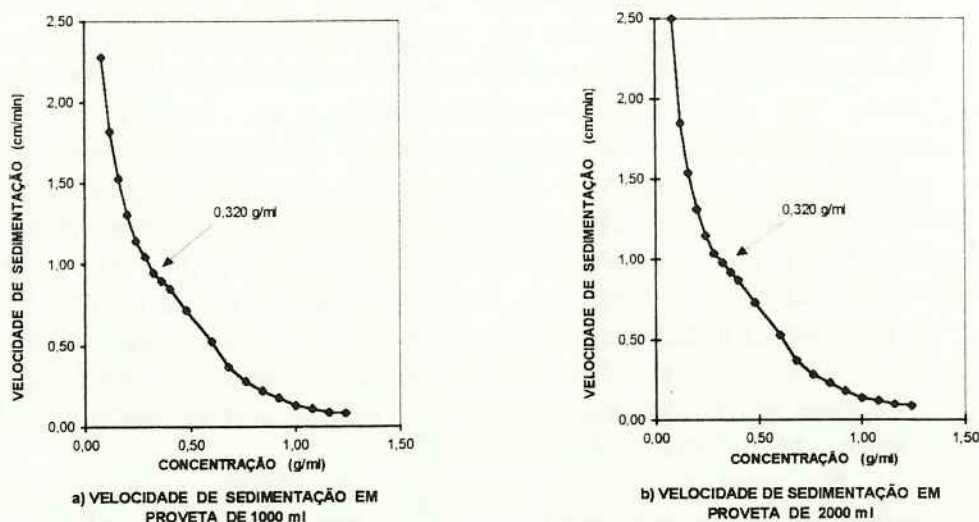


Figura 6 - Variação da velocidade de sedimentação em relação à concentração de sólidos de acordo com a técnica de Coe e Clevenger.

Os gráficos da velocidade de sedimentação em função da concentração, em provetas de 1000 e 2000 ml, ilustrados na figura 6, mostram, a partir da concentração 0,320 g/ml uma queda significativa na razão de decréscimo da velocidade de sedimentação em função da concentração. Tal comportamento, característico de alteração de regime de sedimentação, indica uma alteração no sistema de variáveis que governa o mecanismo de sedimentação dos sólidos da polpa. A presença de uma rede de canais ao longo da coluna de polpa em sedimentação, observada nos ensaios a partir da concentração de 0,360 g/ml, justifica a queda da razão de decréscimo da velocidade indicada pelos gráficos. Semelhante comportamento foi relatado por SCOTT (7), no trato com polpas floculadas, que atribue tal efeito à velocidade de escoamento do líquido clarificado liberado da polpa, a qual é maior com a presença de canais preferenciais.

A figura 6 mostra ainda, que as avaliações de velocidades obtidas em provetas de 1000 e 2000 ml com a técnica de Coe e Clevenger foram praticamente as mesmas.

Os ensaios em provetas de 1000 e 2000 ml nas concentrações de 0,360; 0,480 e 0,600 g/ml, apesar de discordarem da teoria de Kynch, como visto no item 6.1, foram selecionados para avaliar a velocidade de sedimentação versus concentração através da técnica das tangentes de Kynch. Segundo Kynch, em regime de sedimentação livre, a correlação entre a velocidade de sedimentação e a concentração pode ser avaliada a partir da velocidade de queda da interface polpa/líquido clarificado ao longo do ensaio de espessamento. A técnica foi aplicada nos três ensaios, utilizando-se a solução gráfica de JERNQVIST (9). Os resultados obtidos estão apresentados na figura 7.

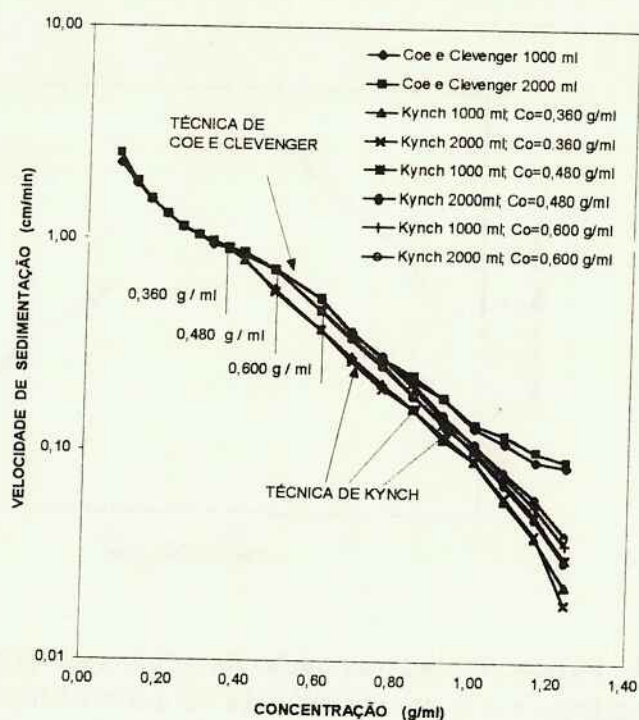


Figura 7 - Variação da velocidade de sedimentação em relação à concentração de sólidos de acordo com as técnicas das tangentes de Kynch e de Coe e Clevenger.

A figura 7 mostra que, para uma dada concentração, as velocidades calculadas segundo a técnica das tangentes se situam significativamente abaixo dos valores calculados pela técnica de Coe e Clevenger, e que diferem marcadamente de ensaio para ensaio (0,360; 0,400 e 0,600 g/ml), indicando que os valores derivados, segundo esta técnica, dependem da concentração inicial do ensaio selecionado. Esta indicação, no entanto, está de acordo com as correlações observadas na discussão realizada no item 6.1 sobre a curva de sedimentação geral e leva a concluir que nesta faixa de concentração a velocidade de sedimentação não é função única da concentração de sólidos na sua vizinhança, visto que polpas na mesma concentração apresentam diferentes valores de velocidade de sedimentação.

A figura 7 mostra, também, que as avaliações de velocidades, em provetas de 1000 e 2000 ml, derivadas da aplicação da técnica das tangentes de Kynch sobre curvas de espessamento de ensaios realizados na mesma concentração, praticamente, fornecem os mesmos resultados.

As figuras 8 e 9, derivadas da figura 7, mostram os resultados de fluxos de sólidos em função da concentração sobre uma mesma linha, indicando a existência de uma única curva de fluxo de sólidos para a amostra. Como consequência, seja qual for a concentração limitante utilizada pelo método de dimensionamento de espessadores, para uma determinada condição operacional, a área de espessamento requerida para o espessador será a mesma. Estas observações mostram que os resultados de dimensionamento de espessadores não dependem das dimensões das provetas utilizadas nos ensaios.

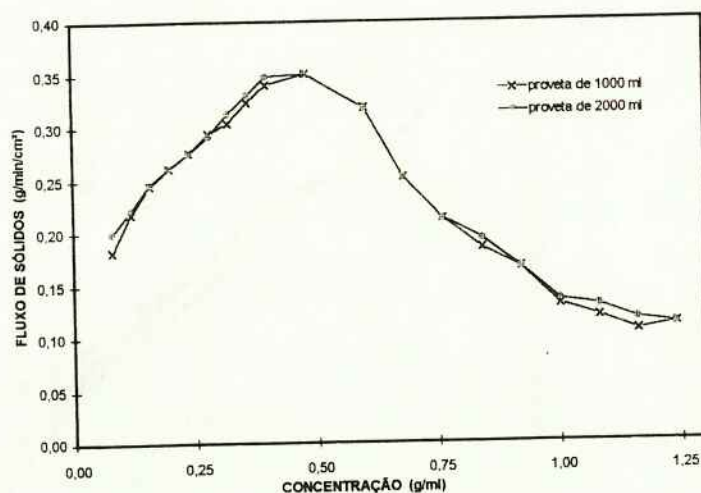


Figura 8 - Fluxos de sedimentação de sólidos em provetas de 1000 e 2000 ml, calculados a partir de velocidades de sedimentação avaliadas segundo a técnica de multi-ensaios de Coe e Clevenger.

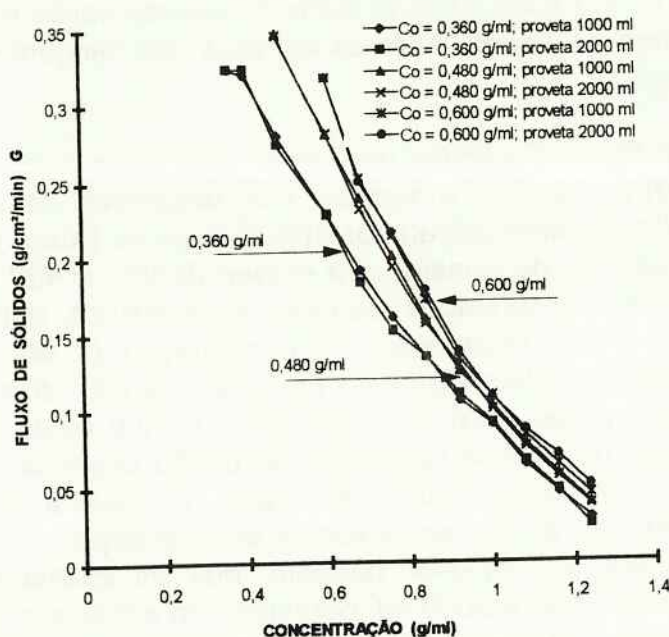


Figura 9 - Fluxos de sedimentação de sólidos em provetas de 1000 e 2000 ml, calculados a partir de velocidades de sedimentação avaliadas segundo a técnica das tangentes de Kynch.

7. CONCLUSÃO

Os estudos realizados mostram que os resultados de ensaios descontínuos de espessamento, levados a efeitos em provetas de 1000 ml não diferem daqueles obtidos através de provetas de 2000 ml.

Os estudos tornam evidente que os resultados de dimensionamento de espessadores não dependem das dimensões das provetas utilizadas nos ensaios. Entretanto, dependem do método de dimensionamento selecionado para avaliação e da técnica utilizada para estimar a velocidade de sedimentação em função da concentração.

Para o material ensaiado, a curva de sedimentação geral revelou ter correlações qualitativas e quantitativas diferentes das prognosticadas por Kynch para "polpas ideais".

Os ensaios mostraram, também, que o espessamento do material ensaiado, em regime de compressão, não depende apenas do tempo de permanência da polpa neste regime, conforme proposta de Coe e Clevenger.

A metodologia adotada no trabalho para investigar tais correlações, bem como as técnicas aplicadas para analisar os resultados de velocidades e fluxos de sedimentação de sólidos, foram suficientes para mostrar que polpas aparentemente não floculadas podem apresentar comportamentos típicos de polpas floculadas, como: compressibilidade e zona de transição do regime de sedimentação livre para o de compressão com gradiente de concentração não compatível com a velocidade de liberação de líquido clarificado, propiciando a formação de canais ao longo da coluna de polpa em sedimentação.

Os estudos realizados sobre os resultados de avaliação de velocidades de sedimentação dos sólidos em diversas concentrações, segundo a técnica das tangentes de Kynch, sugerem que a sua aplicação para dimensionamento de espessadores seja feita sobre ensaios de espessamento com concentrações de sólidos nas vizinhanças da concentração da polpa a ser espessada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. COE, H. S. ; CLEVINGER, G. H. Methods for determining the capacities of slime settling tanks. Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, v. 60, p. 356 - 8
2. ROBERTS, E. J. Thickening -art or science? Mining Engineering, v. 1, p. 61 - 4, mar. 1949.
3. KYNCH, G. J. Theory of sedimentation. Transactions Faraday Society, v. 48, p.166 - 76, 1952.
4. FITCH, B. Current theory and thickener design. Industrial and Engineering Chemistry. v. 58, n 10, p. 18 - 28, Oct. 1966.
5. TALMAGE, W. P. ; FITCH, E. B. Determining thickener unit areas. Industrial and Engineering Chemistry, v. 47, p. 38 - 41, 1955.

6. FITCH, E. B. ; STEVENSON, D. G. Gravity separation and equipment. Clarification and thickening. In: PURCHAS, D. B, ed. Solid/liquid separation equipment scale-up. Croydon, Uplands Press Ltda, 1977. P. 108-127.
7. SCOTT, K. J. Theory of thickening : factors affecting settling rate of solids in flocculated pulps. Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy. Section C, v. 77, p. C85 - C97, 1968.
8. WALLIS, G. M. A simplified one-dimensional representation of two-component vertical flow and its application to batch sedimentation. In: SIMPOSIUM ON THE INTERACTION BETWEEN FLUIDS AND PARTICLES, London, 1963. Proceedings. (London:Institution of Chemical Engineers ,1963), p. 9 - 16.
9. JERNQVIST, A. S. H. Experimental and theoretical studies of thickeners. Parts 1 - 4. Stockholm, Svensk Papperstidning 68, 1965. p. 506 - 11, 545 - 48, 578 - 82 and 69, 1966. p 395 - 8.

BOLETINS TÉCNICOS - TEXTOS PUBLICADOS

BT/PMI/001 - Características Geométricas da Escavação Mecânica em Mineração: Exemplo de Escavadora de Caçamba de Arraste - ANTONIO STELLIN JUNIOR

BT/PMI/002 - Prospecção Geoquímica Experimental na Ocorrência de Ouro Tapera Grande - PAULO BELJAVSKIS, HELMUT BORN

BT/PMI/003 - Estudo de Processo de Dupla Flotação visando o Beneficiamento do Minério Carbonático de Fosfato de Jacupiranga - JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO

BT/PMI/004 - Desenvolvimento de um Equipamento Não-Convencional em Beneficiamento Mineral: A Célula Serrana de Flotação Pneumática - RICARDO NEVES DE OLIVEIRA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO

BT/PMI/005 - Aluste de Modelos Empíricos de Operação de Ciclones - HOMERO DELBONI JUNIOR, ARTHUR PINTO CHAVES

BT/PMI/006 - Contribuição ao Estudo dos Explosivos Permissíveis - AMILTON DOS SANTOS ALMEIDA, WILDOR THEODORO HENNIES

BT/PMI/007 - Contribuição ao Dimensionamento de Pilares em Minas Subterrâneas de Manganês - LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA, ANTONIO STELLIN JUNIOR

BT/PMI/008 - Exploração Mineral: Conceitos e Papel do Estado - LUIZ AUGUSTO MILANI MARTINS, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO

BT/PMI/009 - Otimização do Projeto de Pátios de Homogeneização através do Método da Simulação Condicional - FLAVIO MOREIRA FERREIRA, ARTHUR PINTO CHAVES

BT/PMI/010 - Considerações Gerais sobre Desmonte de Rocha: Análise de Custo - Índice de Produtividade e Otimização da Malha de Perfuração - MARCO ANTONIO REZENDE SILVA, FERNANDO AMOS SIRIANI

BT/PMI/011 - Aglomeração de Rejeitos de Fabricação de Brita para sua Reciclagem - ARTHUR PINTO CHAVES, BRADDLEY PAUL

BT/PMI/012 - Método de Dimensionamento de Peneiras para a Classificação Granulométrica de Rochas ou Minérios - FERNANDO AMOS SIRIANI

BT/PMI/013 - Processo de Beneficiamento para Obtenção de uma Carga Mineral Nobre a partir do Fosfogesso - WALTER VALERY JUNIOR, ARTHUR PINTO CHAVES

BT/PMI/014 - Estudo da Carboxi-Metil-Celulose como Aglomerante para Pelotização - JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA, ARTHUR PINTO CHAVES

BT/PMI/015 - A Influência do Amido de Milho na Eficiência de Separação Apatita/Minerais de Ganga Via Processo Serrana - LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO, ARTHUR PINTO CHAVES

BT/PMI/016 - Beneficiamento de Criolita Natural - Estado da Arte - HENRIQUE KAHN, ARTHUR PINTO CHAVES

BT/PMI/017 - Estudo da Variação do Índice Energético Específico - W_i , segundo a Granulometria do Ensaio, Obtida através de um Moinho de Bolas Padrão, em Circuito Fechado - MARIO SHIRO YAMAMOTO, FERNANDO AMOS SIRIANI

BT/PMI/018 - Fluorita - FERNANDO FUJIMURA, WILDOR THEODORO HENNIES

BT/PMI/019 - O Aproveitamento de Recursos Minerais: Uma Proposta de Abordagem a Nível Nacional - CELSO PINTO FERRAZ, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO

- BT/PMI/020 - Comparação de duas Metodologias - A de Bieniawski e a de Panek, para Dimensionamento de Tirantes em Galerias Subterrâneas de Seção Retangular em Camadas Estratificadas - NESTOR KENJI YOSHIKAWA, LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA
- BT/PMI/021 - Caracterização de Maciços Rochosos através de Envolvimentos de Resistência por Tratamento Estatístico utilizando Dados de Laboratório do IPT Simulando Condições Geotécnicas do Maciço - NESTOR KENJI YOSHIKAWA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/022 - Avaliação de Impactos Ambientais na Mineração de Combustíveis Fósseis Sólidos - GILDA CARNEIRO FERREIRA, ANTONIO STELLIN JUNIOR
- BT/PMI/023 - O Lado Nocivo do Elemento Quartzo no Desgaste Abrasivo de Mandíbula de Britadores - FERNANDO FUJIMURA
- BT/PMI/024 - Conceitos Básicos de Iluminação de Minas Subterrâneas - SÉRGIO MEDICI DE ESTON, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/025 - Sistema Computadorizado para Ajuste de Balanço de Massas e Metalúrgico - ANTONIO CARLOS NUNES, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/026 - Caracterização Mineralógica/Tecnológica das Apatitas de alguns Depósitos Brasileiros de Fosfato - SARA LAIS RAHAL LENHARO, HELMUT BORN
- BT/PMI/027 - Classificação de Maciços quanto à Escarificabilidade - GUILHERME DE REZENDE TAMMERIK, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO, LINDOLFO SOARES
- BT/PMI/028 - Análise Comparativa de Métodos de Amostragem de Depósitos Auríferos - FÁBIO AUGUSTO DA SILVA SALVADOR, HELMUT BORN
- BT/PMI/029 - Avaliação da Qualidade de Corpos Moedores para o Minério Fosfático de Tapira - MG - GERALDO DA SILVA MAIA, JOSÉ RENATO B. DE LIMA
- BT/PMI/030 - Contribuição ao Estudo da Cominuição Inicial à Partir da Malha de Perfuração - MARCO ANTONIO REZENDE SILVA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/031 - Análises Químicas na Engenharia Mineral - GIULIANA RATTI, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/032 - Usos Industriais da Atapulga de Guadalupe (PI) - SALVADOR LUIZ MATOS DE ALMEIDA, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/033 - Minerais Associados às Apatitas: Análise de sua Influência na Produção de Ácido Fosfórico e Fertilizantes Fosfatados - ROBERTO MATTIOLI SILVA, ANTÔNIO EDUARDO CLARK PERES
- BT/PMI/034 - Beneficiamento dos Caulins do Rio Capim e do Jari - ADÃO BENVINDO DA LUZ, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/035 - Dimensionamento de Suportes em Vias Subterrâneas - LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/036 - Estudos da Modelagem Matemática da Moagem com Seixos para Talco de Diversas Procedências - MARIO VALENTE POSSA, JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA
- BT/PMI/037 - Mecânica de Rochas Aplicada ao Dimensionamento do Sistema de Atirantamento em Minas Subterrâneas - LEONCIO TEÓFILO CARNERO CARNERO
- BT/PMI/038 - Geometria de Minas a Céu Aberto: Fator Crítico de Sucesso da Indústria Mineral - FÁBIO JOSÉ PRATI, ANTÔNIO JOSÉ NAGLE
-

BT/PMI/039 - Substituição do Aço por Polímero e Compósitos na Indústria Automobilística do Brasil: Determinantes e Consequências para o Mercado de Minério de Ferro - WILSON TRIGUEIRO DE SOUSA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO, ANTONIO JOSÉ NAGLE

BT/PMI/040 - Aplicação de uma Metodologia que Simule em Moinho de Laboratório Operações Contínuas de Moagem com Seixos para Talco - REGINA COELI CASSERES CARRISSO, JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA

BT/PMI/041 - A Indústria Extrativa de Rochas Ornamentais no Ceará - FRANCISCO WILSON HOLLANDA VIDAL, ANTONIO STELLIN JÚNIOR

BT/PMI/042 - A Produção de Fosfato no Brasil: Uma Apreciação Histórica das Condicionantes Envolvidas - GILDO DE A. DE SÁ C. DE ALBUQUERQUE, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO

BT/PMI/043 - Flotação em Coluna - Estado de Arte - JULIO CESAR GUEDES CORREIA, LAURINDO SALIES LEAL FILHO

BT/PMI/044 - Purificação de Talco do Paraná por Flotação e Alvejamento Químico - IVAN FALCÃO PONTES, LAURINDO SALLES LEAL FILHO

BT/PMI/045- Pequena Empresa - A Base para o Desenvolvimento da Mineração - GILSON EZEQUIEL FERREIRA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO

BT/PMI/046 - Máquinas de Flotação - ROGÉRIO CONTATO GUIMARÃES, ANTÔNIO EDUARDO CLARK PERES

BT/PMI/047 - Aspectos Tecnológicos do Beneficiamento do Carvão de Candiota (RS) - ANTONIO RODRIGUES DE CAMPOS, ARTHUR PINTO CHAVES

