

Relatório Técnico

Parecer sobre a Ruptura do Talude do Porto de Santana - Amapá

Maio de 2014

CONTEÚDO

1	Introdução	3
2	Documentos de referência	3
3	BREVE Histórico E ESTUDOS PRÉVIOS	4
4	ANÁLise e retroanálise da ruptura do porto de santana	15
4.1	Perfis estratigráficos e parâmetros geotécnicos.....	16
4.1.1	Estratigrafia da seção Oeste	17
4.1.2	Estratigrafia da seção Leste	21
4.2	Parâmetros Geotécnicos	23
4.3	Estudo da sensibilidade das argilas.....	27
4.4	Análises de estabilidade	32
4.4.1	Análise de Estabilidade da Seção Oeste	32
4.4.2	Análise de Estabilidade da Seção Leste	37
4.5	Avaliação conjunta da estabilidade das seções Oeste e Leste.	40
5	Conclusões.....	44
6	Anexo 1 – interpretação dos ensaios CPTu	48
7	Anexo 2– Análises de Estabilidade para as figuras 30a e 30B.....	62
7.1	Seção Leste – Parâmetros médios	62
7.2	Seção Oeste – Parâmetros médios	63
7.3	Seção Oeste – Parâmetros reduzidos	65
8-	Anexo 3– Análises de Estabilidade para a figura 32.	66
	Seção Leste – Análises com Parâmetros Médios – Pilhas com 30 m de extensão.	66

1 INTRODUÇÃO

O presente relatório tem por objetivo apontar as causas do escorregamento de cerca de 300.000m³ das margens do Porto de Santana, ocorrido em 28 de Março de 2013. A ruptura resultou num saldo de 6 vítimas fatais, além de perdas materiais e danos ambientais diversos. O movimento de massa para o interior do Rio Amazonas gerou uma grande onda que, ao se propagar, causou a destruição do cais flutuante, do equipamento carregador de navios e do sistema de transporte de minério. Foram também destruídos 4 caminhões e 1 pá carregadeira. Como medidas imediatas foram retiradas as estruturas das proximidades da crista do talude remanescente e feito o abatimento do ângulo do talude.

2 DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

A lista abaixo contém os documentos que serviram de base à elaboração do presente Parecer:

1. Relatório 1: emitido por PLANAVE Engenharia Ltda (novembro 1993) – Relatório Final sobre a Estabilização do solo nas Instalações Portuárias da ICOMI – Amapá – contrato 1.93.101;
2. Relatório 2: emitido por Geoprojetos Engenharia Ltda (Agosto de 2013) - C1041-130720-R7 - Aspectos geotécnicos do acidente ocorrido em 28 de março de 2013;
3. Relatório 3: emitido por Ismar Ferrari Consultoria Geotécnica LTDA (Novembro de 2013) – Ruptura do Terreno Marginal do Rio Amazonas na área do Porto de Santana – Caracterização do Desmoronamento do Depósito Aluvionar Marginal do Porto Santana;
4. Relatório 4: emitido por Geoforma Engenharia Ltda, Sondagem de Simples Reconhecimento (SPT) e Relatório de Ensaio Piezocone – RE-1220-09/07 Geoforma Engenharia Ltda;
5. Relatório 5: emitido por Igeotest Brasil - Planilhas de Ensaios de campo – CPTu (2013);
6. Relatório 6: emitido por Arqueplan Projetos e Serviços – Boletins de Sondagens 2013;
7. Relatório 7: emitido por VOGBR Engenharia Ltda - VG13-095-1-GT-RTE-0004– Aspectos Geotécnicos do evento de Movimentação de Massas na Margem do Rio Amazonas – Laudo técnico.
8. Relatório 8: emitido por UON Engenharia, Relatório Preliminar, de Janeiro de 2014.
9. Desenho Projeto Conceitual/2007 - PLANAVE S.A. DE-B12-C32-004.

Os documentos acima são diretamente referenciados no presente Parecer. Vários outros documentos foram disponibilizados e consultados para a elaboração deste Parecer, mas não são listados por serem também referidos e discutidos nos documentos acima.

Sevem ainda de suporte ao presente Parecer as seguintes referências bibliográficas:

Lunne, T; Robertson, P K Powell J. J M (1997) Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice , Blackie Academic & Professional

Schnaid, F. e Odebrecht , E. (2012) Ensaios de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações. Oficina de Texto

Bjerrum, L. (1973). Problems of soil mechanics and construction on soft clays. Proc. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, v.3, pp. 111-159, Moscow.

Rad, N. S. e Lunne, T. (1986). Correlations between piezocone results and laboratory soil properties. Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Report 52155-39.

Robertson, P. K. e Campanella, R. G. (1988). Guidelines for geotechnical design using CPT and CPTU. University of British Columbia, Vancouver, Department of Civil Engineering, Soil Mechanics Series 120.

3 BREVE HISTÓRICO E ESTUDOS PRÉVIOS

A construção do Porto Santana pela ICOMI – Indústria e Comércio de Minérios, na cidade de Santana, AP, data da década de 50 do século passado. O porto localiza-se no braço norte do Rio Amazonas e foi construído para exportação de minério. O Projeto foi elaborado por uma empresa de consultoria americana e sua concepção baseia-se em cais metálicos flutuantes, conectados ao continente por treliças metálicas ancoradas ao terreno, através de blocos com estacas metálicas.

Na época foi executado um programa de investigação geotécnica restrito a sondagens à percussão. Foi possível mapear as condições dos solos, identificando a faixa de terreno aluvionar de argila mole, junto à margem do rio, assim como a área de sedimento terciário mais resistente a montante, que suportaria as pilhas de minério. Para evitar inundações nos períodos de maré alta, o projeto previu um recobrimento com aterro e revestimento superficial de material empedrado com aproximadamente 2,50m de espessura, de modo que toda a superfície do terreno se situasse acima do nível de maré máxima.

As estruturas de carregamento do navio, localizadas na região do depósito aluvionar de argila mole, foram assentes sobre estacas. Foi admitido o uso de fundações diretas apenas para a instalação dos galpões utilizados para controle dos materiais embarcados, bem como faixas de pavimento para passagem de veículos leves.

Em 1993, de acordo com o Relatório 01, foram propostas soluções corretivas ao deslizamento de terra ocorrido em 20/10/1993, no talude submerso das instalações portuárias da ICOMI, seção Leste. A ruptura foi superficial e deslocou cerca de 30,000m³ em direção ao leito do Rio Amazonas. As ondas geradas pelo deslizamento causaram ruptura das peças metálicas e interrupção das operações portuárias. Uma foto do deslizamento de 1993 é apresentada na Figura 1 e um resumo das ações corretivas (retaludamento) é mostrado na Tabela 1.

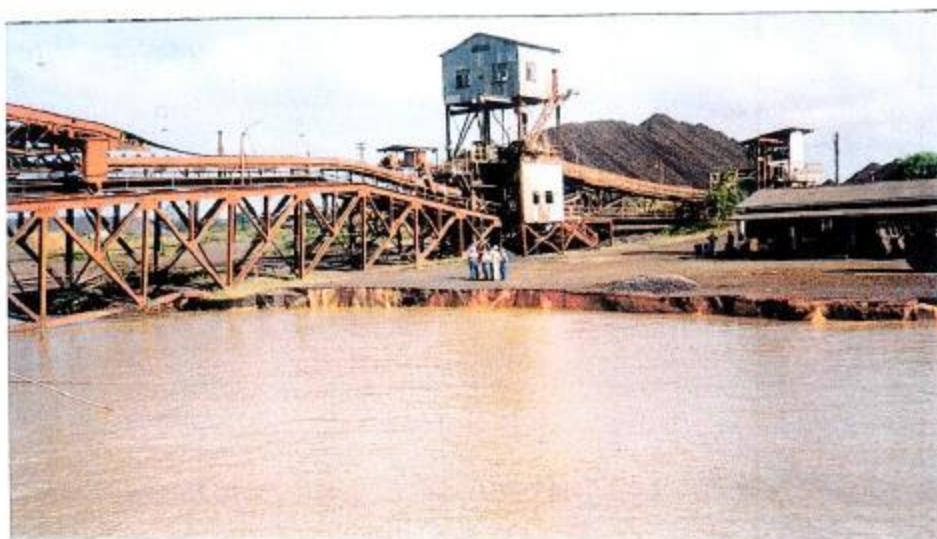


Figura 1. Deslizamento de terra ocorrido em 20/10/1993, seção Leste.

Tabela 1. Resumo das análises e recomendações indicadas no Relatório 01 (1993).

Parâmetros adotados	Solução	Recomendação
$S_u = 20\text{kPa}$ $\gamma_{\text{sub}} = 5,9\text{kN/m}^3$	Retaludamento do talude submerso 1:5 para FS=1,58	Aplicação de manta de Bidim na região de flutuação do NA Cortina de Estacas-prancha protegendo a fundação da estrutura "a frame 1"

O uso do porto pela ICOMI prolongou-se até 1997, quando a exploração do manganês na Serra do Navio encerrou com produção de 138.000 toneladas naquele ano, correspondendo a cerca de 18% da produção de 1987.

Em 2006 a MMX assumiu o controle do Porto Santana, tendo sido realizado, em 2007, um novo programa de investigações geotécnicas (ensaios SPT e CPTu, apresentados no Relatório 04) para fins de adequação do porto para exportação de minério de ferro. As condições geotécnicas dos terrenos na área portuária confirmaram os estudos levados a efeito pela ICOMI em 1956, de modo que foram mantidas as mesmas restrições de uso para a faixa do depósito aluvionar mole marginal do rio Amazonas (Figura 2). O Projeto de reformulação do Porto incluiu a instalação de um novo cais flutuante (Figura 3), inclusive torres para controle e transferência do minério. Vale mencionar que o projeto indicado no Relatório 01 especificou as áreas adequadas para estocagem do minério, mantendo uma distância mínima de segurança de 140m da margem do rio, de forma a garantir um solo de fundação com capacidade de suporte adequada para as pilhas de minério. As obras foram concluídas em meados de 2008. Esses trabalhos não incluíram qualquer alteração nos taludes da margem do cais.



Figura 2. Foto aérea de 2007.

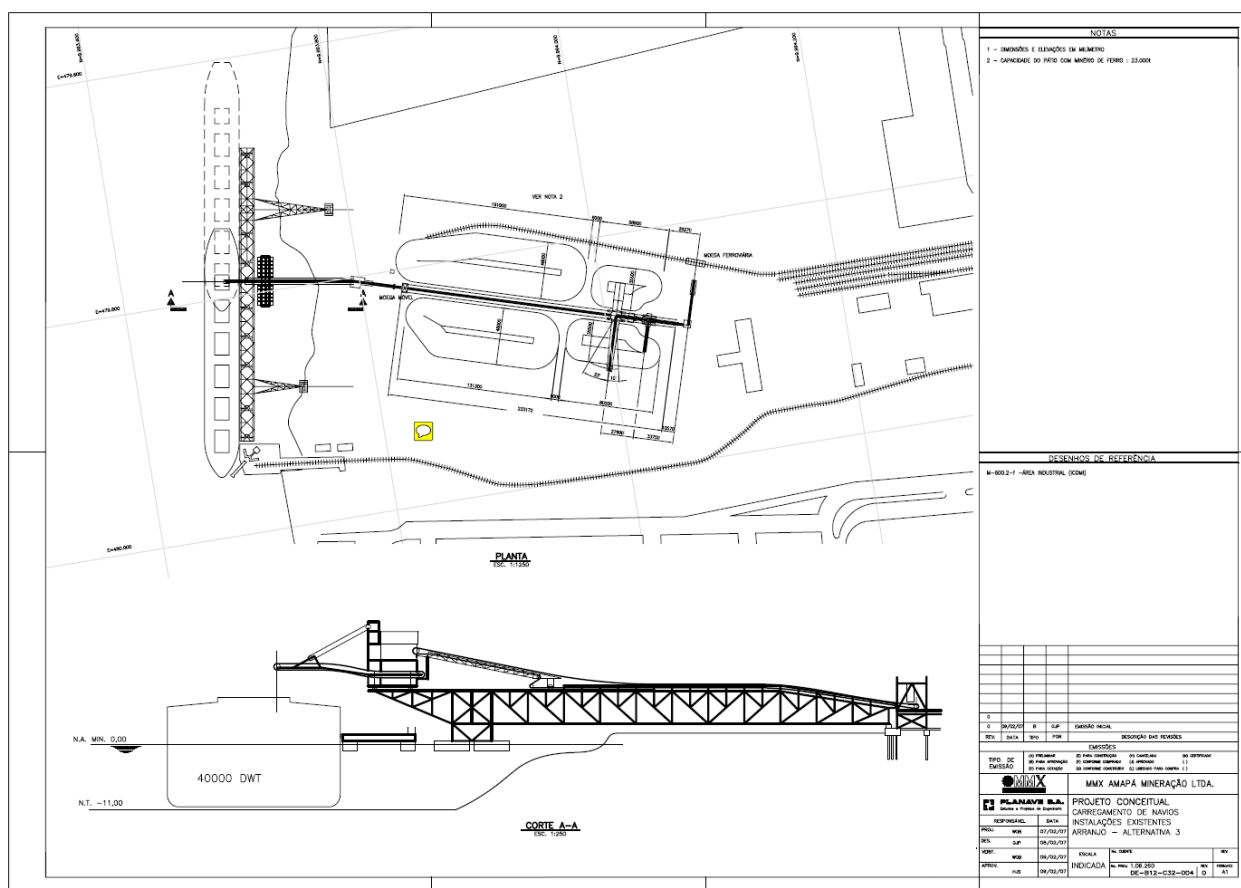


Figura 3. Foto 2007 Planta de operação (Documento 09).

Em agosto de 2008 a companhia Anglo Ferrous Amapá Mineração Ltda comprou os direitos para exploração das minas e assumiu a administração do Porto Santana.

Em março de 2013, aparentemente sem qualquer indício prévio, houve a ruptura das margens do Porto de Santana.

De acordo com o Relatório 02, a ruptura das margens do porto ocorreu por volta das 00:27hs do dia 28 de março de 2013. O movimento de massa foi abrupto e rápido, gerando uma onda, com altura estimada em 5 a 6 metros, que causou movimentação vertical violenta de um navio atracado no cais flutuante, que se encontrava em início de carregamento. O movimento de massa arrastou o apoio Oeste do cais flutuante (denominado “rótula Oeste”) e uma parte do equipamento de carregamento de navios (em particular a casa de controle, a correia de subida e a correia de despejo de minério no navio). Os limites do escorregamento estão indicados na Figura 4 (Relatório 02).

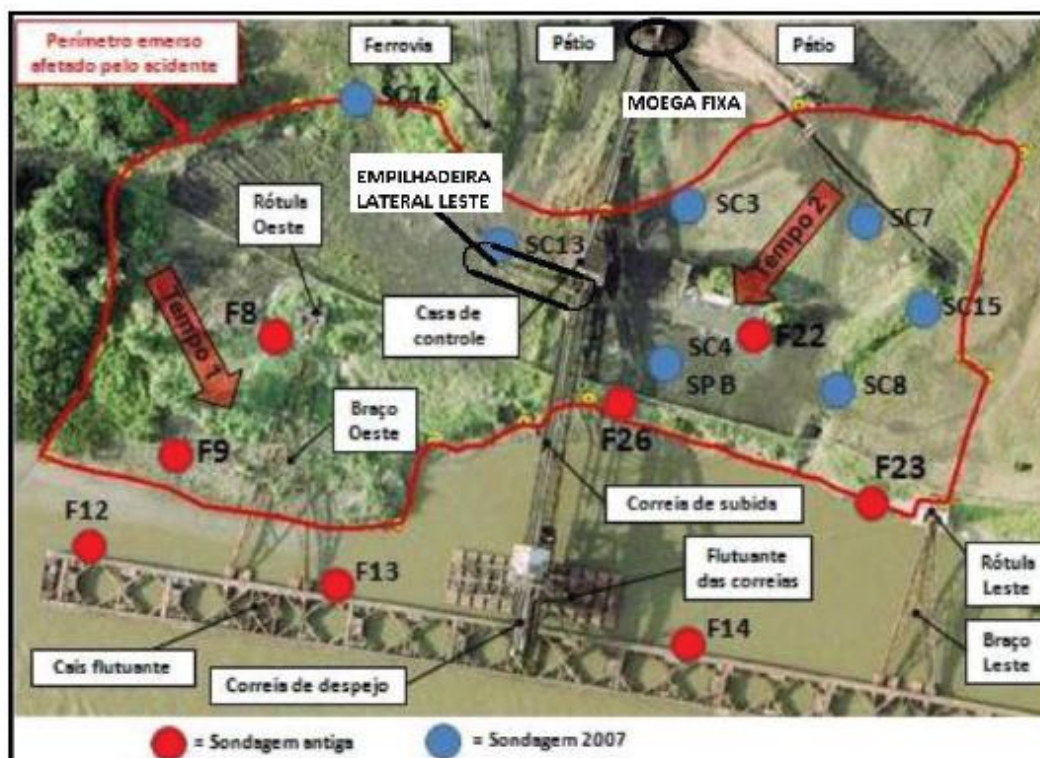
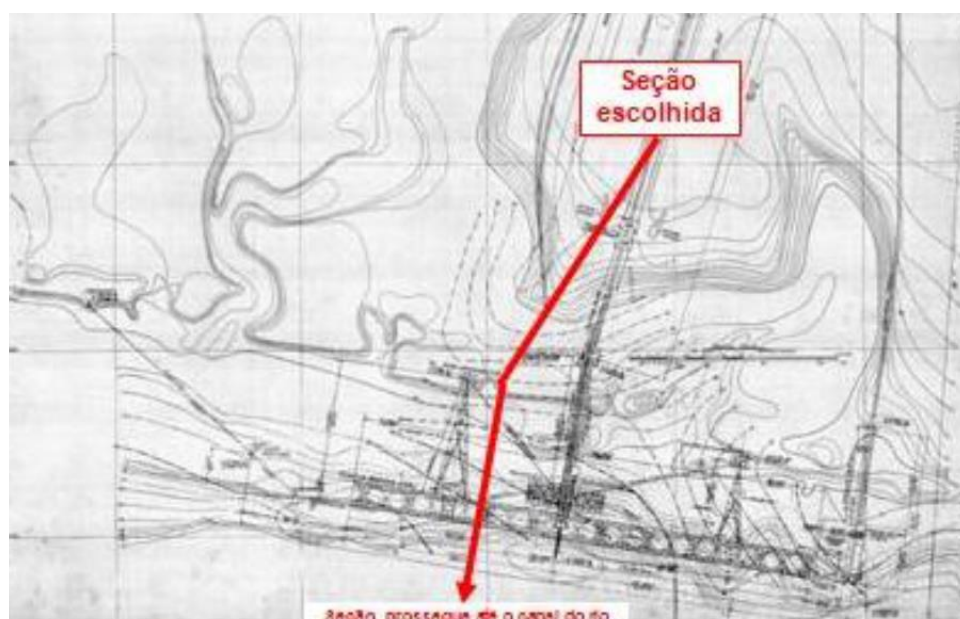
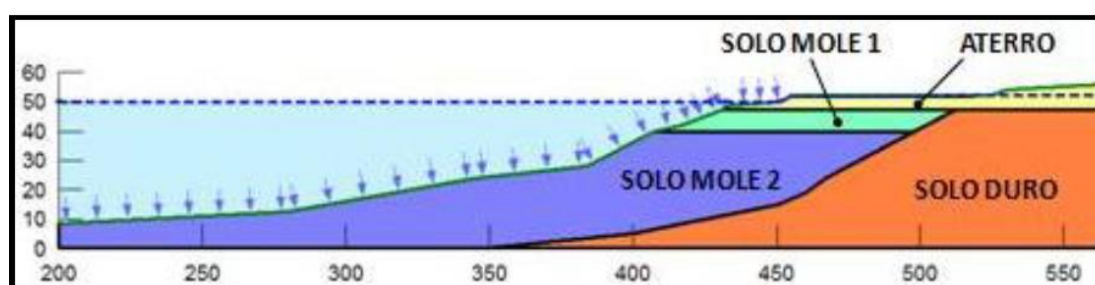


Figura 4. Aspectos do local do acidente (Relatório 02).

Estudos de estabilidade foram apresentados no Relatório 02, referidos a uma seção posicionada a Oeste da correia transportadora, definida topograficamente a partir da planta da ICOMI, datada de 1950. A seção, o perfil e os parâmetros adotados para os materiais estão mostrados na Figura 5. A camada denominada argila “Mole 1”, provavelmente ressecada por efeito climático, com espessura da ordem de 5 a 7 m, apresentou resistência à penetração SPT entre 3 a 6 golpes/30 cm, valores relativamente elevados de q_r (resistência à penetração nos ensaios CPTu) e umidade entre 35% e 40%. A camada denominada argila “Mole 2” apresentou valores de SPT entre 0/50 e 2 e umidade entre 50% e 70%. Na porção inferior do depósito, até o fim dos furos de prospecção, encontram-se solos com SPT mais altos e umidades mais baixas (inferiores a 30%), que constituem o material denominado “solo duro”.



(a) Seção escolhida (Relatório 02).



(b) Perfil de cálculo (Relatório 02).

MATERIAL	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (graus)
ATERRO	17	10	30
MOLE 1	15	40	0
MOLE 2	14,5	34	0
DURO	19	100	40

(c) Parâmetros.

Figura 5. Seção adotada e parâmetros geotécnicos (Relatório 02).

Os resultados das análises de estabilidade (Relatório 02) indicaram fatores de segurança $FS > 1$ ($FS = 1,62$ e $FS = 1,34$ para os níveis d'água máximo e mínimo, respectivamente), como mostra a Figura 6. Na análise do Relatório 02 descarta-se a possibilidade de atividade sísmica, erosão e sobrecarga (admitindo que a ruptura tenha ocorrido em uma área sem a sobrecarga da pilha "sinter-feed",

que alegadamente estaria a Leste da correia transportadora). A variação da maré possui relevância para os cálculos, entretanto é descartada como causa isolada. Dessa forma, segundo o Relatório 02, uma vez afastadas as demais causas possíveis, a ruptura estaria associada a uma súbita perda de resistência do solo mole, interpretado como ultrassensível (“quick clays”). A retro análise do deslizamento (para $FS = 1$) resultou em $s_u = 25\text{kPa}$, como mostra a Figura 7.

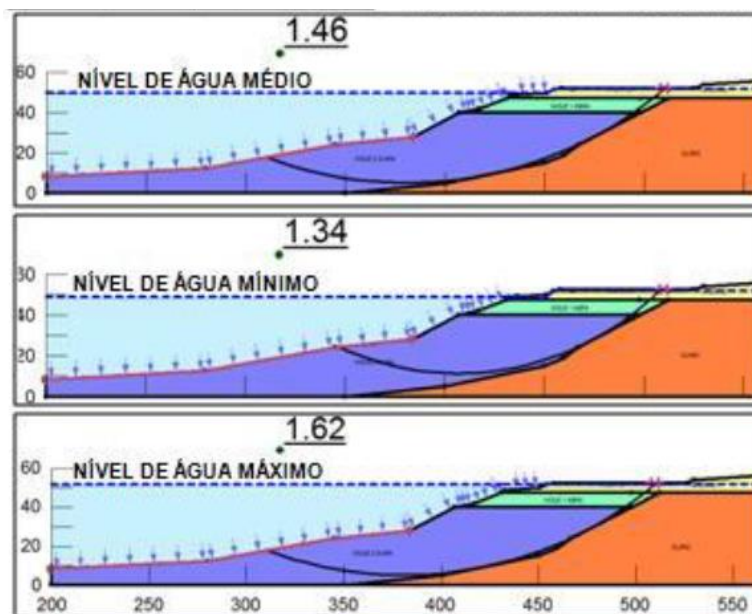


Figura 6. Resultado das análises – método Morgenstern & Price (Relatório 02).

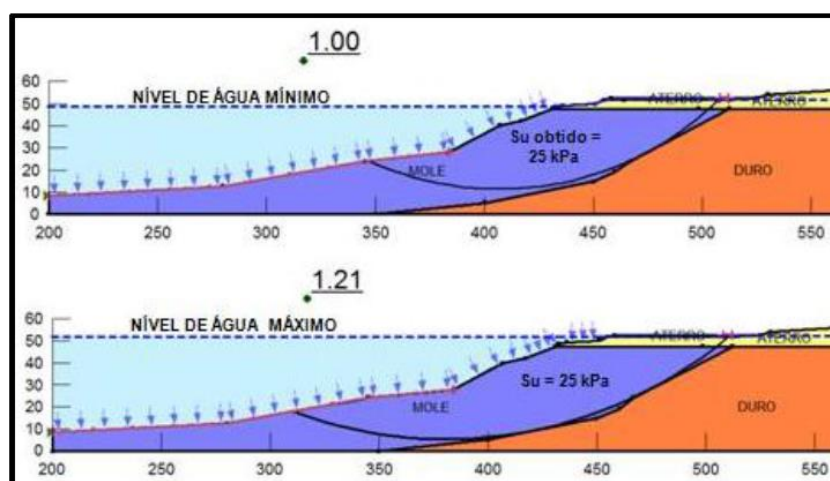


Figura 7. Retroanálise – $S_u = 25\text{kPa}$ (Relatório 02).

De acordo com o Relatório 03, no dia 20/01/2013 (portanto 70 dias antes da ruptura), a operação de embarque de minério foi interrompida pela avaria da recuperadora ZNK stacker (equipamento usado na operação de lançamento do minério na correia transportadora). Operações de emergência foram adotadas para garantir o manuseio do minério e o seu carregamento aos navios. O armazenamento de minério era feito em uma pilha-pulmão que se apoiou sobre o depósito aluvionar de argila orgânica mole na margem do rio, com baixa capacidade de suporte. A Figura 8 mostra o arranjo presumido para o sistema emergencial de carregamento e embarque do minério, conforme apresentado no Relatório 03. De acordo com a Figura 9 (igualmente extraída do Relatório 03), uma parte da pilha-pulmão de minério rompeu e deslocou-se para o leito do rio (Figura 9). A partir do detalhe mostrado na Figura 9b, estima-se uma altura de sobrecarga, no dia da ruptura, da ordem de 6m numa seção à direita da correia transportadora, denominada neste Parecer de Seção Leste.

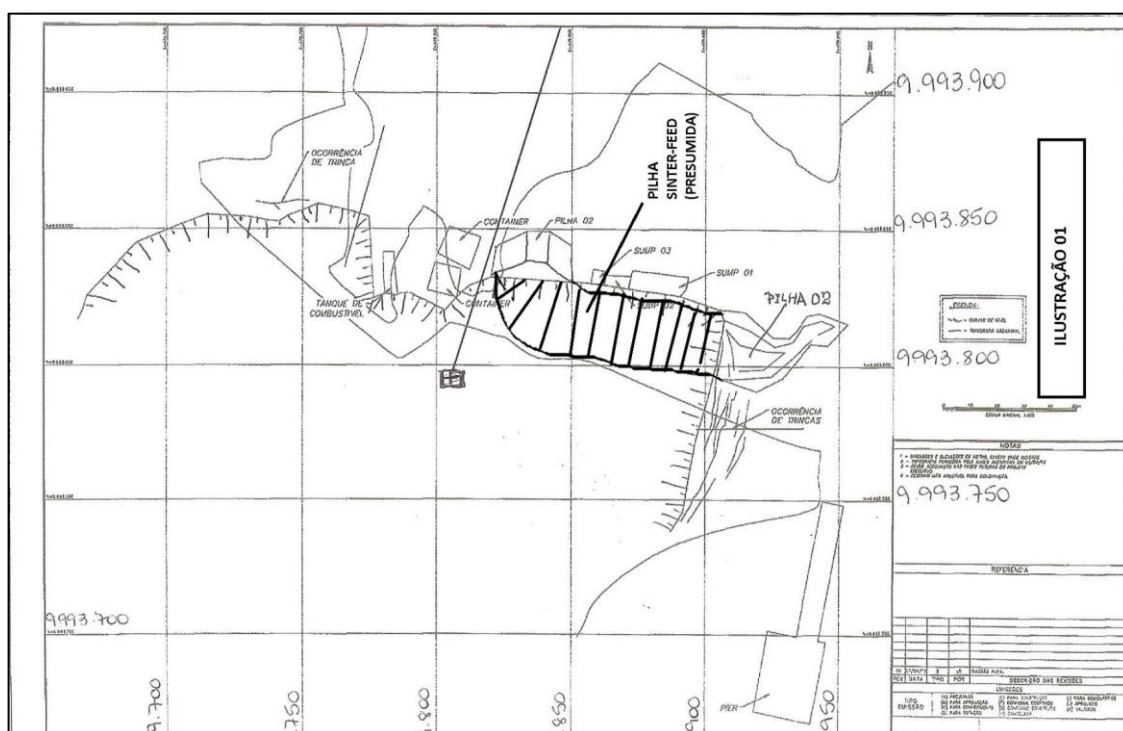


Figura 8. Localização presumida pilha sinter-feed (Relatório 03).



(a) Vista pós ruptura, rótulas Oeste e Leste.



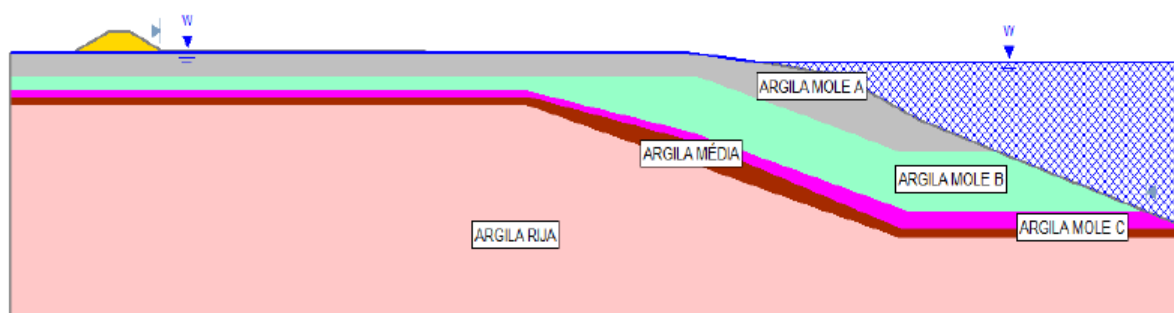
(b) Detalhe 1, rótula Leste.

Figura 9. Cenário pós-ruptura, rótulas Oeste e Leste.

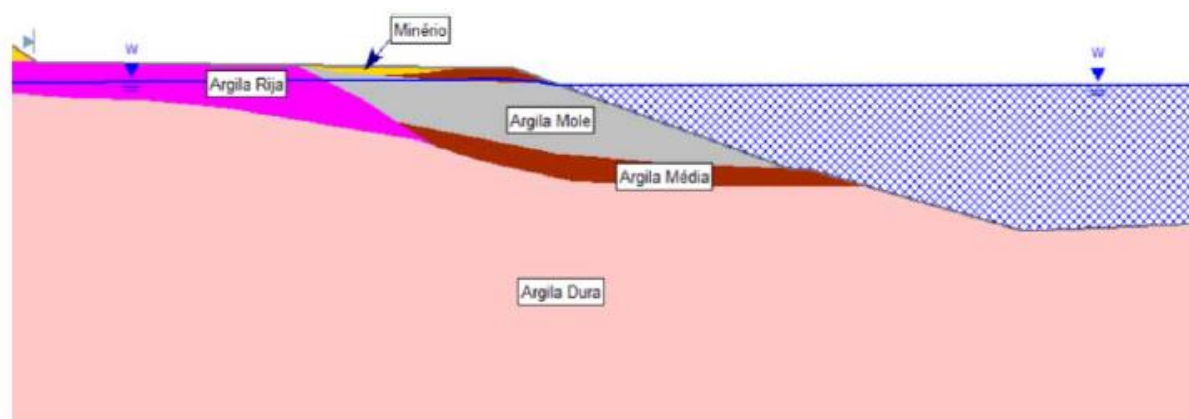
O Relatório 07 indicou que “...o mecanismo de ruptura foi associado à ocorrência de uma primeira ruptura numa região submersa, descalçando o talude e causando a ruptura das margens, de maiores proporções. Com a movimentação da massa, gerou-se uma onda que também contribuiu com rupturas subsequentes, de menor porte. A comparação das batimetrias realizadas em novembro de 2011 e junho de 2012 com a de abril de 2013 permitiu verificar que a maior movimentação submersa ocorreu na região onde se encontrava a rótula Oeste e que o volume movimentado foi da ordem de 550.000 m³”. Com esse entendimento, foi proposta, como hipótese, a seguinte sequência de rupturas:

- i. Ruptura inicial submersa da camada de argila mole próxima à rótula Oeste, danificando esta estrutura. Os movimentos da rótula e da viga de ligação rótula-pier causam a movimentação da popa do navio;
- ii. Descalçamento da base do restante da margem do rio, provocando a continuidade da ruptura das margens e do ship-loader e gerando uma onda que se propaga frontal e lateralmente, provocando danos às embarcações ancoradas no porto de passageiros adjacente ao Terminal de Santana; essa onda também contribuiu com rupturas subsequentes, de menor porte, nos taludes remanescentes da movimentação anterior e na pilha de “sinter feed”.

Análises de estabilidade foram apresentados no Relatório 07, sendo os estudos realizados em duas seções (representativas das rótulas Oeste e Leste), Figura 10, procurando-se quantificar a resistência não drenada da argila associada ao fator de segurança crítico (FS=1). Os demais parâmetros estão mostrados na Figura 11.



(a) Seção na região da rótula Oeste.



(b) Seção na região da rótula Leste.

Figura 10. Seções representativas da rótula Oeste (a) e Leste (B), Método de Bishop - Talude submerso 1V:6H, com nível d'água na condição mais rebaixada, segundo o Relatório 07.

De acordo com o Relatório 07, as retro análises forneceram s_u de 28kPa e 26kPa, para as seções Oeste e Leste, respectivamente. Ainda segundo aquele relatório, "... a posição da pilha não alteraria significativamente o FS para s_u na condição de ruptura..." (Figura 12).

Material	Peso específico (kN/m ³)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)	S_u (kPa)
Argila Mole	15	-	-	Nota 1
Argila Média	18	15	27	-
Argila Rija	18	20	30	-
Argila Dura	18	30	32	-
Pilha de Minério e Minério	24	0	39	-
Aterro da Pêra	19	10	30	-

Figura 11. Parâmetros geotécnicos (Relatório 07) – Nota 1: s_u obtido por retro análise (FS=1).

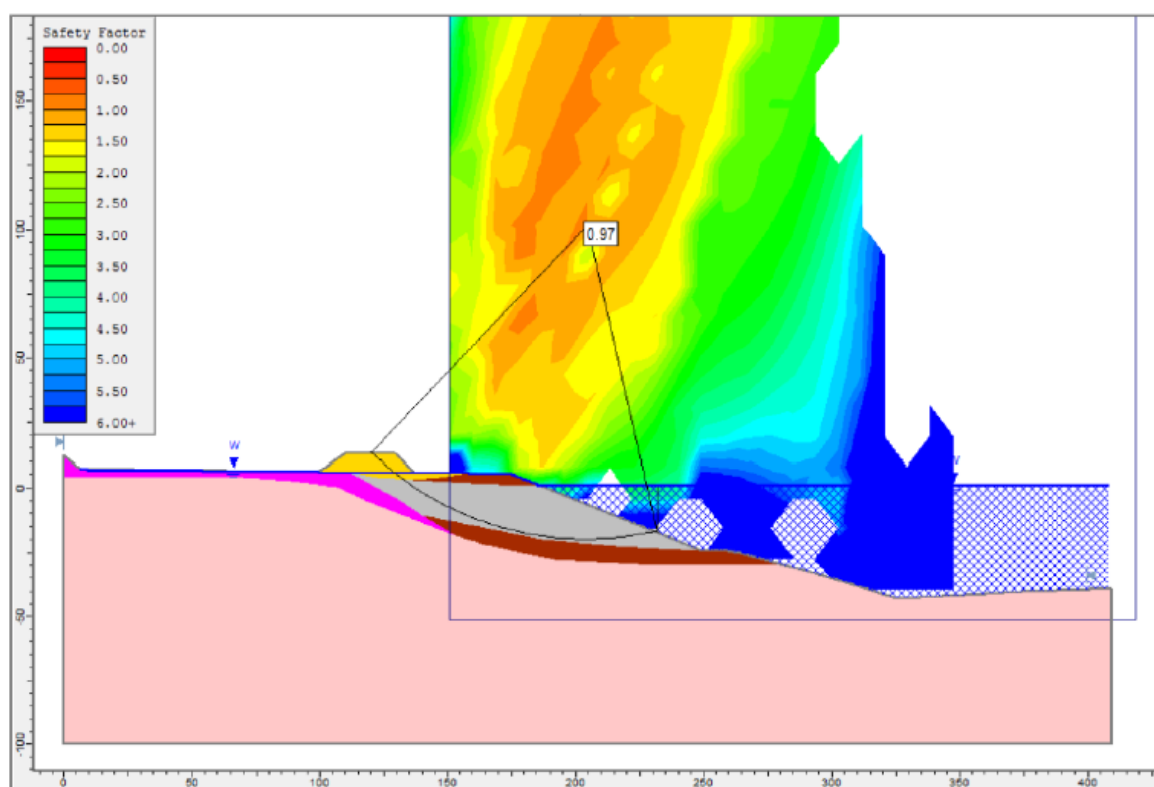


Figura 12. Retroanálise da seção Leste com a pilha “sinter-feed” (Relatório 07”).

4 ANÁLISE E RETROANÁLISE DA RUPTURA DO PORTO DE SANTANA

Para fins das análises desenvolvidas no presente Parecer, foram utilizados os resultados dos seguintes relatórios de investigação geotécnica e de levantamento batimétrico:

- i) Dados de 1993: batimetria após a ruptura superficial ocorrida em 1993 (Relatório 01).
- ii) Dados de 2007: sondagens SPT e ensaios de penetração CPTu (Relatório 04).
- iii) Dados de 2013: sondagens (Relatório 06) e ensaios de penetração CPTu e ensaios de Palheta (Relatório 05) executados após o acidente.

As Figura 13 e 14 mostram os contornos do deslizamento de 2013, em conjunto com a localização das investigações de campo relatadas nos Relatórios 04, 05 e 06, tomando por referência os contornos batimétricos de 1993 (Relatório 01).



Figura 13. Limites do escorregamento (batimetria de 1993, Relatório 01) e localização das investigações geotécnicas consideradas no presente Parecer.

Cabe destacar a dificuldade na locação dos ensaios face aos diferentes sistemas de coordenadas referenciados nas plantas disponibilizadas. Por isso, alguns ensaios recentes e relevantes (Relatório 05) não puderam ser locados em planta. Outros se mostraram em posição julgada incompatível com a lâmina d'água informada, como, por exemplo, no ensaio CPT-33 do Relatório 05.

4.1 Perfis estratigráficos e parâmetros geotécnicos

Para fins das análises desenvolvidas no presente Parecer, foram estudadas duas seções principais, transversais ao leito do rio, posicionadas a Oeste e a Leste da correia transportadora, como se mostra em planta na Figura 14. A construção dos perfis baseou-se em sua maior parte em sondagens SPT e ensaios CPTu realizados em 2007 apenas na seção Leste, além dos resultados de al-

gumas sondagens de 2013 e dos ensaios de palheta de 2013. Importante enfatizar que durante todo o período de operação do porto não foram executadas investigações geotécnicas (ensaios de campo e de laboratório) na seção Oeste. Todos os ensaios considerados foram referidos à batimetria de 1993 (Relatório 01). Quanto aos ensaios CPTu, a preferência por aqueles do Relatório 04 (2007) sobre os do Relatório 05 (2013) se deve ao fato destes terem os resultados apresentados em MPa (em contraste com os do Relatório 07, em kPa), impossibilitando a leitura dos respectivos valores em escala no caso dos estratos de menor resistência (e de maior interesse às análises de estabilidade). A locação das sondagens e dos ensaios geotécnicos está mostrada na Figura 14.

4.1.1 Estratigrafia da seção Oeste

Devido à ausência de investigações geotécnicas na seção Oeste, a análise do Relatório 02 foi baseada em batimetrias da seção Oeste, porém com parâmetros geotécnicos obtidos da seção Leste. Por não terem sido executadas investigações geotécnicas adicionais na seção Oeste desde o acidente de 2013, foi mantida neste Parecer essa mesma hipótese (batimetria da seção Oeste com parâmetros geotécnicos da seção Leste) para as análises de estabilidade na região da rótula Oeste. Há, portanto, maior confiabilidade na estratigrafia da seção Leste, se comparada à da seção Oeste. Cabe ressaltar que face às incertezas no perfil da seção Oeste, aliado ao fato de somente dois ensaios CPTu (SC-04 e SC-08 – Anexo 01) terem revelado a presença de uma camada de menor resistência na seção Leste (Figura 16 - Argila Mole), julgou-se improcedente, neste Parecer, incluir essa camada localizada de solo mais fraco na estratigrafia da seção Oeste.

Para o estudo da seção Oeste foram interpretadas 3 seções auxiliares a partir da Seção Leste (A, B e C, indicadas em planta na Figura 14), paralelas à margem do rio (portanto, transversais à correia transportadora), cujos perfis estão representados nas Figuras 15a, 15b e 15c. Os perfis auxiliares foram necessários para melhor visualizar a estratigrafia da seção Oeste.

O perfil principal representativo da seção Oeste é aquele mostrado nas Figuras 16 e 16a, onde são identificadas duas camadas de solos mais fracos (nas cores verde e verde claro) sobrejacentes a uma camada de solo residual mais resistente. Os parâmetros de resistência atribuídos a essas camadas estão definidos no item 4.2. A denominação dessas duas camadas de sedimentos mais fracos corresponde à mesma nomenclatura do Relatório 2:

- Argila 1, para a camada superficial;
- Argila 2, para a camada subjacente à Argila 1.

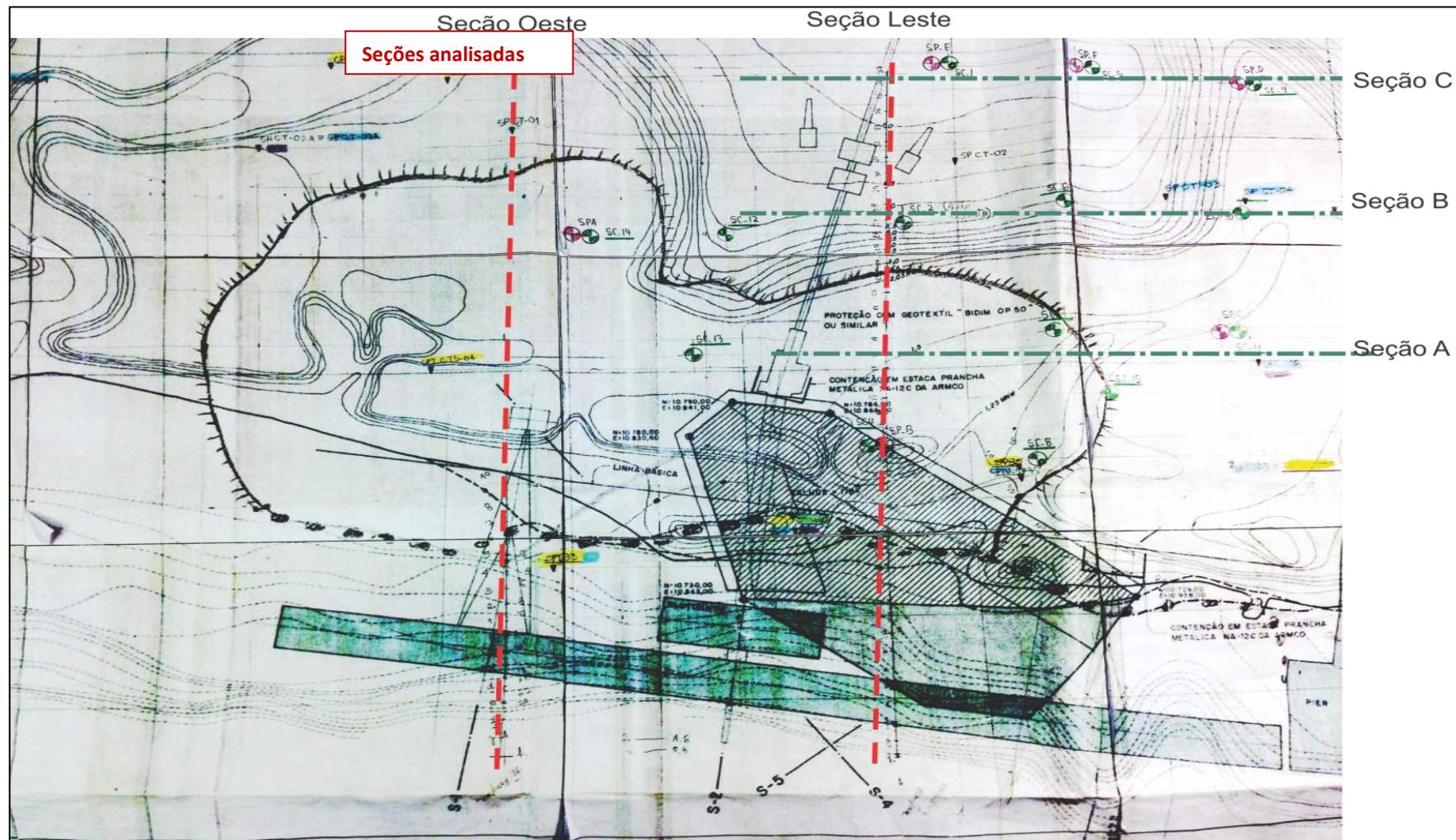


Figura 14. Seções longitudinais e transversais ao leito do rio (referenciadas à planta batimétrica de 1993, Relatório 01).

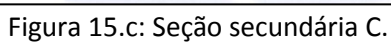
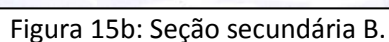
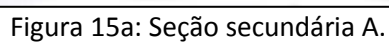


Figura 15. Perfis estratigráficos das seções auxiliares A, B e C.

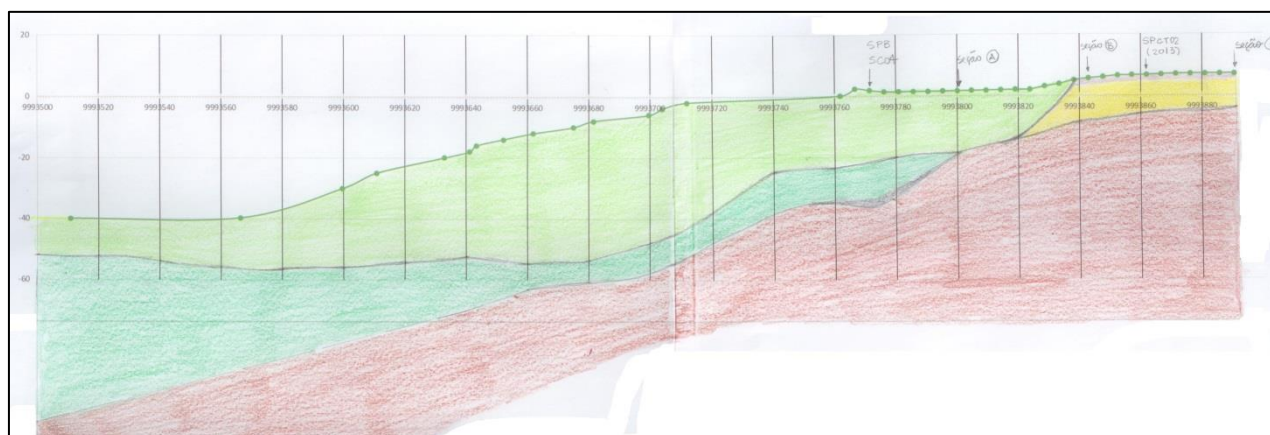


Figura 16a. Perfil estratigráfico da seção Oeste (inferido a partir das seções auxiliares A, B e C).

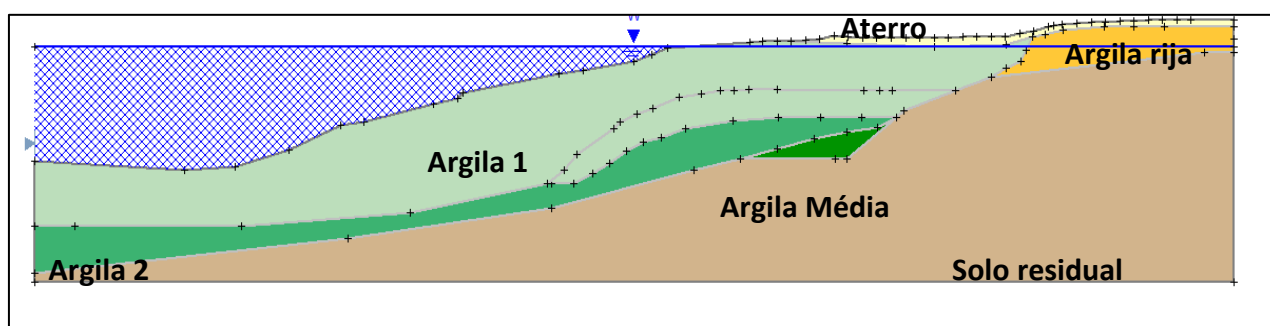


Figura 16b. Perfil geotécnico de cálculo (análise de estabilidade da seção Oeste, programa "Slide").

4.1.2 Estratigrafia da seção Leste

Para a definição da estratigrafia da seção Leste foram utilizados os resultados das sondagens SPT e ensaios CPTu localizados próximos ao alinhamento da seção selecionada para as análises de estabilidade. Adicionalmente foram geradas 3 seções auxiliares (A, B e C, indicadas em planta na Figura 14), paralelas à margem do rio (portanto, transversais à correia transportadora), cujos perfis estão representados nas Figura 15a, 15b e 15c. Como mencionado no item 4.1.1, as seções auxiliares foram também usadas para melhor visualizar a estratigrafia da seção Oeste. Portanto, a estratigrafia da seção Leste foi mais bem definida por apresentar maior proximidade com a locação dos ensaios realizados, sendo assim possível obter um perfil geotécnico com maior confiabilidade comparativamente à seção Oeste, uma vez que várias informações do Relatório 04, como ensaios bem caracterizados quanto aos materiais e à locação dos respectivos furos, foram disponibilizadas. Cabe destacar, todavia, que mesmo na seção Leste a investigação geotécnica disponível até o acidente

de 2013 (apenas sondagens à percussão e ensaios CPTu sem a devida calibração por ensaios de palheta) mostra-se insuficiente para respaldar um projeto de engenharia do porte do Porto de Santana. Em consequência, os estudos de engenharia prévios mostraram-se insatisfatórios.

O perfil representativo da seção Leste está indicado nas Figuras 17a e 17b, onde são identificadas 3 camadas de solo mais fraco (duas camadas em cor verde entremeando uma lente de argila mole na cor vermelha) sobrejacentes a uma camada de solo residual mais resistente. Os parâmetros de resistência atribuídos a essas camadas estão definidos no item 4.2. De acordo com a nomenclatura do Relatório 02 (também seguida na seção Oeste), a camada de argila superficial foi denominada “Argila 1”, enquanto a camada sobrejacente ao solo residual foi denominada “Argila 2”. A camada de argila mole de baixa resistência entremeada entre a “Argila 1” e a “Argila 2”, na cor vermelha, foi denominada “Argila Mole”.

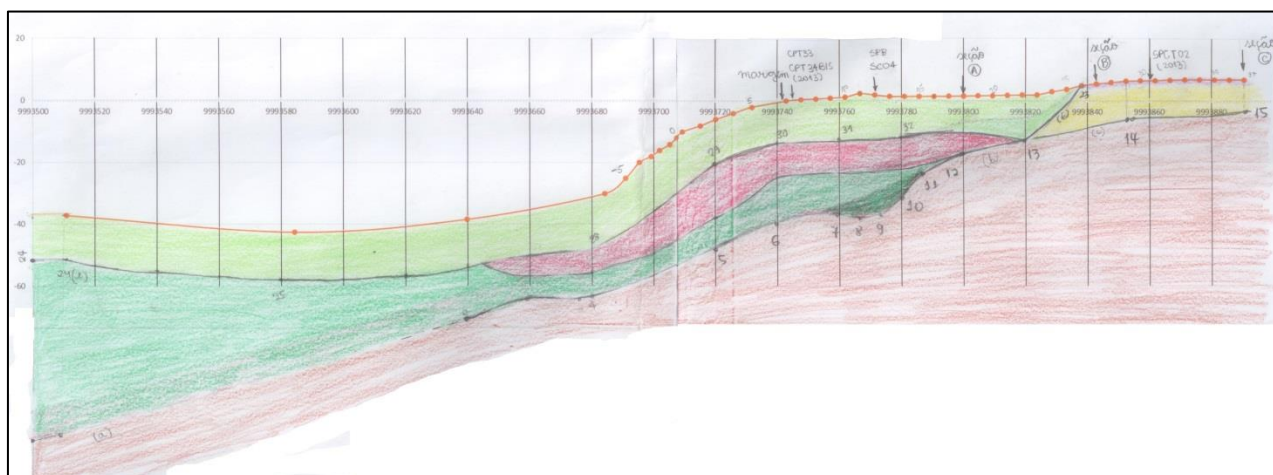


Figura 17a. Perfil estratigráfico da seção Leste.

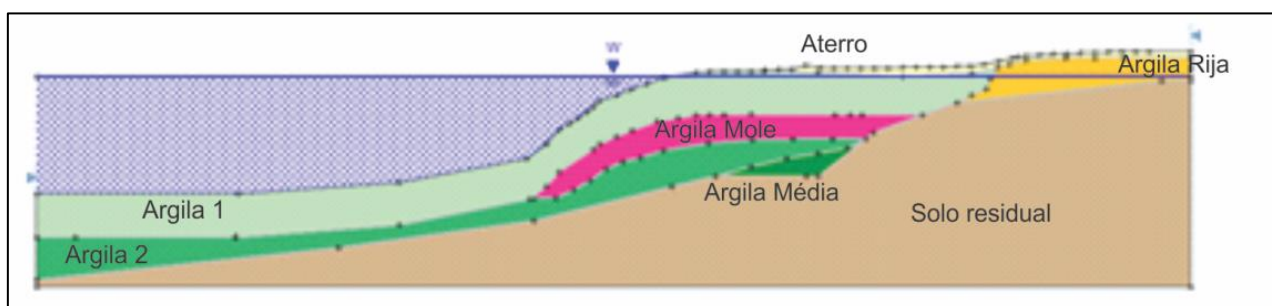


Figura 17.b. Perfil geotécnico de cálculo (análise de estabilidade da seção Leste, programa “Slide”).

4.2 Parâmetros Geotécnicos

A análise das investigações de campo possibilitou a identificação de 04 camadas argilosas na seção Leste, além de uma camada superficial de aterro (por vezes constituída de minério) e do embasamento subjacente de solo residual mais resistente. A locação dos ensaios geotécnicos considerados é mostrada na Figura 13. Para a seção Oeste (Figura 16a), como se descreve no item 4.1, a estratigrafia foi estimada a partir da seção Leste.

No caso das camadas mais resistentes (aterro e solo residual) foram mantidos os mesmos parâmetros adotados no Relatório 02. Salienta-se que os parâmetros do aterro pouco afetam a estabilidade face à sua pequena espessura, comparativamente à espessura das camadas de solo mole.

Tabela 2. Parâmetros do aterro e do solo residual (Relatório 02).

Material	γ_t (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (graus)
Aterro	17	10	30
Solo Residual	19	100	40

Para as camadas argilosas de menor resistência foram analisados os perfis de CPTu realizados em 2007 (Relatório 04) e alguns ensaios CPTu realizados recentemente (Relatório 05). Foram também analisados os ensaios de palheta de campo realizados recentemente (Relatório 05), que serviram para a calibração dos ensaios CPTu, através do parâmetro N_{kt} .

Como não se dispunha dos arquivos digitais dos ensaios CPTu, foram extraídas graficamente as informações sobre resistência de ponta (q_s), atrito lateral (f_s) e poro pressão (u) de vários pontos considerados significativos, para a devida interpretação desses ensaios. As planilhas contendo as respectivas interpretações estão apresentadas no Anexo 1 (interpretação detalhada de 13 ensaios CPTu, Relatório 04).

Os perfis de s_u obtidos pelos ensaios CPTu foram ajustados com base nos ensaios de palheta para valores de N_{kt} variando de 8 a 15, tendo sido obtido o melhor ajuste para $N_{kt}=12$. Essa comparação é resumida para 3 valores de N_{kt} nas Figuras 18 ($N_{kt}=12$), 18a ($N_{kt}=10$) e 18b ($N_{kt}=15$). O valor $N_{kt} = 12$, interpretado neste Parecer como representativo das argilas do Porto de Santana, com base em ensaios de palheta recentes, coincide com o valor estimado no Relatório 02. Na Figura 18

estão também plotados os limites superior e inferior associados ao intervalo de confiança de 90% definido para os resultados dos ensaios de palheta.

A partir do conjunto de ensaios interpretados neste Parecer, foi definida na Figura 18 a variação da resistência não drenada s_u para as três camadas argilosas da seção Leste, com valores médios de s_u distintos. Nos 15m superiores (Argila 1) obtém-se s_u médio constante e igual a 40kPa, seguido por uma camada com resistência média $s_u=35$ kPa (Argila Mole, com 5 m de espessura) e por uma última camada com resistência média s_u crescente com a profundidade (Argila 2), como indicado na Figura 18 e na Tabela 3. Os valores médios foram definidos com base apenas nos resultados dos ensaios de palheta, que foram utilizados na calibração dos ensaios CPTu. Aos valores médios não foi aplicado qualquer fator de correção $\mu=f(IP)$ na resistência medida no ensaio de palheta, como proposto por Bjerrum (1973). Esse fator é empírico e estimado a partir de retro análises de rupturas. Segundo Schnaid e Odebrecht (2012), para as argilas brasileiras o fator de Bjerrum médio é da ordem de $\mu=0,65$.

As análises de estabilidade desenvolvidas neste Parecer foram conduzidas tanto com base em valores médios quanto em valores afetados do fator de Bjerrum. Na ausência de resultados de ensaios de caracterização que permitissem quantificar o índice de plasticidade (IP) das argilas do Porto de Santana, adotaram-se valores de μ próximos daqueles reportados na literatura para as argilas brasileiras, de tal forma que situassem a resistência s_u corrigida dentro da nuvem de pontos indicada na Figura 18. De acordo com esse critério, adotou-se $\mu=0,75$ para a argila 1 ($s_u=40$ kPa x 0,75=30 kPa) e $\mu=0,70$ para a argila mole ($s_u=35$ kPa x 0,70=25 kPa). Para a argila 2, a variação linear da resistência com a profundidade é aquela indicada na Figura 18. Os valores afetados pelo fator μ estão indicados na Tabela 3. A Figura 18 compara o perfil de resistência média (cor vermelha) com o perfil de resistência afetado do fator de Bjerrum (cor verde).

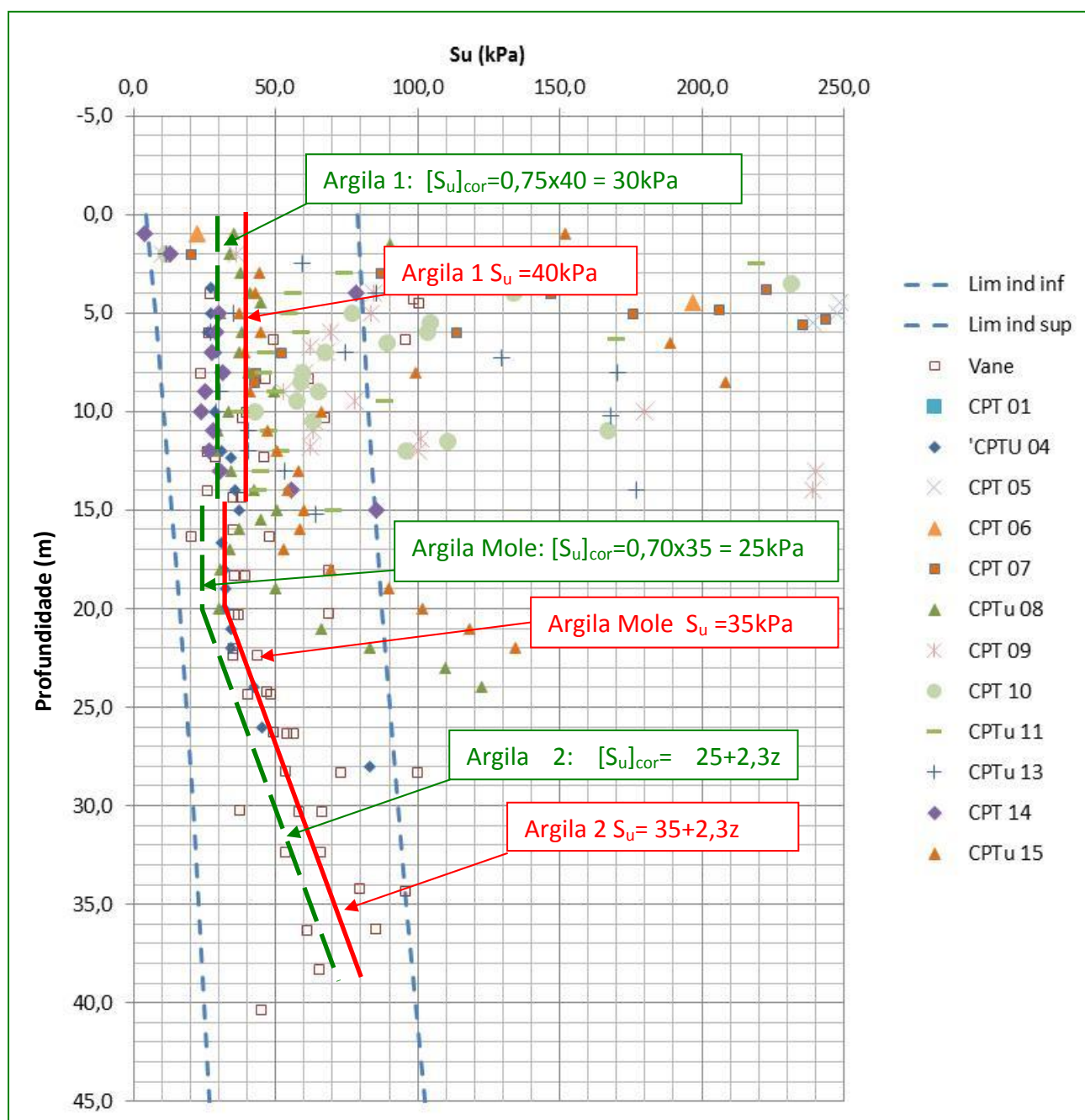


Figura 18. Perfis de valores médios de S_u ($N_{kt} = 12$), na cor vermelha. Os perfis na cor verde representam valores afetados pelo fator de Bjerrum (1973).

Tabela 3. Valores de s_u para cálculo.

Material	γ_t (kN/m ³)	S_u médio (kPa)	S_u Bjerrum (kPa)
Argila 1	15	40	30
Argila 2	15	$35+2,3z$ (*)	$25+2,3z$ (*)
Argila Mole	15	35	25
Argila Média	16	70	70
Argila Rija	17	400	400

(*) z =profundidade

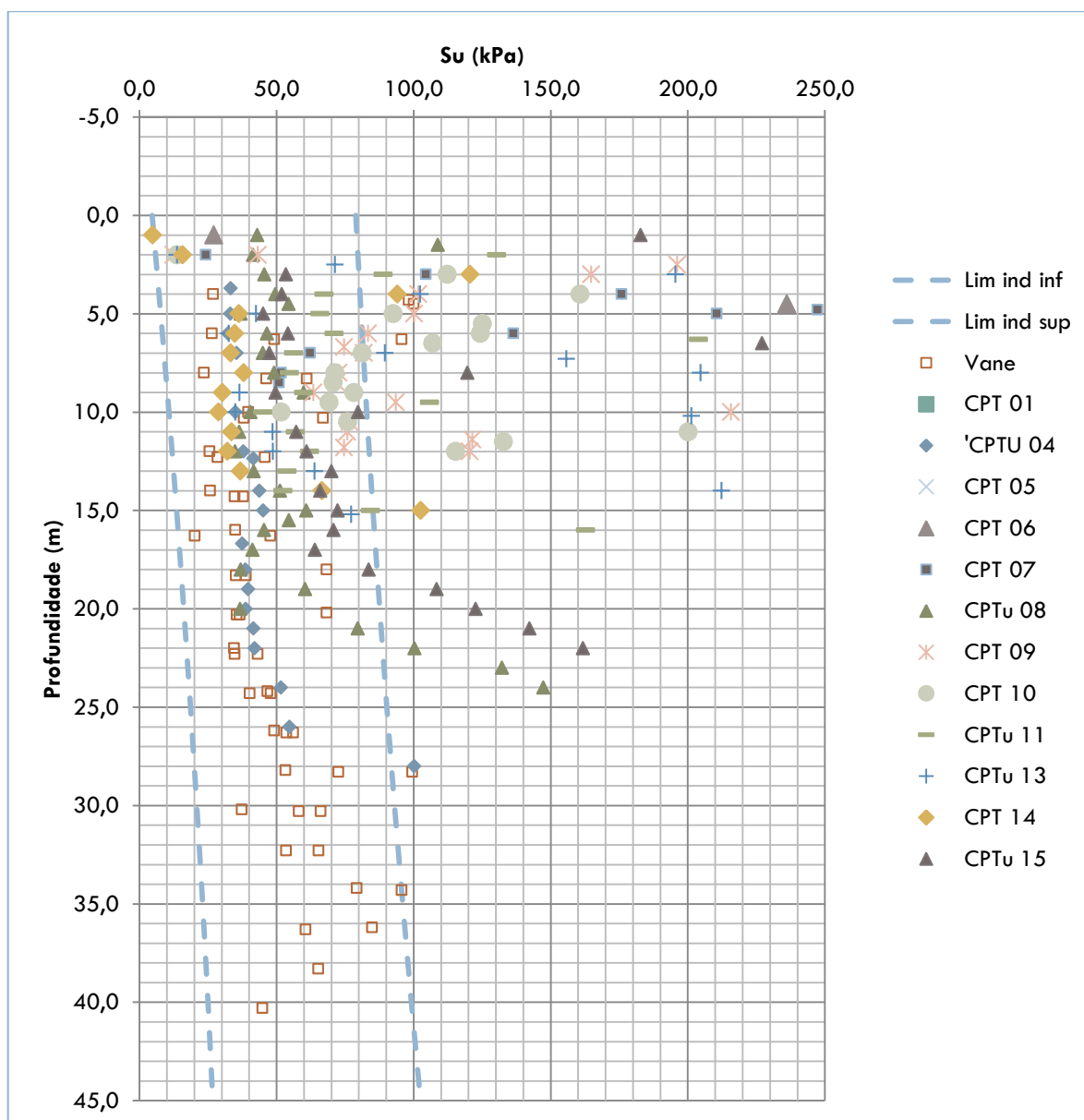


Figura 18a. Valores do ensaio CPTu para $N_{kt}=10$.

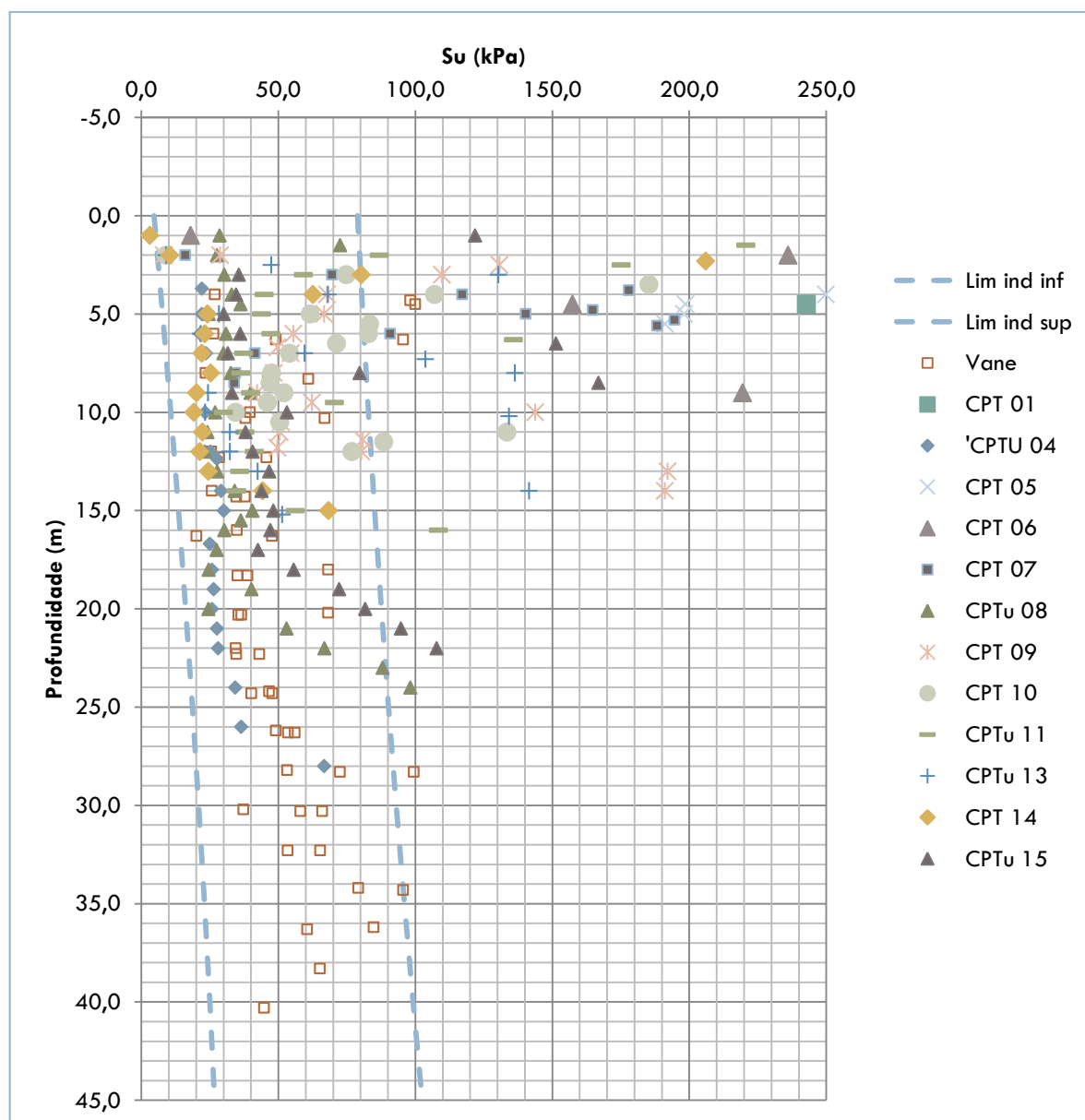


Figura 18b. Valores do ensaio CPTu para $N_{kt}=15$.

4.3 Estudo da sensibilidade das argilas

Os resultados relativos à sensibilidade (S_t) das argilas do Porto de Santana estão apresentados nas Figuras 19 e 20, de acordo com a definição:

$$S_t = \frac{S_u}{S_{ua}}$$

Na equação acima, s_{ua} refere-se à resistência não drenada amolgada. Os quadrados abertos indicados nas Figuras 19a e 19b referem-se aos valores de S_t obtidos com base em ensaios de palheta recentes (Relatório 05), disponibilizados pela Anglo Ferrous Amapá Mineração Ltda. As curvas tracejadas referem-se ao intervalo de confiança de 90% aplicável aos ensaios de palheta.

Os valores de S_t relativos aos ensaios CPTu (Relatório 04) foram comparados na Figura 19a aos ensaios de palheta para o parâmetro de calibração $N_s = 15$, como sugerido por Schmertman (apud Lunne et al, 1997). Entretanto, outros autores (Robertson e Campanella, 1988; Rad e Lunne, 1986) recomendam valores mais baixos, na faixa entre 6 e 10. Após vários ajustes, verifica-se na Figura 19b que o valor médio $N_s = 7,5$ conduz a um melhor ajuste dos resultados dos ensaios CPTu aos ensaios de palheta. Com a exceção de 08 pontos num total de 308 pontos interpretados (2,6%), o limite máximo de sensibilidade foi 7, com nítida predominância de valores inferiores a 4. Em termos de sensibilidade, a menos de alguns poucos pontos, todo o depósito pode ser classificado como sendo de baixa a média sensibilidade, faixa essa usualmente encontrada nas argilas moles brasileiras (Tabela 4). Destaca-se ainda que a classificação de solo sensível, segundo a recomendação de Robertson e Campanella (1988), só foi observada em pontos isolados em apenas 2 ensaios CPTu (SC 04 e SC 08), enquanto que nenhum dos ensaios de palheta logrou apresentar $S_t > 16$.

Tabela 4. Classificação da sensibilidade das argilas (Schnaid e Odebrecht, 2012).

Nomenclatura	S_t
Baixa	2 - 4
Média	4 - 8
Alta	8 - 16
Muito alta	> 16

Os resultados de sensibilidade apresentados nas Figuras 19a e 19b, obtidos a partir de ensaios recentes disponibilizados pela Anglo Ferrous Amapá Mineração Ltda, indicam que a hipótese de a ruptura do Porto de Santana ter sido causada por um tipo raro de argila ultrassensível ("quick-clay", $S_t > 16$) não encontra respaldo experimental e deve ser afastada inequivocamente.

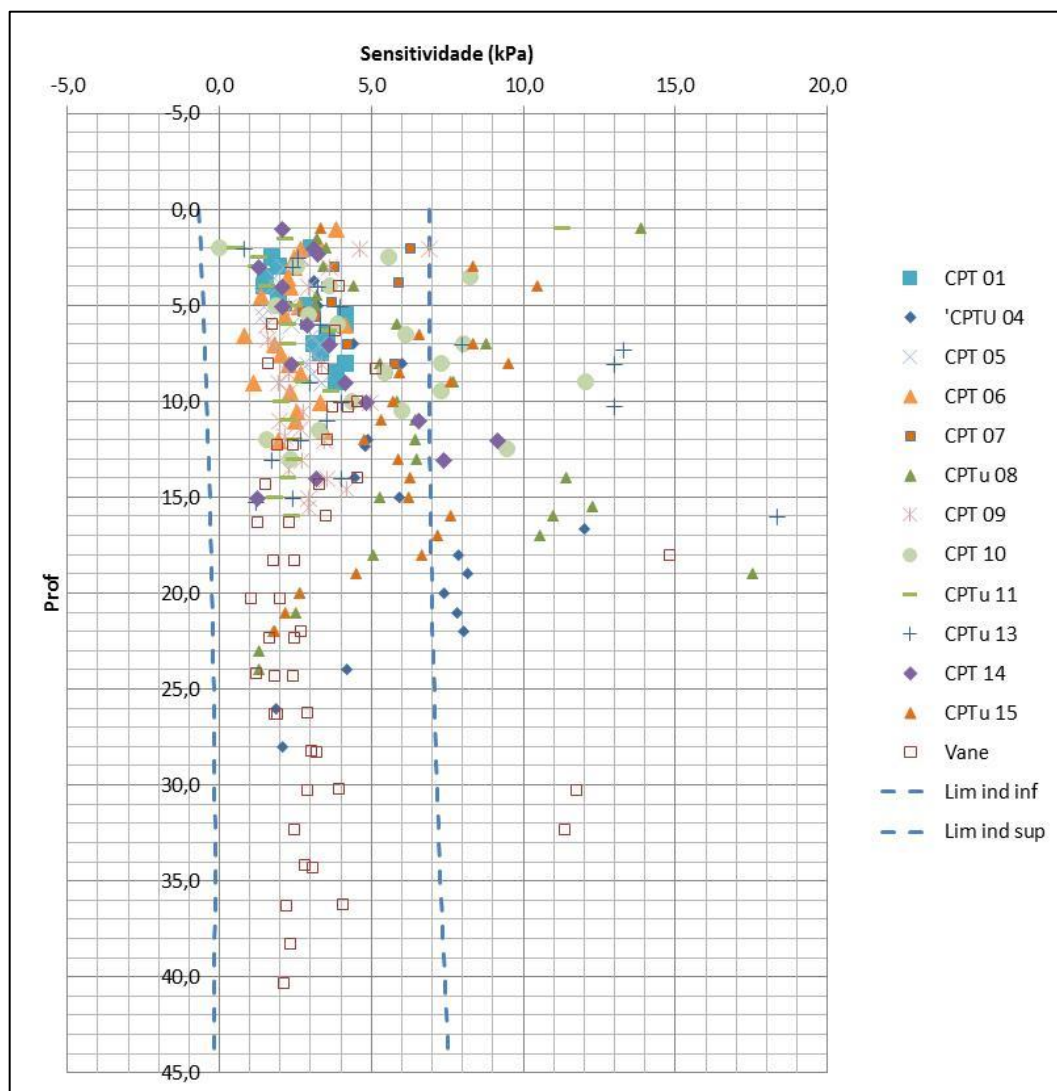


Figura 19a. Perfis de Sensibilidade ($N_s = 15$).

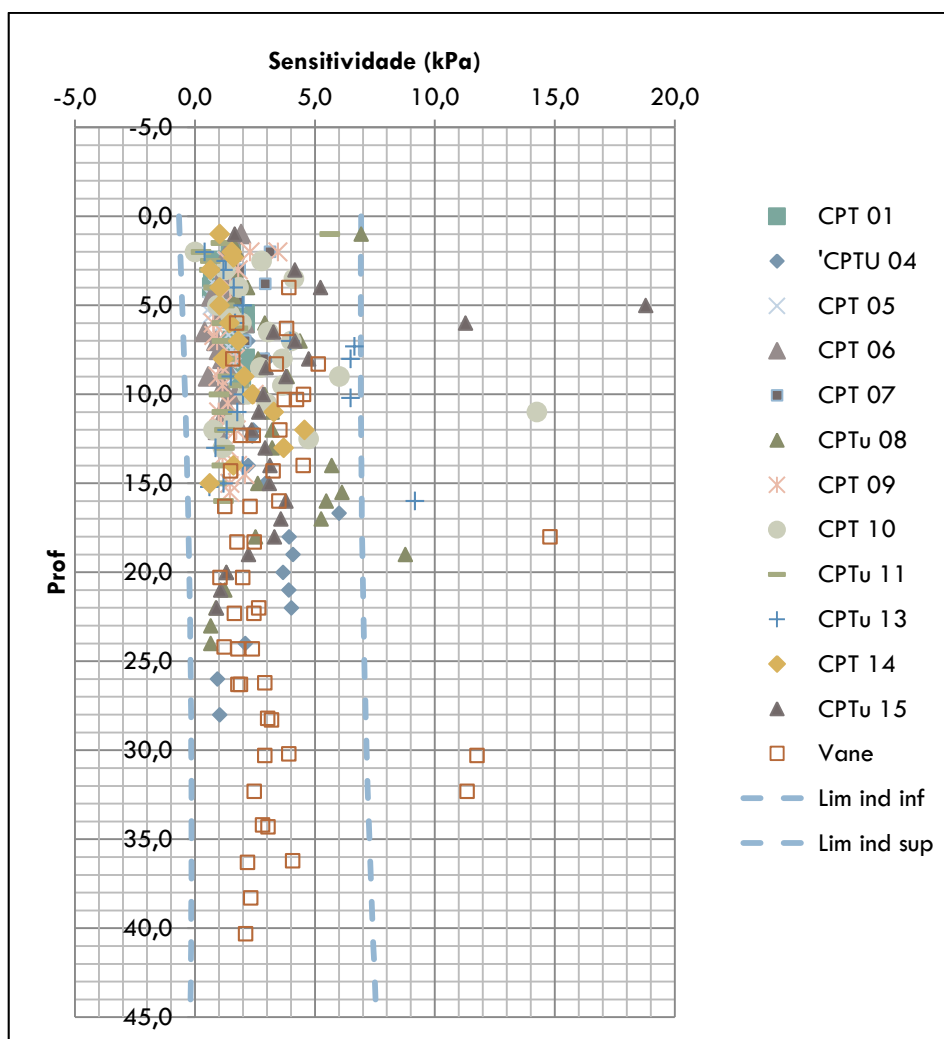


Figura 19b. Perfis de Sensibilidade ($N_s = 7,5$).

As Figuras 19a e 19b mostram para a argila do Porto de Santana uma sensibilidade (em valores médios) $S_t \approx 3$, obtida dos ensaios de palheta, denotando um comportamento do tipo “strain-softening” (amolecimento). Esse resultado equivale, em média, a uma perda de resistência da argila para cerca de 1/3 da resistência s_u intacta, após ser ultrapassada a resistência de pico, sob deformações maiores. Esse comportamento é bem ilustrado nas curvas torque-rotação dos ensaios de palheta disponibilizados recentemente, como, por exemplo, na Figura 20 (ensaio SP CT-01, a 4 m de profundidade, $S_t = 3,92$ – Relatório 05). Cabe destacar que o comportamento “strain softening” da argila do Porto de Santana não deve ser confundido com o de uma “quick-clay” ($S_t > 16$), de ocorrência realmente muito rara, onde ocorre a perda de praticamente toda a resistência após a tensão de pico, com completa fluidificação do material. No caso do Porto de Santana, a sensibilidade da argila é corriqueira dentre as argilas brasileiras, como bem demonstram os ensaios de palheta.

O comportamento tipo “strain-softening” da argila do Porto de Santana denota um importante aspecto a ser ponderado nas análises de estabilidade, que admitem uma resistência s_u constante (comportamento perfeitamente plástico) após iniciada a ruptura, que é bem distinto daquele indicado na Figura 20. Tomando-se o exemplo da camada superior (“Argila 1”), obtém-se da Figura 18 $s_{u,médio}=40$ kPa, ao qual corresponde uma resistência amolgada média $s_{ua}=40/3\cong 13$ kPa. Esse valor é bastante comum nas argilas brasileiras moles a muito moles, que rotineiramente apresentam resistências s_u intactas ainda menores, na faixa de 5 a 10 kPa. Valores de resistência nessa faixa não caracterizam um comportamento fluido, mas são claramente insuficientes para garantir a estabilidade da margem do rio sob a ação indevida de pilhas de minério, como se demonstra adiante nas análises de estabilidade deste Parecer. Portanto, para evitar que a resistência de pico seja ultrapassada é imprescindível garantir um fator de segurança mínimo (geralmente $FS\geq 1,5$), nos casos de argilas do tipo “strain-softening”, para as solicitações de carregamento mais desfavoráveis previstas (no caso, com a sobrecarga de pilhas de minério).

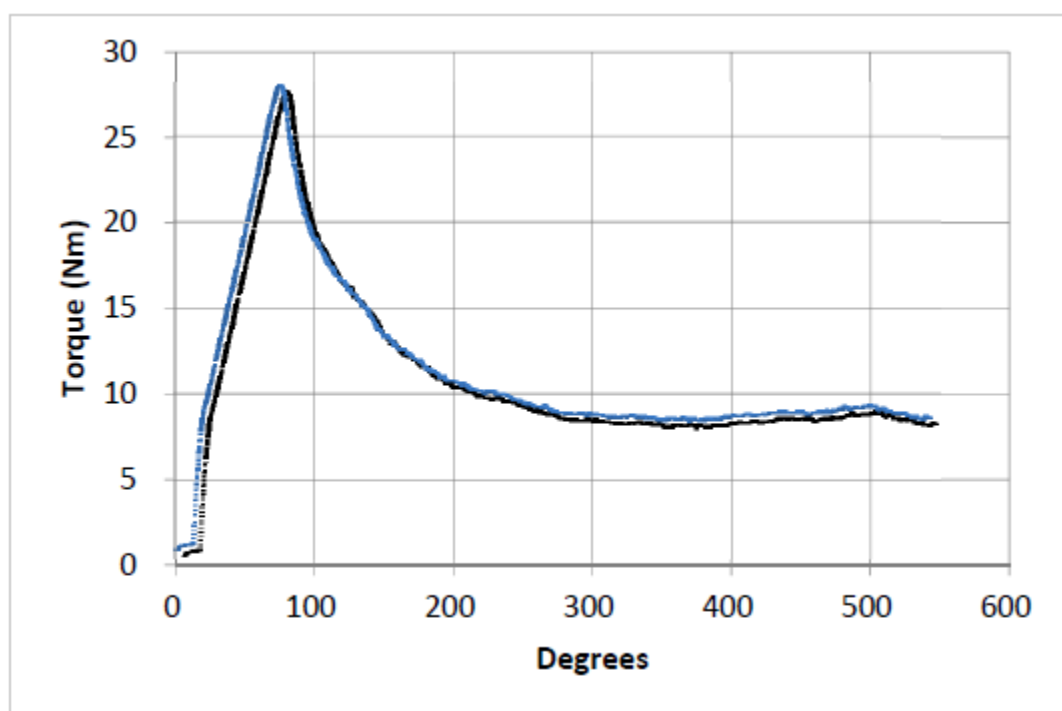


Figura 20. Ensaio de palheta indicando comportamento “strain softening”, curva torque-rotação, ensaio SP-CT-01 (relatório 05).

4.4 Análises de estabilidade

As análises de estabilidade foram desenvolvidas considerando-se seções transversais ao rio próximas às rótulas Oeste e Leste, para as hipóteses de parâmetros de resistência médios e parâmetros de resistência afetados pelo fator de Bjerrum, contemplando-se os cenários sem sobrecarga e com pilha de minério de peso específico $\gamma_t=24 \text{ kN/m}^3$. A extensão da pilha de minério junto à margem do rio, no momento do acidente, é desconhecida já que grande parte dela submergiu durante a ruptura. Da análise da Figura 9, estimou-se inicialmente uma extensão (transversal ao rio) de 40 m da pilha no momento do acidente, considerando que, após a ruptura, pelo menos uma extensão de 10 m da pilha havia permanecido na crista do escorregamento (Figuras 9a e 9b). Com este cenário foram estabelecidas as primeiras análises de estabilidade nas seções Leste e Oeste (itens 4.4.1 e 4.4.2). Entretanto, para a seção Leste, apontada adiante como a mais crítica, verificou-se um cenário adicional com pilhas de 30 m de extensão (item 4.4.3), procurando-se assim simular a possibilidade de um cenário menos crítico.

4.4.1 Análise de Estabilidade da Seção Oeste

Uma seção próxima à rótula Oeste foi estudada no Relatório 02 (resumida em sua Figura 6), para o cenário de nível d'água mínimo do rio, dela tendo sido obtido $FS=1,34$. Essa mesma análise (com a mesma seção transversal e os mesmos parâmetros geotécnicos do Relatório 02) foi reproduzida no presente Parecer, igualmente pelo método de Morgenstern & Price, utilizando-se agora o software "Slide", da Rockscience, que confirma o mesmo $FS=1,34$ (Figura 21). Esta comparação foi feita buscando-se estabelecer a equivalência entre os programas de análise de estabilidade utilizados no Relatório 02 e no presente Parecer.

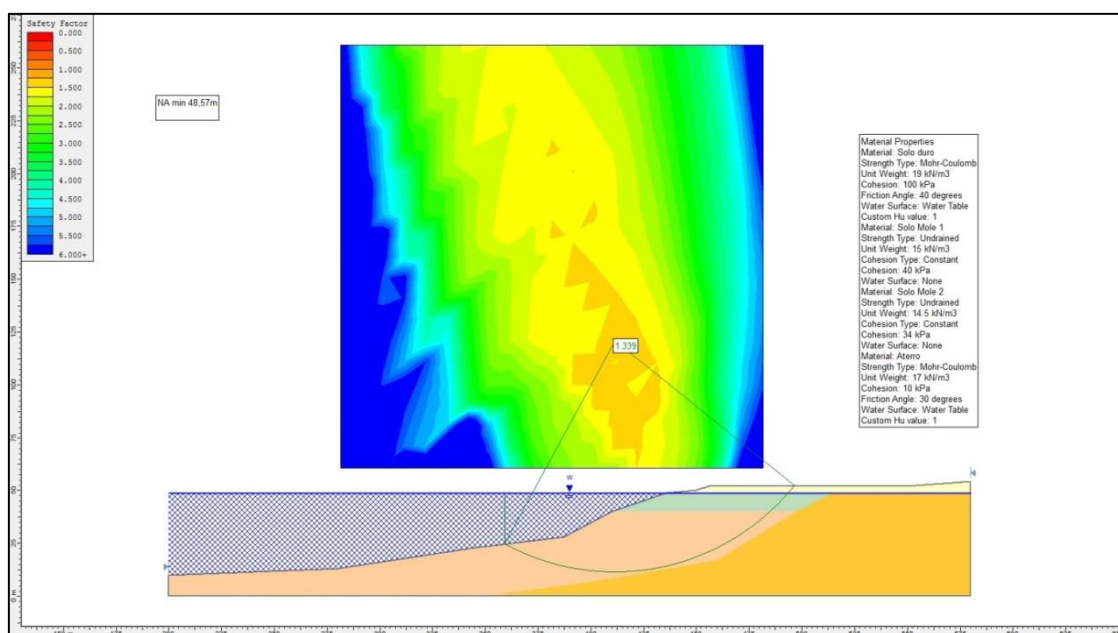


Figura 21. Análise com a mesma seção e com os mesmos parâmetros médios do Relatório 02, sem pilha de minério, conduzindo a $FS = 1,34$, hipótese de NA mínimo, método de Morgenstern & Price.

A Figura 22 resume a análise da seção Oeste baseada na batimetria de 1993 e na estratigrafia interpretada neste parecer (Figuras 16a e 16b), sem sobrecarga e com parâmetros de resistência médios estabelecidos na Figura 18 e na Tabela 3, indicando $FS = 1,68$ para a hipótese de NA mínimo, método de Morgenstern & Price.

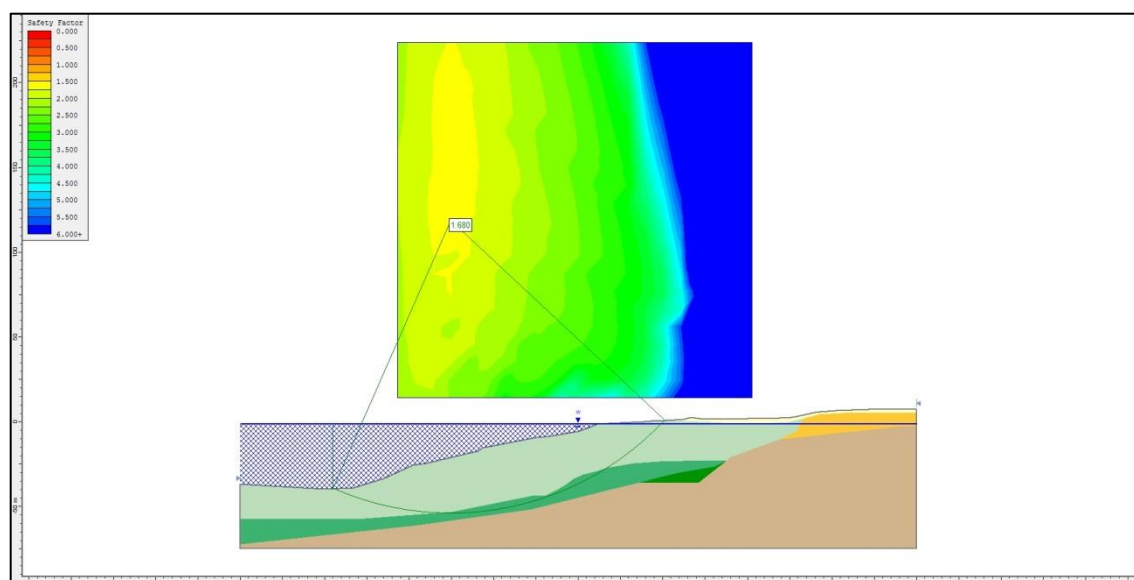


Figura 22. Análise da seção Oeste baseada na batimetria de 1993 e na estratigrafia interpretada neste parecer, sem sobrecarga e com parâmetros de resistência médios, conduzindo a $FS = 1,68$ para a hipótese de NA mínimo, método de Morgenstern & Price.

O fator de segurança $FS=1,68$ indicado na Figura 22 é superior àquele referido no Relatório 02 ($FS=1,34$), sendo essa diferença, em grande parte, atribuída à inclinação do talude, bem mais suave, comparativamente à inclinação adotada no Relatório 02 e reproduzida na Figura 21. Adicionalmente, no presente Parecer, a resistência não drenada da argila foi admitida como crescente com a profundidade a partir 20 m (com base nos resultados dos ensaios na Figura 18), enquanto que, no Relatório 02, a camada inferior de argila teve a resistência admitida constante. Para os 20 m superiores, a resistência não drenada média s_u interpretada neste parecer é apenas ligeiramente superior àquela adotada no Relatório 02.

A Figura 23 resume a análise de estabilidade da seção Oeste, baseada na batimetria de 1993 e na estratigrafia interpretada neste Parecer, indicando que, para parâmetros de resistência médios e sobrecarga de 168 kPa (equivalente a uma pilha de minério de 7,0 m de altura), $FS=1,06$, ocorreria a ruptura do talude Oeste (hipótese de NA mínimo, método de Morgenstern & Price).

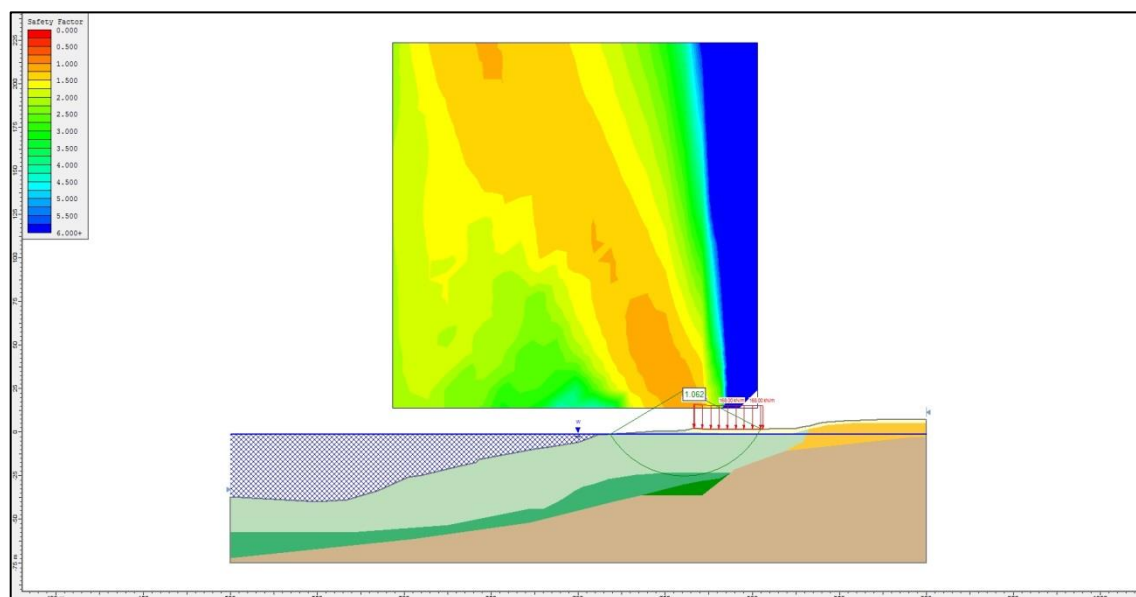


Figura 23. Análise da seção Oeste baseada na batimetria de 1993 e na estratigrafia interpretada neste parecer, com a sobrecarga de 168 kPa (7,0 m de minério) que levaria à ruptura do talude, com parâmetros de resistência médios (hipótese de NA mínimo, método de Morgenstern & Price). Extensão da pilha: 40 m.

A Figura 24 resume a análise de estabilidade da seção Oeste, baseada na batimetria de 1993 e na estratigrafia interpretada neste parecer, sem sobrecarga e com parâmetros de resistência afeta-

dos do fator de Bjerrum, indicando $FS=1,26$ para a hipótese de NA mínimo, método de Morgenstern & Price.

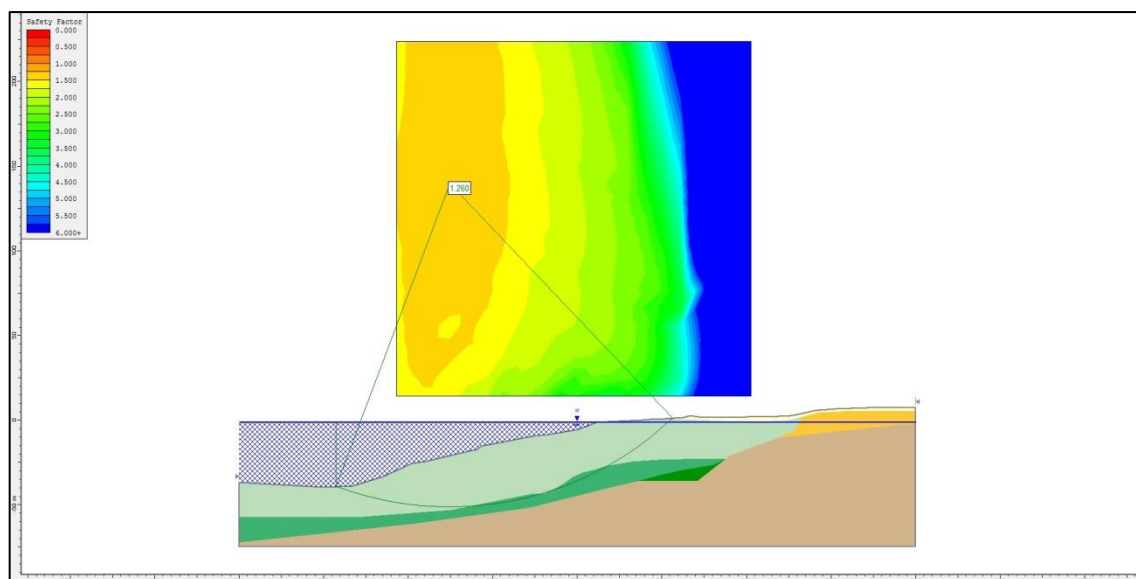


Figura 24. Análise da seção Oeste baseada na batimetria de 1993 e na estratigrafia interpretada neste parecer, sem sobrecarga e com parâmetros de resistência afetados do fator de Bjerrum, indicando $FS=1,26$ para a hipótese de NA mínimo, método de Morgenstern & Price.

A Figura 25 resume a análise de estabilidade da seção Oeste, baseada na batimetria de 1993 e na estratigrafia interpretada neste Parecer, indicando que, para parâmetros de resistência afetados do fator de Bjerrum (Figura 18), uma sobrecarga de 120kPa (equivalente a uma pilha de minério de 5 m de altura) levaria o talude Oeste à ruptura (hipótese de NA mínimo, método de Morgenstern & Price).

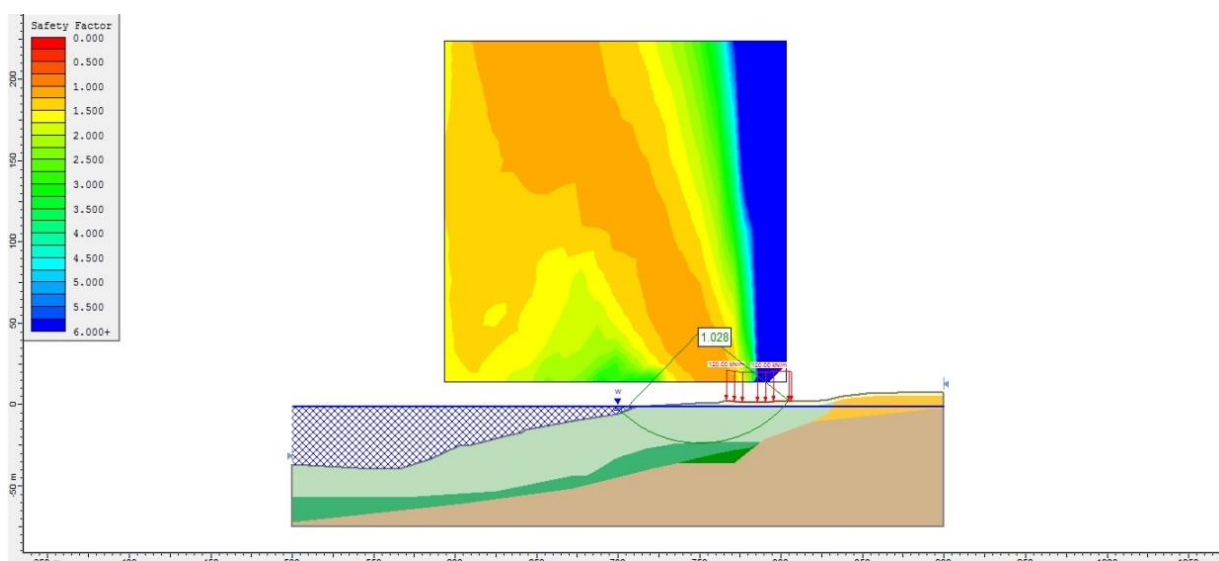


Figura 25. Análise da seção Oeste baseada na batimetria de 1993 e na estratigrafia interpretada neste parecer, com a sobrecarga de 120 kPa (5 m de minério) que levaria à ruptura do talude, com parâmetros de

resistência afetados do fator de Bjerrum (hipótese de NA mínimo, método de Morgenstern & Price). Extensão da pilha: 40 m.

As análises de estabilidade da seção Oeste estão resumidas na Tabela 4.

Tabela 4. Cenários de estabilidade para a seção Oeste.

Cenário 1	Fator de segurança sem sobrecarga	
	Parâmetros de resistência médios	Parâmetros de resistência com fator de Bjerrum
	FS = 1,68	FS = 1,26
Cenário 2	Altura de minério para a ruptura do talude ($FS \cong 1$)	
	Parâmetros de resistência médios	Parâmetros de resistência com fator de Bjerrum
	$h_{ruptura} = 7,0 \text{ m (168 kPa)}$	$h_{ruptura} = 5 \text{ m (120 kPa)}$

Tendo sido documentadamente afastada, no item 4.3, a hipótese de que as argilas locais pudessem ser caracterizadas como ultrassensíveis (“quick clays”, capazes de sofrer súbita perda de praticamente toda a resistência intacta), os resultados da Tabela 4 indicam que o fator de segurança da seção Oeste varia entre $FS=1,26$ (sem fator de Bjerrum) e $FS=1,68$ (com parâmetros médios). Adicionalmente, a ruptura da seção Oeste seria possível mediante a aplicação de sobrecargas de minério correspondentes a alturas na faixa de 5 m (com fator de Bjerrum) a 7 m (com parâmetros médios). A Figura 26 ilustra o cenário pós-ruptura, com claros indícios de movimentação de minério na seção Oeste, em local não autorizado em projeto. Entretanto, a altura possivelmente atingida pelas pilhas de minério, a ponto de desencadear a ruptura na seção Oeste, é desconhecida. Outra possibilidade a ser investigada seria a instabilização prévia da seção Leste (induzindo assim o colapso subsequente da seção Oeste), como se elabora no item 4.4.2.



Figura 26. Cenário pós-ruptura, revelando movimentação indiscriminada de pilhas de minério em local não autorizado em projeto nas seções Leste e Oeste.

4.4.2 Análise de Estabilidade da Seção Leste

A Figura 27 resume a análise de estabilidade da seção Leste, baseada na batimetria de 1993 e na estratigrafia interpretada neste parecer (Figuras 17a e 17b), sem sobrecarga e com parâmetros de resistência médios estabelecidos na Figura 18 e na Tabela 3, indicando $FS=1,42$ para a hipótese de NA mínimo, método de Morgenstern & Price.

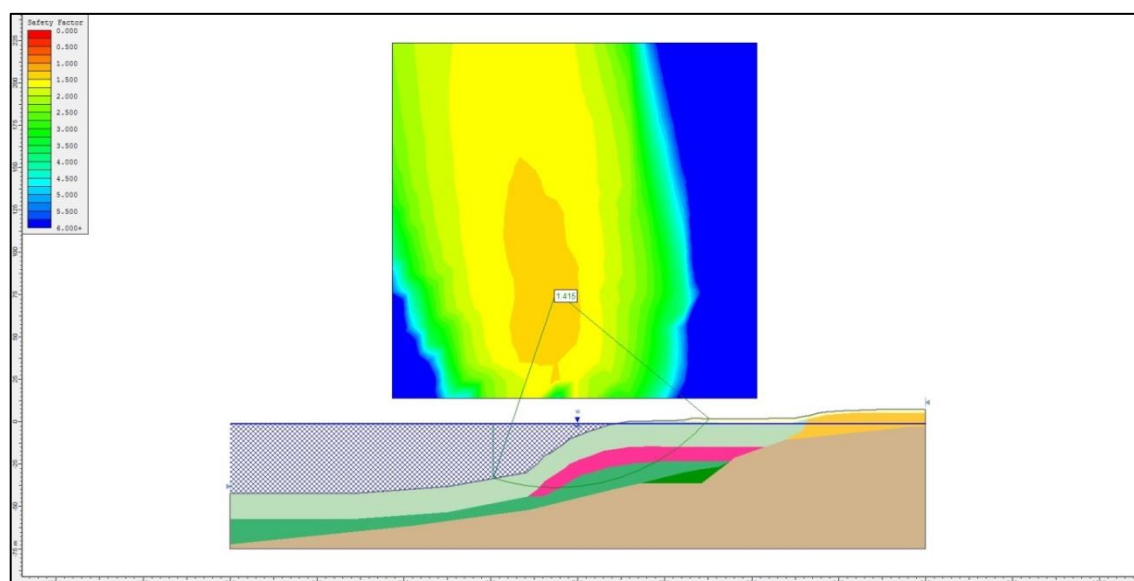


Figura 27. Análise da seção Leste baseada na batimetria de 1993 e na estratigrafia interpretada neste parecer, sem sobrecarga e com parâmetros de resistência médios, conduzindo a $FS=1,42$ para a hipótese de NA mínimo, método de Morgenstern & Price.

A Figura 28 resume a análise de estabilidade da seção Leste, baseada na batimetria de 1993 e na estratigrafia interpretada neste Parecer, indicando que, para parâmetros de resistência médios, uma sobrecarga de 144 kPa (equivalente a uma pilha de minério de 6 m de altura) levaria à ruptura o talude Leste (hipótese de NA mínimo, método de Morgenstern & Price). Este resultado mostra-se consistente com o cenário indicado na Figura 9, onde documentadamente se observa a ruptura da seção Leste para uma sobrecarga de minério de cerca de 6 m de altura no instante do acidente.

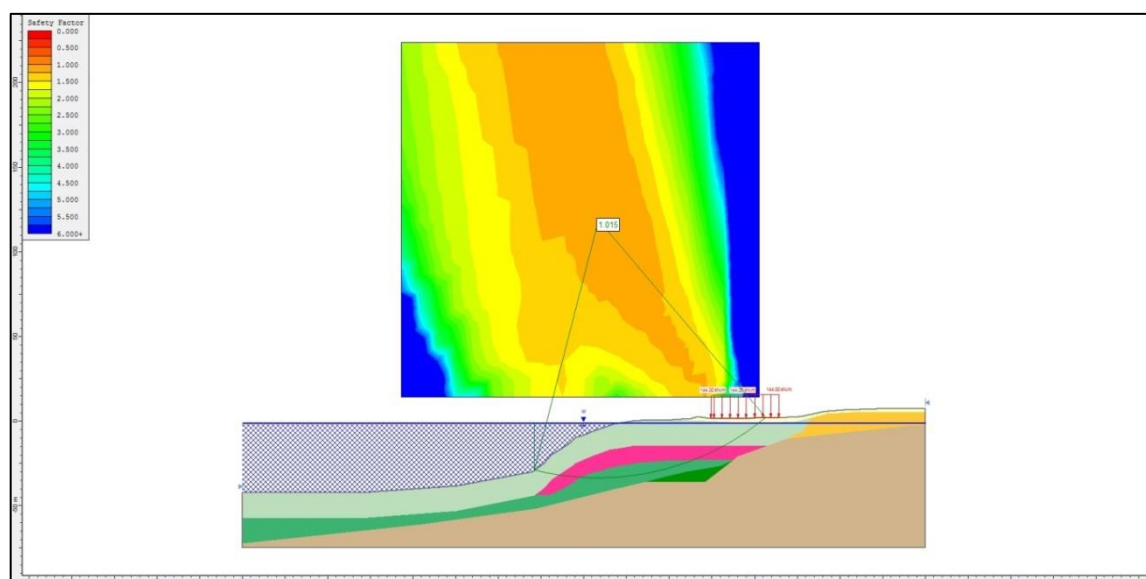


Figura 28. Análise da seção Leste baseada na batimetria de 1993 e na estratigrafia interpretada neste parecer, com a sobrecarga de 144 kPa (6 m de minério) que levaria à ruptura do talude, com parâmetros de resistência médios (hipótese de NA mínimo, método de Morgenstern & Price). Extensão da pilha: 40 m.

A Figura 29 resume a análise de estabilidade da seção Leste, baseada na batimetria de 1993 e na estratigrafia interpretada neste parecer, sem sobrecarga e com parâmetros de Bjerrum, indicando FS=1,06 (situação já próxima da ruptura) para a hipótese de NA mínimo, método de Morgenstern & Price.

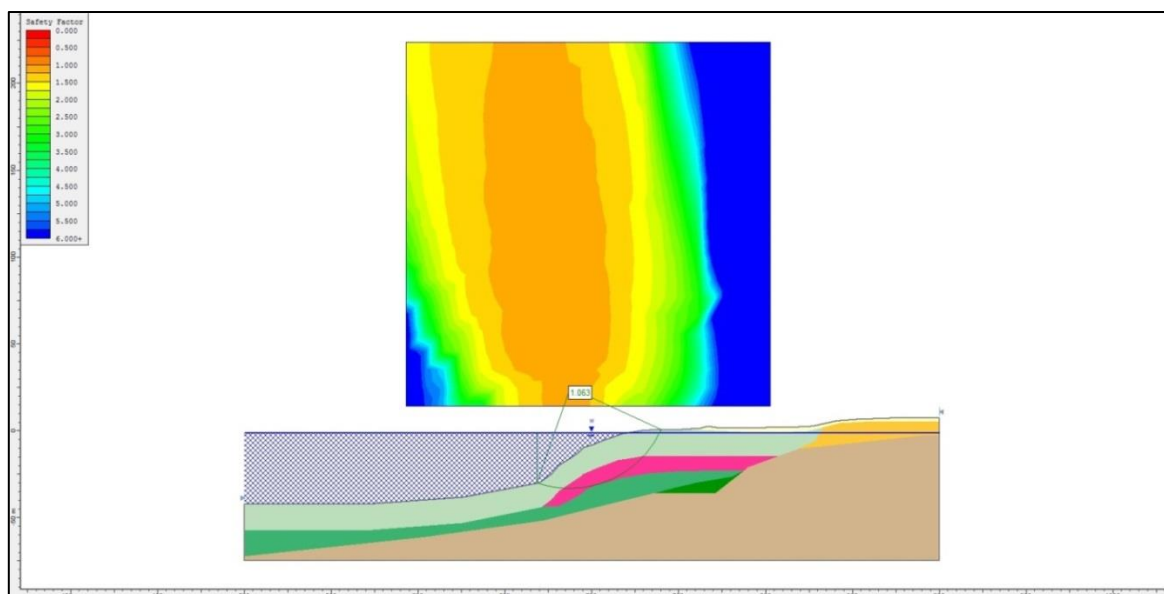


Figura 29. Análise da seção Leste baseada na batimetria de 1993 e na estratigrafia interpretada neste parecer, sem sobrecarga e com parâmetros de Bjerrum, indicando FS=1,06 para a hipótese de NA mínimo, método de Morgenstern & Price.

A Tabela 5 resume as análises de estabilidade da seção Leste.

Tabela 5. Cenários de estabilidade para a seção Leste.

Cenário 1	Fator de segurança sem sobrecarga	
	Parâmetros de resistência médios	Parâmetros de resistência com fator de Bjerrum
	FS = 1,42	FS = 1,06 (próximo da ruptura)
Cenário 2	Altura de minério para a ruptura do talude (FS \approx 1)	
	Parâmetros de resistência médios	Parâmetros de resistência com fator de Bjerrum
	$h_{\text{ruptura}} = 6 \text{ m (144 kPa)}$	<i>Instável sem sobrecarga</i>

De acordo com a Tabela 5, o fator de segurança da seção Leste varia entre $FS \approx 1$ (com fator de Bjerrum) e $FS=1,42$ (com parâmetros médios), enquanto a altura da pilha de minério necessária para desencadear a ruptura varia entre 0 m (com fator de Bjerrum) e 6 m (com parâmetros médios). Esses resultados mostram-se inaceitáveis, principalmente à luz do comportamento “strain-softening” das argilas do Porto de Santana e do elevado risco de perda de vida e de perdas ambientais e materiais em caso de ruptura.

4.5 Avaliação conjunta da estabilidade das seções Oeste e Leste.

A interpretação conjunta dos resultados das análises de estabilidade das seções Oeste e Leste, sob a ação de alturas crescentes de uma pilha de minério de 40 m de extensão, é ilustrada nas Figuras 30a e 30b. O resumo das respectivas análises encontra-se no Anexo 2. Tomando-se por referência a batimetria de 1993, face ao maior gradiente da superfície do talude, as condições de estabilidade da seção Leste mostram-se geralmente mais críticas do que as da seção Oeste.

Tomando-se por base o fator de segurança $FS=1,5$ requerido pela Norma Brasileira NBR-11682 para os casos simultâneos de alto risco de danos a vidas humanas e de alto risco de danos materiais e ambientais, observa-se nas Figuras 30a e 30b que, para o cenário documentado de movimentação generalizada de pilhas de minério nas seções Oeste e Leste fora da posição autorizada em projeto (Figura 26), as condições de estabilidade são insatisfatórias em toda a área do porto. Os

casos com resultados insatisfatórios estão realçados pelo fundo cinza claro nas Figuras 30a e 30b, que se mostram compatíveis com a ruptura simultânea (ou quase simultânea) observada nas seções Oeste e Leste, onde o cenário mais provável é aquele no qual a seção Oeste rompeu imediatamente após a ruptura da seção Leste, quando esta foi indevidamente carregada por uma pilha de minério com altura da ordem de 6 m, como documentado na Figura 9.b.

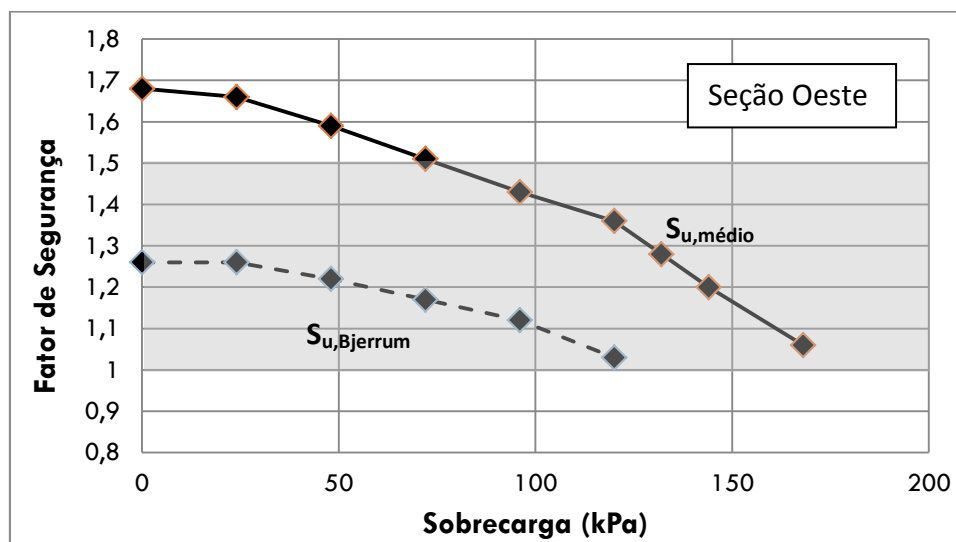


Figura 30a. Variação do fator de segurança para alturas crescentes das pilhas de minério na seção Oeste. Extensão da pilha: 40 m.

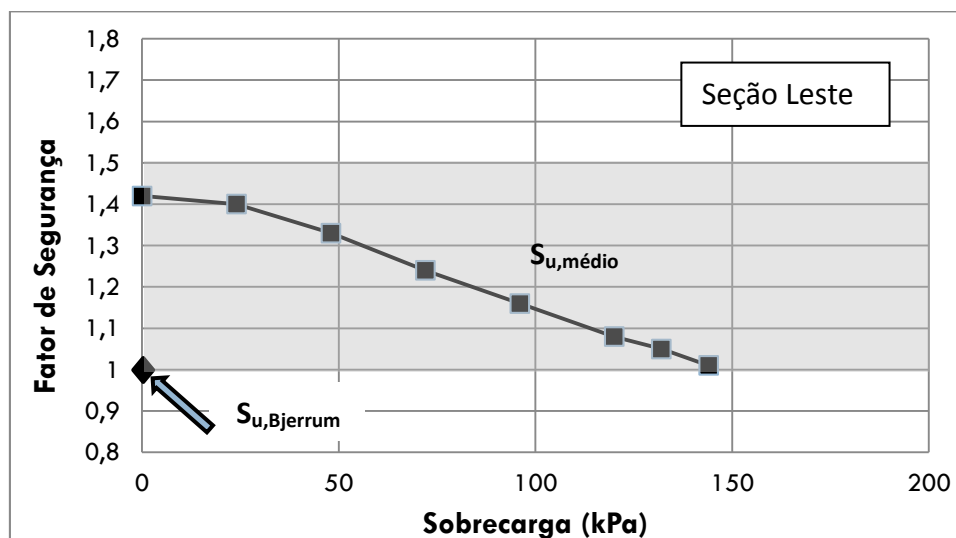


Figura 30b. Variação do fator de segurança para alturas crescentes das pilhas de minério nas seções Leste. Extensão da pilha: 40 m.

De acordo com o cenário documentado na Figura 9, a ruptura da seção Leste com uma pilha de 6 m de altura corresponde à análise com parâmetros médios da Figura 28. Por outro lado, o cenário correspondente à análise com parâmetros de Bjerrum ($FS=1,06$, sem pilha) poderia em princípio ser associado à ruptura de 20/10/1993 (não investigada neste Parecer, mas que aparentemente ocorreu sem pilha na margem do rio, como mostra a Figura 1). A variação entre esses dois cenários reflete uma clara incerteza decorrente da insuficiência de investigações geotécnicas também na seção Leste. Incerteza ainda maior se reflete na seção Oeste, onde não havia qualquer investigação geotécnica e por isso a estratigrafia foi meramente inferida a partir da seção Leste, assim como foram também admitidos na seção Oeste os mesmos parâmetros de resistência da seção Leste. Portanto, ainda que os resultados consolidados nas Figuras 30a e 30b indiquem uma condição de estabilidade maior da seção Oeste (comparativamente à seção Leste) - situação esta reforçada pelo menor gradiente da superfície do terreno do lado Oeste e pelo histórico de instabilidade pregressa do Lado Leste - não é possível concluir que os fatores de segurança mais elevados obtidos com parâmetros médios e sem pilhas de minério possam refletir de forma inequívoca que o lado Oeste seria estável. Portanto, ao ser excluída a hipótese de argila ultrassensível (quick clay), a ruptura da seção Oeste pode ser explicada dentre dois cenários:

- a- O lado Oeste rompeu antes do lado Leste pela ação de uma pilha de minério de altura desconhecida (cenário menos provável), daí resultando a ruptura subsequente do lado Leste.
- b- O lado Leste rompeu antes do lado Oeste pela ação documentada de uma pilha de 6 m de altura (Figura 9), daí resultando a ruptura subsequente do lado Oeste. Este cenário mostra-se mais provável tanto pelo posicionamento de uma pilha de minério em local não autorizado em projeto quanto pela recorrência de uma ruptura anterior (1993).

Análises complementares foram realizadas adotando-se uma extensão de 30m para a pilha de minério, nas quais se procurou estabelecer a condição de ruptura do talude da margem Leste do Porto de Santana (a mais crítica), considerando-se apenas parâmetros de resistência médios. Verifica-se na Figura 31 que uma sobrecarga de 192 kPa (equivalente a uma pilha de minério de 8 m de altura) levaria a $FS=1,04$ (hipótese de NA mínimo, método de Morgenstern & Price).

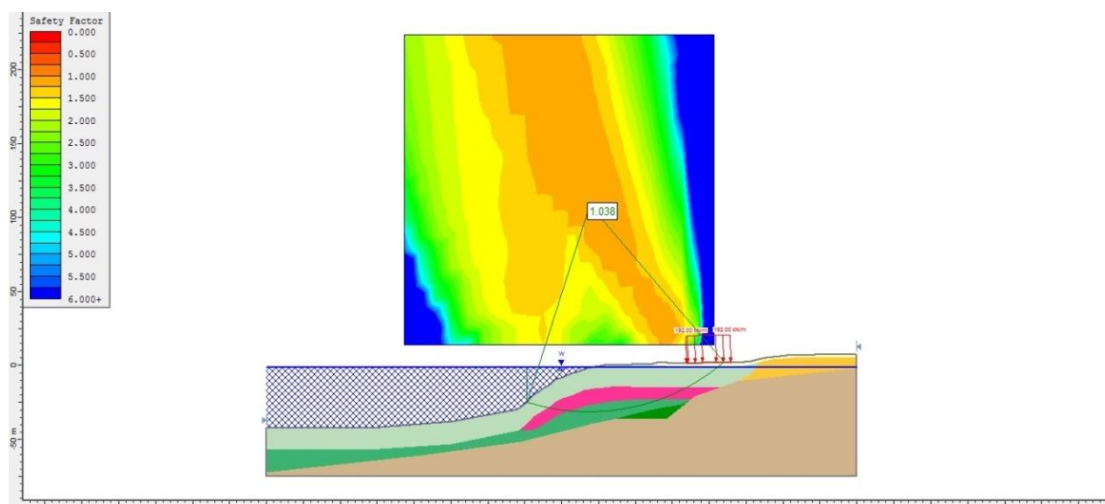


Figura 31. Análise da seção Leste baseada na batimetria de 1993 e na estratigrafia interpretada neste parecer, com sobrecarga de 30m de largura e com parâmetros de médios de resistência, indicando $FS=1,04$ para uma pilha de 8 m de altura (192 kPa), para a hipótese de NA mínimo, método de Morgenstern & Price.

A Figura 32 resume a redução do fator de segurança da seção Leste (a mais crítica) para alturas crescentes da pilha, para as extensões de 30 m e 40 m, admitindo-se os valores médios de resistência (observar que para parâmetros de resistência afetados do fator de Bjerrum, a seção Leste é praticamente instável, independentemente da presença de pilha de minério). As superfícies potenciais de ruptura estão apresentadas no Anexo 3 e estão consistentes com a presença de um volume remanescente da pilha na crista do talude.

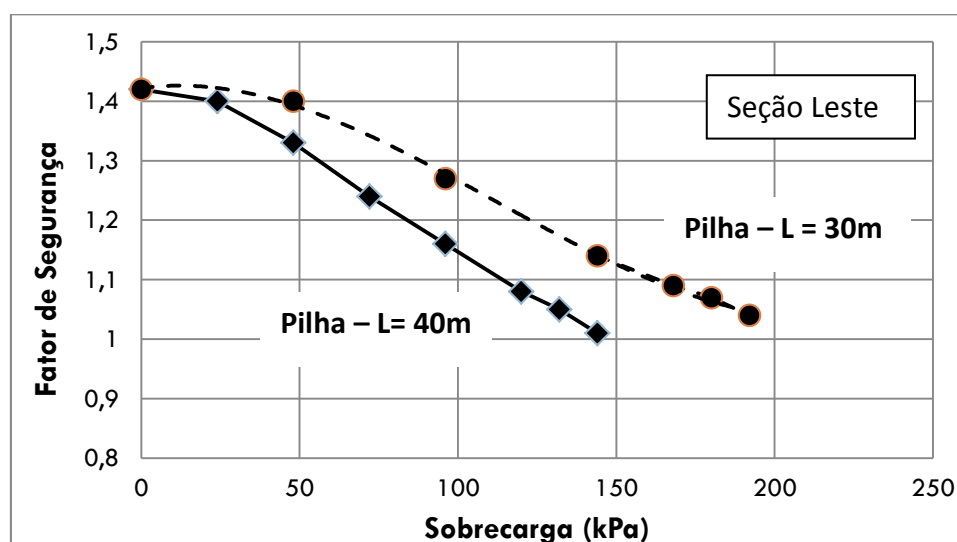


Figura 32. Variação do fator de segurança na seção Leste, para alturas crescentes da pilha de minério e extensões de 30 m e 40 m da pilha, com parâmetros de resistência médios.

De acordo com a Figura 32, mesmo para uma extensão de 30 m para a pilha, as condições de estabilidade da margem do rio se mostram também insatisfatórias. A estabilidade do talude no Por-

to de Santana mostra-se ainda mais crítica (tanto na seção Leste como na Oeste) se levado em conta o aspecto da curva tensão-deformação da argila, do tipo “strain-softening” (amolecimento), cujo comportamento não é contemplado nas análises de estabilidade (que admitem resistência constante após iniciada a ruptura). Nesses casos seria imprescindível garantir um fator de segurança mínimo $FS \geq 1,5$ sob a ação das pilhas de minério, para evitar que sob deformações maiores a resistência de pico da argila fosse ultrapassada e atingisse, em média, um valor aproximadamente igual à terça parte da resistência intacta, como indicam os resultados dos ensaios de palheta executados recentemente (relatório 05).

5 CONCLUSÕES

Num balanço geral dos pontos apresentados neste Parecer, destacam-se os seguintes pontos:

- a- A hipótese de que a ruptura do Porto de Santana tenha sido deflagrada por um tipo raro de argila ultrassensível (“quick clay”, $S_t > 16$, que promove perda total de resistência pós-pico), está experimentalmente afastada, com base em ensaios de palheta recentes disponibilizados pela Anglo Ferrous Amapá Mineração Ltda. Essas argilas denotam sensibilidade baixa a média, bastante comum nas argilas moles brasileiras, exibindo comportamento do tipo “strain-softening”, onde a resistência amolgada (pós-pico) é da ordem de 10 a 13 kPa nos 20 m superiores do depósito, valor esse ainda superior à resistência intacta de várias argilas moles a muito moles no Brasil.
- b- Tendo em vista a documentada movimentação de pilhas de minério fora dos locais autorizados em projeto (adentrando, portanto, na faixa de segurança de 140 m a partir da margem do rio), as condições de estabilidade dos taludes do Porto de Santana não atendiam aos fatores de segurança recomendados na Norma Brasileira NBR-11682, face aos riscos humanos, ambientais e materiais envolvidos. Adicionalmente, em virtude da ocorrência de argilas do tipo “strain-softening” no Porto de Santana, a adoção de fatores $FS \geq 1,5$ seria imprescindível para a estabilidade (com e sem pilhas). A seção Leste é considerada a mais crítica, onde a ruptura foi documentadamente deflagrada por uma pilha de minério de aproximadamente 6 m de altura.

- c- Embora seja irrelevante determinar se a instabilidade se iniciou do lado Leste ou Oeste, a hipótese improvável de a ruptura ter sido iniciada do lado Oeste, sob a ação de uma pilha de minério de altura desconhecida, levaria igualmente à instabilidade da seção Leste. Em qualquer cenário, a ruptura do Porto de Santana foi causada pelo posicionamento indevido de pilhas de minério em solo com capacidade de suporte incompatível, na margem do rio. Esse posicionamento inadequado de pilhas de minério foi agravado pela natureza da argila do Porto de Santana, do tipo “strain-softening”.
- d- Corroborar com o cenário mais provável de o acidente de 2013 ter sido iniciado no lado Leste o registro histórico do colapso do porto em 1993, que foi igualmente deflagrado por insuficiência da capacidade de suporte do solo.
- e- Como documentado na Figura 9 e de acordo com a análise de estabilidade resumida nas Figuras 30a, 30b e 32, uma pilha de minério com aproximadamente 6 m de altura levou à instabilidade da seção Leste, sendo esta a causa principal apontada para a ruptura do Porto de Santana em 28 de Março de 2013, seguida da subsequente ruptura da seção Oeste. Há que salientar, face à estrutura de atracação e carregamento dos navios, que as atividades de dragagem devem ter sido historicamente mais intensas na seção Leste, produzindo ali um talude mais íngreme que o da seção Oeste.
- f- As análises de estabilidade com fatores de Bjerrum, por serem mais desfavoráveis que aquelas com parâmetros médios, devem ser preferidas para fins de projeto. No caso do Porto de Santana, a utilização de parâmetros de resistência mais conservadores, juntamente com fatores de segurança $FS \geq 1,5$, seria altamente recomendável para minimizar a possibilidade de redução da resistência pós-pico das argilas do tipo “strain-softening” do Porto de Santana. Embora em alguns casos reportados na literatura as rupturas de argilas moles possam ser atribuídas a parâmetros de resistência médios, a recomendação bibliográfica ainda largamente dominante é a de utilização de parâmetros corrigidos segundo as recomendações de Bjerrum (1973), ensejando assim projetos mais seguros. No caso do Porto de Santana, as análises deste Parecer com parâmetros de Bjerrum mostraram condições de estabilidade insatisfatórias nos lados Leste e Oeste. No lado Leste, as condições de estabilidade mostraram-se insatisfatórias mesmo com parâmetros médios.
- g- Cumpre destacar a insuficiência histórica de investigações geotécnicas desde o início da operação do porto, com total ausência de ensaios de campo e laboratório do lado Oeste e

tão somente sondagens à percussão e ensaios CPTu (sem a devida calibração por ensaios de palheta) do lado Leste, antes do acidente. Esse cenário mostra-se incompatível com uma obra de engenharia do porte do Porto de Santana, onde havia permanente exposição de vidas humanas e evidentes riscos de danos materiais e ambientais. A simples execução prévia de ensaios geotécnicos rotineiros (como os ensaios de palheta) seria suficiente para detectar as características de baixa capacidade de suporte dessas argilas para o acúmulo de pilhas de minério à margem do rio, providência essa que, infelizmente, só foi tomada após o acidente.

- h- Não estão disponíveis quaisquer estudos ou projetos de engenharia relacionados à estabilidade da margem do Rio Amazonas na área do Porto de Santana, com vistas a garantir a estabilidade do cais, tanto em termos de projeto básico como de projeto executivo, imprescindíveis em obras dessa natureza, notadamente com relação à estabilidade das pilhas de minério. As únicas referências disponíveis contemplam o uso de estacas para as estruturas mais carregadas, incluindo as fundações das rótulas de ancoragem, porém sem demonstrativos de cálculo. A inexistência de investigações geotécnicas e de projetos de engenharia mostrou-se determinante no acidente do Porto de Santana.

O presente Parecer foi elaborado pela junta de consultores docentes do Departamento de Estruturas e Fundações da Faculdade de Engenharia da UERJ abaixo identificados:

Marcus Pacheco, Ph.D., Professor Titular, Matrícula 7499-7.

Denise Soares Gerscovich, D.Sc., Professor Associado, Matrícula 31703-2.

Bernadete Ragoni Danziger, D.Sc., Professor Adjunto, Matrícula 34526-4.

Rio de Janeiro, 15 de Maio de 2014.

6 ANEXO 1 – INTERPRETAÇÃO DOS ENSAIOS CPTU

CPT 01
 COTA NT 7,201 m
 Prof NA 4 m
 γt 15
 γw 9,81
 Nkt 12 (8 a 18)
 Ns 15

ver Schnaid e Odebrecht, 2012

$$B_q = \frac{u - u_0}{q_T - \sigma_{v0}} \quad \frac{f_s}{q_T - \sigma_{v0}} = F$$

$$Q_t = \frac{q_T - \sigma_{v0}}{\sigma_{v0}} \quad S_u = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{N_{kt}}$$

$$R_f = \frac{f_s}{q_T (\%)}$$

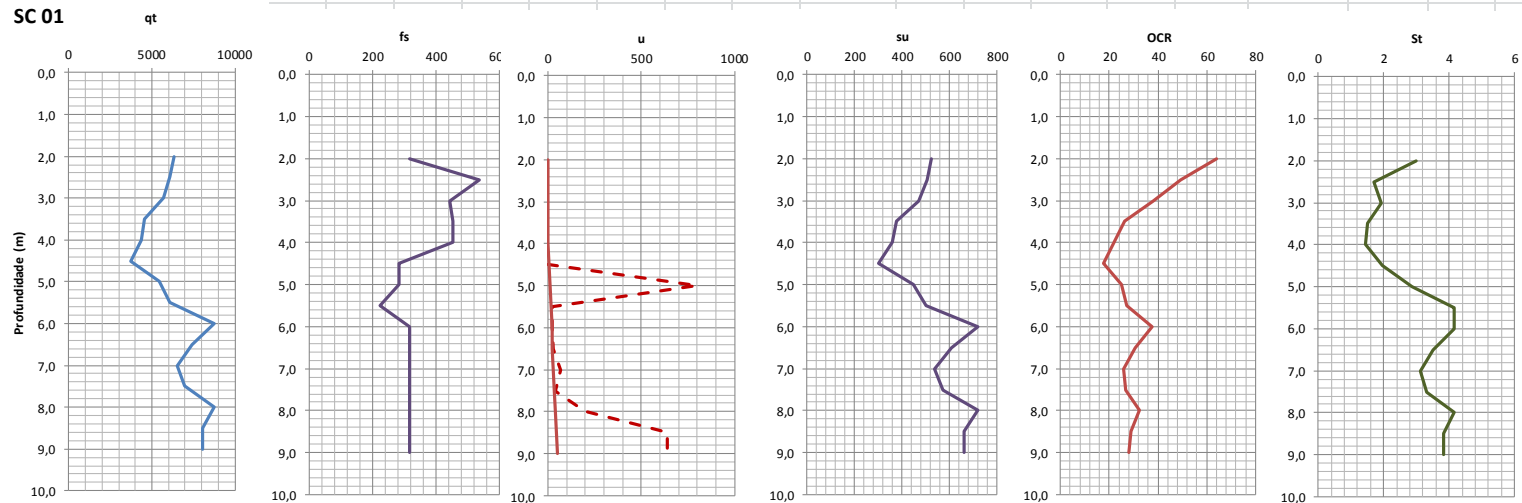
$$\sigma_{vm} = 0,305 (q_T - \sigma_{v0}) \quad \text{Chen e Mayne (1996)}$$

$$S = \frac{N_s}{R_f} \quad \text{Schmertman } N_s=15 \text{ Lunne et al (livro cone)}$$

Classificação Robertson, 1990

														Estrategia: R02/00/1/2010					
														F		Bq			
Cota	Prof	q _t	f _s	u	σ _{vo}	u ₀	σ' _{vo}	Bq	Qt	F	su	σ' _{vm}	OCR	Zona	Nom	Zona	Nom	Rt	Sensitivity
	(m)	(kPa)		(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)				(kPa)								
5,20	2,00	6327,30	315,80		30,00	0,00	30,00	0,00	209,91	5,0%	524,78	1920,68	64,02	9	S		FALSO	5,0	3,01
4,70	2,50	6109,10	536,80		37,50	0,00	37,50	0,00	161,91	8,8%	505,97	1851,84	49,38	9	S		FALSO	8,8	1,71
4,20	3,00	5672,70	442,10		45,00	0,00	45,00	0,00	125,06	7,9%	468,98	1716,45	38,14	9	S		FALSO	7,8	1,92
3,70	3,50	4581,20	452,10		52,50	0,00	52,50	0,00	86,26	10,0%	377,39	1381,25	26,31	9	S		FALSO	9,9	1,52
3,20	4,00	4363,60	452,60		60,00	0,00	60,00	0,00	71,73	10,5%	358,63	1312,60	21,88	3	C		FALSO	10,4	1,45
2,70	4,5	3709,00	284,20	0,00	67,50	4,91	62,60	0,00	58,18	7,8%	303,46	1110,66	17,74	3	C		FALSO	7,7	1,96
2,20	5,00	5454,50	284,20	800,00	75,00	9,81	65,19	0,15	82,52	5,3%	448,29	1640,75	25,17	9	S	6	MC	5,2	2,88
1,70	5,50	6109,10	221,10	20,00	82,50	14,72	67,79	0,00	88,91	3,7%	502,22	1838,11	27,12	9	S		FALSO	3,6	4,14
1,20	6,00	8727,30	315,80	20,00	90,00	19,62	70,38	0,00	122,72	3,7%	719,78	2634,38	37,43	9	S		FALSO	3,6	4,15
0,70	6,50	7418,20	315,80	30,00	97,50	24,53	72,98	0,00	100,32	4,3%	610,06	2232,81	30,60	9	S		FALSO	4,3	3,52
0,20	7,00	6545,50	315,80	70,00	105,00	29,43	75,57	0,01	85,23	4,9%	536,71	1964,35	25,99	9	S	6	MC	4,8	3,11
-0,30	7,50	6981,80	315,80	40,00	112,50	34,34	78,17	0,00	87,88	4,6%	572,44	2095,14	26,80	9	S	6	MC	4,5	3,32
-0,80	8,00	8727,30	315,80	200,00	120,00	39,24	80,76	0,02	106,58	3,7%	717,28	2625,23	32,51	9	S	6	MC	3,6	4,15
-1,30	8,50	8072,70	315,80	640,00	127,50	44,15	83,36	0,07	95,32	4,0%	662,10	2423,29	29,07	4	C	6	MC	3,9	3,83
-1,80	9,00	8072,70	315,80	640,00	135,00	49,05	85,95	0,07	92,35	4,0%	661,48	2421,00	28,17	4	C	6	MC	3,9	3,83

SC 01



CPT 04
COTA NT 2,409
PROF NA 1
γt 15
γw 9,81
Nkt 12 (8 a 18)
Ns 15

ver Schnaid e Odebrecht, 2012

$$B_q = \frac{u - u_0}{q_T - \sigma_{v0}} \cdot \frac{f_s}{q_T - \sigma_{v0}} = F$$

$$Q_i = \frac{q_T - \sigma_{v0}}{\sigma_{v0}} \quad S_0 = \frac{(q_i - \sigma_{v0})}{N_{kt}}$$

$$R_t = \frac{f_s}{q_T (\%)}$$

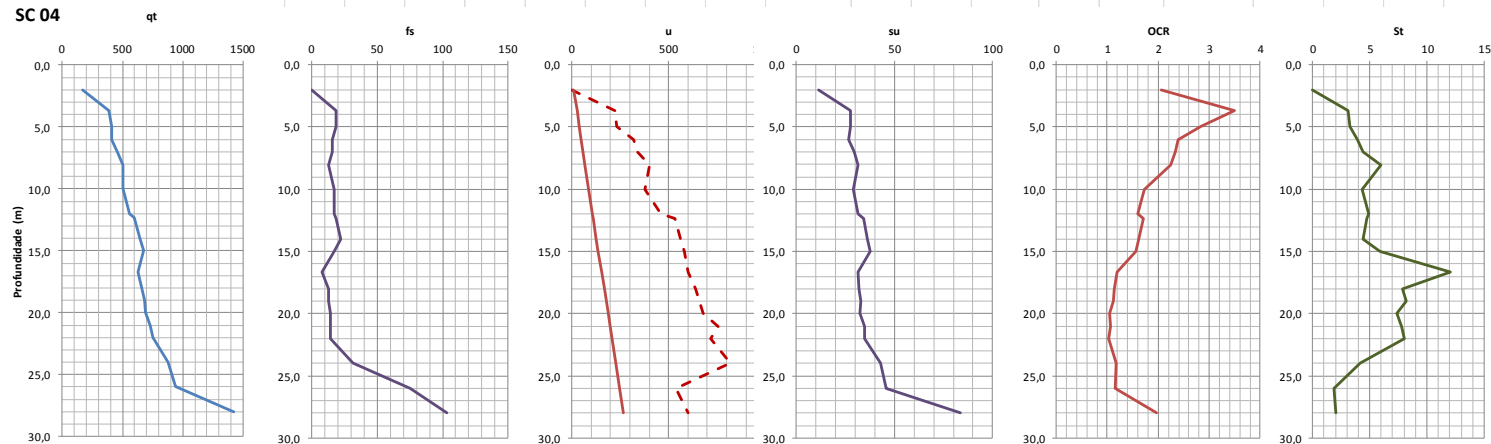
$$\sigma_{vm} = 0,305 (q_T - \sigma_{v0}) \quad \text{Chen e Mayne (1996)}$$

$$S = \frac{N_s}{R_f} \quad \text{Schmertman } N_s=15 \text{ Lunne et al (livro cone)}$$

Classificação Robertson, 1990

Cota	Prof	qt	fs	u	σ _{v0}	u ₀	σ' _{v0}	Bq	Qt	F	su	σ' _{vm}	OCR	F		Bq		Rt	Sensitivity
														Zona	Nom	Zona	Nom		
0,41	2,00	166,70	0,00	0,00	30,00	9,81	20,19	-0,07	6,77	0,0%	11,39	41,69	2,07	4	C	4	C	0,00	#DIV/0!
-1,29	3,70	388,00	18,80	222,00	55,50	26,49	29,01	0,59	11,46	5,7%	27,71	101,41	3,50	3	C	3	C	4,85	3,10
-2,59	5,00	406,00	18,80	230,00	75,00	39,24	35,76	0,58	9,26	5,7%	27,58	100,96	2,82	3	C	3	C	4,63	3,24
-3,59	6,00	412,00	15,60	320,00	90,00	49,05	40,95	0,84	7,86	4,8%	26,83	98,21	2,40	3	C	3	C	3,79	3,96
-4,59	7,00	459,00	15,60	340,00	105,00	58,86	46,14	0,79	7,67	4,4%	29,50	107,97	2,34	3	C	3	C	3,40	4,41
-5,64	8,05	500,00	12,50	400,00	120,75	69,16	51,59	0,87	7,35	3,3%	31,60	115,67	2,24	3	C	3	C	2,50	6,00
-7,59	10,00	500,00	17,20	380,00	150,00	88,29	61,71	0,83	5,67	4,9%	29,17	106,75	1,73	3	C	3	C	3,44	4,36
-9,59	12,00	559,00	17,20	460,00	180,00	107,91	72,09	0,93	5,26	4,5%	31,58	115,60	1,60	3	C	3	C	3,08	4,88
-9,94	12,35	600,00	18,80	533,00	185,25	111,34	73,91	1,02	5,61	4,5%	34,56	126,50	1,71	3	C	3	C	3,13	4,79
-11,59	14,00	647,00	21,90	560,00	210,00	127,53	82,47	0,99	5,30	5,0%	36,42	133,29	1,62	3	C	3	C	3,38	4,43
-12,59	15,00	676,00	17,20	580,00	225,00	137,34	87,66	0,98	5,14	3,8%	37,58	137,56	1,57	3	C	3	C	2,54	5,90
-14,27	16,68	625,00	7,80	600,00	250,20	153,82	96,38	1,19	3,89	2,1%	31,23	114,31	1,19	3	C	1	Sens	1,25	12,02
-15,59	18,00	656,00	12,50	640,00	270,00	166,77	103,23	1,23	3,74	3,2%	32,17	117,73	1,14	3	C	1	Sens	1,91	7,87
-16,59	19,00	681,00	12,50	660,00	285,00	176,58	108,42	1,22	3,65	3,2%	33,00	120,78	1,11	3	C	1	Sens	1,84	8,17
-17,59	20,00	687,00	14,00	680,00	300,00	186,39	113,61	1,28	3,41	3,6%	32,25	118,04	1,04	3	C	1	Sens	2,04	7,36
-18,59	21,00	730,00	14,00	755,00	315,00	196,20	118,80	1,35	3,49	3,4%	34,58	126,58	1,07	3	C	1	Sens	1,92	7,82
-19,59	22,00	750,00	14,00	720,00	330,00	206,01	123,99	1,22	3,39	3,3%	35,00	128,10	1,03	3	C	1	Sens	1,87	8,04
-21,59	24,00	875,00	31,20	820,00	360,00	225,63	134,37	1,15	3,83	6,1%	42,92	157,08	1,17	2	MO	1	Sens	3,57	4,21
-23,59	26,00	937,00	75,00	540,00	390,00	245,25	144,75	0,54	3,78	13,7%	45,58	166,84	1,15	2	MO	3	C	8,00	1,87
-25,59	28,00	1422,00	103,00	600,00	420,00	264,87	155,13	0,33	6,46	10,3%	83,50	305,61	1,97	2	MO	3	C	7,24	2,07

SC 04



CPT 05

NT	6,932
Prof NA	3,9
yt	15
γw	9,81
Nkt	12 (8 a 18)
Ns	15

ver Schnaid e Odebrecht, 2012

$$B_q = \frac{u - u_0}{q_T - \sigma_{v0}} \quad \frac{f_s}{q_T - \sigma_{v0}} = F$$

$$Q_i = \frac{q_T - \sigma_{v0}}{\sigma_{v0}} \quad S_0 = \frac{(q_i - \sigma_{v0})}{N_{kt}}$$

$$R_i = \frac{f_i}{q_T (\%)}$$

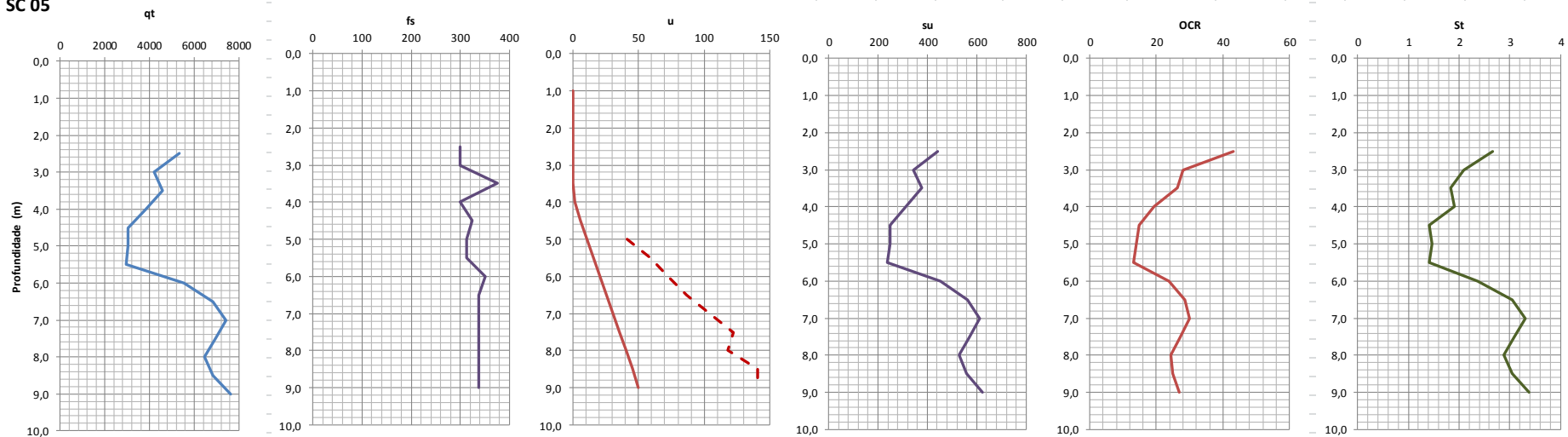
$$\sigma_{vm} = 0,305 (q_T - \sigma_{v0}) \quad \text{Chen e Mayne (1996)}$$

$$S = \frac{N_s}{R_f} \quad \text{Schmertman } N_s=15 \text{ Lunne et al (livro cone)}$$

Classificação Robertson, 1990

Cota	Prof (m)	qt (kPa)	fs (kPa)	u (kPa)	σ _{v0} (kPa)	u ₀ (kPa)	σ' _{v0} (kPa)	Bq	Qt	F	su (kPa)	σ' _{vm} (kPa)	OCR	F		Bq		Rt	Sensitivity
														Zona	Nom	Zona	Nom		
5,93	1,00				15,00	0,00	15,00	0,00							FALSO		FALSO		
4,93	2,00				30,00	0,00	30,00	0,00							FALSO		FALSO		
4,43	2,50	5333,30	300,00		37,50	0,00	37,50	0,00	141,22	5,7%	441,32	1615,22	43,07	9	S		FALSO	5,6	2,67
3,93	3,00	4190,00	300,00		45,00	0,00	45,00	0,00	92,11	7,2%	345,42	1264,23	28,09	9	S		FALSO	7,2	2,10
3,43	3,50	4571,40	375,00		52,50	0,00	52,50	0,00	86,07	8,3%	376,58	1378,26	26,25	9	S		FALSO	8,2	1,83
2,93	4	3809,50	300,00		60,00	0,98	59,02	0,00	63,53	8,0%	312,46	1143,60	19,38	3	C		FALSO	7,9	1,90
2,43	4,50	3047,60	325,00		67,50	5,89	61,61	0,00	48,37	10,9%	248,34	908,93	14,75	3	C		FALSO	10,7	1,41
1,93	5,00	3047,60	312,50	40,90	75,00	10,79	64,21	0,01	46,30	10,5%	247,72	906,64	14,12	3	C	5	CM	10,3	1,46
1,43	5,50	2952,00	312,50	59,00	82,50	15,70	66,80	0,02	42,95	10,9%	239,13	875,20	13,10	3	C	5	CM	10,6	1,42
0,93	6,00	5523,80	350,00	72,70	90,00	20,60	69,40	0,01	78,30	6,4%	452,82	1657,31	23,88	4	C	6	MC	6,3	2,37
0,43	6,50	6857,10	337,50	86,40	97,50	25,51	71,99	0,01	93,89	5,0%	563,30	2061,68	28,64	5	CM	6	MC	4,9	3,05
-0,07	7,00	7428,60	337,50	104,50	105,00	30,41	74,59	0,01	98,19	4,6%	610,30	2233,70	29,95	5	CM	6	MC	4,5	3,30
-0,57	7,50	6952,40	337,50	122,70	112,50	35,32	77,18	0,01	88,62	4,9%	569,99	2086,17	27,03	5	CM	6	MC	4,9	3,09
-1,07	8,00	6476,20	337,50	118,20	120,00	40,22	79,78	0,01	79,67	5,3%	529,68	1938,64	24,30	5	CM	6	MC	5,2	2,88
-1,57	8,50	6857,10	337,50	140,90	127,50	45,13	82,37	0,01	81,70	5,0%	560,80	2052,53	24,92	5	CM	6	MC	4,9	3,05
-2,07	9,00	7619,00	337,50	140,90	135,00	50,03	84,97	0,01	88,08	4,5%	623,67	2282,62	26,86	5	CM	6	MC	4,4	3,39

SC 05



CPT 06
NT 6,729
Prof NA 3,6
yt 15
yw 9,81
Nkt 12 (8 a 18)
Ns 15

ver Schnaid e Odebrecht, 2012

$$B_q = \frac{u - u_0}{q_T - \sigma_{v0}}$$

$$\frac{f_s}{q_T - \sigma_{v0}} = F$$

$$R_t = \frac{f_s}{q_T}$$

$$Q_t = \frac{q_T - \sigma_{v0}}{\sigma_{v0}} \quad S_u = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{N_{kt}}$$

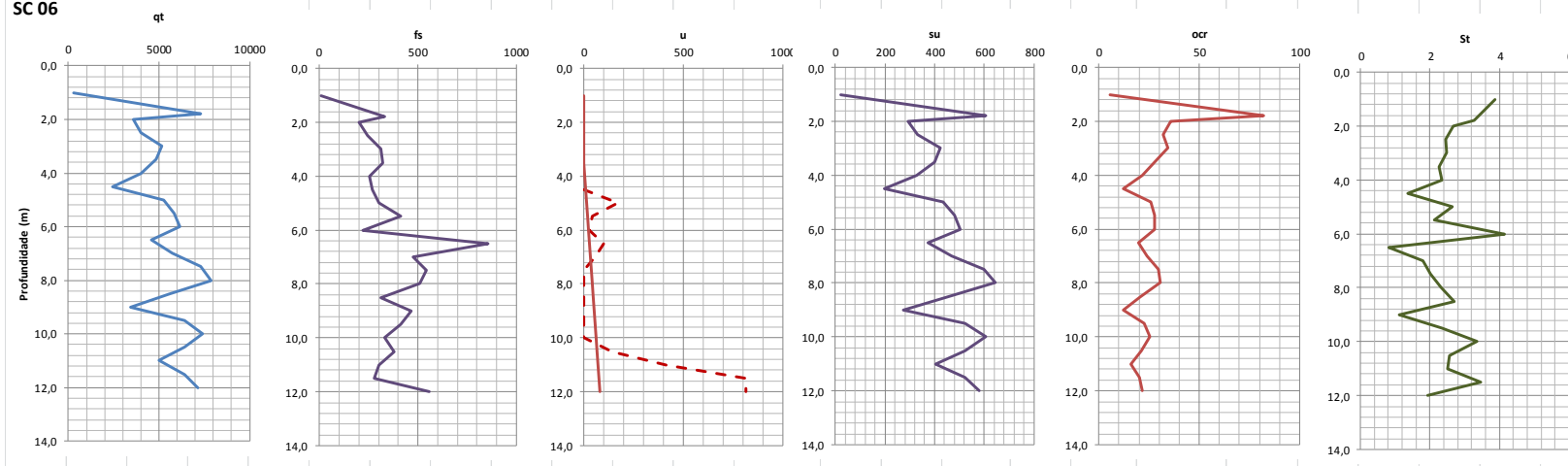
$$\sigma_{vm} = 0,305 (q_T - \sigma_{v0}) \text{ Chen e Mayne (1996)}$$

$$S = \frac{N_s}{R_f} \text{ Schmertman } N_s=15 \text{ Lunne et al (livro cone)}$$

Classificação Robertson, 1990

Cota	Prof	qt	fs	u	σ _{v0}	u ₀	σ' _{v0}	Bq	Qt	F	su	σ' _{vm}	OCR	F		Bq		Rt	Sensitivity
														Zona	Nom	Zona	Nom		
5,73	1,00	285,70	11,10		15,00	0,00	15,00	0,00	18,05	4,1%	22,56	82,56	5,50	3	C		FALSO	3,9	3,86
4,93	1,80	7285,70	333,30		27,00	0,00	27,00	0,00	268,84	4,6%	604,89	2213,90	82,00	9	S		FALSO	4,6	3,28
4,73	2,00	3571,40	200,00		30,00	0,00	30,00	0,00	118,05	5,6%	295,12	1080,13	36,00	9	S		FALSO	5,6	2,68
4,23	2,50	4000,00	244,40		37,50	0,00	37,50	0,00	105,67	6,2%	330,21	1208,56	32,23	9	S		FALSO	6,1	2,45
3,73	3,00	5142,80	311,10		45,00	0,00	45,00	0,00	113,28	6,1%	424,82	1554,83	34,55	9	S		FALSO	6,0	2,48
3,23	3,5	4857,10	322,20		52,50	0,00	52,50	0,00	91,52	6,7%	400,38	1465,40	27,91	9	S		FALSO	6,6	2,26
2,73	4,00	4000,00	255,60		60,00	3,92	56,08	0,00	70,26	6,5%	328,33	1201,70	21,43	4	C		FALSO	6,4	2,35
2,23	4,50	2428,60	266,70	0,00	67,50	8,83	58,67	0,00	40,24	11,3%	196,76	720,14	12,27	3	C	6	MC	11,0	1,37
1,73	5,00	5285,70	300,00	171,40	75,00	13,73	61,27	0,03	85,05	5,8%	434,23	1589,26	25,94	4	C	6	MC	5,7	2,64
1,23	5,50	5857,10	411,10	42,90	82,50	18,64	63,86	0,00	90,42	7,1%	481,22	1761,25	27,58	4	C	6	MC	7,0	2,14
0,73	6,00	6142,90	222,20	28,60	90,00	23,54	66,46	0,00	91,08	3,7%	504,41	1846,13	27,78	5	CM	6	MC	3,6	4,15
0,23	6,50	4571,40	855,60	100,00	97,50	28,45	69,05	0,02	64,79	19,1%	372,83	1364,54	19,76		FALSO	6	MC	18,7	0,80
-0,27	7,00	5714,20	477,80	57,10	105,00	33,35	71,65	0,00	78,29	8,5%	467,43	1710,81	23,88	3	C	6	MC	8,4	1,79
-0,77	7,50	7285,70	544,40	0,00	112,50	38,26	74,24	-0,01	96,62	7,6%	597,77	2187,83	29,47	9	S		FALSO	7,5	2,01
-1,27	8,00	7857,10	511,10	0,00	120,00	43,16	76,84	-0,01	100,70	6,6%	644,76	2359,82	30,71	9	S		FALSO	6,5	2,31
-1,77	8,50	5571,40	311,10	0,00	127,50	48,07	79,43	-0,01	68,54	5,7%	453,66	1660,39	20,90	4	C		FALSO	5,6	2,69
-2,27	9,00	3428,50	466,70	0,00	135,00	52,97	82,03	-0,02	40,15	14,2%	274,46	1004,52	12,25		FALSO		FALSO	13,6	1,10
-2,77	9,50	6428,60	411,10	0,00	142,50	57,88	84,62	-0,01	74,29	6,5%	523,84	1917,26	22,66	4	C		FALSO	6,4	2,35
-3,27	10,00	7428,50	333,30	0,00	150,00	62,78	87,22	-0,01	83,45	4,6%	606,54	2219,94	25,45	4	C		FALSO	4,5	3,34
-3,77	10,50	6428,50	377,80	142,90	157,50	67,69	89,81	0,01	69,82	6,0%	522,58	1912,66	21,30	4	C	6	MC	5,9	2,55
-4,27	11,00	5000,00	300,00	414,30	165,00	72,59	92,41	0,07	52,32	6,2%	402,92	1474,68	15,96	4	C	6	MC	6,0	2,50
-4,77	11,50	6428,60	277,80	814,30	172,50	77,50	95,00	0,12	65,85	4,4%	521,34	1908,11	20,09	5	CM	6	MC	4,3	3,47
-5,27	12,00	7142,90	555,50	814,30	180,00	82,40	97,60	0,11	71,34	8,0%	580,24	2123,68	21,76	3,00	C	6,00	MC	7,8	1,93

SC 06



CPT 07

NT 4,349
Prof NA 1,3
 γ_t 15
 γ_w 9,81
Nkt 12 (8 a 18)
Ns 15

ver Schnaid e Odebrecht, 2012

$$B_q = \frac{u - u_0}{q_T - \sigma_{v0}} \quad \frac{f_s}{q_T - \sigma_{v0}} = F$$

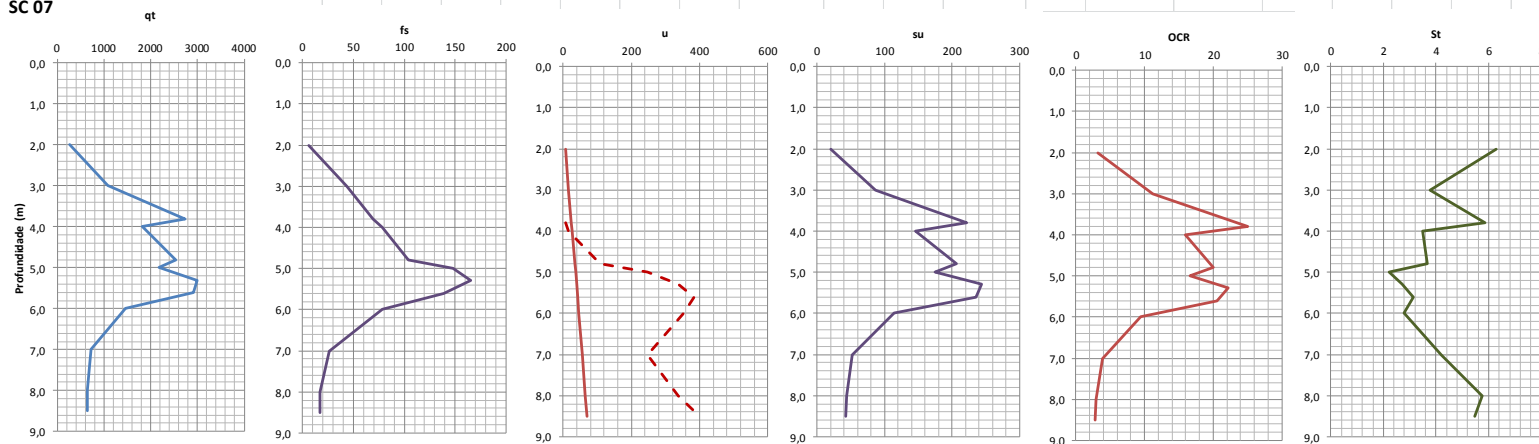
$$Q_i = \frac{q_T - \sigma_{v0}}{\sigma_{v0}} \quad S_g = \frac{(q_i - \sigma_{v0})}{N_{kt}}$$

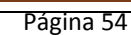
$$\sigma_{vm} = 0,305 (q_T - \sigma_{v0}) \quad \text{Chen e Mayne (1996)}$$

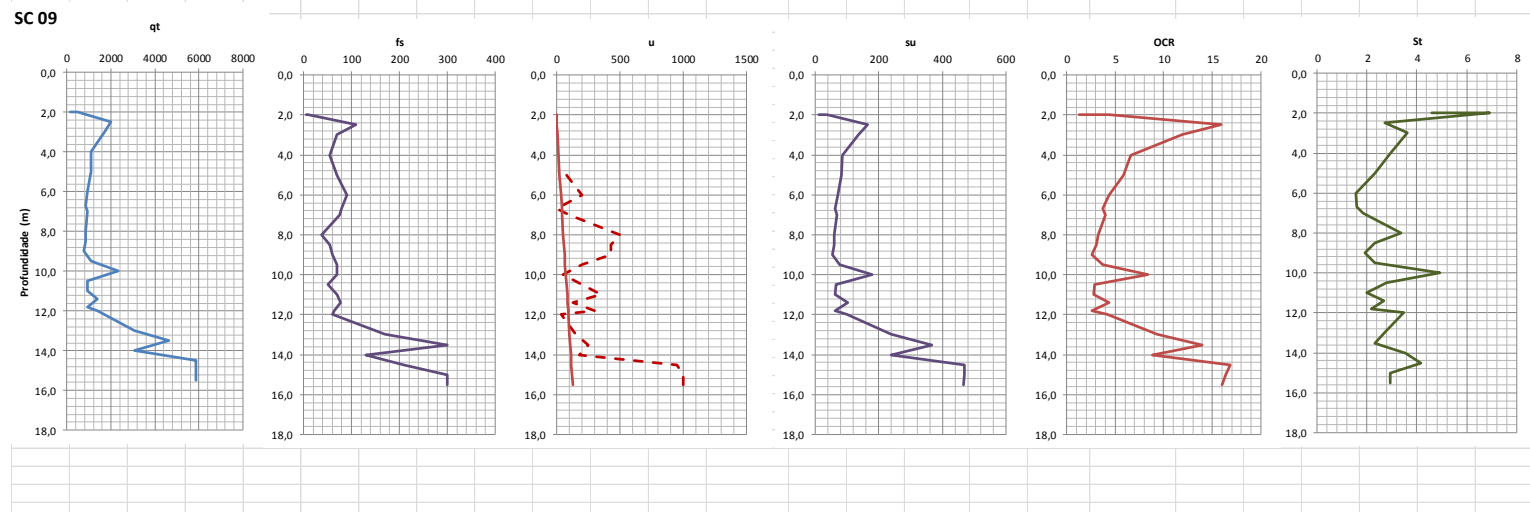
Classificação Robertson, 1990

Cota	Prof	q_t	f_s	u	σ_{v0}	u_0	σ'_{v0}	Bq	Qt	F	su	σ'_{vm}	OCR	F		Bq		Rt	Sensitivity
														Zona	Nom	Zona	Nom		
2,35	2,00	272,00	6,50	7,60	30,00	6,87	23,13	0,00	10,46	2,7%	20,17	73,81	3,19	4	C	4	C	2,39	6,28
1,35	3,00	1090,00	43,50		45,00	16,68	28,32	-0,02	36,90	4,2%	87,08	318,73	11,25	4	C	4	C	3,99	3,76
0,55	3,80	2727,00	69,60	7,60	57,00	24,53	32,48	-0,01	82,22	2,6%	222,50	814,35	25,08	5	CM	8	S	2,55	5,88
0,35	4,00	1818,00	78,30	15,40	60,00	26,49	33,51	-0,01	52,46	4,5%	146,50	536,19	16,00	5	CM	5	CM	4,31	3,48
-0,45	4,80	2545,00	104,30	107,70	72,00	34,34	37,67	0,03	65,66	4,2%	206,08	754,27	20,03	5	CM	6	MC	4,10	3,66
-0,65	5	2181,00	147,80	246,20	75,00	36,30	38,70	0,10	54,41	7,0%	175,50	642,33	16,60	3	C	5	CM	6,78	2,21
-0,95	5,30	3000,00	165,00	338,50	79,50	39,24	40,26	0,10	72,54	5,6%	243,38	890,75	22,13	9	S	6	MC	5,50	2,73
-1,25	5,60	2909,00	139,10	384,60	84,00	42,18	41,82	0,12	67,56	4,9%	235,42	861,63	20,60	4	C	6	MC	4,78	3,14
-1,65	6,00	1454,00	78,30	353,80	90,00	46,11	43,89	0,23	31,08	5,7%	113,67	416,02	9,48	3	C	5	CM	5,39	2,79
-2,65	7,00	727,30	26,00	246,20	105,00	55,92	49,08	0,31	12,68	4,2%	51,86	189,80	3,87	3	C	3	C	3,57	4,20
-3,65	8,00	636,40	16,60	338,40	120,00	65,73	54,27	0,53	9,51	3,2%	43,03	157,50	2,90	4	C	3	C	2,61	5,75
-4,15	8,50	636,40	17,40	400,00	127,50	70,63	56,87	0,65	8,95	3,4%	42,41	155,21	2,73	3	C	3	C	2,73	5,49

SC 07



Classificação Robertson, 1990SC 08



CPT 10	
COTA NT	4,597 m
Prof NA	1,3 m
γ_t	15
γ_w	9,81
Nkt	12 (8 a 18)
Ns	15

$$B_q = \frac{u - u_0}{q_T - \sigma_{v0}} = \frac{f_s}{q_T - \sigma_{v0}} = F$$

$$Q_t = \frac{q_T - \sigma_{v0}}{\sigma_{v0}} \quad S_q = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{N_{kt}}$$

$$R_f = \frac{f_s}{q_T (\%)}$$

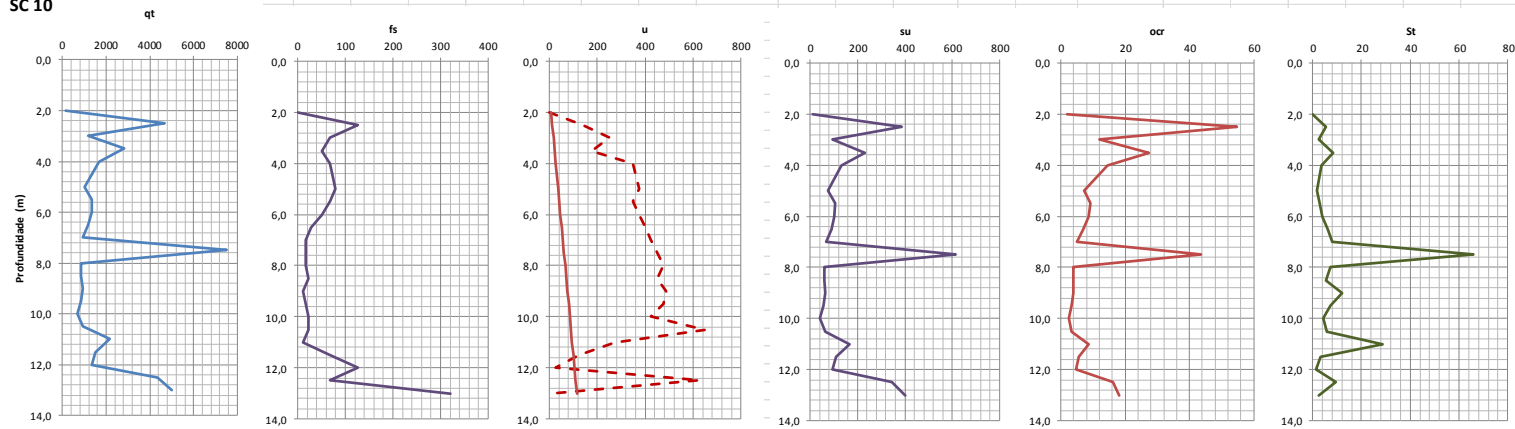
$$\sigma_{vm} = 0,305 (q_T - \sigma_{v0}) \text{ Chen e Mayne (1996)}$$

$$S = \frac{N_s}{R_f} \text{ Schmertman } N_s=15 \text{ Lunne et al (livro cone)}$$

Classificação Robertson, 1990

Cota	Prof	q_t	f_s	u	σ_{v0}	u_0	σ'_{v0}	Bq	Qt	F	su	σ'_{vm}	OCR	F		Bq		Rt	Sensitivity
														Zona	Nom	Zona	Nom		
2,60	2,00	166,70	0,00	0,00	30,00	6,87	23,13	-0,05	5,91	0,0%	11,39	41,69	1,80		FALSO	3	C	0,0	#DIV/0!
2,10	2,50	4666,70	125,70	137,50	37,50	11,77	25,73	0,03	179,93	2,7%	385,77	1411,91	54,88	8	S	6	MC	2,7	5,57
1,60	3,00	1167,00	68,57	250,00	45,00	16,68	28,32	0,21	39,61	6,1%	93,50	342,21	12,08	3	C	6	MC	5,9	2,55
1,10	3,50	2833,00	51,43	175,00	52,50	21,58	30,92	0,06	89,93	1,8%	231,71	848,05	27,43	5	CM	6	MC	1,8	8,26
0,60	4,00	1666,70	68,60	350,00	60,00	26,49	33,51	0,20	47,94	4,3%	133,89	490,04	14,62	4	C	6	MC	4,1	3,64
-0,40	5	1000	80,00	375,00	75,00	36,30	38,70	0,37	23,90	8,6%	77,08	282,13	7,29	3	C	4	C	8,0	1,88
-0,90	5,50	1333,30	68,60	350,00	82,50	41,20	41,30	0,25	30,29	5,5%	104,23	381,49	9,24	3	C	4	C	5,1	2,92
-1,40	6,00	1333,30	51,40	375,00	90,00	46,11	43,89	0,26	28,33	4,1%	103,61	379,21	8,64	4	C	4	C	3,9	3,89
-1,90	6,50	1166,60	28,60	400,00	97,50	51,01	46,49	0,33	23,00	2,7%	89,09	326,08	7,01	4	C	4	C	2,5	6,12
-2,40	7,00	916,70	17,10	425,00	105,00	55,92	49,08	0,45	16,54	2,1%	67,64	247,57	5,04	4	C	3	C	1,9	8,04
-2,90	7,50	7500,00	17,10	450,00	112,50	60,82	51,68	0,05	142,95	0,2%	615,63	2253,19	43,60	6	MC	6	MC	0,2	65,79
-3,40	8,00	833,30	17,10	475,00	120,00	65,73	54,27	0,57	13,14	2,4%	59,44	217,56	4,01	4	C	3	C	2,1	7,31
-3,90	8,50	833,30	22,90	450,00	127,50	70,63	56,87	0,54	12,41	3,2%	58,82	215,27	3,79	4	C	3	C	2,7	5,46
-4,40	9,00	916,60	11,40	487,50	135,00	75,54	59,46	0,53	13,14	1,5%	65,13	238,39	4,01	4	C	3	C	1,2	12,06
-4,90	9,50	833,30	17,14	475,00	142,50	80,44	62,06	0,57	11,13	2,5%	57,57	210,69	3,40	4	C	3	C	2,1	7,29
-5,40	10,00	666,70	22,90	425,00	150,00	85,35	64,65	0,66	7,99	4,4%	43,06	157,59	2,44	3	C	3	C	3,4	4,37
-5,90	10,50	916,60	22,90	650,00	157,50	90,25	67,25	0,74	11,29	3,0%	63,26	231,53	3,44	4	C	3	C	2,5	6,00
-6,40	11,00	2166,60	11,40	275,00	165,00	95,16	69,84	0,09	28,66	0,6%	166,80	610,49	8,74	5	CM	5	CM	0,5	28,51
-6,90	11,50	1500,00	68,60	125,00	172,50	100,06	72,44	0,02	18,33	5,2%	110,63	404,89	5,59	3	C	5	CM	4,6	3,28
-7,40	12,00	1333,30	127,10	25,00	180,00	104,97	75,03	-0,07	15,37	11,0%	96,08	351,67	4,69	3	C	5	CM	9,5	1,57
-7,90	12,50	4333,00	68,60	625,00	187,50	109,87	77,63	0,12	53,40	1,7%	345,46	1264,38	16,29	5	CM	6	MC	1,6	9,47
-8,40	13,00	5000,00	320,00	0,00	195,00	114,78	80,22	-0,02	59,90	6,7%	400,42	1465,53	18,27	3	C	6	MC	6,4	2,34

SC 10



CPT 11
NT
Prof NA
γt
γw
Nkt
Ns

3,105 m
0,6 m
15 kN/m³
9,81 kN/m³
12 (8 a 18)
15

ver Schnaid e Odebrecht, 2012

$$B_q = \frac{u - u_0}{q_T - \sigma_{v0}} \quad \frac{f_s}{q_T - \sigma_{v0}} = F$$

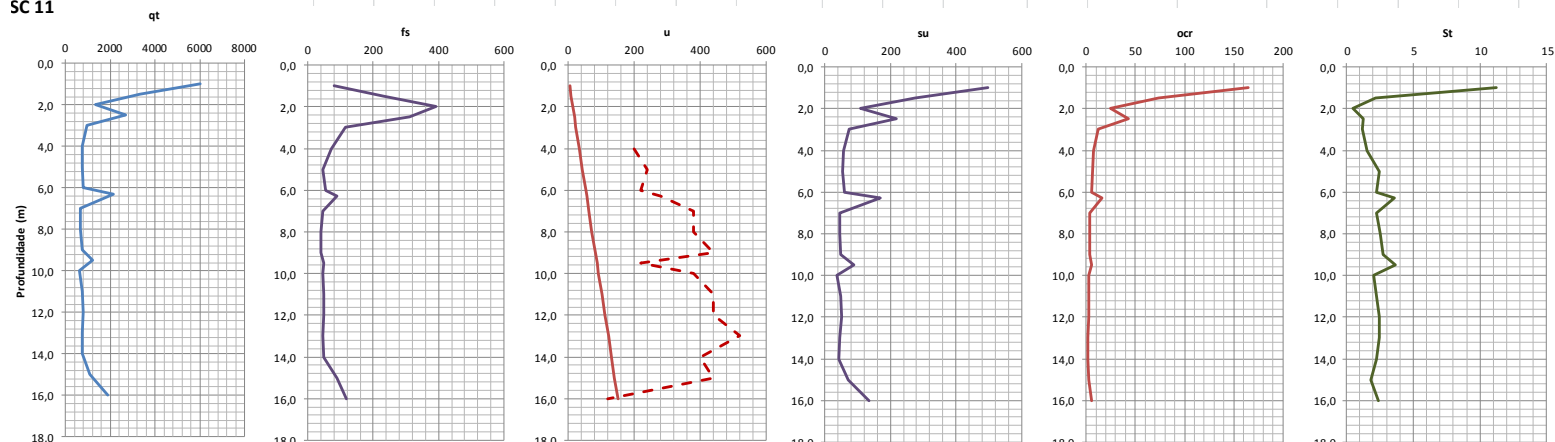
$$Q_i = \frac{q_T - \sigma_{v0}}{\sigma_{v0}} \quad S_0 = \frac{(q_i - \sigma_{v0})}{N_{kt}}$$

$$\sigma_{vm} = 0,305 (q_T - \sigma_{v0}) \quad \text{Chen e Mayne (1996)}$$

Classificação Robertson, 1990

														Clasificación Robertson, 1959				F		Bq			
Cota	Prof	q _t	f _s	u	σ _{vo}	u ₀	σ' _{vo}	Bq	Qt	F	su	σ' _{vm}	OCR	Zona	Nomenclatura	Zona	Nomenclatura	Rt	Sensitivity				
	(m)	(kPa)		(kPa)		(kPa)					(kPa)	(kPa)											
2,11	1,00	5999,00	80,00		15,00	3,92	11,08	0,00	540,27	1,3%	498,67	1825,12	164,78	6	MC	7	SM	1,33	11,25				
1,61	1,50	3333,00	231,00		22,50	8,83	13,67	0,00	242,15	7,0%	275,88	1009,70	73,86	9	S	7	SM	6,93	2,16				
1,11	2,00	1333,00	392,90		30,00	13,73	16,27	-0,01	80,11	30,2%	108,58	397,42	24,43		FALSO	6	MC	29,47	0,51				
0,61	2,50	2666,00	311,10		37,50	18,64	18,86	-0,01	139,36	11,8%	219,04	801,69	42,51	9	S	6	MC	11,67	1,29				
0,11	3,00	933,30	115,60		45,00	23,54	21,46	-0,03	41,40	13,0%	74,03	270,93	12,63	3	C	4	C	12,39	1,21				
-0,90	4	733,30	71,10	200,00	60,00	33,35	26,65	0,25	25,27	10,6%	56,11	205,36	7,71	3	C	4	C	9,70	1,55				
-1,90	5,00	733,30	44,40	240,00	75,00	43,16	31,84	0,30	20,68	6,7%	54,86	200,78	6,31	3	C	4	C	6,05	2,48				
-2,90	6,00	800,00	53,30	220,00	90,00	52,97	37,03	0,24	19,18	7,5%	59,17	216,55	5,85	3	C	4	C	6,66	2,25				
-3,20	6,30	2133,00	88,90	280,00	94,50	55,92	38,58	0,11	52,83	4,4%	169,88	621,74	16,11	4	C	5	CM	4,17	3,60				
-3,90	7,00	666,70	44,40	380,00	105,00	62,78	42,22	0,56	13,31	7,9%	46,81	171,32	4,06	3	C	3	C	6,66	2,25				
-4,90	8,00	666,70	40,00	380,00	120,00	72,59	47,41	0,56	11,53	7,3%	45,56	166,74	3,52	3	C	3	C	6,00	2,50				
-5,90	9,00	733,30	40,00	440,00	135,00	82,40	52,60	0,60	11,38	6,7%	49,86	182,48	3,47	3	C	3	C	5,45	2,75				
-6,40	9,50	1200,00	48,90	220,00	142,50	87,31	55,19	0,13	19,16	4,6%	88,13	322,54	5,84	3	C	4	C	4,08	3,68				
-6,90	10,00	600,00	44,40	380,00	150,00	92,21	57,79	0,64	7,79	9,9%	37,50	137,25	2,38	3	C	3	C	7,40	2,03				
-7,90	11,00	733,30	48,90	440,00	165,00	102,02	62,98	0,60	9,02	8,6%	47,33	173,24	2,75	3	C	3	C	6,67	2,25				
-8,90	12,00	800,00	48,80	440,00	180,00	111,83	68,17	0,53	9,10	7,9%	51,67	189,10	2,77	3	C	3	C	6,10	2,46				
-9,90	13,00	733,30	44,40	520,00	195,00	121,64	73,36	0,74	7,33	8,3%	44,83	164,09	2,24	3	C	3	C	6,06	2,48				
-10,90	14,00	733,30	48,90	400,00	210,00	131,45	78,55	0,51	6,66	9,3%	43,58	159,52	2,03	3	C	3	C	6,67	2,25				
-11,90	15,00	1067,00	88,80	440,00	225,00	141,26	83,74	0,35	10,06	10,5%	70,17	256,81	3,07	3	C	3	C	8,32	1,80				
-12,90	16,00	1867,00	117,80	120,00	240,00	151,07	88,93	-0,02	18,30	7,2%	135,58	496,24	5,58	3	C	3	C	6,31	2,38				

SC 11



CPT 12
NT 7,051 m
Prof NA 3,7 m
γ_t 15 kN/m³
γ_w 9,81 kN/m³
Nkt 12 (8 a 18)
Ns 15

ver Schnaid e Odebrecht, 2012

$$B_q = \frac{u - u_0}{q_T - \sigma_{v0}} \quad \frac{f_s}{q_T - \sigma_{v0}} = F$$

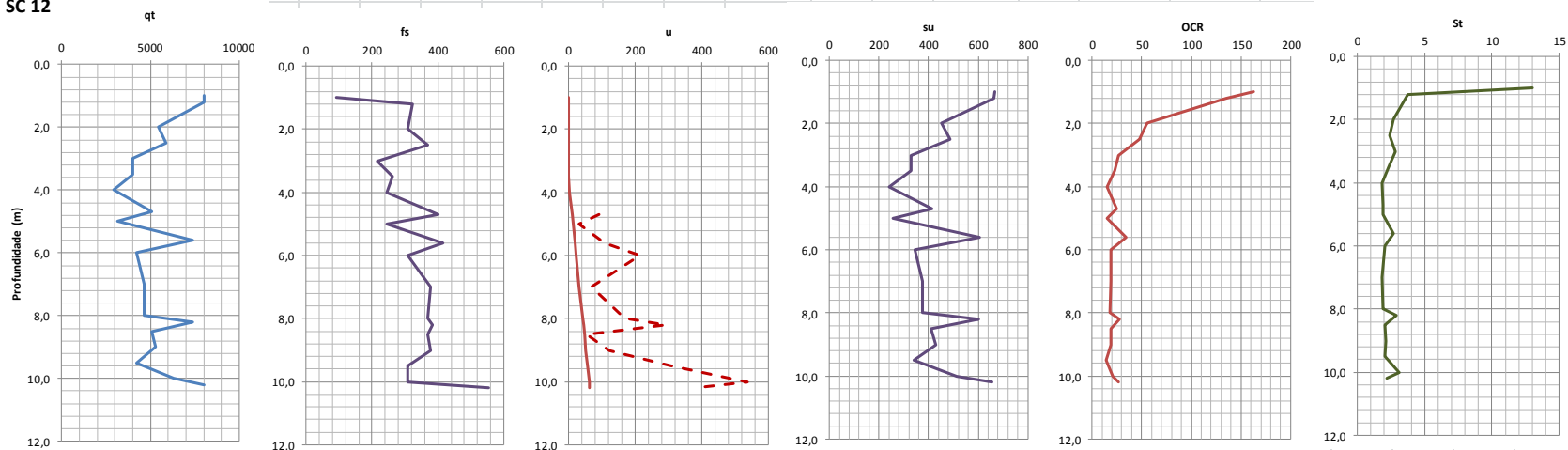
$$Q_t = \frac{q_T - \sigma_{v0}}{\sigma_{v0}} \quad S_u = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{N_{kt}}$$

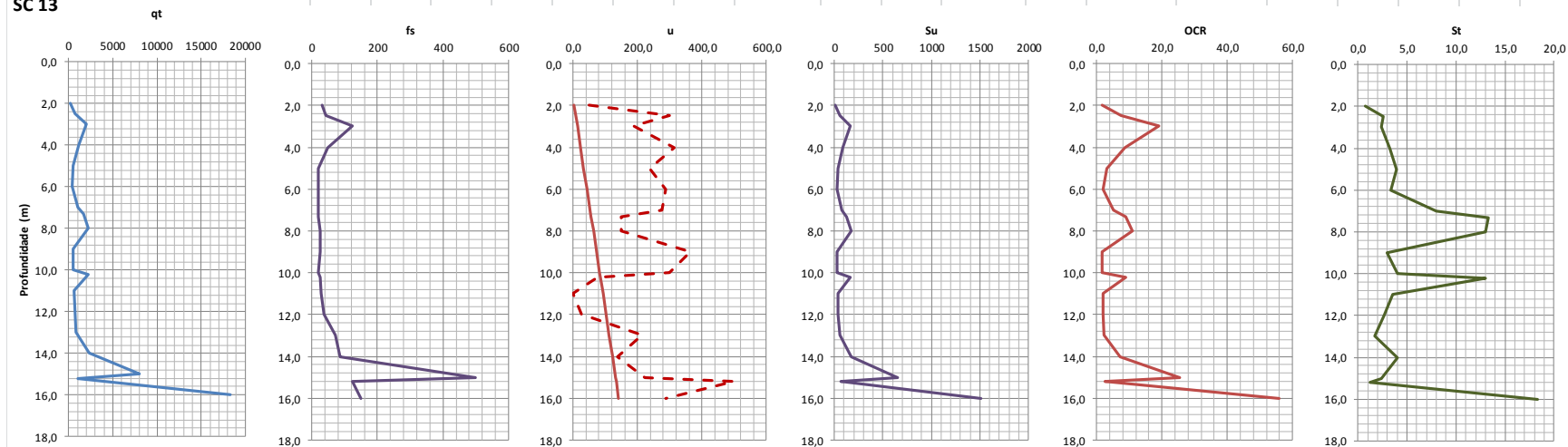
$$\sigma_{vm} = 0,305 (q_T - \sigma_{v0}) \quad \text{Chen e Mayne (1996)}$$

Classificação Robertson, 1990

Cota	Prof	q _t	f _s	u	σ _{v0}	u ₀	σ' _{v0}	Bq	Qt	F	su	σ' _{vm}	OCR	F		Bq		Rt	Sensitivity
														Zona	Nomenclatura	Zona	Nomenclatura		
	(m)	(kPa)		(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)				(kPa)	(kPa)							
6,05	1,00	8000,00	92,30		15,00	0,00	15,00		532,33	1,2%	665,42	2435,43	162,36	6	MC		FALSO	1,15	13,00
5,85	1,20	8000,00	323,00		18,00	0,00	18,00		443,44	4,0%	665,17	2434,51	135,25	8	S		FALSO	4,04	3,72
5,05	2,00	5473,00	307,70		30,00	0,00	30,00		181,43	5,7%	453,58	1660,12	55,34	9	S		FALSO	5,62	2,67
4,55	2,50	5894,00	369,20		37,50	0,00	37,50		156,17	6,3%	488,04	1786,23	47,63	9	S		FALSO	6,26	2,39
4,05	3,00	4000,00	215,40		45,00	0,00	45,00		87,89	5,4%	329,58	1206,28	26,81	9	S		FALSO	5,39	2,79
3,55	3,5	4000,00	261,50		52,50	0,00	52,50		75,19	6,6%	328,96	1203,99	22,93	9	S		FALSO	6,54	2,29
3,05	4,00	2947,00	246,20		60,00	2,94	57,06		50,60	8,5%	240,58	880,54	15,43	9	S		FALSO	8,35	1,80
2,35	4,70	5053,00	400,00	92,30	70,50	9,81	60,69	0,02	82,10	8,0%	415,21	1519,66	25,04	9	S	6	MC	7,92	1,89
2,05	5,00	3158,00	246,20	30,70	75,00	12,75	62,25	0,01	49,53	8,0%	256,92	940,32	15,11	3	C	6	MC	7,80	1,92
1,45	5,60	7368,00	415,40	107,70	84,00	18,64	65,36	0,01	111,44	5,7%	607,00	2221,62	33,99	9	S	6	MC	5,64	2,66
1,05	6,00	4210,00	307,70	215,40	90,00	22,56	67,44	0,05	61,09	7,5%	343,33	1256,60	18,63	3	C	6	MC	7,31	2,05
0,05	7,00	4631,00	376,90	69,20	105,00	32,37	72,63	0,01	62,32	8,3%	377,17	1380,43	19,01	3	C	6	MC	8,14	1,84
-0,95	8,00	4631,00	369,20	169,20	120,00	42,18	77,82	0,03	57,97	8,2%	375,92	1375,86	17,68	3	C	6	MC	7,97	1,88
-1,15	8,20	7368,00	384,40	292,30	123,00	44,15	78,86	0,03	91,88	5,3%	603,75	2209,73	28,02	9	S	6	MC	5,22	2,88
-1,45	8,50	5053,00	369,20	53,80	127,50	47,09	80,41	0,00	61,25	7,5%	410,46	1502,28	18,68	4	C	6	MC	7,31	2,05
-1,95	9,00	5263,00	376,90	123,10	135,00	51,99	83,01	0,01	61,78	7,3%	427,33	1564,04	18,84	4	C	6	MC	7,16	2,09
-2,45	9,50	4211,00	307,70	307,70	142,50	56,90	85,60	0,06	47,53	7,6%	339,04	1240,89	14,50	4	C	6	MC	7,31	2,05
-2,95	10,00	6315,00	307,70	538,40	150,00	61,80	88,20	0,08	69,90	5,0%	513,75	1880,33	21,32	4	C	6	MC	4,87	3,08
-3,15	10,20	8000,00	553,80	384,60	153,00	63,77	89,24	0,04	87,94	7,1%	653,92	2393,34	26,82	4	C	6	MC	6,92	2,17

SC 12





Página 60

CPT 15
NT 1,915
Prof NA 1,2
γt 15
γw 9,81
Nkt 12 (8 a 18)
Ns 15

ver Schnaid e Odebrecht, 2012

$$B_q = \frac{u - u_0}{q_T - \sigma_{v0}} \quad \frac{f_s}{q_T - \sigma_{v0}} = F$$

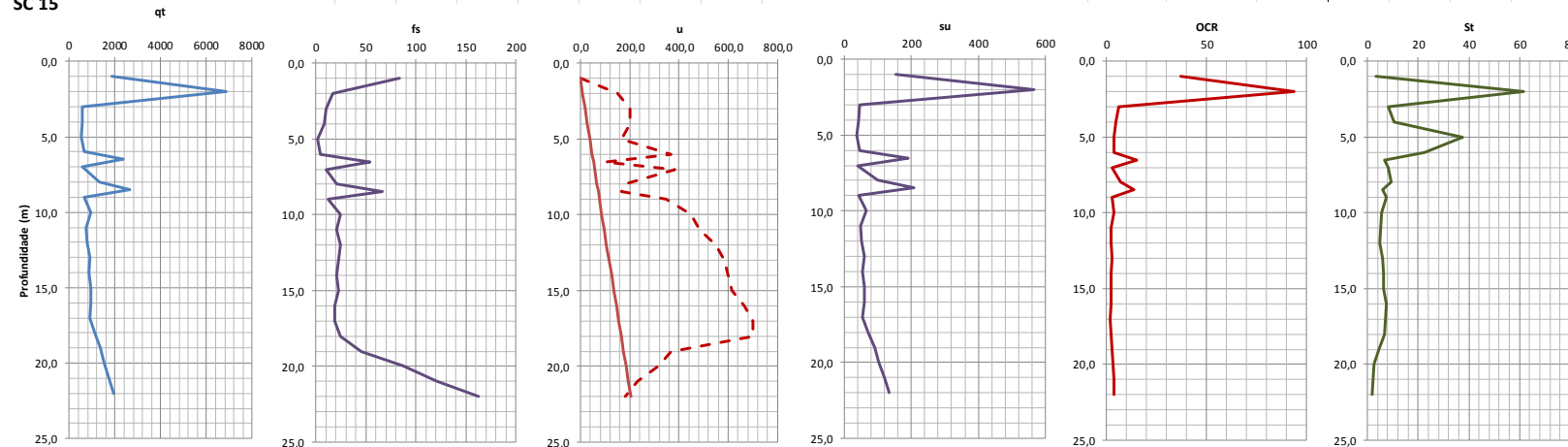
$$Q_t = \frac{q_T - \sigma_{v0}}{\sigma_{v0}} \quad S_b = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{N_{kt}}$$

$$\sigma_{vm} = 0,305 (q_T - \sigma_{v0}) \quad \text{Chen e Mayne (1996)}$$

Classificação Robertson, 1990

Cota	Prof	qt	fs	u	σ _{v0}	u ₀	σ _{v0}	Bq	Qt	F	su	σ _{vm}	OCR	F		Bq		Rt	Sensitivity
														Zona	Nom	Zona	Nom		
0,92	1,00	1842,00	83,30	0,00	15,00	0,00	15,00	0,00	121,80	4,6%	152,25	557,24	37,15	9	S	6	MC	4,52	3,32
-0,09	2,00	6842,00	16,70	150,00	30,00	7,85	22,15	0,02	307,51	0,2%	567,67	2077,66	93,79	7	SM	7	SM	0,24	61,46
-1,09	3,00	578,90	10,42	200,00	45,00	17,66	27,34	0,34	19,53	2,0%	44,49	162,84	5,96	4	C	5	CM	1,80	8,33
-2,09	4,00	578,90	8,30	200,00	60,00	27,47	32,53	0,33	15,95	1,6%	43,24	158,26	4,86	4	C	3	C	1,43	10,46
-3,09	5,00	526,30	2,10	166,00	75,00	37,28	37,72	0,29	11,96	0,5%	37,61	137,65	3,65	5	CM	3	C	0,40	37,59
-4,09	6	631,60	4,20	366,00	90,00	47,09	42,91	0,59	12,62	0,8%	45,13	165,19	3,85	4	C	3	C	0,66	22,56
-4,59	6,50	2368,40	54,20	100,00	97,50	51,99	45,51	0,02	49,90	2,4%	189,24	692,62	15,22	5	CM	5	CM	2,29	6,55
-5,09	7,00	578,90	10,40	383,30	105,00	56,90	48,10	0,69	9,85	2,2%	39,49	144,54	3,00	4	C	3	C	1,80	8,35
-6,09	8,00	1315,80	20,80	183,30	120,00	66,71	53,29	0,10	22,44	1,7%	99,65	364,72	6,84	5	CM	5	CM	1,58	9,49
-6,59	8,50	2631,60	66,60	166,70	127,50	71,61	55,89	0,04	44,81	2,7%	208,68	763,75	13,67	5	CM	4	C	2,53	5,93
-7,09	9,00	631,60	12,50	350,00	135,00	76,52	58,48	0,55	8,49	2,5%	41,38	151,46	2,59	3	C	3	C	1,98	7,58
-8,09	10,00	947,40	25,00	450,00	150,00	86,33	63,67	0,46	12,52	3,1%	66,45	243,21	3,82	4	C	3	C	2,64	5,68
-9,09	11,00	736,80	20,80	483,30	165,00	96,14	68,86	0,68	8,30	3,6%	47,65	174,40	2,53	3	C	3	C	2,82	5,31
-10,09	12,00	789,50	25,00	550,00	180,00	105,95	74,05	0,73	8,23	4,1%	50,79	185,90	2,51	3	C	3	C	3,17	4,74
-11,09	13,00	894,70	22,90	583,30	195,00	115,76	79,24	0,67	8,83	3,3%	58,31	213,41	2,69	3	C	3	C	2,56	5,86
-12,09	14,00	868,40	20,80	600,00	210,00	125,57	84,43	0,72	7,80	3,2%	54,87	200,81	2,38	3	C	3	C	2,40	6,26
-13,09	15,00	947,40	22,90	616,70	225,00	135,38	89,62	0,67	8,06	3,2%	60,20	220,33	2,46	3	C	3	C	2,42	6,21
-14,09	16,00	947,40	18,70	666,70	240,00	145,19	94,81	0,74	7,46	2,6%	58,95	215,76	2,28	3	C	3	C	1,97	7,60
-15,09	17,00	894,70	18,70	700,00	255,00	155,00	100,00	0,85	6,40	2,9%	53,31	195,11	1,95	3	C	3	C	2,09	7,18
-16,09	18,00	1105,30	25,00	700,00	270,00	164,81	105,19	0,64	7,94	3,0%	69,61	254,77	2,42	3	C	3	C	2,26	6,63
-17,09	19,00	1368,40	45,80	366,70	285,00	174,62	110,38	0,18	9,82	4,2%	90,28	330,44	2,99	3	C	4	C	3,35	4,48
-18,09	20,00	1526,30	87,50	316,70	300,00	184,43	115,57	0,11	10,61	7,1%	102,19	374,02	3,24	3	C	4	C	5,73	2,62
-19,09	21,00	1736,80	120,80	233,30	315,00	194,24	120,76	0,03	11,77	8,5%	118,48	433,65	3,59	3	C	5	CM	6,96	2,16
-20,09	22,00	1947,30	162,50	183,30	330,00	204,05	125,95	-0,01	12,84	10,0%	134,78	493,28	3,92	3	C	5	CM	8,34	1,80

SC 15

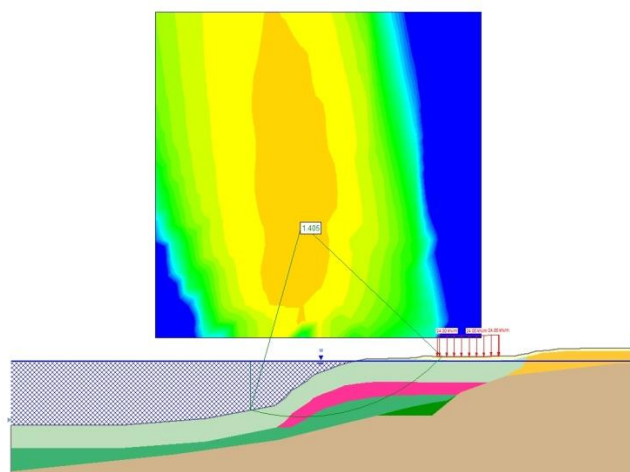


7 ANEXO 2- ANÁLISES DE ESTABILIDADE PARA AS FIGURAS 30A E 30B.

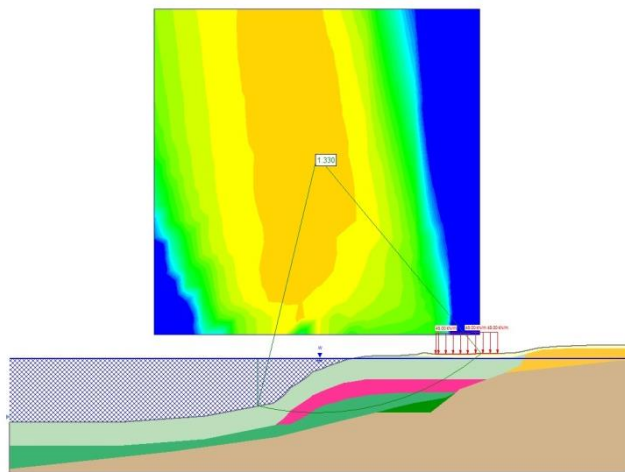
Tabela Resumo das Análises de Estabilidade

	S_u (kPa)		S_u Bjerrum (kPa)
	Leste	Oeste	Oeste
Sobrecarga (kPa)	FS		
0	1,42	1,68	1,26
24	1,4	1,66	1,26
48	1,33	1,59	1,22
72	1,24	1,51	1,17
96	1,16	1,43	1,12
120	1,08	1,36	1,03
132	1,05	1,28	
144	1,01	1,2	0,9
168		1,06	

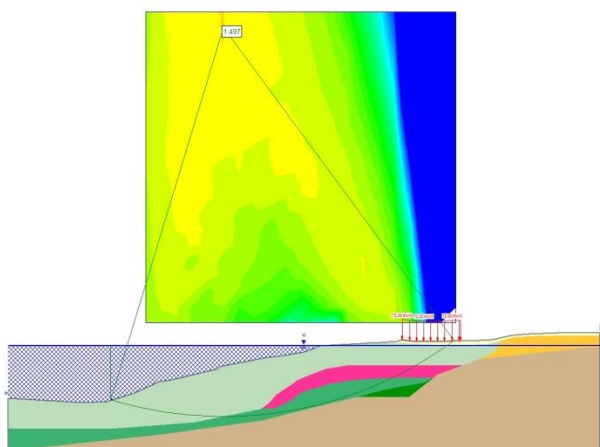
7.1 Seção Leste – Parâmetros médios



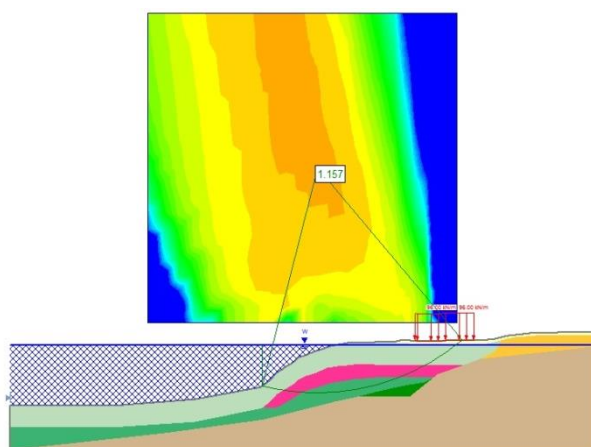
(a) Sobrecarga 24kPa



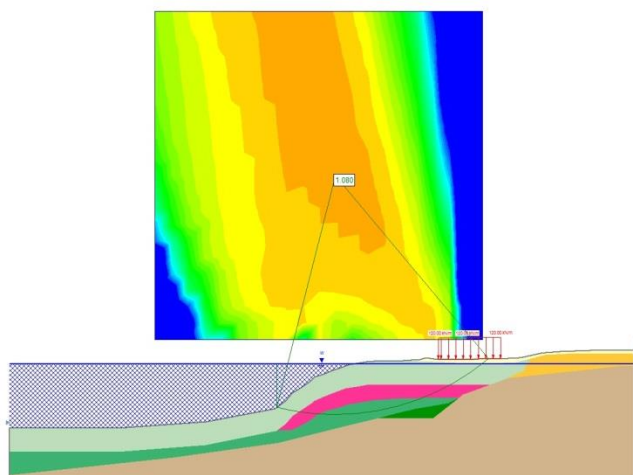
(b) Sobrecarga 48kPa



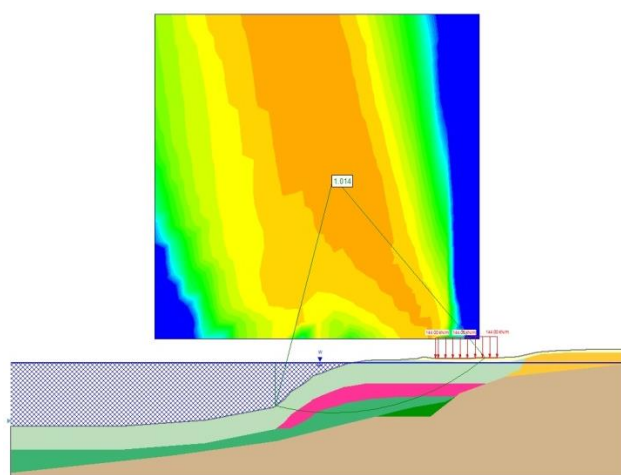
(c). Sobrecarga 72kPa.



(d) Sobrecarga 96kPa

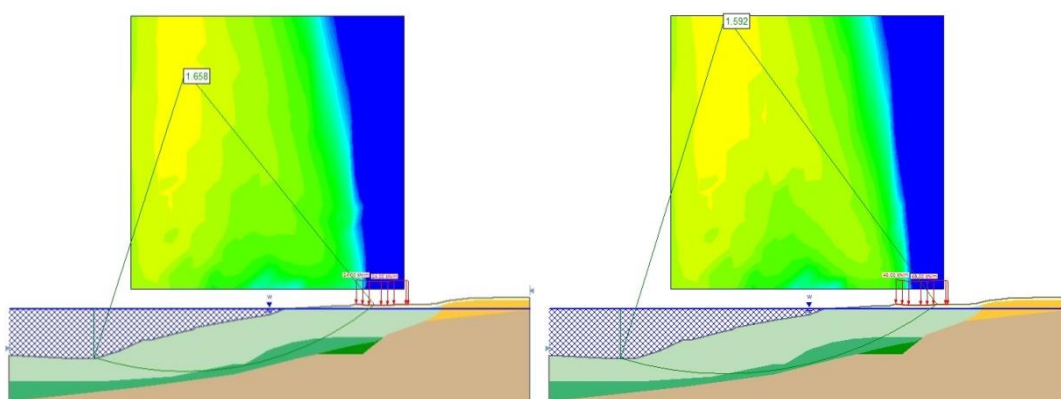


(e). Sobrecarga 120kPa

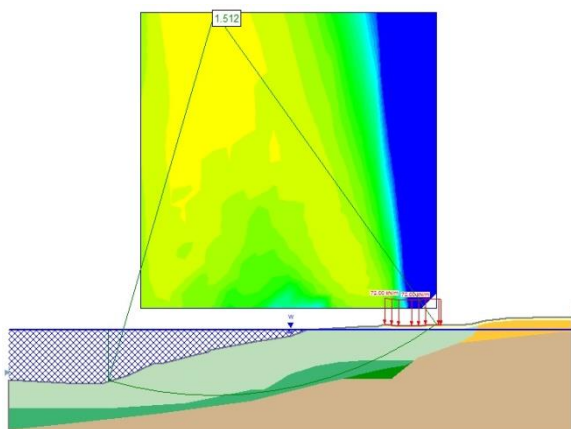


(e). Sobrecarga 144kPa

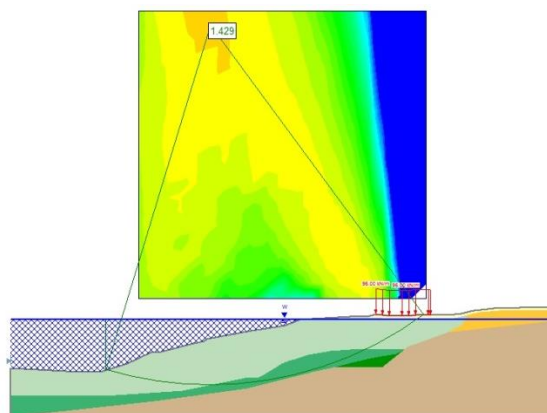
7.2 Seção Oeste – Parâmetros médios



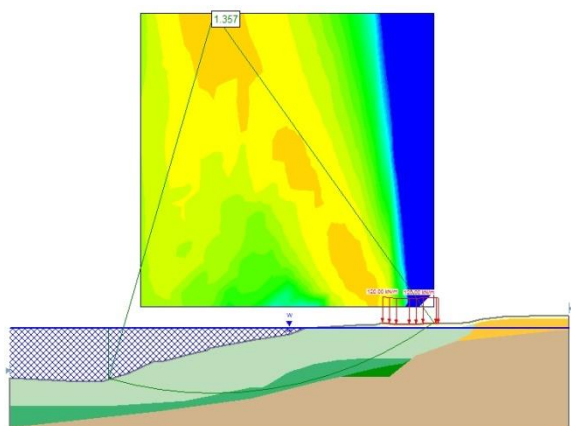
(a) Sobrecarga 24kPa



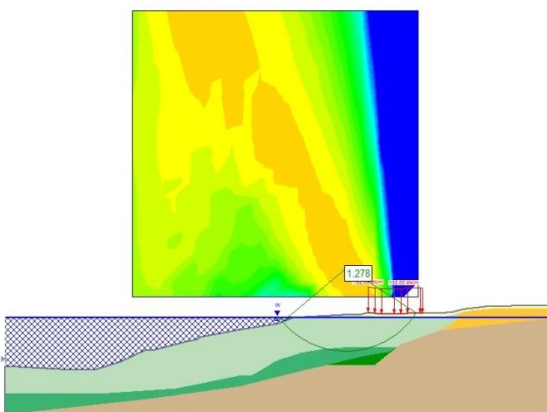
(b) Sobrecarga 48kPa



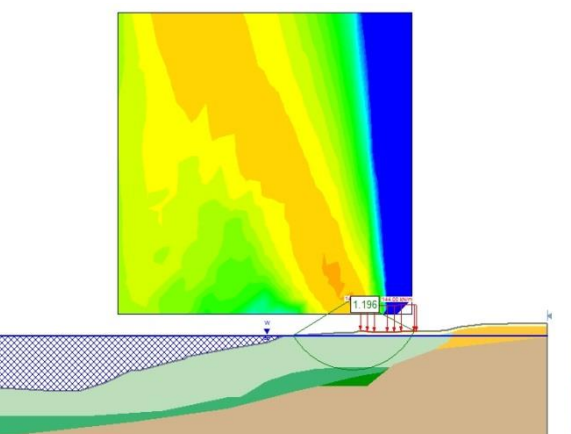
(c). Sobrecarga 72kPa.



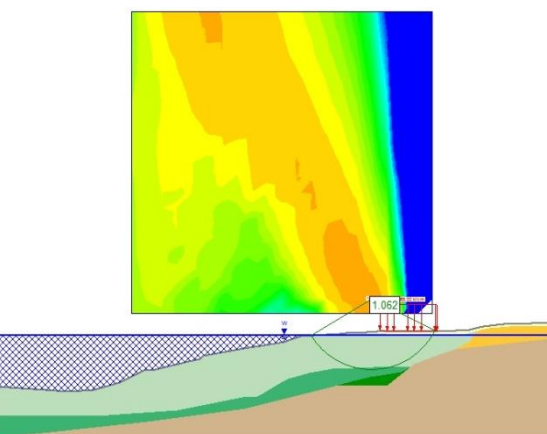
(d) Sobrecarga 96kPa



(e). Sobrecarga 120kPa



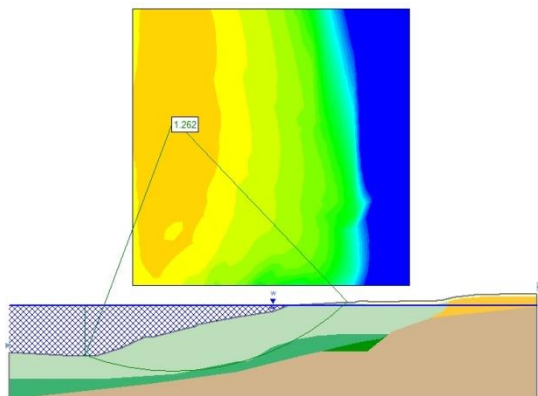
(f). Sobrecarga 132kPa



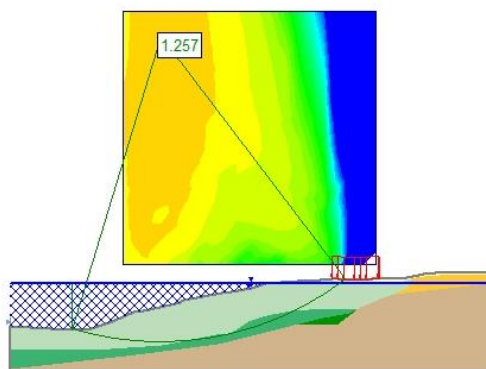
(e). Sobrecarga 144kPa

(f). Sobrecarga 168kPa

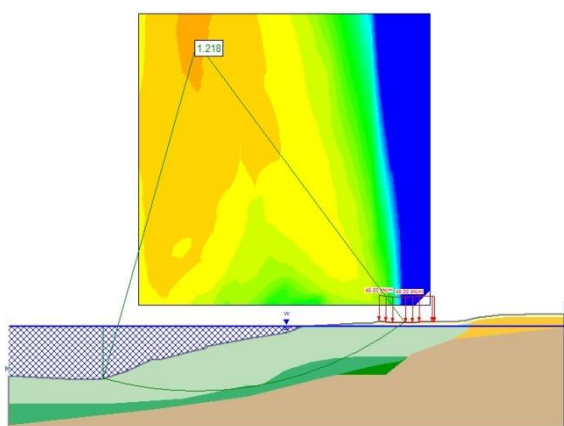
7.3 Seção Oeste – Parâmetros reduzidos



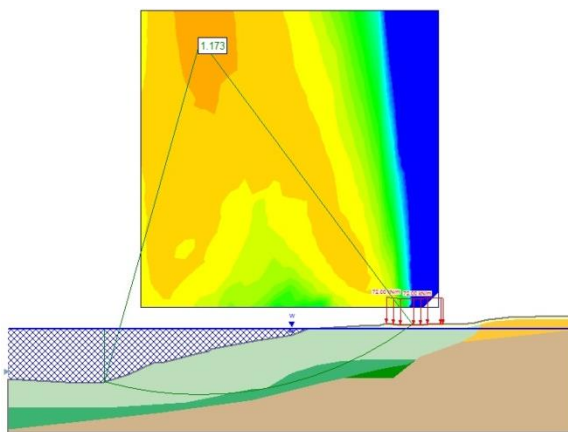
(a) Sobrecarga 0kPa



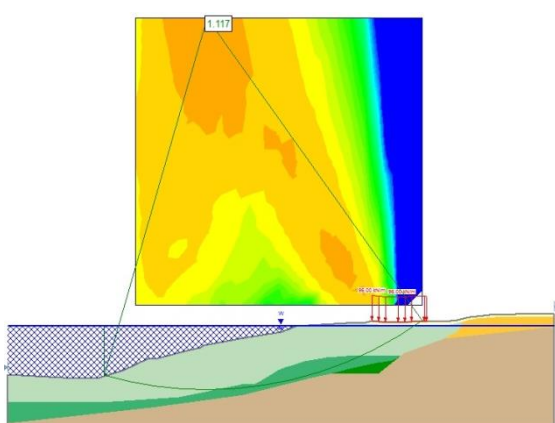
(b) Sobrecarga 24kPa



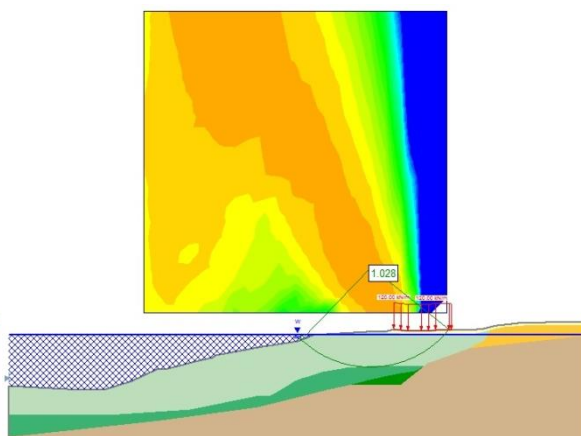
(c). Sobrecarga 48kPa.



(d)Sobrecarga 72kPa



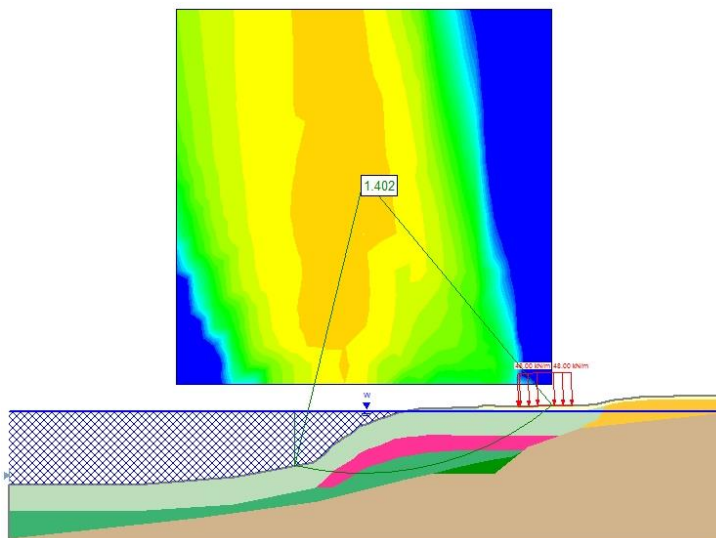
(e). Sobrecarga 96kPa .



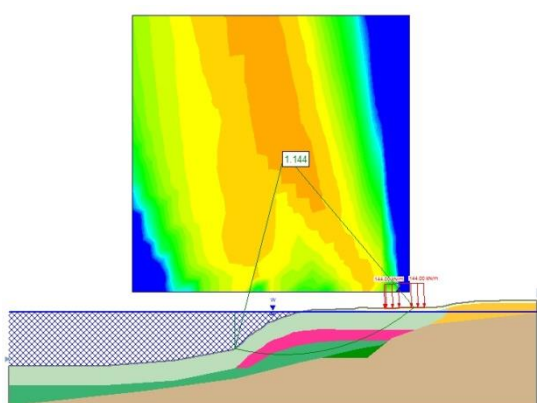
(d)Sobrecarga 120kPa

8- ANEXO 3- ANÁLISES DE ESTABILIDADE PARA A FIGURA 32.

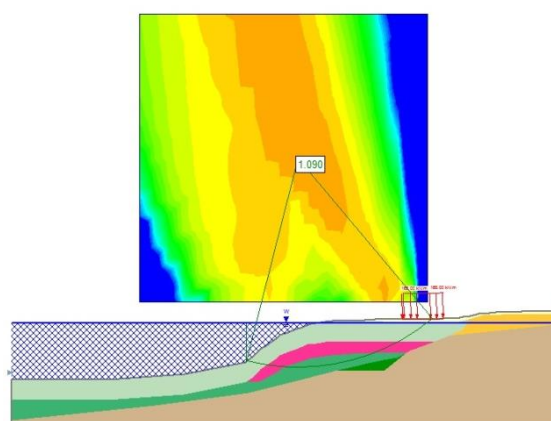
Seção Leste – Análises com Parâmetros Médios – Pilhas com 30 m de extensão.



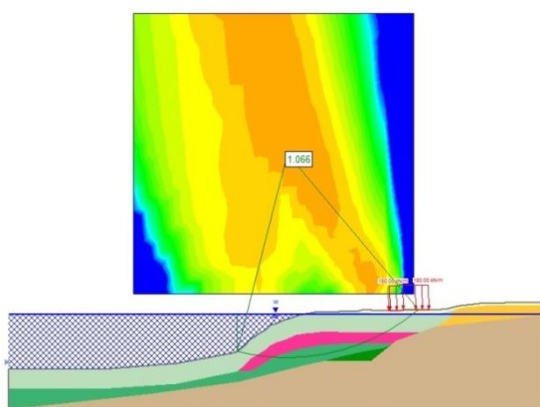
(a) Sobrecarga 48kPa



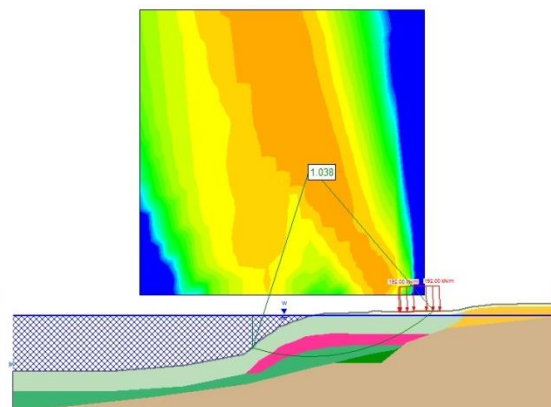
(b) Sobrecarga 144kPa



(c) Sobrecarga 168kPa



(d) Sobrecarga 180kPa



(e) Sobrecarga 192kPa