

# AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE LIQUEFAÇÃO ESTÁTICA DE REJEITOS DE MINERAÇÃO

Evaluation of static liquefaction potential of mining tailings

Eleonardo Lucas Pereira\*

Romero César Gomes\*\*

Luís Fernando Martins Ribeiro\*\*\*

**RESUMO** – O fenômeno da liquefação está diretamente relacionado à perda repentina da resistência dos materiais granulares, fofos e saturados, induzida por uma redução significativa das tensões efetivas e, em consequência, por um desenvolvimento de elevadas poropressões. O mecanismo, em muitos casos, é causado pelos efeitos de vibrações, associadas os eventos sísmicos ou detonações. Por outro lado, em regiões assísmicas, caso do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais (Brasil), o fenômeno pode ocorrer mesmo sob carregamentos estáticos. Para a investigação da susceptibilidade à liquefação dos rejeitos granulares de minério de ferro, foram coletadas amostras em seis diferentes sistemas de contenção da região do Quadrilátero Ferrífero e realizado um amplo programa experimental. Os estudos consistiram de séries de ensaios triaxiais não-drenados, em amostras adensadas isotropicamente. Os resultados obtidos são apresentados neste trabalho, constatando-se a possibilidade de ocorrência do fenômeno em rejeitos de minério de ferro e demonstrando a consistência das metodologias de avaliação adotadas.

**SYNOPSIS** – The liquefaction process is strictly related to the abrupt loss of shear strength of loose, saturated and coarse grains. It is induced by a significant decrease in the effective stress and the consequent increase in pore pressure, which, in turn, can be related to vibration, seismic events and the use of explosives. Liquefaction may also be present in non seismic regions, as the case of the Quadrilátero Ferrífero, in the state of Minas Gerais, Brazil, due to static loading. In this work iron ore tailings were investigated for their susceptibility to liquefaction. For that, tailings samples were collected in six different tailings containment systems of the Quadrilátero Ferrífero, followed by an extensive laboratory program. Many series of triaxial tests under undrained conditions were performed in isotropically consolidated samples. The results of these tests are presented in this work, showing that the occurrence of liquefaction is a possibility for iron ore tailings, corroborating also the methods used for evaluating this phenomenon.

**PALAVRAS CHAVE** – Liquefação, ensaios de laboratório, rejeitos de mineração.

## 1 – INTRODUÇÃO

A região do Quadrilátero Ferrífero, localizada no estado de Minas Gerais, Brasil, com área aproximadamente de 7.000 km<sup>2</sup>, é caracterizada por possuir imensas reservas de minério de ferro, ouro, manganês e outros minerais, cuja exploração sistemática e intensa resulta em volumes consideráveis de resíduos. Deste acervo mineral de grandes proporções, participam grandes conglomerados industriais (Samarco, CVRD, MBR, etc.) e um sem número de minerações de pequeno e médio porte.

---

\* Mestre em Geotecnia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil

\*\* Professor Doutor, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil

\*\*\* Professor Doutor, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasil

A partir da década de 70 foram feitos grandes investimentos tecnológicos nesta região, visando aumentar a capacidade operacional nos processos de concentração e beneficiamento dos minérios itabiríticos. Com os elevados investimentos tecnológicos aplicados na região, ocorreram aumentos substanciais dos volumes de resíduos gerados. Os resíduos remanescentes, denominados rejeitos de mineração, apresentam características e comportamentos geotécnicos que dependem diretamente do tipo de minério bruto, bem como dos processos que envolvem o beneficiamento industrial.

A disposição dos rejeitos oriundos do processo produtivo exige um planejamento racional e criterioso, a partir do plano de lavra e das premissas de recuperação do minério, em virtude dos grandes volumes envolvidos. Em geral, os rejeitos são dispostos por via úmida através de barramentos construídos com ou sem a utilização dos próprios rejeitos (barragens de contenção) ou por via seca mediante as chamadas pilhas de rejeitos que, ao contrário das barragens, não têm o objetivo de reter líquidos conjuntamente com a matéria sólida descartada.

Em alguns casos, podem ser usados dispositivos especiais, como os hidrociclones, por exemplo, para separação das frações grossa e fina em rejeitos. Em outras situações, o processo de segregação natural das partículas do rejeito pode tornar-se um fenômeno bastante complexo em face das diferentes densidades dos minerais presentes (evento típico em minerações de ferro, devido a interação de diferentes granulometrias e densidades de grãos de sílica e óxidos de ferro).

A construção de uma barragem de rejeito, geralmente, é feita pela própria mineradora e o alteamento ocorre de acordo com a necessidade de armazenamento do rejeito. Este processo apresenta vantagens econômicas em relação às barragens convencionais compactadas, que são usualmente finalizadas num curto período de tempo antes do enchimento. Entretanto, o controle construtivo destas barragens de rejeito é geralmente limitado e podem ocorrer rupturas associadas à má aplicação das práticas construtivas (Gomes et al., 2001).

Adicionalmente, as barragens de rejeito, em sua maioria, são projetadas com a técnica de aterros hidráulicos pelo método de alteamento para montante. Esta metodologia, no entanto, pode apresentar grandes problemas relacionados aos aspectos construtivos e de segurança, pois existem poucas especificações técnicas relacionadas a este tipo de estrutura.

Além de apresentar possibilidade de saturação, os rejeitos granulares dispostos através de aterros hidráulicos podem também apresentar, devido à forma de lançamento, densidades relativamente baixas, favorecendo, desta forma, a ocorrência de fenômenos associados à liquefação. Estes podem ser deflagrados por carregamentos estáticos, associados, por exemplo, a uma elevação súbita do lençol freático ou a um movimento localizado de massa, sem conotações dinâmicas, em uma área francamente assísmica como é o caso da região do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais.

Com isso, tornam-se extremamente importantes análises e abordagens específicas sobre o comportamento geotécnico de rejeitos de minério ferro à liquefação, sob carregamentos estáticos, que podem ser implementadas através de ensaios de campo e/ou laboratório. O presente estudo aborda o mecanismo a partir de técnicas experimentais de laboratório.

## **2 – O FENÔMENO DA LIQUEFAÇÃO**

Muito recentemente, o fenômeno da liquefação em solos tem sido muito incrementado em função de diversos registros de rupturas de encostas, diques e depósitos de materiais granulares induzidos pelo mesmo. A maioria das pesquisas, entretanto, tem sido direcionada à ocorrência do fenômeno sob condições dinâmicas, principalmente em países com registros constantes de eventos

sísmicos. Avaliações direcionadas para as tensões estáticas, como condicionantes do mecanismo de ruptura, têm sido raramente realizadas (Fourie et al., 2001).

A liquefação pode ser basicamente entendida como sendo uma ação de levar qualquer substância de seu estado natural ao estado fluido e, no caso dos solos, do estado sólido para o estado liquefeito. Para tal, impõe-se um dado acréscimo da poropressão em concomitância com a redução das tensões efetivas. Esta transformação decorre da brusca aplicação de uma determinada carga, que pode ter origem estática ou dinâmica.

Castro (1969), em estudo sobre a liquefação das areias saturadas, definiu a liquefação como sendo o fenômeno pelo qual a areia experimentou uma redução significativa da sua resistência ao cisalhamento, em condições não-drenadas, resultando em uma condição de fluxo da massa de solo até que as tensões cisalhantes em ação fossem compensadas pela própria resistência ao cisalhamento do solo.

O fenômeno está potencialmente associado a solos que apresentam tendência à contração (redução de volume) durante o cisalhamento. Os solos dilatantes, ou seja, aqueles que experimentam acréscimos de volume durante a ação cisalhante, não apresentam susceptibilidade à liquefação. A impossibilidade do mecanismo nestes solos está conectada à justificativa de que a resistência ao cisalhamento não-drenada é maior do que a resistência drenada (Poulos et al., 1985). Todavia, alguns autores associam o fenômeno também aos solos dilatantes.

Casagrande formalizou uma distinção clara entre dois fenômenos associados à liquefação: a chamada *liquefação cíclica*, relacionada ao comportamento de materiais granulares dilatantes durante solicitações cíclicas e a chamada *liquefação efetiva* (verdadeira), relacionada a uma redução substancial da resistência ao cisalhamento de materiais granulares, fofos e saturados. A redução da resistência ao cisalhamento pode ser induzida pelo desenvolvimento de poropressões elevadas, oriundas de grandes incrementos monotônicos (carregamentos estáticos) ou por eventos dinâmicos.

Uma outra classificação, mais comumente utilizada, é baseada nos agentes causadores do fenômeno: a liquefação dinâmica, causada por terremotos e vibrações e a liquefação estática. A liquefação estática pode estar associada a eventos tais como:

- elevação do nível d'água em depósitos de materiais granulares;
- carregamentos rápidos;
- movimentos de massa na área de influência dos depósitos de materiais granulares;
- excessos de precipitação pluviométrica.

Em países com índices sísmicos elevados, a ruptura sob condições estáticas não se dá, muitas vezes, devido às medidas involuntárias adotadas em projetos que visam o combate essencialmente voltado aos carregamentos sísmicos. Em zonas assísmicas, entretanto, o fenômeno tem sido responsável por rupturas de diques, barragens e aterros hidráulicos associados à deposição de rejeitos de mineração, pois nestas estruturas, em muitos casos, inexistente um sistema de controle as variáveis de deposição. A proposta da avaliação da susceptibilidade à liquefação de rejeitos de minério de ferro realizada no presente estudo está condicionada ao fenômeno da liquefação estática, uma vez que o Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais está localizado numa região francamente assísmica (Tibana et al., 1998; Gomes et al., 2002; Pereira, 2005).

### 3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para a realização dos estudos, foram coletadas amostras deformadas de rejeitos de minério de ferro, considerando diferentes aspectos em termos da natureza do minério bruto, granulometria, processos de beneficiamento industrial e características químicas e mineralógicas.

As amostras, provenientes de seis diferentes sistemas de contenção de rejeitos, localizados em diferentes pontos do Quadrilátero Ferrífero do estado de Minas Gerais, foram coletadas comumente em dois pontos de referência ao longo do depósito (a cerca de 1 m e a 20 m de distância do ponto de lançamento). Para a identificação das amostras, adotou-se um código baseado na designação do nome da estrutura de contenção e da distância de coleta em relação ao ponto de lançamento. Desta maneira, as três letras iniciais da identificação correspondem ao nome da barragem ou pilha de rejeitos investigada e os algarismos subseqüentes caracterizam o ponto de coleta, em termos de distância do ponto de descarte ao longo da praia. Algumas amostras, submetidas aos ensaios de separação gravimétrica em mesa oscilatória para redução do teor de *Fe* presente, foram identificadas mediante a inclusão da letra R (de teor de *Fe reduzido*) à extensão.

#### 3.1 – Caracterização geotécnica dos rejeitos

Como etapa preliminar das análises experimentais, os rejeitos foram caracterizados de acordo com as normas técnicas padronizadas no Brasil, compreendendo ensaios para a determinação da massa específica dos grãos, análise granulométrica e determinação dos índices de vazios máximo e mínimo, todos realizados no Laboratório de Geotecnia da UFOP.

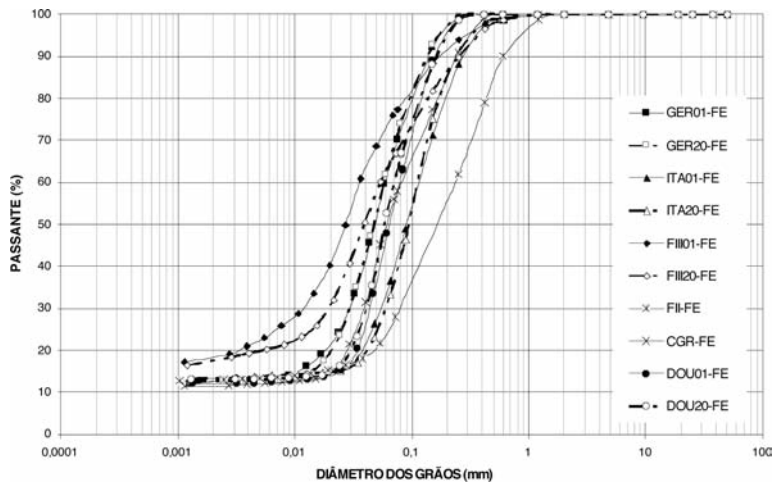
Os resultados dos ensaios para a determinação da massa específica dos grãos ( $\rho_s$ ) e determinação dos índices de vazios limites das doze amostras estudadas são apresentados no Quadro 1.

**Quadro 1** – Massa específica dos grãos e índices de vazios limites dos rejeitos analisados.

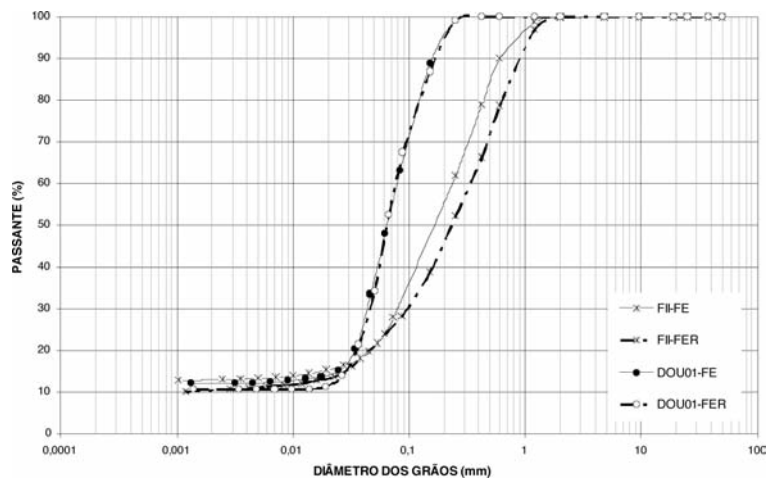
Sistema de contenção	Amostra	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$e_{\min}$	$e_{\max}$
Pilha de rejeitos da Cava do Germano (Samarco)	GER01-FE	3,395	0,624	1,327
	GER20-FE	3,266	0,621	1,255
Barragem de rejeitos de Itabiruçu (CVRD)	ITA01-FE	3,337	0,670	1,392
	ITA20-FE	3,411	0,669	1,365
Barragem de rejeitos de Forquilha III (CVRD)	FIII01-FE	3,945	0,642	1,766
	FIII20-FE	3,806	0,570	1,588
Barragem de rejeitos de Forquilha II (CVRD)	FII-FE	4,796	0,735	1,625
	FII-FER	3,630	0,618	1,160
Barragem de rejeitos de Campo Grande (CVRD)	CGR-FE	4,152	0,739	1,245
Barragem de rejeitos de Córrego do Doutor (CVRD)	DOU01-FE	3,366	0,604	1,368
	DOU20-FE	3,397	0,612	1,245
	DOU01-FER	2,923	0,505	0,991

As doze amostras de rejeitos foram submetidas ao ensaio de granulometria conjunta (peneiramento + sedimentação). A etapa de peneiramento restringiu-se à fração fina, pois todas as partículas das amostras ensaiadas passavam integralmente na peneira #10 (peneira com abertura padrão de 2

mm), com exceção da amostra FII-FE, que apresentou uma pequena parcela (0,2%) retida nessa peneira. As curvas granulométricas obtidas são apresentadas nas Figuras 1 e 2. As frações granulométricas de todas as amostras são dadas no Quadro 2.



**Fig. 1** – Curvas granulométrica das amostras iniciais dos rejeitos.



**Fig. 2** – Curvas granulométrica dos rejeitos submetidos à redução do teor de ferro.

**Quadro 2** – Distribuição granulométrica dos rejeitos analisados.

Amostra	Fração argila (%)	Fração silte (%)	Fração areia (%)		
			Fina (%)	Média (%)	Grossa (%)
GER01-FE	13,0	48,0		39,0	
			36,5	2,5	–
GER20-FE	13,0	49,0		38,0	
			35,5	2,5	–
ITA01-FE	13,5	20,5		66,0	
			47,0	18,0	1,0
ITA20-FE	13,5	17,0		69,5	
			54,5	14,0	1,0
FIII01-FE	18,5	55,0		26,5	
			18,5	7,5	0,5
FIII20-FE	18,0	45,0		37,0	
			23,5	12,5	1,0
FII-FE	13,0	11,0		76,0	
			32,0	34,0	10,0
FII-FER	10,5	13,0		76,5	
			22,0	33,5	21,0
CGR-FE	12,0	38,0		30,0	
			15,5	14,5	–
DOU01-FE	12,0	35,0		53,0	
			49,0	4,0	–
DOU20-FE	13,0	39,0		48,0	
			43,0	5,0	–
DOU01-FER	11,0	36,0		53,0	
			48,0	5,0	–

### 3.2 – Caracterização química e mineralógica dos rejeitos

Para verificação da influência das composições químicas e mineralógicas dos rejeitos de minério de ferro, e suas variações relacionadas ao teor de ferro na susceptibilidade à liquefação, foram realizadas caracterizações baseadas em análises químicas através do plasma de acoplamento indutivo (ICP) e de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados das análises químicas estão detalhados no Quadro 3.

**Quadro 3** – Composição química dos rejeitos analisados.

Amostra	Composição (%)				
	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	MnO <sub>2</sub>
GER01-FE	22,22	69,20	0,22	0,01	0,14
GER20-FE	17,60	76,65	0,22	0,01	0,02
ITA01-FE	19,18	72,10	0,60	0,01	0,14
ITA20-FE	20,95	80,90	0,66	0,02	0,13
FIII01-FE	35,17	43,17	2,26	0,07	0,69
FIII20-FE	33,72	46,46	2,03	0,06	0,59
FII-FE	53,96	18,47	1,47	0,05	0,42
FII-FER	41,91	34,32	2,02	0,08	0,47
CGR-FE	42,45	37,71	0,33	0,03	0,03
DOU01-FE	23,00	66,29	0,44	0,01	0,04
DOU20-FE	21,41	70,85	0,40	0,02	0,04
DOU01-FER	14,43	78,69	0,38	0,01	0,09

As amostras para as análises microscópicas de varredura dos rejeitos de minério de ferro foram preparadas em “stubs” (forma cilíndrica) com cerca de 15 mm de diâmetro e recobertas com evaporação de carbono, permitindo, desta forma, a realização de micro-análises. Após preparadas e evaporadas, as amostras foram levadas ao MEV, sendo realizadas micro-análises e análises morfológicas de todos os rejeitos. Além da evidência clara da hematita e do quartzo em todos os rejeitos de minério de ferro analisados, algumas amostras apresentaram também uma presença marcante de goethita (Quadro 4).

**Quadro 4** – Quadro resumo dos minerais identificados nos rejeitos submetidos ao MEV.

Amostra	Principais minerais identificados
GER01-FE	quartzo, hematita e goethita
GER20-FE	quartzo, hematita e goethita
ITA01-FE	quartzo e hematita
ITA20-FE	quartzo, hematita e goethita
FIII01-FE	quartzo, hematita e goethita
FIII20-FE	quartzo, hematita e goethita
FII-FE	quartzo, hematita e goethita
CGR-FE	quartzo, hematita e goethita
DOU01-FE	quartzo e hematita
DOU20-FE	quartzo, hematita e goethita

### 3.3 – Ensaio de compressão triaxial

As amostras que constituíram os corpos de prova foram moldadas a partir do rejeito granular seco em estufa. Posteriormente, acrescentou-se um volume d'água suficiente para a manutenção da estabilidade da amostra sobre a base do equipamento triaxial (em torno de 6 a 10% de umidade, dependendo da granulometria do rejeito). Para tanto, foi elaborado um molde bipartido com dimensões internas de 35,5 mm de diâmetro e 80 mm de altura, capaz de moldar corpos de prova de rejeitos com diferentes densidades. O procedimento de transferência das frações de rejeito para o molde bipartido foi realizado com o auxílio de uma pequena colher, que era levada até o fundo para se evitar efeitos de segregação, utilizando-se um bastão de 8 mm de diâmetro para a sua eventual compactação. A adoção deste procedimento possibilitou uma maior uniformidade da amostra, em termos estruturais e de densidade.

Todas as amostras foram moldadas com índices de vazios próximos ao  $e_{\max}$ , ou seja, correspondentes aos menores valores de densidades relativas ( $Dr$ ), suficientes para a estabilidade da amostra. A maioria das amostras foi moldada com valores de  $Dr$  abaixo de 20%. Entretanto, durante a fase de saturação por percolação e, principalmente, durante a aplicação da contra-pressão, as amostras sofreram ligeiras reduções de volume.

As tensões confinantes de trabalho variaram entre 50 e 200 kPa. Como se utilizou uma contra-pressão ( $u_p$ ) igual a 200 kPa para todas as amostras de rejeito, a pressão de célula necessária para atingir as tensões confinantes 50, 100 e 200 foram acrescidas deste valor de  $u_p$ . A contra-pressão de 200 kPa é sugerida como um valor razoável para amostras granulares reconstituídas (Head, 1986). As velocidades adotadas variaram entre 0,04 e 0,09 mm/min, de acordo com a metodologia adotada.

Os registros das tensões, poropressões e deslocamentos durante o ensaio foram controladas através de um medidor de variação de volume eletrônico, dotado de um sistema automático de aquisição de dados.

Com base na correlação entre parâmetros obtidos das envoltórias  $p'-q$  e os parâmetros de resistência  $c'$  e  $\phi'$  (coesão e ângulo de atrito efetivos) do critério de Mohr-Coulomb, foram determinados os parâmetros de resistência correspondentes às condições mais desfavoráveis (estado mais fofo possível) dos rejeitos de minério de ferro oriundos do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais (Quadro 5).

**Quadro 5** – Parâmetros de resistência dos rejeitos de minério de ferro.

Amostra	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	GC (%)	e	n (%)	Dr (%)	Parâmetros de pico	
						$c'$ (kPa)	$\phi'$ (o)
GER01-FE	1,64	78,47	1,07	51,69	36,81	2,46	35,18
ITA01-FE	1,58	79,00	1,11	52,61	39,49	0,03	25,89
FIII01-FE	1,85	77,08	1,13	53,05	56,46	6,34	28,67
FII-FE	1,86	67,39	1,57	61,09	5,79	0,89	24,49
FII-FER	1,85	82,59	1,09	52,15	12,47	0,83	34,02
CGR-FE	1,99	83,26	1,09	52,15	30,81	0,30	28,75
DOU01-FE	1,62	77,14	1,08	51,92	37,77	0,12	22,36
DOU01-FER	1,65	85,05	0,89	47,09	21,34	1,12	25,32



## 4 – AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE LIQUEFAÇÃO DOS REJEITOS

A susceptibilidade à liquefação dos rejeitos granulares de minério de ferro, em face do processo típico de deposição em aterro hidráulico destes resíduos, constitui premissa básica do projeto de suas estruturas de contenção e foi investigado neste trabalho por meio de ensaios triaxiais em amostras adensadas. Tais formulações, cujos princípios gerais e metodologias de análise foram tratados e discutidos previamente, são aplicadas ao conjunto dos rejeitos investigados.

### 4.1 – Determinação do fator de segurança contra a liquefação ( $F_L$ )

Poulos et al. (1985) estabeleceram um procedimento para avaliação do potencial de liquefação com a utilização de ensaios triaxiais não-drenados, sob deformação controlada, a partir de corpos de prova ensaiados sob variados índices de vazios. Aplicando-se diferentes tensões de confinamento, é possível a construção de diagramas  $p'$  versus  $q$  e  $e$  (índice de vazios) versus  $\sigma'_3$  (tensão efetiva principal menor), obtendo uma curva de ajuste chamada linha de regime permanente, em escala logarítmica.

Os autores recomendam ainda a construção de um diagrama  $e$  versus  $S_{su}$  (resistência ao cisalhamento não-drenada de regime permanente), uma vez que o procedimento para a avaliação do potencial de liquefação proposto é dependente desta variável. A determinação do valor de  $S_{su}$  pode ser feita a partir dos resultados dos ensaios triaxiais não-drenados, de acordo com as seguintes relações:

$$S_{su} = q_s \cos \phi_s \quad (1)$$

$$\tan \phi_s = \frac{q_s}{(\sigma'_{3c} - \Delta u_s) + q_s} \quad (2)$$

$$q_s = \frac{\sigma_{1s} - \sigma_{3s}}{2} \quad (3)$$

em que  $(\sigma_{1s} - \sigma_{3s})$  é a diferença das tensões principais de regime permanente,  $\sigma'_{3c}$  é a tensão principal menor no início do cisalhamento,  $\Delta u_s$  é a poropressão gerada no regime permanente e  $\phi_s$  é o ângulo de atrito de regime permanente.

No entanto, como o objeto da avaliação aplicada aos rejeitos é a condição de índice de vazios máximo possível, justificada pela sua técnica de disposição, a sistemática do procedimento proposto restringiu-se essencialmente às análises com amostras moldadas em uma única densidade relativa ( $Dr$ ). A densidade de moldagem refere-se ao maior índice de vazios conseguido durante a moldagem, próximo ao índice de vazios máximo. Cabe ressaltar que a compactidade obtida no momento da moldagem variou para cada tipo de rejeito, em função das suas especificidades de geração.

Os autores propõem, então, estimar a susceptibilidade do material à liquefação através da determinação de um fator de segurança de liquefação ( $F_L$ ), dado por:

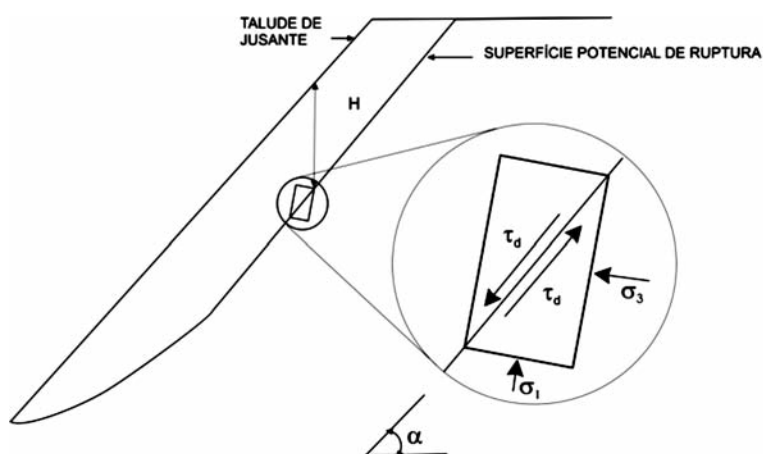
$$F_L = \frac{S_{su}}{\tau_d} \quad (4)$$

em que  $\tau_d$  é a tensão de cisalhamento necessária para a manutenção do equilíbrio estático, que pode ser obtida a partir de métodos clássicos de análise de estabilidade.

A maioria dos métodos clássicos de análise de estabilidade utiliza, além dos parâmetros de resistência dos materiais presentes, informações relativas à geometria da estrutura analisada, posição do nível freático, etc. No entanto, o procedimento foi aqui trabalhado com a consideração das propriedades e do comportamento dos rejeitos, sendo aplicadas situações hipotéticas relacionadas às variáveis geométricas das estruturas de contenção dos rejeitos.

A análise foi amparada na proposição de Ishihara *et al.* (2000). Nesta concepção, a tensão de cisalhamento é obtida por meio da análise simplificada da estabilidade de uma massa de material granular, com ruptura potencial paralela à inclinação de um talude hipotético (Figura 3), tal que  $\tau_d$  é expressa da seguinte forma:

$$\tau_d = \gamma \cdot H \cdot \text{sen} \alpha \quad (5)$$



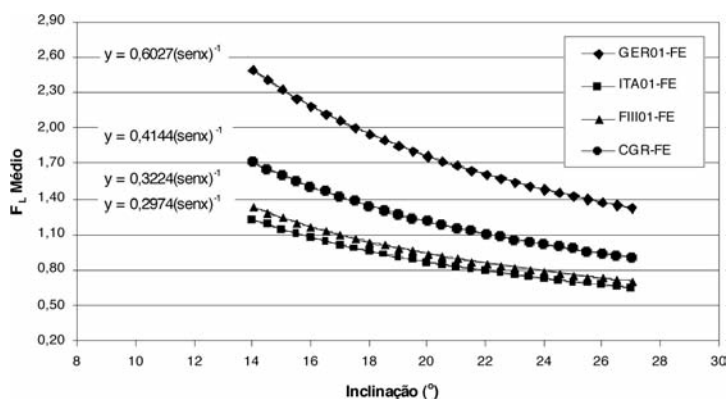
**Fig. 3** – Seção hipotética de um talude com ruptura paralela à inclinação (modificado de Ishihara *et al.*, 2000).

onde  $\tau_d$  é a tensão de cisalhamento,  $\gamma$  é o peso específico aparente do material em análise e  $H$  e  $\alpha$  são grandezas relacionadas à geometria do talude (Figura 3).

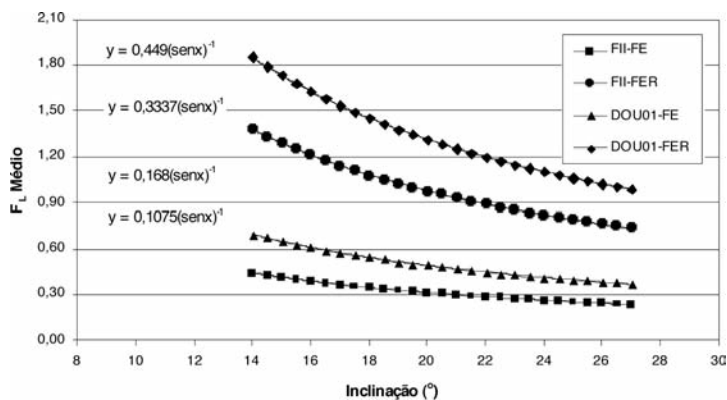
Dessa forma, o fator de segurança contra a liquefação, segundo a proposta apresentada por Poulos *et al.* (1985) e adaptada por Ishihara *et al.* (2000), dependerá fundamentalmente da inclinação do talude e da localização (profundidade) de uma superfície plana potencial de ruptura.

Os resultados foram processados com base na adoção dos valores médios de  $F_L$  (Figuras 4 e 5). A adoção dos valores médios contempla a posição de diversos autores (por exemplo, Sladen *et al.*, 1985) de que a estabilidade de materiais granulares à liquefação, em condição de regime permanente, é função somente do índice de vazios e, assim, os efeitos de confinamento não devem ser considerados como variáveis intervenientes no fenômeno.

Estes resultados demonstram a evidência da susceptibilidade ao fenômeno em alguns rejeitos, quando analisados com base na proposta de Poulos *et al.* (1985). Dentre os materiais estudados, os



**Fig. 4** – Relação entre valores médios de  $F_L$  e a inclinação para o rejeitos GER01-FE, ITA01-FE, FIII01-FE e CGR-FE.



**Fig. 5** – Relação entre valores médios de  $F_L$  e a inclinação para o rejeitos FII-FE, FII-FER, DOU01-FE e DOU01-FER.

rejeitos GER01-FE e CGR-FE apresentam-se bem estáveis face aos mecanismos potenciais de ruptura associados à liquefação. No caso do segundo, porém, valores de  $F_L < 1$  ocorrem para taludes com  $\alpha > 24^\circ$ , ou seja, taludes com inclinação superior a 1V:2,2H.

Os depósitos de rejeitos FIII01-FE e ITA01-FE somente seriam estáveis para inclinações muito suaves, da ordem de 1V:2,9H e 1V:3,2H, respectivamente. Contudo, quando os seus comportamentos são analisados levando em consideração taludes mais íngremes, tipicamente aplicados neste tipo de estrutura, por exemplo, acima de 1V:2,5H,  $F_L$  tende assumir valores de 0,87 para o rejeito FIII01-FE e de 0,80 para o rejeito ITA01-FE, evidenciando, portanto, condições críticas em termos de uma ruptura por liquefação, mesmo sob condições estáticas de carregamento.

Esta condição é ainda mais crítica no caso dos rejeitos FII-FE e DOU01-FE, que se mostram muito susceptíveis à liquefação sob carregamentos estáticos, com base nos valores de  $F_L$ . Durante o cisalhamento não-drenado desses materiais, observou-se uma geração excessiva das poropressões. Em contrapartida, ocorreram quedas abruptas das tensões efetivas, tendo o regime permanente de resistência no plano de ruptura ( $S_{su}$ ) assumido valores relativamente mais baixos. Este fato evidenciou o aparecimento de números de  $F_L$  abaixo da unidade para os rejeitos FII-FE e DOU01-FE,

mesmo quando avaliados sob baixas inclinações. Esta característica foi visivelmente evidenciada em todos os níveis de carregamento.

Cabe destacar que os mesmos rejeitos, quando submetidos à redução do teor de ferro, apresentaram um ganho considerável de estabilidade quanto aos potenciais mecanismos de ruptura associados à liquefação estática, como mostrado na Figura 5. Analisando os resultados das amostras FII-FER, para uma inclinação de 1V:4H, o valor de  $F_L$  assume um valor em torno de 3 vezes maior, quando comparado à FII-FE. De uma condição de total instabilidade, o rejeito passa a se comportar com segurança à liquefação (valores de  $F_L$  maiores que 1) para baixas inclinações de taludes.

#### 4.2 – Determinação do índice de fragilidade não-drenada ( $I_{Bu}$ )

O índice de fragilidade não-drenada (*"brittleness index"*) definido por Bishop (1967) é, de acordo com o conceito, um índice de colapsibilidade que os materiais granulares apresentam quando submetidos ao cisalhamento não-drenado, sendo definido com base na seguinte expressão:

$$I_{Bu} = \frac{S_{pico} - S_{su}}{S_{pico}} \quad (6)$$

em que  $S_{pico}$  é a tensão de cisalhamento de pico e  $S_{su}$  é a resistência ao cisalhamento não-drenado de regime permanente, definido anteriormente (Equação 1).

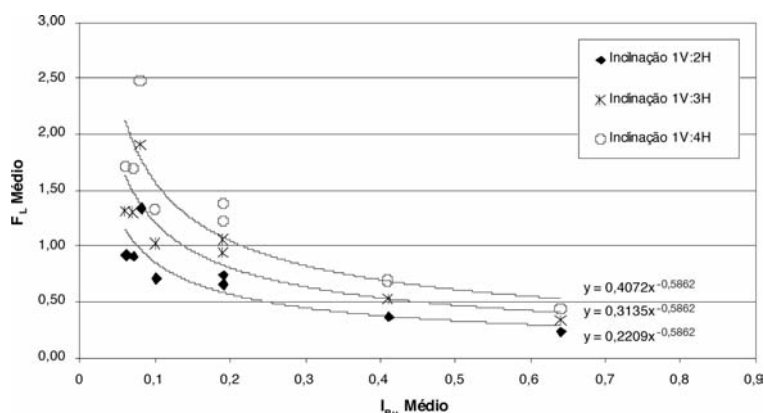
$$S_{pico} = q_{pico} \cdot \cos \phi_{pico} \quad (7)$$

em que  $q_{pico}$  a semi-diferença das tensões principais de pico ( $\sigma_{1p}$  e  $\sigma_{3p}$ ) e  $\phi_{pico}$ , o ângulo de atrito de pico.

O valor de  $I_{Bu}$  varia entre 0 e 1. Quanto mais próximo da unidade, maior a fragilidade do material, resultando em uma característica mais elevada de ruptura por liquefação. Tal característica condiciona a classificação dos rejeitos FII-FE e DOU01-FE como possuidores do maior grau de fragilidade e, conseqüentemente, maior tendência de ruptura associada à liquefação. Durante o carregamento monotônico não-drenado, se o material comportar-se como dilatante, o índice de fragilidade é definido como sendo igual a zero. A proposta de avaliação classifica os rejeitos GER-FE e CGR-FE como os menos susceptíveis ao fenômeno, ratificando as análises anteriores.

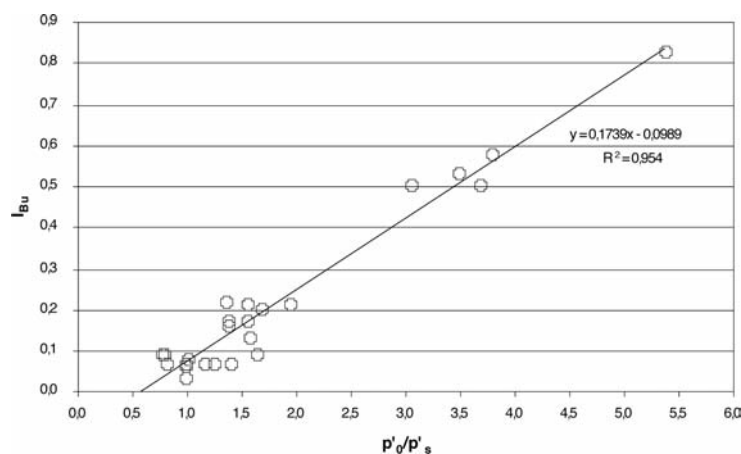
A caracterização do potencial de liquefação de materiais granulares, a partir do parâmetro  $I_{Bu}$ , é numericamente inversa ao coeficiente de segurança  $F_L$ . Assim, torna-se possível o estabelecimento de uma correlação direta entre estes dois índices, permitindo verificar a aplicabilidade destas metodologias de análise aos rejeitos de mineração estudados. A Figura 6 apresenta essa correlação em termos dos valores médios obtidos, para três diferentes inclinações de taludes.

As curvas de tendência traçadas possuem coeficientes de regressão em torno de 0,85, valor razoável considerando a dispersão dos dados e a natureza distinta do minério de origem e dos processos de beneficiamento industrial. Em caráter preliminar, verifica-se que, para valores de  $I_{Bu}$  superiores aos limites de 0,21, 0,14 e 0,07, relativas às inclinações de 1V:4H, 1V:3H e 1V:2H, respectivamente, as estruturas de contenção dos rejeitos de minério de ferro tenderiam a ser estáveis à liquefação estática.



**Fig. 6** – Correlação proposta entre  $F_L$  e  $I_{Bu}$  para todos os rejeitos em 3 diferentes graus de inclinação.

Além da correlação estabelecida com os valores de  $F_L$ , o índice de fragilidade não-drenada pode ser ainda comparado com outros dados que utilizam relações diretas com a condição de regime permanente. Sladen et al. (1985) plotaram  $I_{Bu}$  versus a razão  $p'0/p's$ , que caracteriza a relação entre a tensão efetiva média inicial e a de regime permanente, para quatro tipos de areias finas e uniformes. A estreita inter-relação entre os dois índices, relatada pelos autores, também é observada nos rejeitos de minério de ferro. A Figura 7 apresenta os índices plotados durante o presente estudo, indicando que  $I_{Bu}$  é uma função bem definida de  $p'0/p's$  para o conjunto dos rejeitos ensaiados.



**Fig. 7** – Relação entre  $I_{Bu}$  e  $p'0/p'$  para as amostras dos rejeitos analisados.

O índice de fragilidade não-drenada igual a zero indica, de fato, a não-constatação de perda de resistência durante o cisalhamento e, consequentemente, a impossibilidade de ocorrência dos mecanismos de ruptura por liquefação (Sladen et al., 1985). De acordo com os dados da Figura 7, isso corresponde a uma razão  $p'0/p'$  em torno de 0,6 para as amostras de rejeitos adensadas isotropicamente.

Particularmente, observa-se uma concentração de pontos para valores da razão  $p'0/p'$  entre 0,6 e 2,0. Estes pontos correspondem aos rejeitos que se comportam estaticamente instáveis para talu-

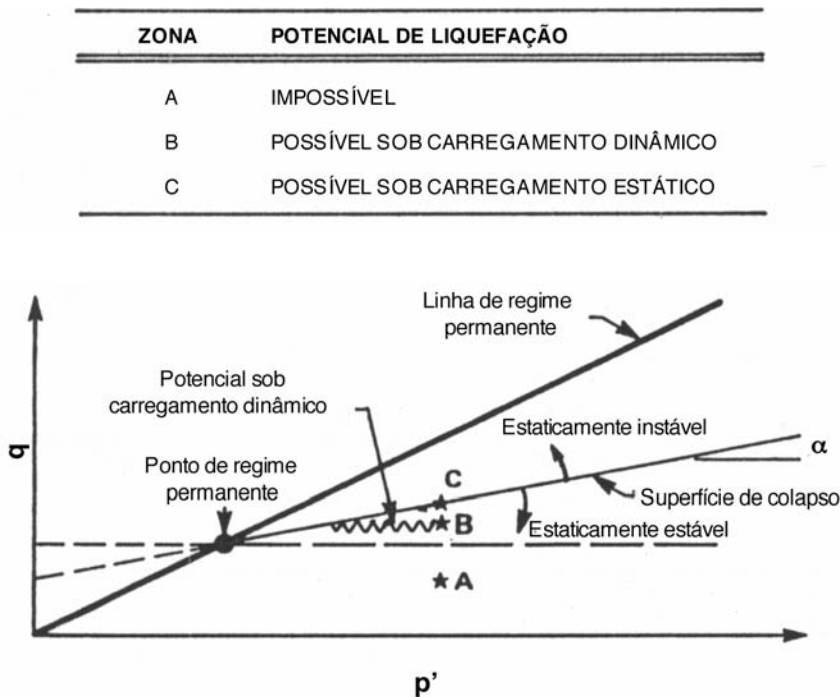
des com inclinações elevadas, mas seguros para taludes mais suaves. Portanto, considerando taludes com inclinações abaixo de 1V:4H,  $p'0/p's$  poderia assumir valores inferiores a 2,0 para garantir a estabilidade relacionada à liquefação.

Cabe destacar que, tanto as análises de  $I_{Bu}$  quanto as de  $F_L$ , estão condicionadas à estruturas alteadas com o próprio rejeito. Os valores mínimos destas grandezas foram determinados para a condição mais crítica de estabilidade, ou seja, a condição saturada do maciço. Evidentemente, para a ocorrência da liquefação, o material disposto deve apresentar-se fofo e saturado de modo a permitir o desenvolvimento de poropressões elevadas. Caso contrário, as metodologias não são aplicáveis e eventos de rupturas não podem ser associados ao fenômeno, tanto em condições estáticas quanto dinâmicas.

### 4.3 – Determinação superfície de colapso dos rejeitos

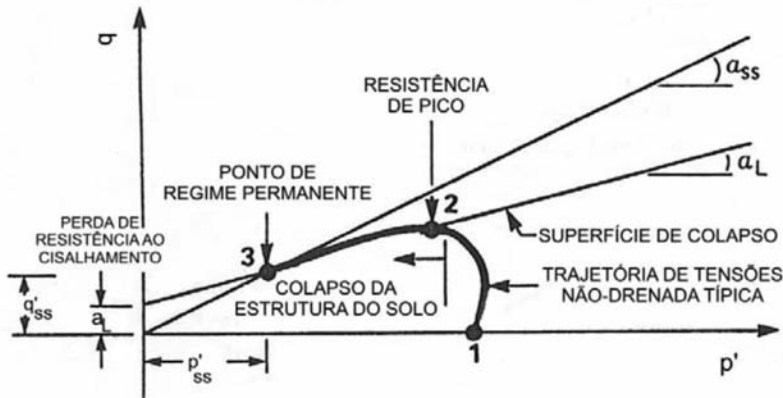
Sladen *et al.* (1985), buscando analisar o potencial de liquefação de um material granular em um aterro hidráulico, utilizaram o conceito de superfície de colapso (análise tridimensional) ou linha de colapso (análise em termos de trajetórias de tensões) em ensaios triaxiais não-drenados.

A partir das trajetórias, foram definidas zonas no espaço de tensões em que é possível a ocorrência da liquefação por indução de um carregamento dinâmico e/ou estático e regiões onde a ativação do fenômeno é fisicamente inconsistente. As zonas, com as correspondentes tendências de liquefação, são apresentadas na Figura 8.



**Fig. 8** – Efeitos do estado de um material granular no potencial de liquefação adaptado para o diagrama de Lambe (modificado de Sladen et al., 1985).

Na adaptação proposta, são definidos a inclinação da superfície de colapso ( $M_L$ ), o ângulo de inclinação da superfície de colapso ( $\alpha_L$ ) e o intercepto ( $a_L$ ) projetado no eixo  $q$ . A Figura 9 apresenta esses parâmetros representados na trajetória de Lambe (1964).



**Fig. 9** – Representação dos parâmetros de colapso no espaço  $p'$ - $q$  de Lambe (modificado de Sladen et al., 1985).

Assim, torna-se possível o estabelecimento de uma relação da inclinação da superfície de colapso ( $M_L$ ) com o seu ângulo de inclinação ( $\alpha_L$ ), tal que:

$$M_L = \frac{6 \cdot \tan \alpha_L}{3 - \tan \alpha_L} \quad (8)$$

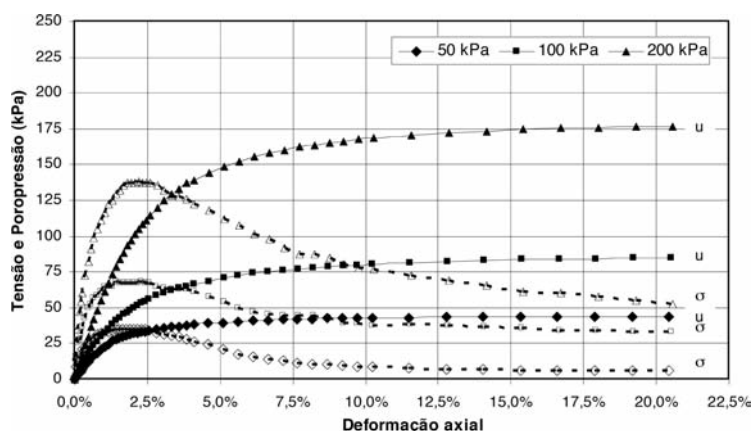
A partir da representação no diagrama  $p'$ - $q$ , pode ser estabelecida uma analogia direta com os parâmetros no critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Assim, a superfície de colapso pode ser ainda definida por um ângulo de atrito interno ( $\phi_L$ ) e um intercepto de coesão ( $c_L$ ) equivalentes, expressos por:

$$\sin \phi_L = \tan \alpha_L \quad (9)$$

$$c_L = \frac{a_L}{\cos \phi_L} \quad (10)$$

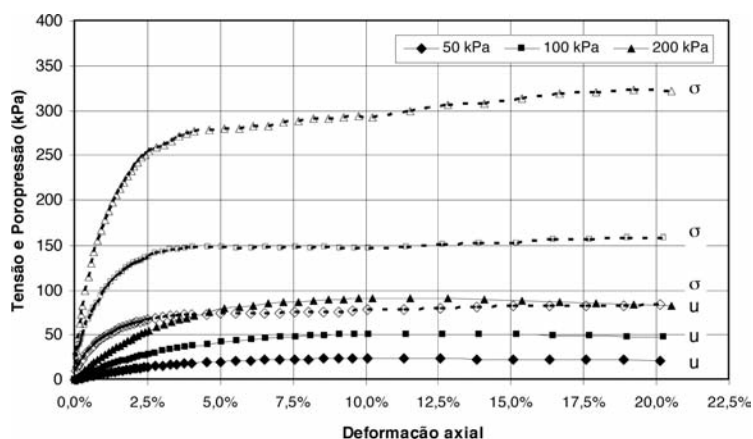
Com a possibilidade da analogia entre os parâmetros de colapso no espaço  $p'$ - $q$  e no diagrama de Mohr-Coulomb, esses parâmetros podem ser usados em análises de equilíbrio limite para avaliar o potencial de liquefação de um material granular. Dessa forma, para materiais que apresentam susceptibilidade à liquefação estática, as análises de estabilidade podem ser feitas a partir da superfície de colapso. A aplicação do método exige apenas o conhecimento da resistência ao cisalhamento do material em regime permanente e a inclinação da superfície de colapso, a partir dos quais o excesso de poropressão para ativar a liquefação pode ser estimado.

Portanto, para que seja conhecida a superfície de colapso de um determinado material granular, é necessário estabelecer previamente o comportamento das tensões totais e das poropressões geradas em função das deformações. A Figura 10 mostra o diagrama tensão-deformação e poropressão-deformação para o rejeito FII-FE, passo inicial para a determinação da superfície de colapso.



**Fig. 10** – Diagrama tensão-deformação e poropressão-deformação do rejeito FII-FE.

Para efeito de comparações das magnitudes das poropressões geradas durante o cisalhamento não-drenado do rejeito FII-FE, é apresentada a seguir (Figura 11) uma representação similar à Figura 10, demonstrando os baixos níveis de poropressões geradas pelo rejeito GER01-FE.



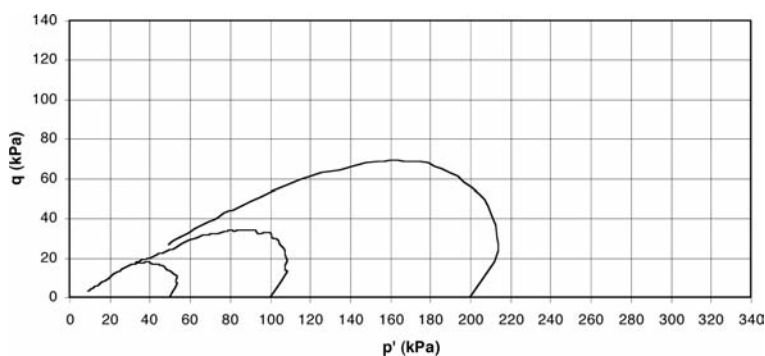
**Fig. 11** – Diagrama tensão-deformação e poropressão-deformação do rejeito GER01-FE.

A partir da Figura 10 verifica-se que o pico de tensões é alcançado para um baixo nível de deformação, da ordem de 2 %, em todos os níveis de confinamento. Este ponto é correspondente ao ponto máximo de cada trajetória de tensões efetivas apresentadas na Figura 12, cuja configuração é típica de materiais com tendência de contração durante o cisalhamento não-drenado.

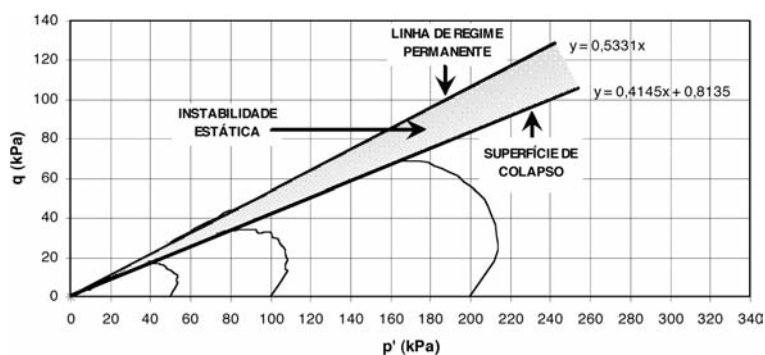
Interligando-se os pontos correspondentes às condições de regime permanente e dos picos de resistência para cada trajetória, são definidas, respectivamente, a linha de regime permanente e a superfície de colapso. Com base na proposta exposta, a liquefação pode ocorrer sob condições estáticas se o estado de tensões do rejeito granular for consistente com o domínio de instabilidade estática, compreendida entre a superfície de colapso e linha de regime permanente, indicada na Figura 13.

Nota-se uma expressiva região de instabilidade estática, associada a baixos níveis de deformação, evidenciando, assim, mais uma vez, os condicionantes críticos deste rejeito à liquefação, tal



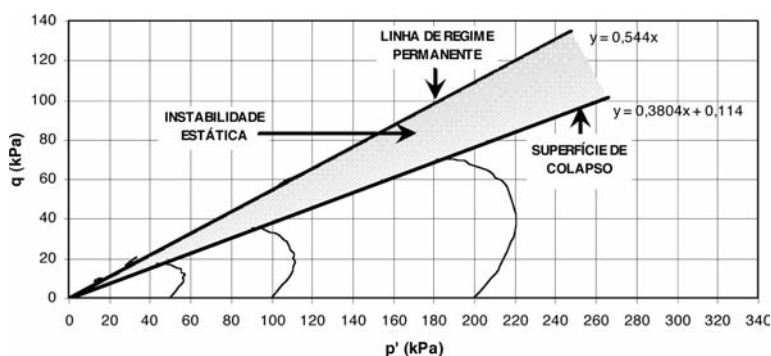


**Fig. 12** – Trajetórias de tensões efetivas do rejeito FII-FE.



**Fig. 13** – Superfície de colapso e região de instabilidade estática - rejeito FII-FE.

como explicitado anteriormente pelos baixos valores de FL e IBu. Comportamento similar ocorreu para outros rejeitos, com destaque para a amostra do rejeito DOU01-FE (Figura 14).



**Fig. 14** – Superfície de colapso e região de instabilidade estática - rejeito DOU01-FE.

Diversos autores costumam representar a superfície de colapso em termos das trajetórias de Cambridge. No entanto, um ponto vantajoso quando se considera diagrama  $p'$ - $q$  de Lambe (1964) para a representação, é o estabelecimento de uma analogia direta para a utilização dos parâmetros de colapso no critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

Assim, é possível caracterizar os parâmetros ângulo de atrito interno de colapso ( $\phi_L$ ) e intercepto de coesão de colapso ( $c_L$ ), com base no ângulo  $\alpha_L$  e no intercepto  $\alpha_L$  da superfície de colapso. Estes valores estão apresentados no Quadro 6 e são coincidentes com os parâmetros de pico dos rejeitos no estado mais fofo possível, uma vez que a superfície de colapso, sendo definida pelos picos das trajetórias de tensões efetivas, é a própria envoltória de ruptura para as tensões de pico.

**Quadro 6** – Parâmetros de colapso dos rejeitos.

Amostra	Dr (%)	Parâmetros de colapso	
		$c'_L$ (kPa)	$\phi'_L$ (°)
GER01-FE	36,81	2,46	35,18
ITA01-FE	39,49	0,03	25,89
FIII01-FE	56,46	6,34	28,67
FII-FE	5,79	0,89	24,49
FII-FER	12,47	0,83	34,02
CGR-FE	30,81	0,30	28,75
DOU01-FE	37,77	0,12	22,36
DOU01-FER	21,34	1,12	25,32

Comparando-se os valores dos ângulos de atrito de regime permanente e dos parâmetros de colapso dos rejeitos, observam-se variações expressivas dos dados, principalmente para os rejeitos em que o potencial de liquefação apresentou-se mais evidente. Em vista dessa observação, optou-se por restabelecer os fatores de segurança em relação à liquefação, agora analisados em função dos parâmetros de colapso. Dessa forma, em analogia à Equação 4, pode-se definir o fator de segurança contra a liquefação no colapso pelas seguintes relações:

$$F_{L(L)} = \frac{S_L}{\sigma_c \cdot \text{sen}\alpha} \tag{11}$$

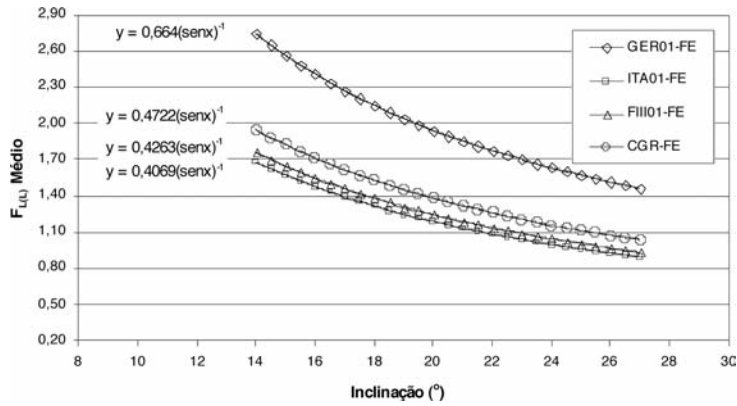
$$S_L = q_L \cos\phi_L \tag{12}$$

onde  $S_L$  é a resistência ao cisalhamento não-drenada de colapso e  $q_L$  e  $\phi'_L$  são a semi-diferença das tensões principais e o ângulo de atrito efetivo de colapso, respectivamente.

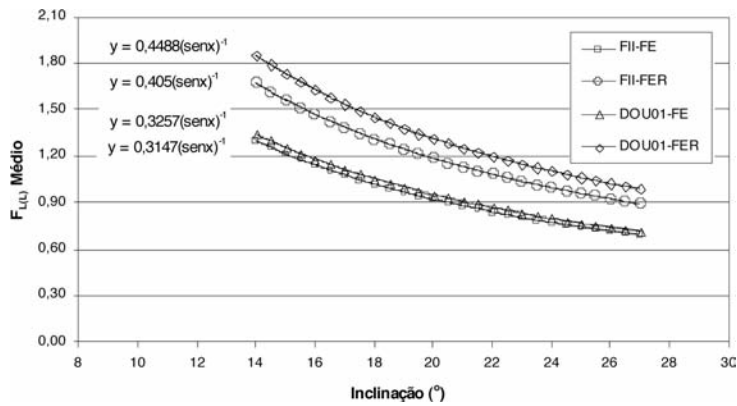
Utilizando esta nova conceituação, os valores de  $F_{L(L)}$  médios, para as condições de mínima compacidade dos rejeitos analisados, foram determinados para diversas inclinações, representando-se os resultados de forma similar às análises com  $F_L$  (Figuras 15 e 16).

Os resultados apresentados nas condições de colapso indicam valores mínimos de  $FL(L)$  superiores a 1,2, para inclinações mais suaves. O rejeito FII-FE, por exemplo, que apresentou  $FL$  inferior a 0,50, na consideração de um talude 1V:4H, apresenta agora um  $FL(L)$  em torno de 1,30 para as mesmas condições. O rejeito DOU01-FE também assume um valor de  $FL(L)$  acima de 1,30 para o mesmo grau de inclinação.

Outros rejeitos, que apresentavam condições de segurança apenas para inclinações mais baixas, como o ITA01-FE e o FIII01-FE, apresentam fatores de segurança no colapso superiores a 1,



**Fig. 15** – Relação entre  $F_{L(L)}$  médio e a inclinação para o rejeitos GER01-FE, ITA01-FE, FIII01-FE e CGR-FE.



**Fig. 16** – Relação entre  $F_{L(L)}$  médio e a inclinação para o rejeitos FII-FE, FII-FER, DOU01-FE e DOU01-FER.

para níveis médios de inclinação na condição de colapso. Contudo, de maneira proporcional, o ganho de estabilidade destes materiais foi notadamente inferior aos rejeitos com potencial de liquefação elevado. Isso se dá em virtude do colapso destes últimos ser alcançado para baixos níveis de deformação, o que garante parâmetros de colapso mais baixos. No caso dos rejeitos ITA01-FE e FIII01-FE, seriam necessárias elevadas taxas de deformação para atingir o colapso.

A necessidade de baixas taxas de deformação para o advento da liquefação é abordada por diversos autores e esta condição se aplica amplamente para o caso dos rejeitos FII-FE e DOU01-FE. Evidentemente, a consistência deste princípio deve ser amparada pela boa representatividade dos ensaios de laboratório.

A adaptação da metodologia de Poulos *et al.* (1985), aliada aos diagramas de superfície de colapso, mostra ainda que, alguns rejeitos, com capacidade real de apresentar mecanismos de ruptura associados à liquefação estática, podem ter reduzidas, de forma significativa, as probabilidades de rupturas. Essa redução é formalizada quando se adota nas análises parâmetros característicos da superfície de colapso de cada rejeito.

Para efeitos de análises de estabilidade de taludes de barragens e pilha de rejeitos, os parâmetros referentes à condição de regime permanente são válidos para alguns rejeitos. A justificativa está embutida na elevada taxa de deformação relativa ao colapso. No entanto, o que se observa é que outros, particularmente aqueles que apresentaram baixos valores de  $F_L$ , alcançam o colapso para baixos níveis de deformação, ou seja, bem antes da condição de regime permanente. Neste caso, convém realizar as análises de segurança dos taludes com base nos parâmetros de colapso dos rejeitos.

## 5 – CONCLUSÕES

Dentro das metodologias adotadas para avaliação do potencial de liquefação dos rejeitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero, foram estudados materiais oriundos de seis diferentes sistemas de contenção. Inicialmente, realizou-se a caracterização tecnológica dos rejeitos, predominantemente com granulometrias variando de siltes a areias finas e médias. Em termos de massa específica dos grãos, os valores mínimos obtidos foram da ordem de  $3,3 \text{ g/cm}^3$ , atingindo valores máximos de  $4,7 \text{ g/cm}^3$ . Estes resultados foram fortemente influenciados pelo teor de ferro presente.

As análises de microscopia confirmaram basicamente a presença de hematita e quartzo, com alguns rejeitos apresentando elevados teores de  $Fe$ . Em alguns rejeitos também foram constatados goethita, em menor escala. Conclui-se que alguns rejeitos apresentam uma matriz de grãos maiores e uniformes de quartzo envolvidos por grãos menores e uniformes de hematita, conformando um arranjo com elevada não-uniformidade, observação feita também na curva granulométrica. Esses rejeitos são bastante mal graduados, resultando em elevados índices de vazios, quando dispostos hidráulicamente, enquanto outros rejeitos já incorporam, na fração granular mais fina, algumas partículas de quartzo. Isso se dá em função do processo de beneficiamento do minério de ferro empregado.

Os rejeitos de minério de ferro da Cava do Germano, identificados como GER01-FE, mostraram-se os mais estáveis em relação aos mecanismos de ruptura associados à liquefação estática. Embora contrativos, as poropressões geradas durante o cisalhamento não-drenado foram consideravelmente inferiores às tensões totais, não evidenciando efeitos que acarretassem baixas tensões efetivas. Dessa maneira, mesmo sob condições de baixa compactidade e elevado grau de saturação, resultante de uma suposta falha no sistema de drenagem da pilha, a probabilidade de eventos desta natureza é remota.

Os rejeitos granulares oriundos da Barragem de Campo Grande (*underflow*) também apresentaram uma elevada estabilidade ao fenômeno da liquefação estática, para as condições usuais de deposição destes materiais em praias de rejeitos. Na hipótese de empilhamentos com inclinações superiores a 1V:2H, instabilizações por liquefação são pertinentes.

Os rejeitos de Itabiruçu (ITA01-FE) mostraram a possibilidade de ser potencialmente ativados pelo fenômeno da liquefação, mas o processo é restringido pelas condicionantes de campo. A justificativa está embutida no sistema construtivo da barragem, uma vez que o maciço da barragem é constituído de terra compactada, com alteamentos realizados para jusante. Entretanto, em função dos resultados obtidos, cuidados especiais devem ser tomados no caso de futuras contenções e alteamentos envolvendo o empilhamento dos rejeitos (*underflow*) de Itabiruçu.

Conclui-se que estes rejeitos, empilhados em inclinações superiores a 1V:2,5H, são susceptíveis aos mecanismos de rupturas associados à liquefação. Para a condição de colapso, porém, a es-

estrutura de contenção teria que sofrer grandes deformações. De acordo com as poropressões geradas, o rejeito ITA01-FE mostra-se potencialmente susceptível à liquefação para deformações críticas particularmente elevadas, da ordem de 9 e 13%.

Os sistemas de contenção de rejeitos da Mina de Fábrica, abordados por esta pesquisa, compreendem as Barragens de Forquilha II (FII-FE) e Forquilha III (FIII01-FE). Os rejeitos armazenados na primeira mostraram-se com elevado potencial de liquefação, inclusive com apresentação de susceptibilidade ao fenômeno sob baixos níveis de deformação.

A ruptura parcial de um dique de montante, ocorrida no início do ano de 2002, quando o lançamento já estava paralisado há mais de um ano, pode estar relacionada à liquefação estática, hipótese agora mais evidente, considerando-se também a condição de saturação dos rejeitos depositados na época.

Esses rejeitos saturados, estruturados com elevados índices de vazios, apresentaram um colapso ocasionado pela redução repentina das tensões efetivas, em concordância com o acréscimo significativo das poropressões, fato observado durante a compressão triaxial não-drenada. Os sistemas de contenção dos rejeitos FII-FE somente seriam estáveis para inclinações suaves, tipicamente para inclinações inferiores a 1V:3,5H.

Os rejeitos tipo FII-FER, submetido à redução do teor das partículas de ferro, tendeu a apresentar maior estabilidade aos mecanismos de liquefação, em relação à amostra inicial, FII-FE. A alteração substancial do comportamento geotécnico garantiu um rearranjo e uma redistribuição estrutural das partículas, fazendo com que, na condição mais crítica, o rejeito manifestasse um padrão estável para empilhamentos hipotéticos com inclinações da ordem de 1V:2,7H.

Os rejeitos da Barragem Forquilha III, identificados como FIII01-FE, mesmo sendo originados da mesma mina, apresentaram características granulométricas diferenciadas dos rejeitos dispostos na Barragem de Forquilha II, comportando-se como materiais granulares mais finos. Os rejeitos FIII01-FE apresentam susceptibilidade ao colapso por liquefação para empilhamentos com inclinações superiores a 1V:2,2H. Cabe destacar que o maciço desta barragem também é constituído de terra compactada. Porém, seus alteamentos são realizados para montante, apoiados sobre os rejeitos previamente depositados. Estando esses materiais depositados nas regiões próximas ao dique, em condições saturadas, o carregamento induzido pela evolução dos alteamentos pode ativar os efeitos da liquefação estática, numa hipotética condição de carregamento em condições não drenadas. Neste caso, a variável que comandará as condições de segurança do maciço é o grau de compactidade dos rejeitos depositados.

A condição mais crítica, entre os materiais estudados, pode ser atribuída aos rejeitos armazenados na Barragem de Córrego do Doutor (DOU01-FE). As trajetórias de tensões efetivas demonstraram o grau de colapsibilidade para baixas deformações. Os rejeitos, na geometria de campo (com taludes de jusante inclinados em 1H:3V), em condições fofas e saturadas, apresentaram capacidades claras de desenvolver poropressões elevadas. Estes materiais mostram-se seguros aos mecanismos de liquefação somente para empilhamentos com inclinações inferiores a 1V:3,5H. Reforça-se, no entanto, que eventuais rupturas somente se concretizariam se as densidades relativas *in situ* fossem consistentes ou mais críticas do que as utilizadas em laboratório.

Portanto, recomenda-se enfaticamente a adoção de procedimentos de controle e de monitoramento relacionados à liquefação. Estes procedimentos devem incorporar medidas de controle quanto a eventos que possam deflagrar a ocorrência do fenômeno induzida por carregamento estático,

buscando-se avaliar a compacidade do material depositado e a possibilidade de elevação da linha freática, visto que a barragem, embora alteada pela linha de centro, apresenta um leve deslocamento para montante.

A amostra denominada DOU01-FER (teor de  $Fe$  reduzido) apresentou menores poropressões geradas, quando comparada à amostra do rejeito DOU01-FE e isto ocorreu devido a um rearranjo estrutural ocasionado pela redução do teor de ferro, conforme o caso anterior. Tal fato condicionou a estes rejeitos uma maior estabilidade à liquefação.

## 6 – AGRADECIMENTOS

Este trabalho é parte integrante de um amplo projeto de caracterização tecnológica de rejeitos de mineração, desenvolvido pelo Núcleo de Geotecnia Aplicada da Universidade Federal de Ouro Preto. Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento, e às mineradoras Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) e Samarco Mineração pelo apoio estrutural.

## 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bishop, A.W. Progressive failure - with special reference to the mechanism causing it. In: Geotechnical Conference on Shear Strength Properties of Natural Soils and Rocks. 1967, Oslo. Proceedings... Oslo, 1967. v. 2, p. 142-150.
- Castro, G. Liquefaction of sands. Cambridge: Harvard University, 1969. 231 p. Thesis of Doctor of Philosophy, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, USA, 1969.
- Fourie, A.B., Blight, G.E. & Papageorgiou, G. Static liquefaction as a possible explanation for Merriespruit tailings dam failure. Canadian Geotechnical Journal, Canada, v. 38, p. 707-719, 2001.
- Gomes, R.C., Oliveira Filho, W.L. & Ribeiro, L.F.M. Laudo pericial da ruptura do dique de contenção de rejeitos de minério de ferro da Cava C1 da Mineração Rio Verde Ltda., localizada no município de Nova Lima / MG. Min. Público de Minas Gerais, 2001. 22 p.
- Gomes, R.C., Pereira, E.L., Ribeiro, L.F.M. & Silva, J.T.G. Evaluation of liquefaction potential of fine grained tailings. In: International Congress on Environmental Geotechnics, ICEG, 4. 2002, Rio de Janeiro. Proceedings, Lisse, Netherlands: Swets & Zeitlinger, 2002. v. 1, p. 329-333.
- Head, K.H.. Manual of soil laboratory testing. London, UK: Pentech Press, 1986. 1240 p.
- Ishihara, K., Tsukamoto, Y., & Shibayama, T. Evaluation of slope stability against flow in saturated sand deposits. Jubilee volume of Terzaghi, 2000.
- Lambe, T.W. Methods of estimating settlement. In: Conference on Settlement, ASCE. 1964, Northwestern University, Evanston, IL. Proceedings, Evanston, 1964.
- Pereira, E.L. Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático. Ouro Preto: UFOP, 2005. 186 p. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.
- Poulos, S.J., Castro, G. & France, J.W. Liquefaction evaluation procedure. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, v. 111, n. 6, p. 772-792, 1985.

- Sladen, J.A., D'Hollander, R.D. & Krahn, J. The liquefaction of sands, a collapse surface approach. Canadian Geotechnical Journal, v. 22, p. 564-578, 1985.
- Tibana, S., Campos, T.M.P. & Bernardes, G.P. Behaviour of a loose iron tailing material under triaxial monotonic loading. In: International Congress on Environmental Geotechnics, ICEG, 3. 1997, Lisbon, PT. Proceedings, Lisbon, 1998. CD-ROM.