

Capítulo 30

ESTUDO EXPERIMENTAL DA ESTABILIDADE DE PILHAS DE ESTOCAGEM DE MINÉRIO DE FERRO

[DOI: 10.37423/200400778](https://doi.org/10.37423/200400778)

Evandro Moraes da Gama (Affiliation): Department Mining Engineering, Federal University of Minas Gerais, Brazil). evandrodagamatro@gmail.com

RESUMO: A estocagem de minério de ferro na condição de pellet feed fine (granulometria mínima com $90\% < 45\mu\text{m}$ e $100\% < 150\mu\text{m}$) pode ser estudada através da mecânica de materiais granulares. Os aportes da geotecnia não conseguem explicar o fenômeno da ruptura de forma abrangente. Mesmo assim a tendência na indústria é trabalhar com os aportes da geotecnia e com um grau exagerado da interpretação visual. Este artigo mostra na sua primeira parte de forma resumida artigos com autores onde a ênfase é a mecânica de materiais granulados e um artigo com ênfase na geotecnia de materiais granulados. Na segunda parte é mostrado a resolução da equação desenvolvida por Thamwattana et al. (2004) aplicada a geometria de pilha de estocagens de minério de ferro. O estudo com modelo reduzido da variação de tensões no eixo de do modelo é realizado e comparação da variação das tensões com a resolução analítica de Thamwattana é comentada. Na terceira parte é mostrado um estudo de distribuição de tensões através da formulação das diferenças finitas centradas aplicando o software PFC2D da Itasca Consulting Group na pilha de estocagem de minério de ferro dentro das mesmas dimensões da pilha de estocagem do modelo analítico. As conclusões deste estudo são mostrada a seguir

- O diferencial entre os modelos são as diferenças de rigidez normal e tangencial. Estas diferenças entre rigidez tangencial K_t e rigidez normal K_n provocam nas pilha de estocagens a instabilidade. Podemos afirmar que quando $K_n = K_s$ as pilha de estocagens seriam mais estáveis.
- Os modelos e todo o trabalho desenvolvido mostram que as pilha de estocagens não são estáveis. As pilha de estocagens apresentam em momentos uma estabilidade temporária, porém, mesmo após a formação, estas pilha de estocagens são instáveis e as partículas estão sempre em movimento.

1.INTRODUÇÃO.

Materiais granulares são abundantes na natureza, sendo estimado que sejam também 75% das matérias primas estocadas nas indústrias. O conhecimento de suas propriedades, do comportamento e dos esforços atuantes nestes sistemas é relevante para a segurança no manuseio do estoque, assim como nos projetos de equipamentos que processam e transportam estes materiais (Figura 1).

O exemplo mais simples de um sistema de material granular é uma pilha de estocagem de grãos. Estas pilha de estocagens podem ter volumes variáveis, uma pequena pilha de estocagem de areia feita por uma pessoa, até uma escala muito maior no caso de indústrias, particularmente na indústria mineira. Estas pilha de estocagens industriais são geralmente de forma cônica, mas também podem assumir forma prismática, superposição de cones, kidney-shaped (circulares), dependendo de sua metodologia de construção e os contornos.

A estocagem de finos de minério (pellet feed) assim como de materiais granulares finos representa sempre um risco de perda material e de vidas humanas. Não é raro depararmos com estocagem de pilha de estocagens de finos nos portos de embarque e pátios de estocagem apresentando rupturas súbitas. Este artigo mostra um estudo abrangente sobre a estabilidade de pilha de estocagens de finos de minério de ferro (pellet feed). Na primeira parte é abordado resumidamente o estado da arte onde os autores enfatizam a mecânica de materiais granulados e um artigo com ênfase na geotecnia de materiais granulados. Na segunda parte é mostrada a resolução da equação desenvolvida por [1] aplicada à geometria de pilha de estocagens de minério de ferro. O estudo da variação das tensões utilizando um modelo reduzido é realizado. A comparação da variação das tensões com a resolução analítica [1] é comentada. Na terceira parte é mostrado um estudo de uma pilha de estocagem de minério de ferro evidenciando a distribuição de tensões através da formulação dos elementos discretos.



Figura1: Ruptura de pilha de estocagem de pellet feed no porto de Vitória.

2. UM BREVE HISTÓRICO

Intuitivamente, podemos esperar que a tensão máxima na base de uma pilha de estocagem acontece diretamente abaixo de seu topo, entretanto resultados experimentais [2] mostram que o ponto de pressão máxima se localiza numa posição intermediária entre o centro e a borda da pilha de estocagem de estocagem. Este fato motivou a elaboração de modelos discretos e computacionais na tentativa de explicar este fenômeno denominado “stress dip effect”.

Na tentativa de formular uma solução analítica para o problema da pilha de estocagem [1] propõe uma abordagem de uma pilha de estocagem teórica composta por duas regiões, uma região externa plástica em que o material se encontrasse em estado de equilíbrio limite, e uma região interna elástica em que o material se encontra em equilíbrio (Figura 2). Resultados numéricos indicam que para uma pilha de estocagem que se encontra inteiramente no equilíbrio limite, as equações do problema admitem solução apenas para o caso em que o ângulo de atrito é igual a 90° , pode-se assumir então que nem todo o material da pilha de estocagem se encontra em equilíbrio limite.

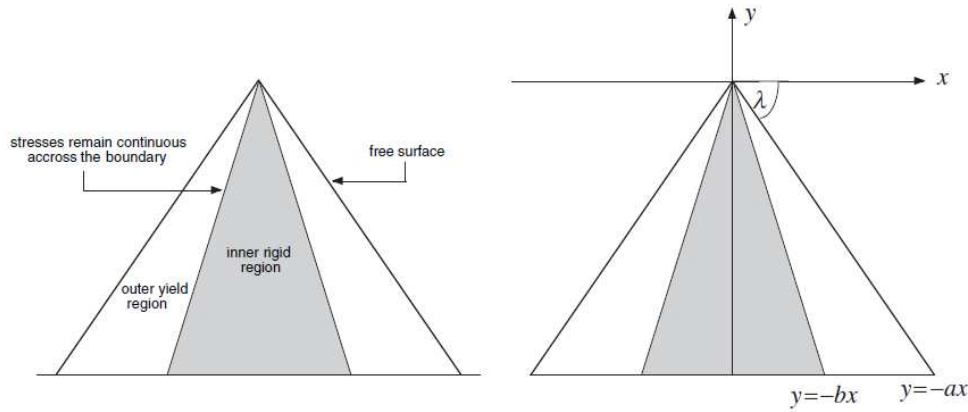


Figura2: Modelo de uma pilha de estocagem composta por duas regiões e seu sistema de coordenadas. [1]

A luz da mecânica dos meios contínuos aplicada aos meios granulares [1] desenvolve a partir das equações básicas de equilíbrio uma solução para o critério de Mohr-Coulomb:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = \rho g$$

$$q \leq p \sin \phi + c \cos \phi$$

Onde ρ é a densidade, g a gravidade e p e q são as invariantes de tensões.

As expressões das componentes de tensões abaixo foram obtidas a partir de uma solução analítica exata para o caso simplificado em que $\phi = 90^\circ$.

$$\sigma_{xx} = -\frac{\rho g [\sqrt{2\pi} + C_3] x}{2as^{1/2} e^{-s/2}} \quad \tau_{xy} = \frac{\rho g [\sqrt{2\pi} \operatorname{erf}(s/2)^{1/2} + C_3] x}{2s^{1/2} e^{-s/2}} \quad \sigma_{yy} = -\frac{\rho g a [\sqrt{2\pi} \operatorname{erf}(s/2)^{1/2} + C_3]^2 x}{2s^{1/2} e^{-s/2} [\sqrt{2\pi} + C_3]}$$

Onde a é a inclinação da pilha de estocagem, $\operatorname{erf}(x)$ representa a função erro, s é um parâmetro de integração, b é a inclinação da reta que define a fronteira entre as duas regiões e C_3 é uma constante de integração definidas por:

$$C_3 = 2Bs_2^{1/2} e^{-s_2/2} - \sqrt{2\pi} \operatorname{erf}(s_2/2)^{1/2}$$

$$b = \frac{2aB^2 s_2^{1/2} e^{-s_2/2}}{(1 - B) \{ \sqrt{2\pi} \operatorname{erf}(s_2/2)^{1/2} + 2Bs_2^{1/2} e^{-s_2/2} \}}$$

$$s_2 = -\frac{(B - 1)}{B(2B - 1)}$$

s_2 é a variável paramétrica s na fronteira elástico-plástica e $\mathbf{erfc}(\mathbf{x})$ é a função erro complementar $\mathbf{erfc}(\mathbf{x}) = 1 - \mathbf{erf}(\mathbf{x})$.

Este resultado depende do parâmetro arbitrário B que se encontra no intervalo $0,5 < B < 1,0$.

O resultado dessas equações é mostrado na Figura 3 onde $\beta = \sin \phi = 1$, o gráfico mostra também a distribuição de tensões obtida [3] para valores de β a partir de $\cos \alpha$ onde α é metade do ângulo de inclinação da pilha de estocagem até $\beta = 1$.

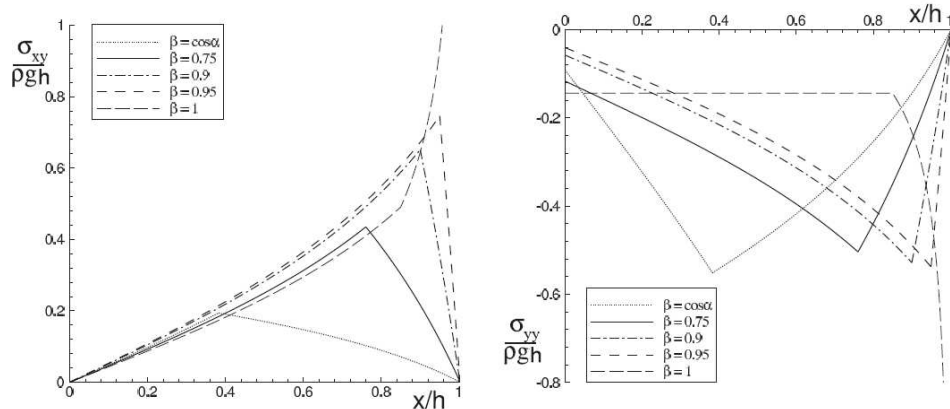


Figura3: Resultados obtidos analiticamente para diferentes valores de $\beta = \sin \phi$ onde α é metade da inclinação da superfície da pilha de estocagem [3].

Nos gráficos da Figura 3 nota-se um deslocamento da tensão máxima para a extremidade da pilha de estocagem à medida que o ângulo de atrito aumenta, aparentemente as tensões tendem ao infinito na face livre da pilha de estocagem no caso do aumento do ângulo de atrito, porém a conversão das tensões resulta em uma tensão normal nula na borda da pilha de estocagem.

Neste modelo também é possível associar a fronteira entre as regiões plástica e elástica no ponto de tensão máxima.

Vanelet al (1999) demonstra que a forma de deposição do material influencia no valor da tensão mínima central . Esta tensão poderia ser reproduzida pela deposição pontual do material acima da pilha de estocagem de material, e este mínimo desaparecia se a pilha de estocagem fosse formada por sucessivas camadas horizontais.

Uma importante conclusão foi revelada a propósito de pilha de estocagem na formas cônica formada de pelotas de minério de ferro [4]. O estudo utilizando a metodologia DEM (discret element method), revelou que a construção da pilha de estocagem sofre um forte efeito das orientações dos contatos e

orientações das forças de contato que ocorrem no centro da pilha de estocagem. As pressões na região central produzem uma orientação de forças verticais no contato entre as partículas, quando a deposição é distribuída em toda pilha de estocagem. Quando a formação da pilha de estocagem é por deposição pontual, as pressões produzem forças inclinadas nos contatos entre as partículas, provocando instabilidade na pilha de estocagem de estocagem(Figura 4).

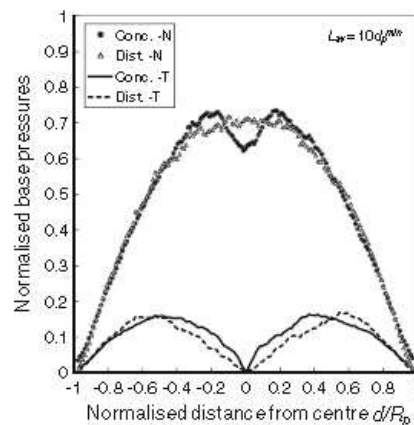
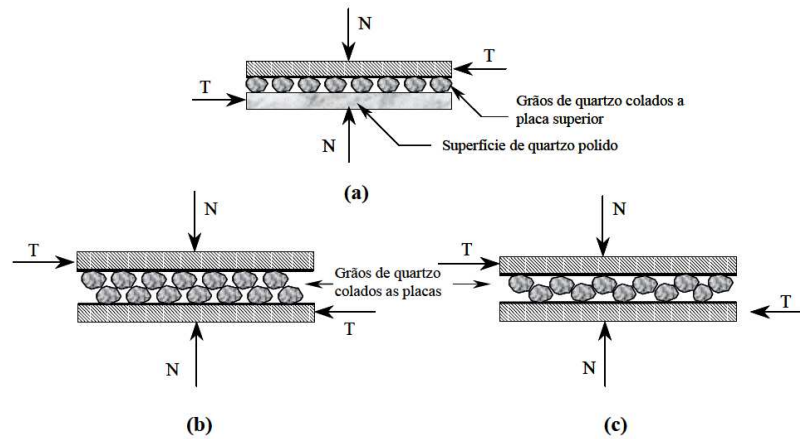


Figura4: Distribuição normalizada das pressões em função do modo de deposição. [4]

O mecanismo de formação da pilha de estocagem por sucessivas avalanches provenientes do acréscimo de material a crista da pilha de estocagem, poderia influenciar na textura do empacotamento dos grãos, provocando uma anisotropia do material. As avalanches induziriam uma deformação na direção em que ocorrem. Este fato é similar a uma deformação provocada pelo cisalhamento do material [5].

Na formação da pilha de estocagem por sucessivas avalanches o ângulo de repouso do material poderia ser o ângulo máximo de inclinação no qual o material se encontra estável. Para uma pilha de estocagem de material granular com os grãos secos e num estado de compactação “leve”, o ângulo de repouso pode ser considerado igual ao ângulo de atrito do material [6]. Ressalta-se que a natureza friccional do material granular é altamente influenciada pelo grau de compactidade das partículas. O embricamento entre as partículas oferece uma resistência extra ao cisalhamento. A definição de ângulo de atrito pura de um material é mostrada na Figura 5(a). Na Figura5(b) podemos observar uma rigidez normal (K_n) elevada e uma rigidez tangencial (K_t) reduzida. A partir de outra orientação, na Figura 5(c) podemos observar um valor de K_t maior e um valor de K_n menor do que na situação anterior [7].



Figura(5): Composição do ângulo de atrito nas diferentes condições (a) definição pura de ângulo de atrito; (b) ângulo de atrito efetivo baixo com $K_n \uparrow; K_t \downarrow$; (c) ângulo de atrito efetivo elevado com $K_n \downarrow; K_t \uparrow$. [7]

O ângulo de repouso (Figura 6) também é influenciado pela granulometria dos grãos, onde para o mesmo material, observam-se ângulos de repouso maiores para granulometrias maiores, onde a maior angulosidade e as faces achatadas dos grãos maiores oferecem maior condição de estabilidade [8].

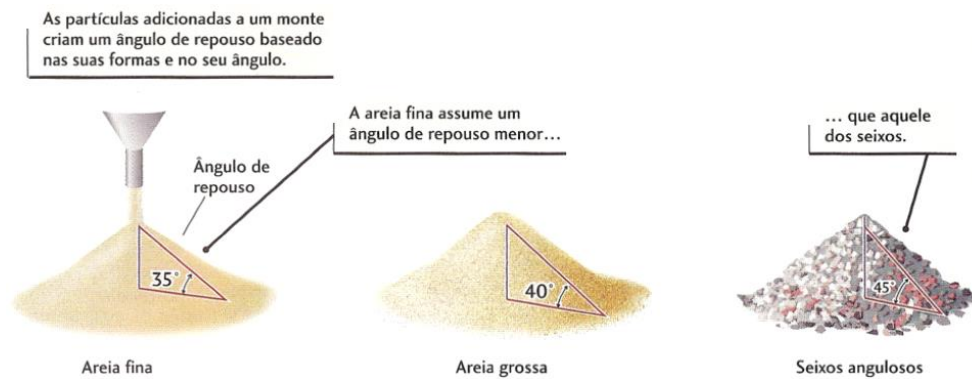


Figura6: Ângulos de repouso diferentes granulometrias [8].

Nos interstícios entre os grãos pode conter certo grau de umidade, e dependendo do grau de umidade a tensão superficial da água pode gerar forças coesivas entre os grãos, por outro lado quando os espaços vazios estão saturados de água, a pressão nos poros pode ser suficiente para separar os grãos e provocar uma liquefação da massa [8].



Figura7: Poro pressões negativas, nulas e positivas respectivamente nos interstícios entre as partículas. [8]

3.Comparação entre os resultados do modelo analítico formulado por de Thamwattana [1] e o modelo reduzido de pilha de estocagens de finos de minério de ferro.

Amostras com 50 kg de pellet feed (fino de minério de ferro) foram utilizadas para formação dos modelos reduzidos das pilha de estocagens dispostas nos pátios de produção de minas de minério de ferro. Os valore densidade para a amostra é de $5,35 \text{ g/cm}^3$. Esta amostra foi intitulado neste artigo de amostra 1.

Aplicamos a formulação [1] para a geometria da pilha de estocagem usada na estocagem de pellet feed em pátios de mineradoras, $h= 12$ metros (altura) $x = 28$ metros (largura). Os resultados (Figura 11) são apresentados a seguir. A inclinação da pilha de estocagem é de $40,6^\circ$ ($a=0,84$) e $B=0,75$ resultados:

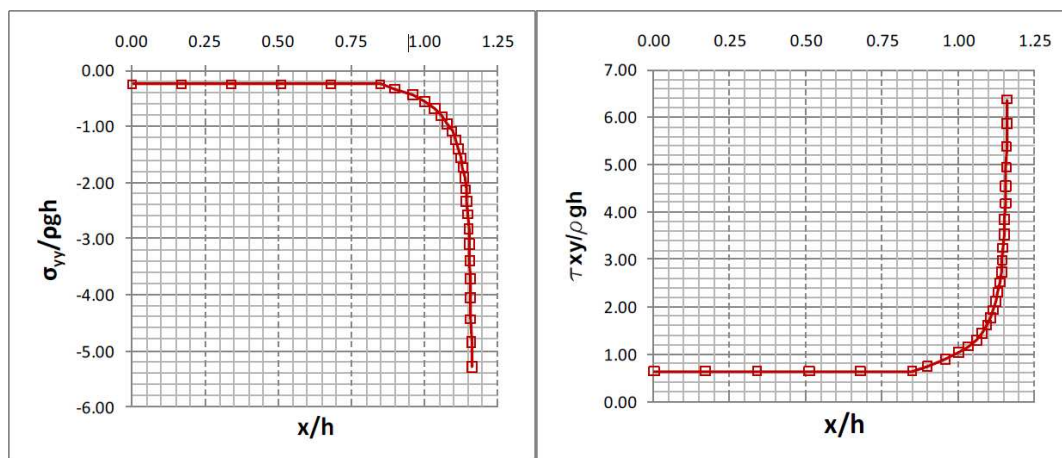


Figura (11): Distribuição de (a) tensões verticais, e (b) tensões tangenciais, calculada para a geometria de pilha de estocagem altura 12 metros largura 28 metros.

Para o modelo reduzido a lógica para os experimentos foi registrar através de um aparato patenteado para o registro e tratamento da variação de tensões [xx] das tensões no eixo e na borda da pilha da pilha de estocagem em tempo real. Estes registros contínuos foram feitos durante, após e na ruptura da pilha de estocagem.

O modelo reduzido da pilha de estocagem formada pela amostra 1 é mostrado na Figura 12. Sua base possui dois muros de contenção laterais a fim de simular as condições reais em que as pilhas de estocagem estão submetidas nos pátios de estocagem.



Figura 12: Modelo reduzido de uma pilha de estocagem de minério de ferro.

Os resultados obtidos são mostrados na figura 13 e 14.

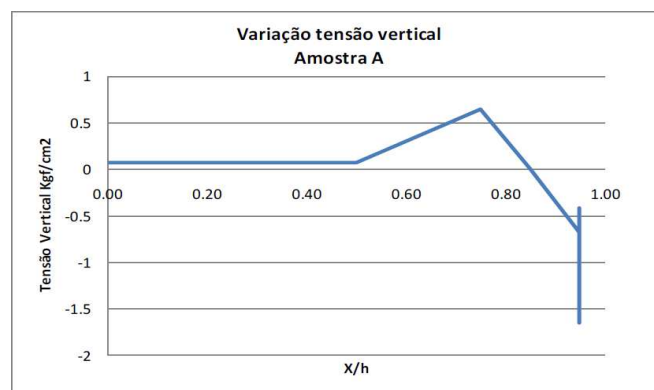


Figura 13: Variação da Tensão vertical em função da relação X/h , X largura da pilha de estocagem, h altura da pilha de estocagem.

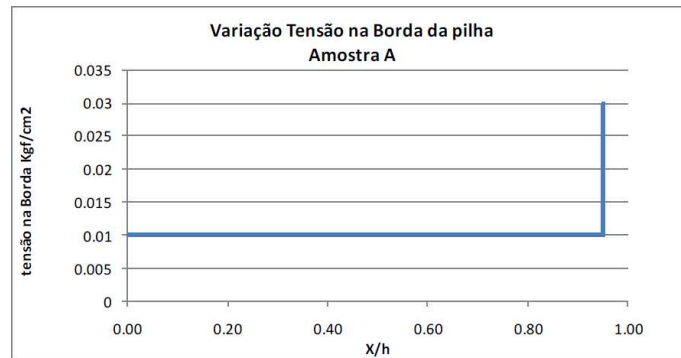


Figura 14:Variação da Tensão na borda da pilha de estocagem em função da relação X/h, X largura da pilha de estocagem, h altura da pilha de estocagem.

Comparando as curvas obtidas no experimento com modelos reduzindo-se as curvas obtidas com a formulação analítica verifica-se que curvas mostram a mesma distribuição para as tensões no eixo com a tensão σ_{yy} e para a tensão de borda, tensão τ_{xy} . No eixo σ_{yy} (tensão vertical figura 13) temos uma queda desta tensão a partir de 0,75 de X/h para o modelo teórico e 0,78 para o modelo reduzido. No eixo τ_{xy} (tensão na borda) temos um aumento da tensão para X/h igual a 0,75 e no modelo reduzido este aumento é obtido para 0,78. A obtenção de dados no modelo reduzido não permitiu uma captação de dados monótona. Este fato mostra curvas com variações bruscas para o modelo reduzido.

4. MODELAMENTO NUMÉRICO COM PFC 2D.

A criação de modelos numéricos para estudo de comportamentos de mecânicos de sólidos, baseados na integração infinitesimal, necessita a determinação de parâmetros mecânicos. No caso específico os estudos foram baseados na resistência ao cisalhamento.

O ensaio de cisalhamento consiste em solicitar com forças transversais (F_s) um material de estudo sob uma força normal constante (F_n). Os resultados são obtidos em um gráfico de Tensão Cisalhante (τ) vs Tensão Normal (σ) (Figura15). Este critério de ruptura é definido na literatura como critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Através deste critério podemos determinar ângulo de atrito e a coesão do material.

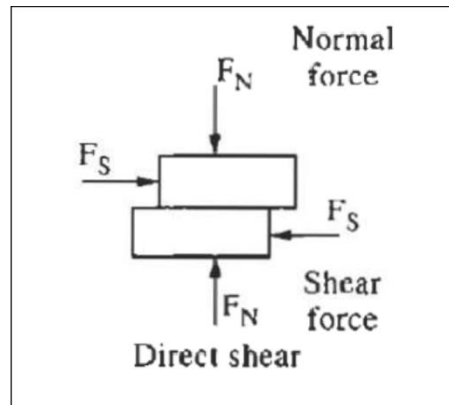


Figura15: Solicitação mecânica no ensaio de cisalhamento.

Os parâmetros de entrada na modelagem numérica são principalmente ângulo de atrito e rigidez. A rigidez pode ser definida como sendo a tangente da relação tensão de cisalhamento e as deformações normais (verticais) e tangenciais (horizontais) obtidas das amostras durante o ensaio.

Foram realizados 3 ensaios para cada amostra, cada ensaio sendo submetido a uma normal de 50, 200 e 500 kPa. O gráfico da Figura 16 mostra a curva de um dos ensaios para a amostra 1.

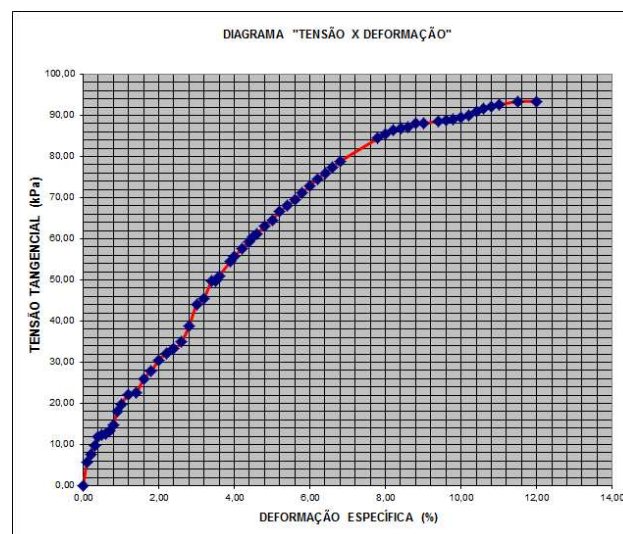


Figura16: Curva do ensaio de cisalhamento da amostra 1 para tensão normal igual a 50kPa.

O resultado dos 3 ensaios foram plotados em um gráfico de tensão cisalhante vs tensão normal, e a partir da envoltória de Mohr-Coulomb foi possível calcular o ângulo de atrito do material (Figura 16).

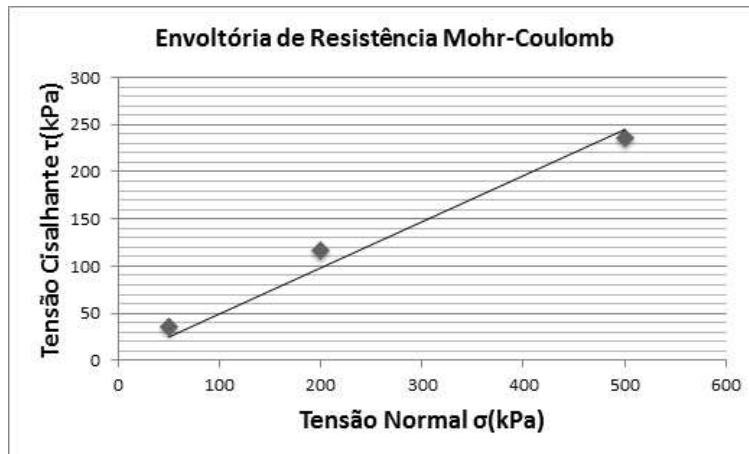


Figura16: Envoltória de Mohr-Coulomb para a Amostra 1.

Os resultados de todas as amostras são mostrados na Tabela 1. A amostra de SL mostra um comportamento diferente quando comparada a Amostra1. O fator mais marcante é o parâmetro de rigidez da amostra de SL. Este parâmetro indica que a rigidez vertical da amostra SL é maior na amostra1, porém a rigidez tangencial é menor. Poderíamos inferir que pilhas de estocagens de finos de minério de SL apresentam deformações maiores no sentido lateral que no eixo axial.

Tabela 1– Resultados finais dos parâmetros para modelamento numérico

Amostra	Tensão Normal (kPa)	Rigidez Normal (kPa/mm)	Rigidez Tangencial (kPa/mm)	Ângulo de atrito (graus)
Amostra 1	50	21,90	87,60	29
	200	26,18	91,65	
	500	71,42	500,00	
SL	50	7,11	32,00	28
	200	24,10	38,56	
	500	110,36	331,10	

Parâmetros de entrada e simulações estudadas.

Para as simulações foram usado:

- Densidade a granel, 2,830 kgf/m³
- Rigidez normal e tangencial para tensão normal de 500 kPa
- Ângulo de atrito.

O número de partículas foi de 2.000, com altura de pilha de estocagem de 12m e largura de 26m e a utilização de dois muros de contenção laterais medindo $1/3$ da altura da pilha de estocagem.

A Figura17abaixo representa o esquema de monitoramento variação das forças horizontais e verticais ao longo da base da pilha de estocagem, representados pelos pontos 1, 4, 7, 10 e 13.

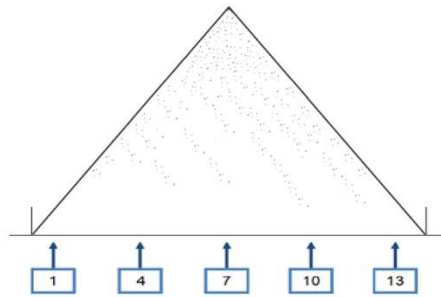


Figura17: Regiões de monitoramento da Pilha de estocagem.

Os resultados dos dois modelos estão representados a seguir:

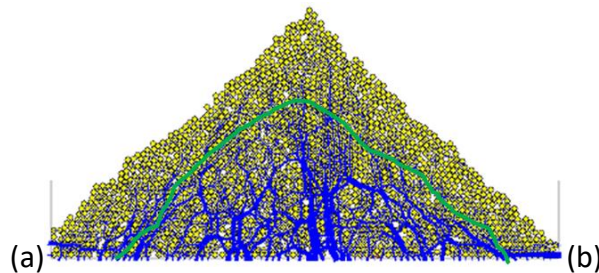


Figura18: Resultados do modelo numérico para pilha de finos de minério de ferro

Na pilha de estocagem da amostra as partículas acima da linha verde estão “fixas” somente pela força de atrito. O efeito é de que a pilha de estocagem da amostra 1 possui um perfil mais triangular e a pilha de estocagem da amostra SL se mostra mais parabólica.

Em nenhum momento o modelo mostra uma velocidade nula para as partículas. As partículas estão sempre em movimento mesmo com a formação da pilha de estocagem. As pilhas de estocagens chegam a apoiar nos muros, dentro do numero de ciclos de cálculo aplicados. Não foi observado um transbordamento das partículas sobre o muro.

Os resultados da evolução das forças verticais e horizontais para os pontos 1,4 e 7 da Figura 17 estão representados nas Figuras 19, 20, 21 e 22 respectivamente. Por razões de simetria os resultados para os pontos 10 e 13 foram semelhantes como esperado e não apresentaremos seus gráficos.

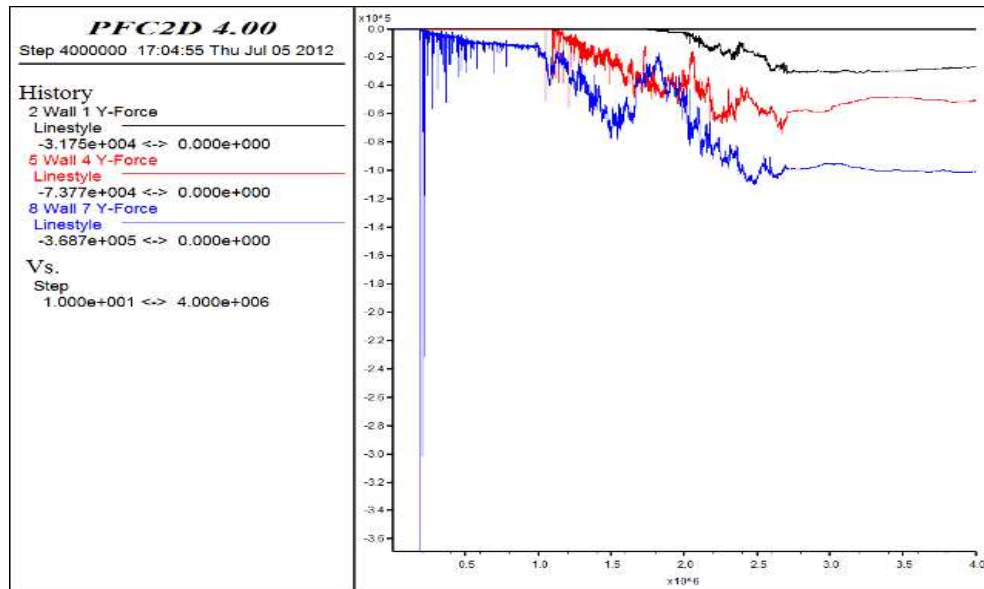


Figura 19: Amostra 1 - Evolução das forças na direção Y nos pontos 1 (linha preta), 4 (linha vermelha) e 7 (linha azul ponto central).

O eixo x corresponde ao número de ciclos da interação de cálculo. No ponto $2,5 \times 10^6$ ciclos, o ponto 7 central do modelo figura 17 é representado pela linha azul. Constata-se a estabilização das forças próximo a $1,0 \times 10^5$ N (eixo Y). Constata-se a oscilação das curvas devido ao período de carregamento da pilha de estocagem. Nota-se no início das curvas 4 e 1 a partir de $1,0 \times 10^6$ ciclos e $1,7 \times 10^6$ ciclos respectivamente, o aumento da altura das pilhas de estocagens ao atingir estas regiões da base utilizada. Próximo ao muro da esquerda (Ponto 1) a linha preta mostra uma tendência a carga constante de $0,2 \times 10^5$ N. Na posição a linha vermelha intermediária mostra uma tendência a estabilização em $4,0 \times 10^6$ ciclos próximo a $0,5 \times 10^5$ N.

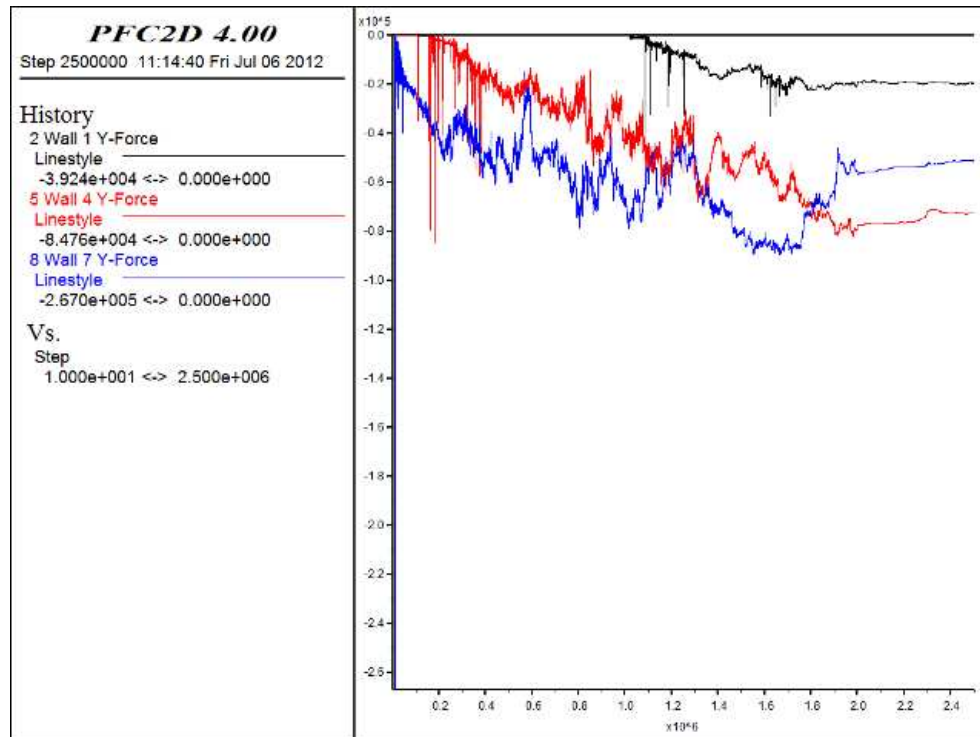


Figura20: Amostra SL - Evolução das forças na direção Y nos pontos 1 (linha preta), 4 (linha vermelha) e 7 (linha azul ponto central).

A força no ponto 1 passa ser constante e próxima a $0,2 \times 10^5$ N próximo do muro, onde este, influencia a dissipação de parte destas forças. No ponto central a tendência a uma estabilização esta muito próxima do ponto intermediário após $1,8 \times 10^6$ ciclos. As forças tendem a $0,5 \times 10^5$ N para o eixo central e $0,9 \times 10^5$ N para o ponto intermediário. Estas forças permanecem constantes sugerindo uma estabilização temporária da pilha de estocagem.

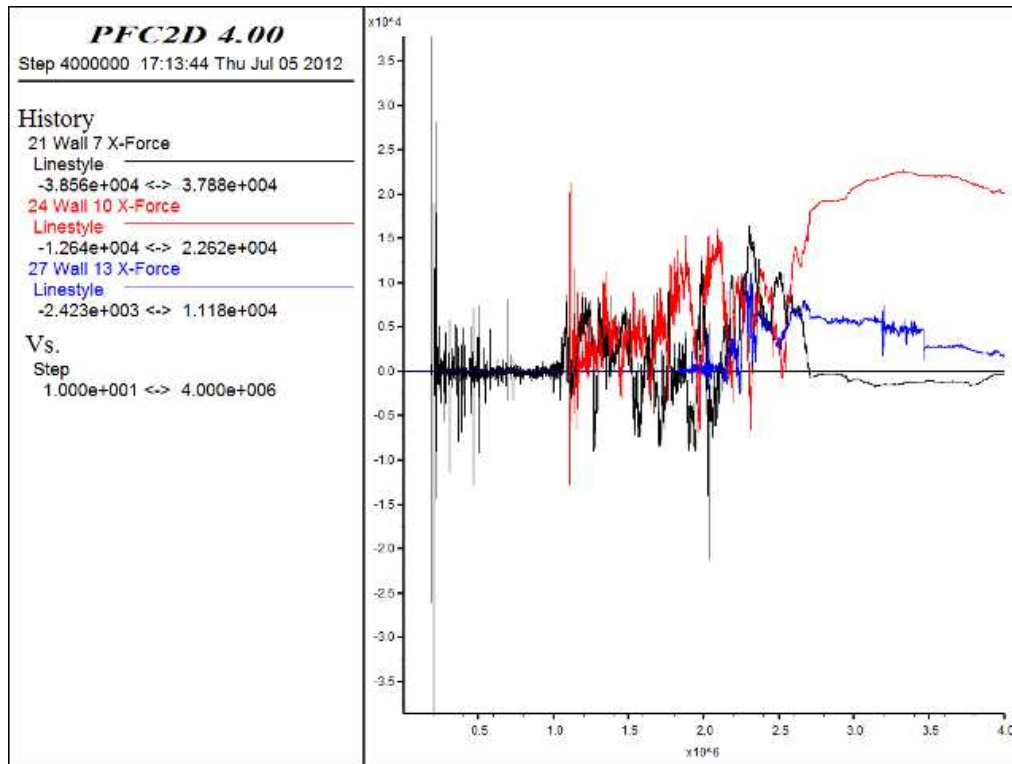


Figura21: Amostra 1 Evolução das forças na direção X nos pontos 7 (linha preta) 10 (linha vermelha) 13 (linha azul ponto central).

O ponto 7 (linha preta neste caso) é o ponto central conforme mostrado na Figura 17. Constata-se uma tendência á descompressão á $2,5 \times 10^6$ ciclos. Os pontos intermediários e próximos ao muro, respectivamente 10 e 13 mostram uma tendência à estabilização, porém com cargas diferentes, para linha azul $0,25 \times 10^4$ N e para linha vermelha $2,0 \times 10^4$ N.

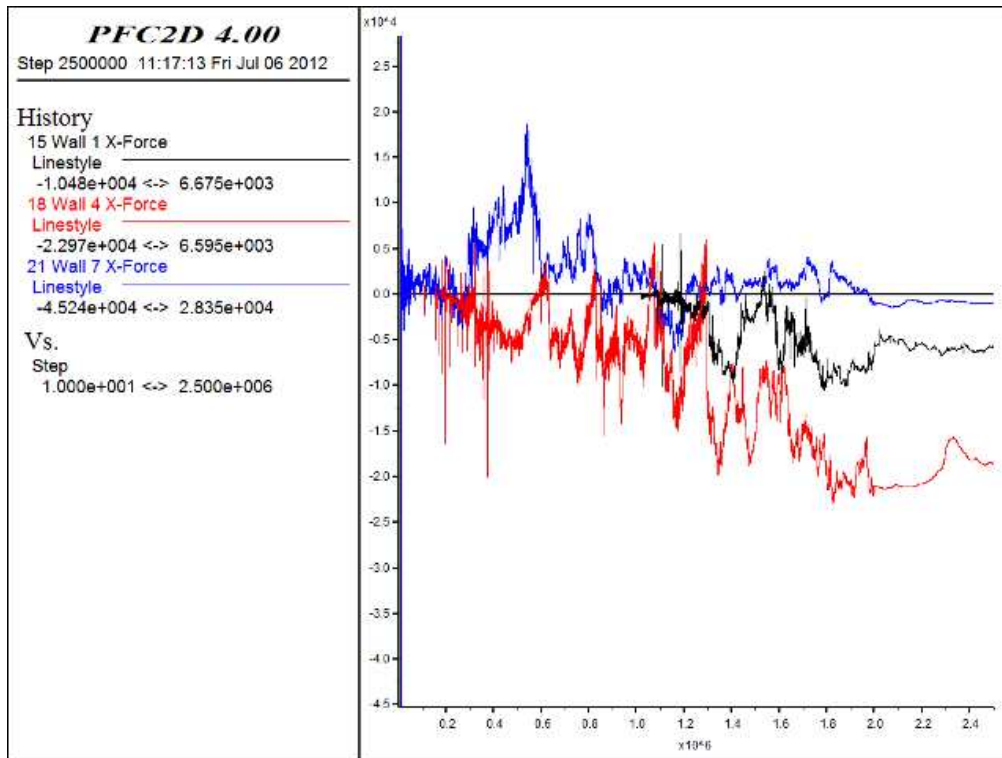


Figura1 Amostra SL - Evolução das forças na direção X nos pontos 1 (linha preta), 4 (linha vermelha) e 7 (linha azul ponto central ponto central).

O ponto central da pilha de estocagem linha azul mostra uma tendência a anular as forças após 2.0×10^6 ciclos. As forças no ponto médio e próximo ao muro não se anulam mostrando uma transferência carga para estes pontos. Este fato propicia uma estabilidade.

5. CONCLUSÃO FINAL.

Comparando os resultados modelo analítico teórico de Thamwattana et. al (2004) aos resultados do modelo reduzido observa-se uma grande semelhança . Esta semelhança esta mais na função e não nos valores. Atribuímos este fato ao ângulo de atrito do modelo teórico ser igual a 90° . No modelo reduzido este ângulo é o ângulo real próximo a 29° . Os modelos numéricos mostram comportamentos semelhantes entre si para a evolução das forças no eixo X, as forças acabam por se estabilizarem na borda das pilhas de estocagens. Este comportamento é observado no modelo reduzido e no modelo de Thamwattanaet al. (2004).

No eixo Y os modelos, teórico e reduzido mostras também funções semelhantes e valores numéricos diferentes. O modelo numérico SL mostra também uma descompressão no eixo central da pilha de estocagem o que não é observado no modelo da Amostra 1.

Na Figura 18(b) o centro da pilha de estocagem SL mostra um maior adensamento provando um arqueamento devido a uma menor rigidez tangencial (K_t). Na pilha de estocagem da amostra 1 o centro da pilha esta menos adensado com menor mobilidade devido ao valor da rigidez tangencial ser maior. A pilha de estocagem da amostra1 não mostra uma descompressão no eixo central da pilha de estocagem para devido à rigidez K_t do modelo. A razão entre as rigidez K_t/K_n da amostra 1 é de aproximadamente 7 e para a amostra SL é de 3. Este fato torna a pilha de estocagem SL mais estável e com o formato de adensamento parabólico.

- [1] THAMWATTANA, N.; HILL, J.M. & COX G.M. Stress distribution in highly frictional granular heaps. *Z. angew.Math. Phys.* 55 (2004) 330–356
- [2] SMID, J. & NOVOSAD J. Pressure distribution under heaped bulk solids. I. *Chem. E. Symp.* (1981)
- [3] HILL, J. M. & COX, G.M. The force distribution at the base of sand-piles. *Developments in Theoretical Geomechanics, The John Booker Memorial Symposium*, (2000) 43-61.
- [4] AI, J.; CHEN, J. F.; ROTTER, J. M. & OOI, J. Y. Numerical and experimental studies of the base pressures beneath stockpiles. *Granular Matter* 13:133–141 (2011)
- [5] ATMAN, A.P.F. From the stress response function (back) to the sand pile “dip”. *The European Physical Journal E.* 17, 93-100 (2005)
- [6] ITASCA Consulting Group. *PFC2D User's guide. Ver. 4.0.* Minneapolis. (2003)
- [7] HERNANDEZ, H.M.O. Caracterização Geomecânica de Rejeitos Aplicada a Barragens de Aterro Hidráulico. *Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília.* (2002)
- [8] PRESS, F.; SIEVER, R.; GROTZINGER, J. & JORDAN, T. H. (2006). *Para Entender a Terra. Tradução Rualdo Menegat*, 4 ed. – Porto Alegre: bookman, 656 p.