

**LEIS DE COMPRESSIBILIDADE E PERMEABILIDADE DE ALGUNS  
REJEITOS BRASILEIROS.**

Prof. Assist. Luiz Guilherme F. S. de Mello - Escola Politécnica da USP  
Eng. Armando Alencar da Silveira - Escola de Engenharia de São Carlos

**RESUMO**

As indiscutíveis vantagens do uso da Teoria de Adensamento a Grandes Deformações para a avaliação da vida útil de reservatórios de rejeitos lançados por via úmida, vem sendo apresentadas na bibliografia internacional e nacional.

O uso de programas de computador na simulação das várias etapas do enchimento e do comportamento dos reservatórios quando abandonados requer que as leis de Compressibilidade e Permeabilidade dos rejeitos em deposição sejam postuladas desde elevados índices de vazios.

Discute-se no presente trabalho tais leis de comportamento geomecânico para alguns rejeitos de atividades de beneficiamento no Brasil, a saber, bauxita, cromita, urânio, fluorita, titânio e caulim, incorporando-se também dados referentes ao material fino dragado do rio Pinheiros (Gobara & Pinto, 1990). As leis de comportamento são obtidas através de ensaios de consolidômetro de lama a tensão ou deformação controlada ou extrapoladas a partir de ensaios de caracterização, especialmente realizados para o estudo.

**1. INTRODUÇÃO**

Este trabalho pretende reunir parte da experiência adquirida e disponível no estudo do comportamento de rejeitos gerados no processo de beneficiamento de diferentes minérios, na tentativa de composição de um banco de dados no qual se inserirão, progressivamente, novos resultados. Procurou-se incluir dados constantes da bibliografia nacional, sempre que apresentados em maneira compatível com a utilizável na otimização da deposição destes rejeitos segundo nossa sistemática de análise. A bibliografia nacional apresenta um pequeno volume de trabalhos publicados que atendem os requisitos necessários. Desta forma, o espaço amostral apresentado é um tanto restrito, mas esperamos que este trabalho também sirva como estímulo para a execução e divulgação de novos testes, em diferentes rejeitos, que venham a complementá-lo em um futuro próximo.

Basicamente, os rejeitos derivam-se da lavagem da bauxita e do beneficiamento de cromita, fluorita, titânio, caulim e urânio. Incluem-se também resultados dos materiais finos de dragagem da calha do rio Pinheiros em São Paulo (Gobara & Pinto, 1990).

Ensaios especiais de laboratório, realizados em consolidômetros de lama de diferentes tipos (a tensão controlada e a fluxo restrito), e formulações empíricas baseadas nos resultados de ensaios rotineiros de caracterização em Mecânica dos Solos, permitem a obtenção das leis de Compressibilidade e Permeabilidade dos diversos rejeitos. A partir destas leis e de programas especiais de computador que utilizam a Teoria de Adensamento a Grandes Deformações, otimiza-se a deposição dos rejeitos em lagoas ou reservatórios especialmente construídos em sintonia com os objetivos ambientalistas da empresa e com reduzida relação custo/benefício. Um balanço hídrico realista também é obtido a partir da otimização da geometria das áreas de deposição, das taxas de produção da planta industrial e das condições meteorológicas do local.

## 2. CONCEITUAÇÃO DE SEDIMENTAÇÃO E DE CONSOLIDAÇÃO

A deposição de rejeitos pode ser caracterizada por três estágios distintos (Pane, 1985); o primeiro deles consiste na sedimentação propriamente dita, na qual as partículas são solicitadas pela gravidade sem contato umas com as outras. Uma segunda fase seria aquela em que ocorrem interações físicas entre as partículas. Finalmente, o fenômeno de adensamento por peso próprio passa a ser caracterizado a partir do momento em que as partículas transmitem tensões através do arcabouço sólido do material (Bromwell, 1984).

A utilização da Teoria de Adensamento a Grandes Deformações é válida a partir do momento em que se estabelece a transmissão de tensões grão a grão.

A distinção exata do índice de vazios a partir do qual há mudança de comportamento é difícil, sendo que na prática um pequeno erro em sua determinação resulta em estimativa de tempos de consolidação com pequena variação em relação ao tempo total de adensamento previsto.

Uma estimativa prática do índice de vazios de transição entre sedimentação e consolidação pode ser realizada a partir de ensaios de sedimentação de 24 horas em tubos de ensaio, para minimizar as tensões efetivas atuantes. Pode também ser estimado a partir da correlação proposta por Carrier et al. (1983):

$$e_1 = 7 * G * LL$$

onde  $e_1$  = índice de vazios inicial

G = densidade dos grãos

LL = limite de liquidez

O teor de sólidos dos rejeitos conforme produzidos na planta industrial de uma mineração governa a existência/duração do processo de sedimentação anterior à fase de adensamento.

## 3. PARAMETROS DE COMPORTAMENTO GEOMECANICO

Os estudos para a sistemática de deposição dos rejeitos das atividades de mineração e dragagem tem na previsão da vida útil dos reservatórios sua principal preocupação. Em dependência da maior presença de partículas de pequenos diâmetros, inferiores a 0,002 mm, e em função do tipo dos argilo-minerais presentes, aumentam as dificuldades de adensamento destes materiais.

A utilização da Teoria Clássica do Adensamento, proposta por Terzaghi, em vista das hipóteses simplificadoras introduzidas no processo de adensamento, não representa de forma ideal o comportamento de rejeitos, uma vez que as propriedades geomecânicas destes variam durante a consolidação.

A Teoria de Adensamento a Grandes Deformações (Gibson et al., 1967, 1981) apresenta hipóteses mais realistas do comportamento dos materiais em níveis de tensão normalmente encontrados na mineração.

Segundo Carrier & Beckman (1984), a previsão do comportamento dos finos é bastante compatível com o processo desenvolvido no campo.

Somogyi (1980) e Carrier et al. (1983) propuseram uma solução numérica rigorosa e de simples utilização para a deposição de rejeitos para o caso de adensamento unidimensional. Soluções adicionais se encontram disponíveis para a análise do enchimento de vales fechados por barragens. Para tanto, torna-se necessário o conhecimento das características de compressibilidade e permeabilidade, o índice de vazios no início do processo de consolidação e as condições de beneficiamento no que diz respeito a produção de rejeitos, tempo de lançamento e drenagem periférica dos reservatórios.

Através de ensaios de laboratório realizados em consolidômetros de lama em tensão controlada, ou equipamentos mais refinados ("restricted flow consolidometer", centrifugas, etc) é possível definir-se com bastante precisão as leis que regem a compressibilidade e a permeabilidade dos rejeitos em uma grande faixa de níveis de tensões.

Carrier & Beckman (1984), apresentam o resultado de ensaios em uma grande série de rejeitos, oferecendo equações empíricas que permitem correlacionar as leis de Compressibilidade e Permeabilidade com os ensaios rotineiros de caracterização em Mecânica dos Solos. Salienta-se apenas que os Limites de Atterberg para uso nestas correlações devem ser determinados com material que passa na peneira de malha 200 (ASTM).

A lei de Compressibilidade obedece a seguinte relação empírica:

$$e = \alpha (\sigma' / P_{atm})^\beta + \epsilon$$

onde e = índice de vazios

$\sigma'$  = tensão efetiva

$P_{atm}$  = pressão atmosférica

$\alpha, \beta$  e  $\epsilon$  = coeficientes empíricos relacionados com as características intrínsecas dos rejeitos.

A lei de Permeabilidade será dada por:

$$k = \mu \frac{(e - d)^\gamma}{(1 + e)}$$

onde k = permeabilidade

e = índice de vazios

$\mu, d$  e  $\gamma$  = coeficientes empíricos relacionados com as características intrínsecas dos rejeitos.

Estas formulações podem ser utilizadas fornecendo leis de comportamento preliminares bastante confiáveis para a execução de simulações iniciais, no aguardo dos resultados de ensaios de laboratório mais rigorosos.



#### 4. INFLUENCIA DA PLASTICIDADE NAS LEIS DE COMPRESSIBILIDADE

De uma maneira geral a plasticidade influencia bastante o adensamento dos rejeitos e, quando as leis de comportamento são extrapoladas a partir de ensaios de caracterização, de acordo com as formulações empíricas mencionadas no item anterior, a plasticidade do material tem influência direta no estabelecimento de suas leis de comportamento.

Com o aumento da plasticidade, é sensível a mudança na consolidação dos rejeitos.

Desta forma, visualiza-se facilmente que nos materiais mais argilosos são requeridos maiores tempos de adensamento para que se atinja um mesmo adensamento, fato este dificultando o adensamento durante a própria deposição dos rejeitos. As simulações realizadas e apresentadas a seguir evidenciam este argumento.

A figura 1 apresenta o gráfico de plasticidade para os rejeitos, colocando como materiais de baixa compressibilidade (ML e CL) os rejeitos de urânio, titânio e fluorita, e como materiais de alta compressibilidade (CH), os rejeitos de bauxita, caulim, cromita e o material fino dragado do rio Pinheiros. A permeabilidade nos materiais CL e CH é menor do que para os materiais ML.

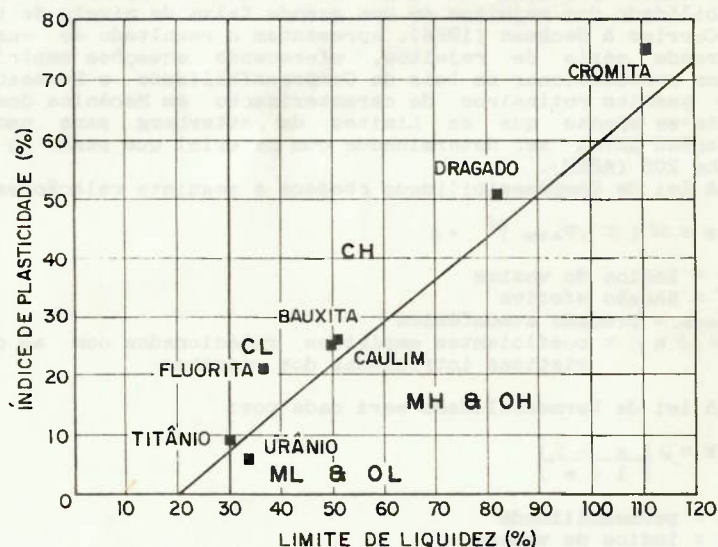


FIG. 1 - GRÁFICO DE PLASTICIDADE

#### 5. PROPRIEDADES DOS REJEITOS ESTUDADOS

Os rejeitos do beneficiamento da bauxita são provenientes da lavagem do minério. Suas leis de comportamento foram postuladas a partir de ensaios em consolidômetros de lama, ensaios de centrifugação e aferição no campo, em áreas teste de deposição.

Os rejeitos do processamento da fluorita são originários de uma ciclonagem do material proveniente da britagem e da flotação. Estes rejeitos são depositados em conjunto. As leis de comportamento são estimadas a partir dos ensaios de caracterização voltada a rejeitos.

O estudo das propriedades dos rejeitos de beneficiamento da cromita permitiu a postulação de leis de comportamento estimadas a partir dos ensaios de caracterização e aferidas em consolidômetros de lama.

Os rejeitos do processamento do urânio consistem de uma mistura de materiais originários do processo de filtragem do "yellow cake" e líquidos obtidos nos processos de lixiviação e precipitação. As leis de comportamento são estimadas a partir de ensaios em consolidômetros de lama.

Rejeitos gerados pelo beneficiamento do titânio foram estudados em consolidômetros de lama e suas leis de comportamento determinadas para a otimização dos reservatórios de estocagem.

Os rejeitos do beneficiamento do caulim resultam do processo industrial de branqueamento do minério. As leis de comportamento são estimadas a partir de ensaios em "restricted flow consolidometers".

Os materiais finos originários da dragagem do rio Pinheiros apresentam parâmetros de compressibilidade e permeabilidade definidos a partir dos ensaios de adensamento em células de grande diâmetro.

A tabela 1 resume as características geotécnicas destes rejeitos, que seriam utilizáveis na formulação de suas leis de comportamento a partir das equações empíricas anteriormente discutidas:

REJEITO	LL (%)		LP (%)		ARGILA (%)	SILTE (%)	AREIA (%)	DENS. GRAOS
	#40	#200	#40	#200				
URANIO	-	34.0	-	28.0	8.0	36.0	56.0	2.7
TITANIO	26.3	30.4	21.4	21.2	1.0	69.0	30.0	3.6
FLUORITA	37.0	-	17.0	-	4.0	96.0	0.0	2.9
CROMITA	113.9	110.8	38.0	35.9	2.0	96.0	2.0	2.7
BAUXITA	-	51.0	-	25.0	56.0	44.0	0.0	2.9
CAULIM	53.0	50.0	26.0	25.0	46.0	54.0	0.0	2.6
DRAGADO	82.0	-	31.0	-	10.0	45.0	45.0	2.5

TABELA 1 - CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS REJEITOS

A figura 2 apresenta as curvas granulométricas destes rejeitos.

As figuras 3 e 4 apresentam respectivamente as leis de Compressibilidade e de Permeabilidade para os materiais estudados.

## 6. SIMULAÇÃO DO ENCHIMENTO DE RESERVATORIO TIPICO

A partir das leis que regem a compressibilidade e a permeabilidade dos rejeitos pode-se, com o auxílio de computador realizar simulações de enchimento de reservatórios, obedecendo as hipóteses da Teoria de Adensamento a Grandes Deformações. Inúmeros trabalhos discutem os dados de entrada, as hipóteses de trabalho e os dados de saída destas simulações numéricas. O "Symposium on Consolidation and Disposal of Phosphatic and Other Waste Clays" (1987) discute longamente as metodologias de análise e os resultados obtiveis.

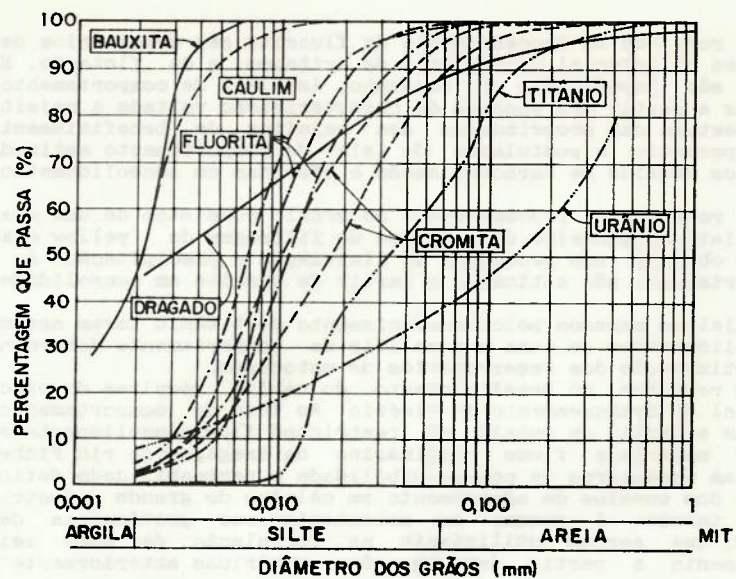


FIG. 2 - CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

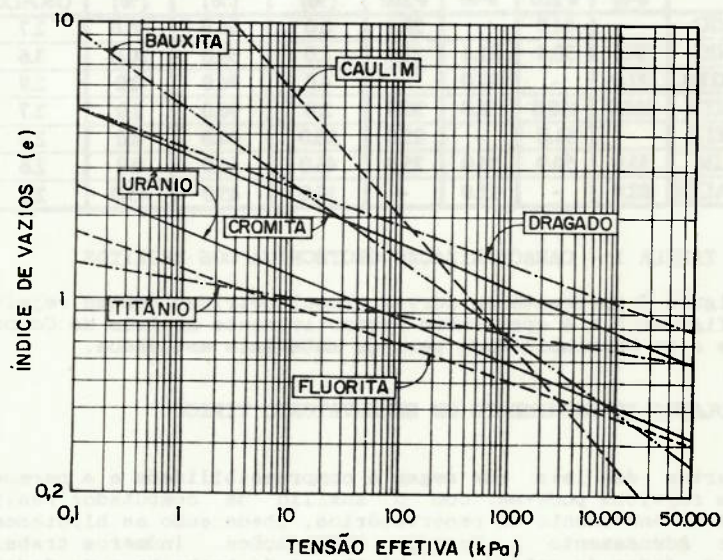


FIG. 3- LEIS DE COMPRESSIBILIDADE



Nas simulações realizadas, utilizou-se um reservatório cilíndrico com área equivalente a 40 ha, enchido durante 5 anos e taxa de produção de 300.000 toneladas/ano (base seca).

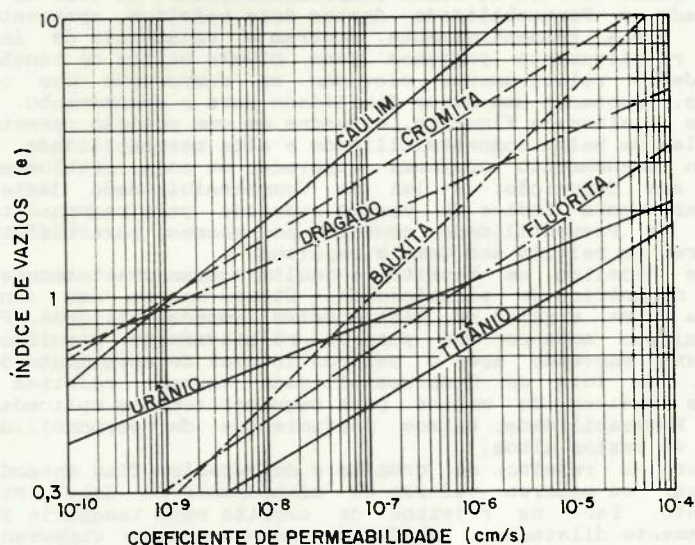


FIG. 4 - LEIS DE PERMEABILIDADE

A tabela 2 apresenta os resultados das simulações realizadas para os rejeitos identificados no item 4:

REJEITO	TEOR DE SÓLIDOS INICIAL (%)	ALTURA APOS 5 ANOS (m)	TEOR DE SÓLIDOS APOS 5 ANOS MEDIO (%)	RECALQUE ADICIONAL ESPERADO (m)	ALTURA FINAL (m)	TEOR DE SÓLIDOS FINAL MEDIO (%)
CROMITA	13,20	13,00	39,00	4,95	8,05	54,60
DRAGADO	14,30	10,60	46,10	1,20	9,40	50,30
CAULIM	14,60	40,30	15,10	24,60	15,70	33,90
TITÂNIO	23,60	2,60	90,10	0,05	2,55	90,60
BAUXITA	30,00	11,70	41,80	3,80	7,90	54,70
URÂNIO	32,60	5,50	69,10	0,10	5,40	69,70
FLUORITA	44,70	4,60	75,00	0,15	4,45	76,30

TABELA 2 - SIMULAÇÕES DO ENCHIMENTO DE RESERVATÓRIO

De acordo com a figura 2, que mostra a posição dos rejeitos no gráfico de plasticidade, identificando características com relação a compressibilidade e permeabilidade, e com a tabela 2, dos resultados das simulações realizadas para o enchimento do reservatório definido nos parágrafos anteriores, podemos dizer o seguinte:

Os rejeitos de urânio, constituídos praticamente por pó de pedra, confirmam a expectativa de alta permeabilidade e baixa compressibilidade, apresentando praticamente todo o adensamento

esperado durante sua deposição para o reservatório típico estudado. Mesma consideração pode ser estendida aos rejeitos do beneficiamento de titânio, que encontram-se em uma zona intermediária de argilas/materiais finos inertes de baixa compressibilidade. As leis de Compressibilidade e Permeabilidade destes dois rejeitos, apresentadas nas figuras 3 e 4, respectivamente, mostram a existência de índices de vazios relativamente pequenos para níveis baixos de tensão e permeabilidades relativamente elevadas em comparação com os outros rejeitos, denotando uma maior facilidade para o adensamento.

Os rejeitos de fluorita, situados em uma posição característica de argilas de baixa compressibilidade e alta permeabilidade, apresentam seu adensamento conforme esperado, ou seja, praticamente todo durante sua deposição. A lei de Compressibilidade deste rejeito também apresenta índice de vazios reduzido para pequenas tensões e sua lei de Permeabilidade confere as mesmas características dos anteriores em relação aos demais rejeitos.

Os rejeitos de bauxita e caulim ocupam praticamente a mesma posição no gráfico de plasticidade. Situam-se em uma zona intermediária entre argilas de alta e baixa compressibilidade. Para um e outro rejeito nota-se uma parcela relativamente significativa de adensamento esperado após o período inicial de enchimento do reservatório. As leis de Compressibilidade destes rejeitos indicam elevados índices de vazios para pequenas tensões aplicadas e suas leis de Permeabilidade, baixos coeficientes de permeabilidade para índices de vazios altos.

Para os rejeitos de cromita e do material fino dragado era de se esperar os maiores valores de adensamento na fase posterior ao enchimento. Para os rejeitos de cromita esta tendência de tempos relativamente dilatados é verificada, embora quando comparada com os rejeitos de bauxita e caulim esta tendência deixe de se manifestar.

Para os rejeitos do material fino dragado, o comportamento apresentado confunde-se com aquele referente a materiais finos praticamente inertes, pois seu adensamento é verificado quase na totalidade na fase de deposição. Talvez a posição ocupada no gráfico de plasticidade, na vizinhança da linha A, separadora de materiais argilosos e finos praticamente inertes, exerça real influência, caracterizando de forma errônea estes rejeitos quanto suas características de compressibilidade e permeabilidade. Pelas leis de comportamento, nota-se que o material dragado apresenta índices de vazios menores que os rejeitos de caulim e bauxita para pequenas tensões e permeabilidades maiores para um mesmo índice de vazios, denotando uma facilidade maior para o adensamento. Em comparação com os rejeitos de cromita, apresenta índices de vazios maiores com o desenvolver de tensões e permeabilidades também maiores para os mesmos índices de vazios.

As simulações da vida útil de reservatórios, iniciando pelo seu enchimento e dando continuidade com o adensamento sob peso próprio, novas etapas de enchimento ou de aplicação de pré-cargas e, finalmente, de início de recuperação ambiental, em microcomputadores são ferramenta hoje indispensável para melhor subsidiar estudos econômicos de planejamento de atividades mineradoras.

A otimização da geometria, área e altura dos reservatórios para melhor aproveitar as características de cada rejeito, assim como para facilitar a recuperação ambiental futura das áreas de deposição é parte corrente nos processos decisórios.

A postulação de leis de comportamento a partir de resultado de ensaios de caracterização dos rejeitos deve sempre ser aliada ao bom senso para impedir que comportamentos anômalos, gerados por eventuais alterações químicas introduzidas durante o beneficiamento do minério,



condicionem de maneira inadequada e irreal os estudos de deposição dos rejeitos.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

BROMWELL, L.G. (1984). Consolidation of Mining Wastes. Proc. Symposium on Sedimentation Models. ASCE. p. 275-295, São Francisco, EUA.

CARRIER, W.D. III; BROMWELL, L.G. & SOMOGYI, F. (1983). Design Capacity of Slurried Mineral Waste Ponds. ASCE. v. 109, nº 5, p. 699-716.

CARRIER, W.D. III & BECKMAN, J.F. (1984). Correlations between index Tests and the Properties of Remoulded Clays. Géotechnique 34, nº 2, p. 211-228.

GIBSON, R.E.; ENGLAND, G.L. & HUSSEY, J.H.L. (1967). The Theory of one-dimensional Consolidation of Saturated Clays. Géotechnique 18, nº 2, p. 280-293.

GOBARA, W. & PINTO, C.S. (1990). O Ensaio de Adensamento Hidráulico em Grandes Dimensões para Materiais sujeitos a Deformações Finitas. IX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. v. 1, p. 63-69, Salvador.

PANE, V. (1985). Sedimentation and Consolidation of Clays. Tese de Doutorado, Universidade do Colorado. 302 p., Boulder. EUA.

SOMOGYI, F. (1980). Large Strain Consolidation of Fine-grained Slurries. Apresentado à Canadian Society for Civil Engineering. Annual Conference, Winnipeg, Manitoba.