



PETROBRAS

**ANÁLISES DE ESTABILIDADE DE TALUDES PARA ROTA
DE GASODUTO AO LONGO DO CÂNION GOYTACÁ NO
CAMPO DE ESPADARTE**

CT MC nº 014/2005

Comunicação Técnica

P & D DE PRODUÇÃO

Métodos Científicos

Novembro de 2005



CENPES

Centro de Pesquisas e Desenvolvimento

Leopoldo A. Miguez de Mello

CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO LEOPOLDO A. MIGUEZ DE MELLO
P & D DE PRODUÇÃO
Métodos Científicos

AT-00003.02.0004 – Análise de estabilidade para gasoduto em Espadarte.

**ANÁLISES DE ESTABILIDADE DE TALUDES PARA ROTA DE
GASODUTO AO LONGO DO CÂNION GOYTACÁ NO CAMPO DE
ESPADARTE**

CT MC Nº 014/2005

Relator

Ricardo Garske Borges (CENPES/PDP/MC)

Colaboradores

Cláudio dos Santos Amaral (CENPES/PDP/MC)

Leopoldo Machado Paganelli (CENPES/PDP/MC)

Cliente

Paulo César Alves dos Santos (UN-BC/ATP-C/EE)

Rio de Janeiro
Novembro de 2005

SUMÁRIO

Resumo	iv
1. Introdução.....	5
2. Dados do problema	6
2.1. Batimetria e visão geral da área em estudo	6
2.2. Seções geológicas	7
2.3. Propriedades geotécnicas	10
2.3.1. Furo GT/JPC-693	12
2.3.2. Furo GT/JPC-694	13
2.3.3. Furo GT/JPC-695	15
3. Análises de equilíbrio limite	18
3.1. Método de Morgenstern-Price	20
3.2. Análise da seção AA'	23
3.3. Análise da seção BB'	27
3.4. Análise da seção CC'	31
4. Conclusões.....	36
Referências bibliográficas.....	38

RESUMO

A instalação de um gasoduto no campo petrolífero *offshore* de Espadarte, na Bacia de Campos, ligando o futuro FPSO que ficará no poço 1-RJS-409 ao FPSO-Espadarte, necessita atender às exigências de segurança e meio ambiente, devendo para isso também ser avaliada a estabilidade do piso marinho ao longo da rota deste duto, a fim de se certificar de sua segurança quanto a riscos geológicos e geotécnicos, ou mais especificamente, o risco de deslizamento de taludes naturais submarinos.

Nesta Comunicação Técnica do AT-00003.02.0004 – Análise de estabilidade para gasoduto em Espadarte, são apresentados os resultados das verificações geotécnicas de estabilidade de um dos flancos do Cânion Goytacá, tendo sido analisadas três seções geológicas consideradas críticas quanto à estabilidade de taludes, utilizando-se de dados geotécnicos obtidos da Campanha de Investigação Geológico-Geotécnica do navio Fugro Explorer realizada em 2005.

Essas análises de estabilidade de taludes foram efetuadas com o auxílio de um *software* especializado, tendo-se verificado que o duto encontra-se com boa margem de segurança contra eventuais deslizamentos do flanco do Cânion Goytacá, podendo ser mantida sua diretriz atual. Entretanto, foi estimado o afastamento necessário a ser dado ao gasoduto em relação à borda do cânion, buscando dessa forma contribuir para uma redução da extensão do duto e de custos a serem debitados ao projeto.

1 INTRODUÇÃO

O Campo de Espadarte está situado na Bacia de Campos, a sudoeste do Campo de Barracuda, em profundidades de água variando de 750 a 1.500 m. Possui uma área de 728 km², distando cerca de 110 km do litoral norte do Estado do Rio de Janeiro.

A UN-BC/ATP-C/SMS, quando da execução do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) que subsidiará a obtenção de licenças ambientais para a instalação e operação de um duto que exportará gás da futura unidade de produção FPSO que ficará no poço 1-RJS-409 para o FPSO-Espadarte e daí a plataforma P-15, precisa apresentar uma justificativa técnica para a escolha da diretriz deste gasoduto, bem como medidas a serem adotadas para a minoração de riscos de instabilidade geológica.

De modo a atender às exigências do IBAMA para este duto, o CENPES/PDP/MC abriu uma Assistência Técnica e Científica no Módulo de Projetos do SAP R/3, sob o número AT-00003.02.0004 – Análise de estabilidade para gasoduto em Espadarte⁽¹⁾, com o objetivo de realizar avaliações de estabilidade do piso marinho, certificando-se dessa forma quanto à segurança do futuro gasoduto no que concerne a riscos geológicos e geotécnicos, ou seja, o risco de deslizamento de taludes naturais submarinos ao longo do traçado do duto.

Foram utilizados dados geotécnicos provenientes da Campanha de Investigação Geológico-Geotécnica realizada no Campo de Espadarte no início de outubro de 2005, pela Fugro-McClelland Marine Geosciences Inc., através do navio geotécnico Fugro Explorer.

A partir desses dados, foi analisada a estabilidade de três seções sísmicas consideradas críticas, calculando-se para cada uma delas o fator de segurança associado à superfície de escorregamento crítica.

Essas análises de estabilidade de taludes foram efetuadas com o auxílio de um *software* especializado, com o objetivo de prever o afastamento necessário a ser dado ao novo gasoduto em relação à borda do Cânion Goytacá, de modo a minorar o risco de um eventual deslizamento do flanco deste cânion que pode atingir o duto, podendo assim contribuir para uma redução de extensão do duto e de custos a serem debitados ao projeto.

2 DADOS DO PROBLEMA

2.1 BATIMETRIA E VISÃO GERAL DA ÁREA EM ESTUDO

A figura 1 mostra o mapa de batimetria da região abrangida pelos intervalos de coordenadas UTM entre 345.000 e 365.000 m na direção Este, e entre 7.470.000 e 7.487.500 m na direção Norte, onde está representado o traçado do duto de exportação de gás de 6" a ser lançado no Campo de Espadarte, ligando o futuro FPSO que ficará no poço 1-RJS-409 ao FPSO-Espadarte, e deste à plataforma P-15 no Campo de Piraúna. Neste mapa, verifica-se que o duto segue ao lado de um cânion, o Cânion Goytacá:

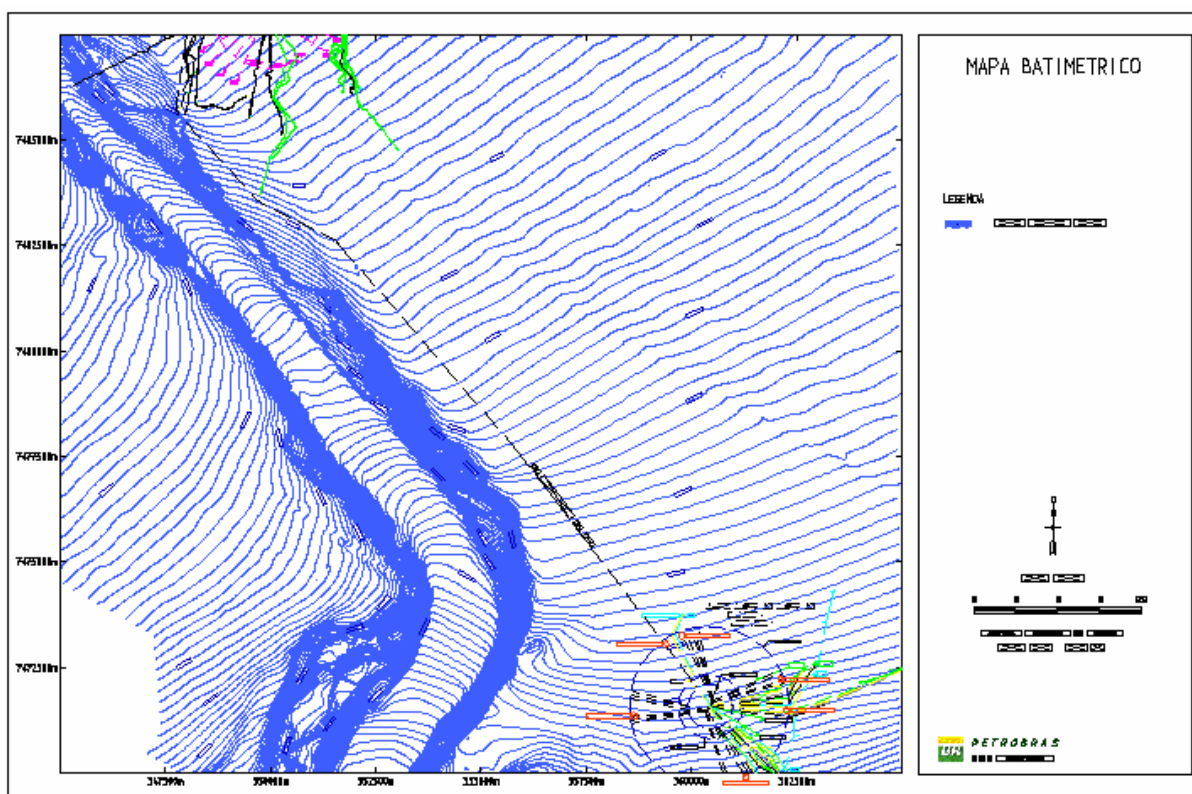


Figura 1 – Batimetria do Campo de Espadarte.

A figura 2 a seguir apresenta o Mapa de Declividades do Campo de Espadarte, o qual foi importante na etapa de escolha da locação das seções estratigráficas a serem modeladas, bem como dos furos geotécnicos a serem executados na área:

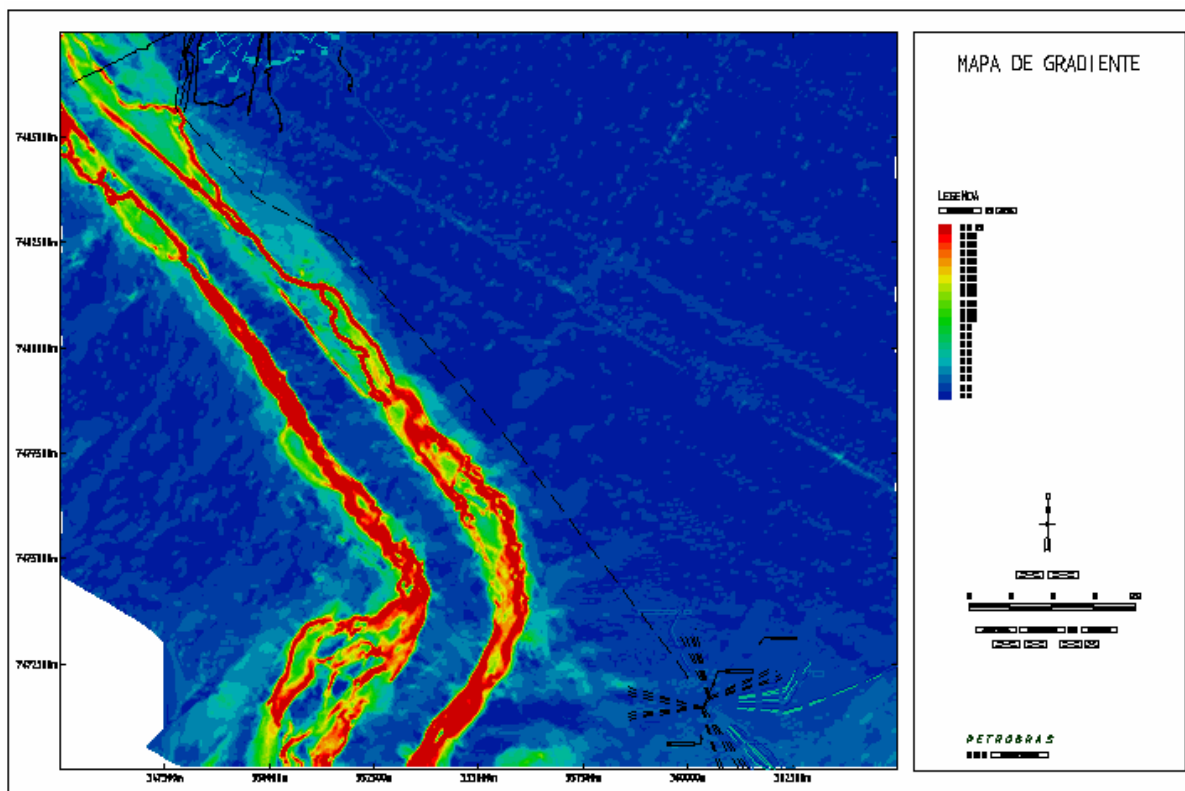


Figura 2 – Mapa de gradientes batimétricos do Campo de Espadarte, ao longo do Cânion Goytacá.

2.2 SEÇÕES GEOLÓGICAS

Foram identificadas as feições fisiográficas que pela declividade, proximidade do duto e direção de potenciais movimentos de massa poderiam colocar em risco a futura linha de escoamento. Assim, as posições das seções AA', BB' e CC' foram escolhidas de modo que suas direções fossem aproximadamente ortogonais às linhas isóbatas, obtendo-se seções que passassem pelos pontos de maiores declividades, isto é, pelos pontos de maior gradiente batimétrico, onde as linhas batimétricas estão mais juntas umas das outras. Nestes casos, o duto passa junto à crista do talude, e as seções foram locadas de modo a estudar o risco de possíveis deslizamentos do flanco do cânion que está mais próximo à diretriz do gasoduto.

Para cada seção geológica selecionada, as coordenadas UTM de suas extremidades e a respectiva extensão, correspondente à distância horizontal abrangida pela seção, estão indicadas na Tabela I. A extremidade inicial da seção, em projeção horizontal, tem coordenadas (X_1, Y_1) , e a extremidade final, coordenadas (X_2, Y_2) :

TABELA I

Coordenadas UTM das extremidades das seções geológicas e suas respectivas larguras (em metros) – Borges⁽²⁾

Seção	X ₁	Y ₁	X ₂	Y ₂	Extensão
AA'	346.738	7.484.393	348.878	7.486.350	2.899,90
BB'	348.850	7.482.292	350.889	7.484.168	2.770,72
CC'	350.733	7.480.259	352.082	7.483.236	3.268,38

A figura 3 mostra em detalhe a região do Campo de Espadarte próxima ao FPSO-Espadarte, com o traçado das seções estratigráficas AA', BB' e CC', consideradas críticas para análise de estabilidade de taludes, tendo em vista a proximidade do duto em relação ao Cânion Goytacá neste trecho. Nesta figura, podem-se ver também as locações dos furos GT/JPC-693, GT/JPC-694 e GT/JPC-695:

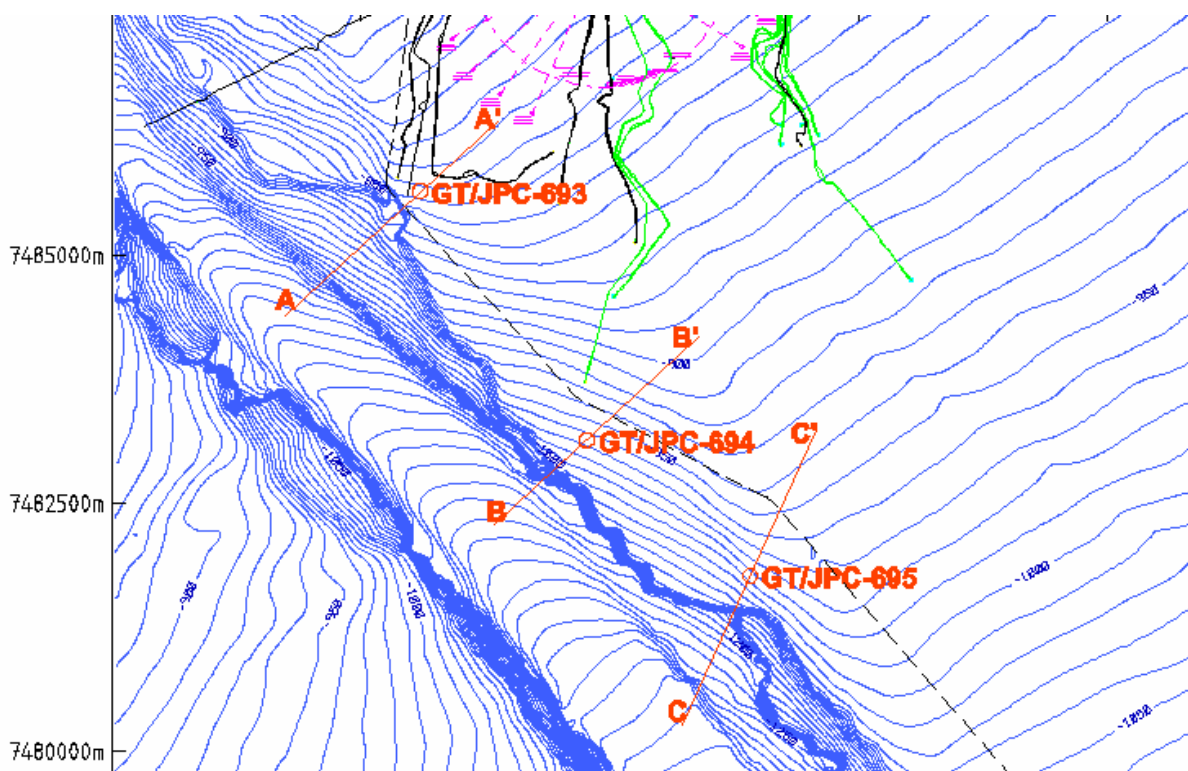


Figura 3 – Representação das seções estratigráficas AA', BB' e CC' no Mapa Batimétrico do Campo de Espadarte, com a locação dos furos de sondagem GT/JPC-693, GT/JPC-694 e GT/JPC-695.

Essas seções geológicas foram obtidas a partir de dados de sísmica 3D convencional, e foram levantadas por Marcos da Silva, Marco Aurélio Merschmann e Ana Cristina Vieira, da E&P-SERV/US-SUB/GM⁽³⁾.

As estratigrafias das referidas seções, usadas para definição geométrica do problema na modelagem para análise de estabilidade de taludes pelo SLOPE/W⁽⁴⁾, são exibidas nas figuras 4, 5 e 6:

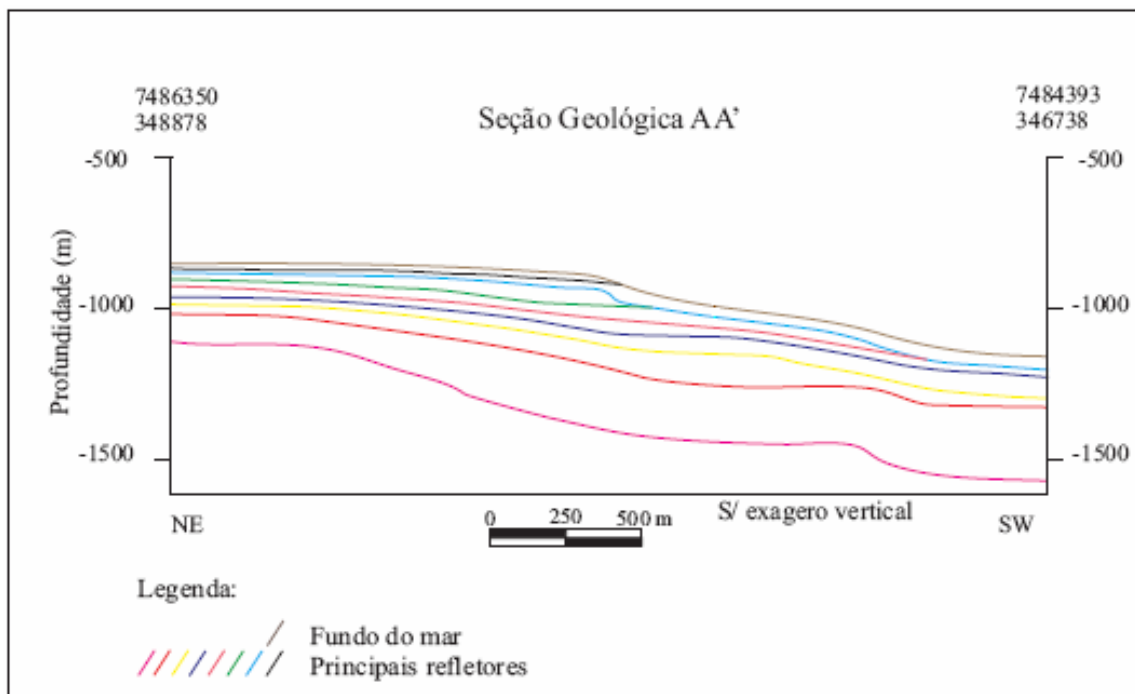


Figura 4 – Seção geológica AA'.

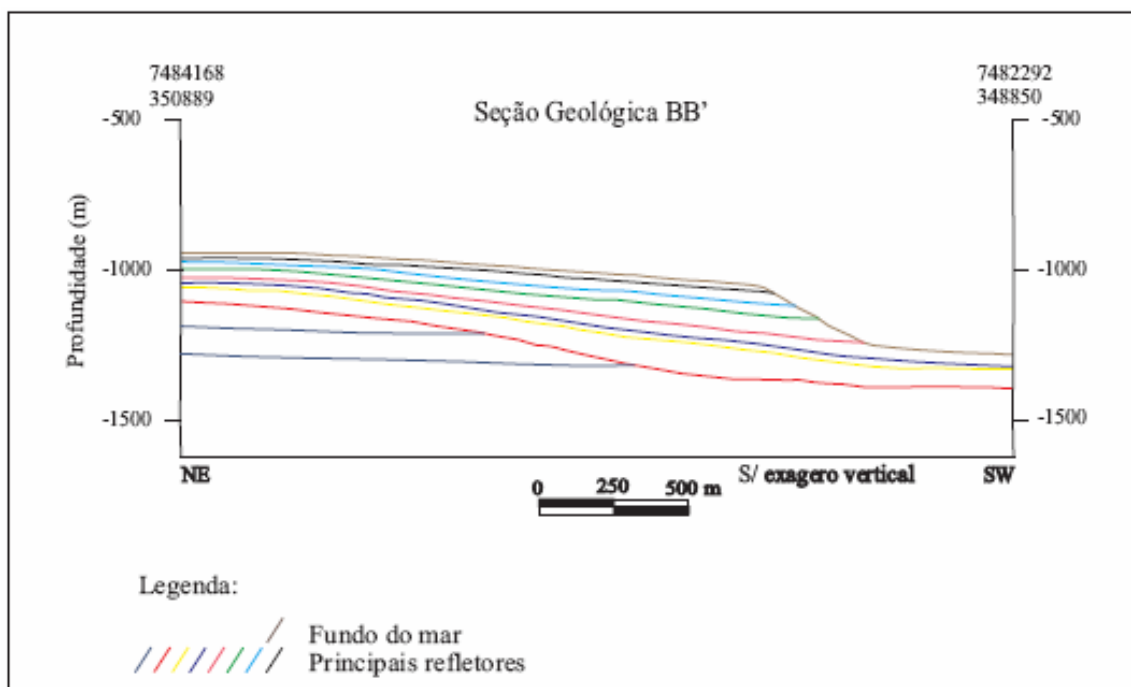


Figura 5 – Seção geológica BB'.

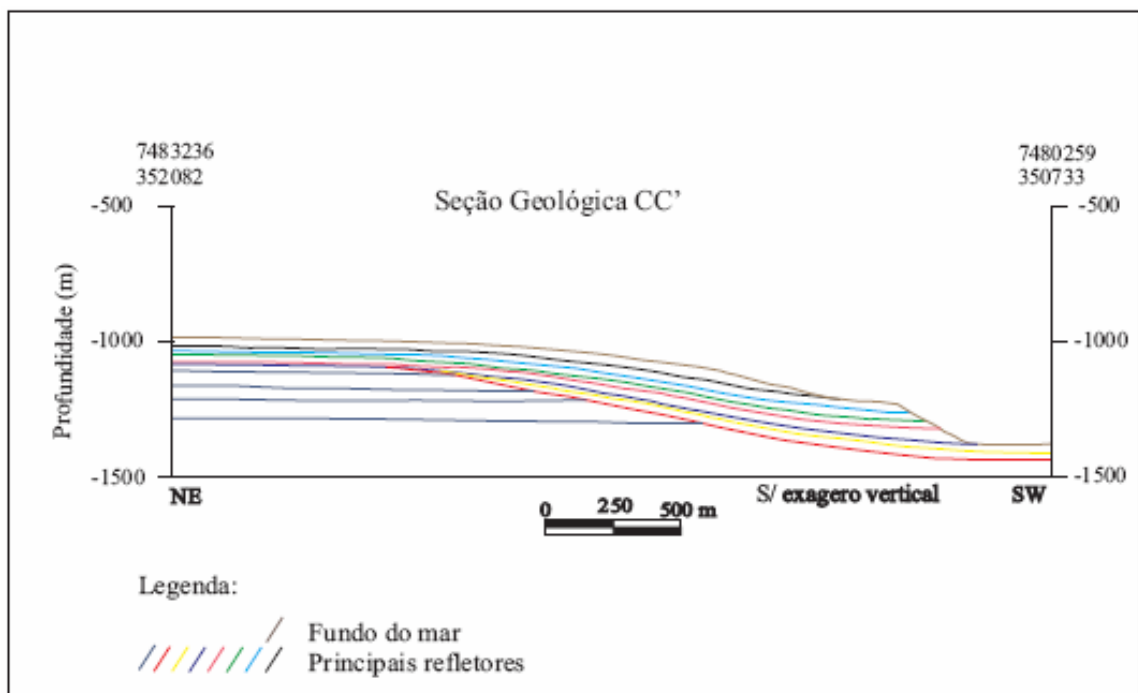


Figura 6 – Seção geológica CC'.

2.3 PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS

Como mostrou a figura 3, as seções geológicas e furos geotécnicos estão localizados próximos ao flanco do Cânion Goytacá (seções AA', BB' e CC' / furos GT/JPC-693, 694 e 695), em frente a um fundo marinho bastante plano, horizontal e homogêneo. Em função da proximidade da locação dos furos de sondagem em relação às seções geológicas escolhidas para análises de estabilidade de taludes, selecionaram-se os seguintes furos para a análise de cada uma das seções AA', BB' e CC', conforme Tabela II:

TABELA II

Furos de sondagem escolhidos para a análise de estabilidade de seções geológicas ao longo da rota de gasoduto a ser lançado no Campo de Espadarte – Borges⁽⁵⁾

Seção geológica	Furo de sondagem
AA'	GT/JPC-693
BB'	GT/JPC-694
CC'	GT/JPC-695

A Tabela III apresenta as locações dos furos de sondagem escolhidos para as análises de estabilidade de taludes ao longo da diretriz do gasoduto a ser lançado no Campo de Espadarte, próximo ao Cânion Goytacá. Posto que as cargas atuantes no talude mobilizam a resistência na região acima do sopé do talude e, em grande

parte nas suas proximidades, as propriedades mecânicas significativas são, por essa razão, aquelas ao longo dos furos geotécnicos situados nestas regiões do maciço, que são os furos GT/JPC-693, GT/JPC-694 e GT/JPC-695 – situados na crista dos taludes das seções AA', BB' e CC', respectivamente:

TABELA III

Locações dos furos geotécnicos selecionados para análises de estabilidade de taludes ao longo de rota de gasoduto no Campo de Espadarte – Borges⁽⁵⁾

Furo	Coordenada E (m)	Coordenada N (m)	PDA (m)	Penetração / Recuperação (m)
GT-693	348.101,34	7.485.640,34	827,00	40,94
JPC-693	348.096,93	7.485.643,70	827,00	18,60
GT-694	349.772,89	7.483.131,67	968,00	41,50
JPC-694	349.770,86	7.483.136,61	968,00	18,50
GT-695	351.414,52	7.481.770,09	995,00	41,10
JPC-695	351.412,74	7.481.765,58	995,00	18,60

Obs.: Datum: Aratu Esferóide: Hayford UTM: 24S MC: 39W

Estes furos foram executados como parte da Campanha de Investigação Geológico-Geotécnica do navio Fugro Explorer na Bacia de Campos, no início do mês de outubro de 2005. Na Tabela III apresentada, quanto aos tipos de investigação empregadas nestes furos, foi feito o ensaio de PCPT contínuo nos ensaios GT, e de amostragem geotécnica contínua e ensaios de laboratório nos ensaios do tipo JPC.

Estes furos foram escolhidos para representar o perfil geotécnico de propriedades mecânicas a ser usado para fornecer os dados de entrada para o programa SLOPE/W⁽⁴⁾, na definição do problema de estabilidade a ser analisado no que concerne a propriedades geomecânicas. As propriedades dos materiais, camada por camada, obtidas por estas sondagens geotécnicas, juntamente com a geometria da seção geológica e cargas aplicadas definem o problema de estabilidade a ser modelado computacionalmente para análise pelo *software* especializado SLOPE/W.

Nos subitens 2.3.1 a 2.3.3 a seguir, são apresentados os gráficos de resistência não-drenada *versus* profundidade (a partir de dados interpretados de ensaios de PCPT), e de peso específico submerso *versus* profundidade (obtido de ensaios de laboratório de bordo com amostras de solo indeformadas coletadas com amostrador do tipo JPC), para os furos GT/JPC-693, GT/JPC-694 e GT/JPC-695, respectivamente. Todos os parâmetros geotécnicos interpretados destes ensaios podem ser consultados em Borges⁽⁵⁾.

2.3.1 Furo GT/JPC-693

O furo geotécnico GT-693 se localiza nas coordenadas UTM E 348.101,34 m e N 7.485.640,34 m, em lâmina d'água de 827 m, com penetração de 40,94 m. Seu gráfico de resistência ao cisalhamento não-drenada *versus* profundidade pode ser visto abaixo na figura 7:

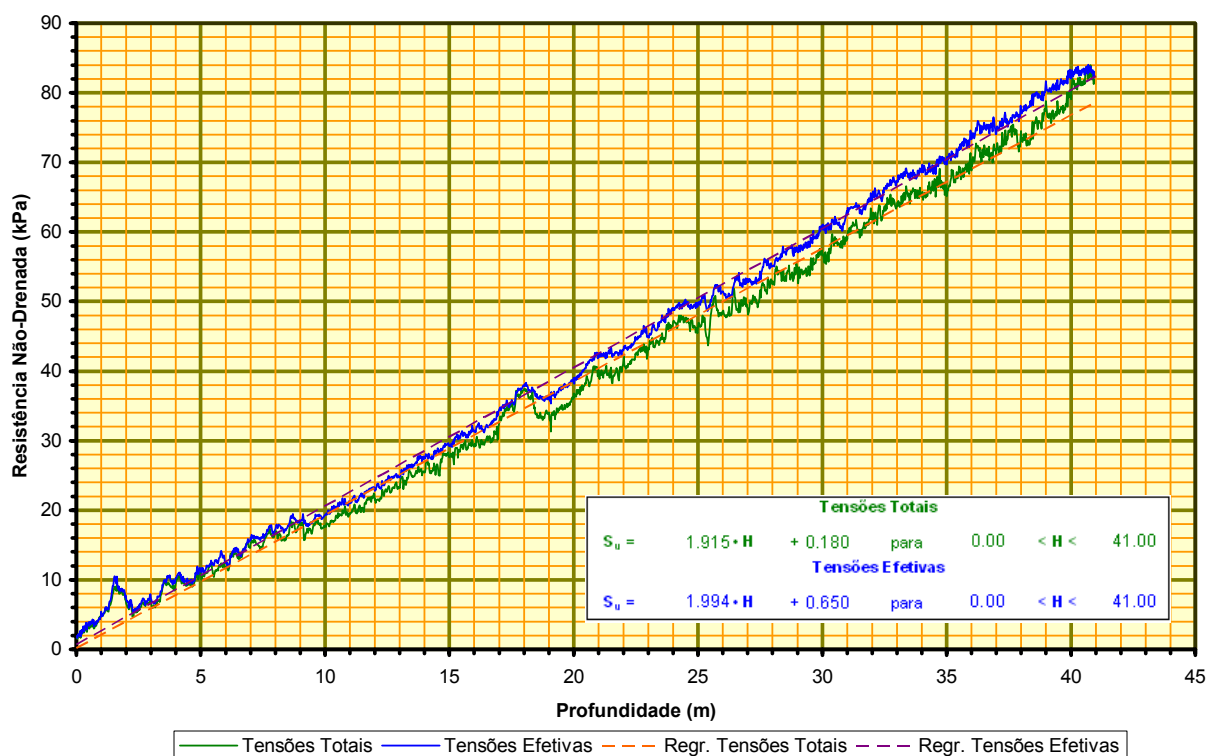


Figura 7 – Perfil de resistência não-drenada do furo GT-693.

A figura 8 apresenta o gráfico de peso específico submerso *versus* profundidade para o furo JPC-693, o qual se localiza nas coordenadas UTM E 348.096,93 e N 7.485.643,70 m, em lâmina d'água de 827 m, com recuperação de 18,60 m. O peso específico submerso (γ') foi obtido através de ensaios de bordo com amostras de solo indeformadas, sendo seu valor médio estimado em 5,2619 kN/m³:

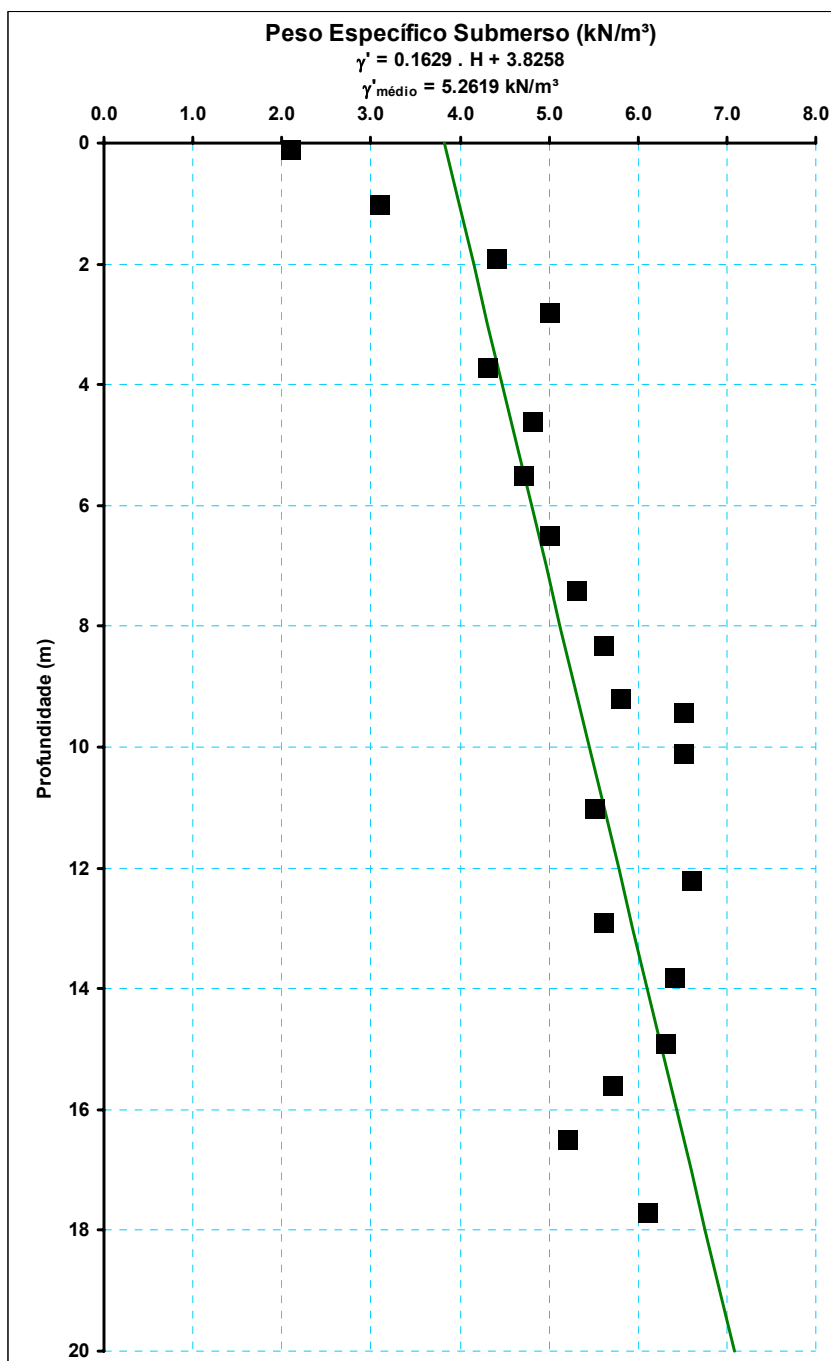


Figura 8 – Perfil de peso específico submerso para o furo JPC-693.

2.3.2 Furo GT/JPC-694

O furo geotécnico GT-694 se localiza nas coordenadas UTM E 349.772,89 m e N 7.483.131,67 m, em lâmina d'água de 968 m, com penetração de 41,50 m. Seu gráfico de resistência ao cisalhamento não-drenada *versus* profundidade pode ser visto na figura 9:

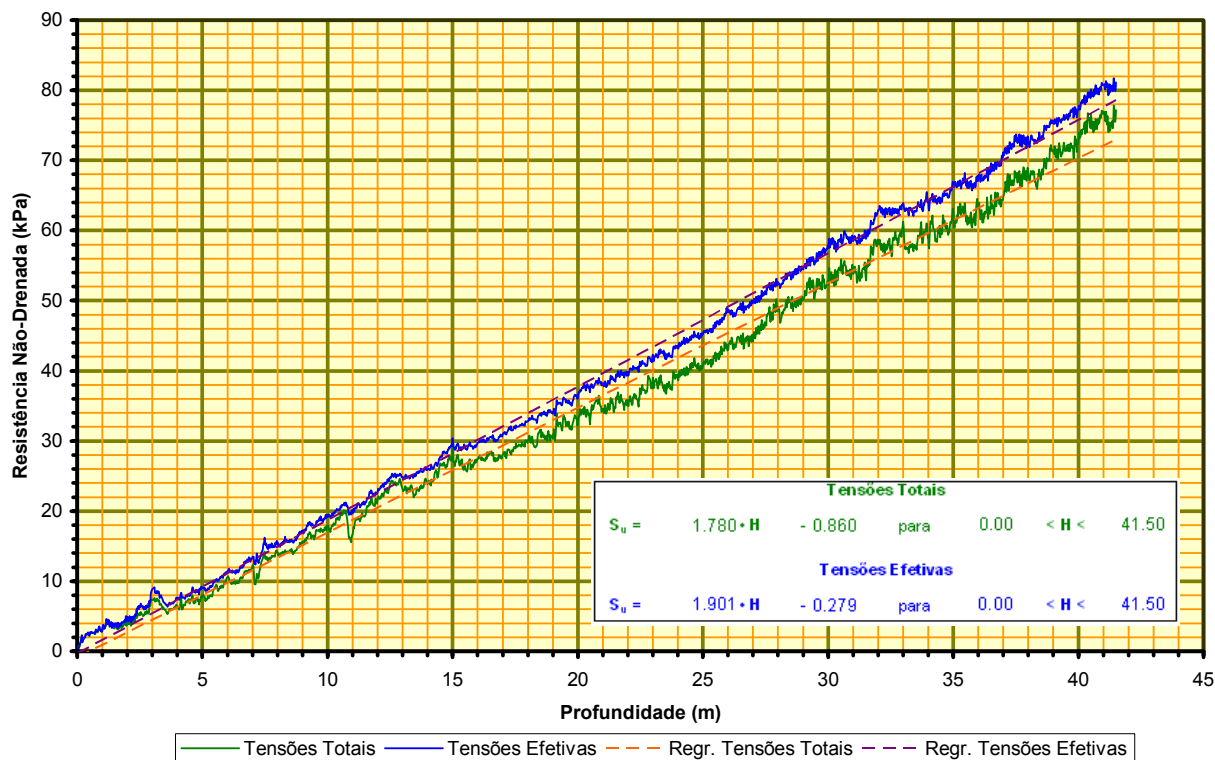


Figura 9 – Perfil de resistência não-drenada do furo GT-694.

A figura 10 apresenta o gráfico de peso específico submerso *versus* profundidade para o furo JPC-694, o qual se localiza nas coordenadas UTM E 349.770,86 e N 7.483.136,61 m, em lâmina d'água de 968 m, com recuperação de 18,50 m. O peso específico submerso (γ') foi obtido através de ensaios de bordo com amostras de solo indeformadas, sendo seu valor médio estimado em 5,0350 kN/m³:

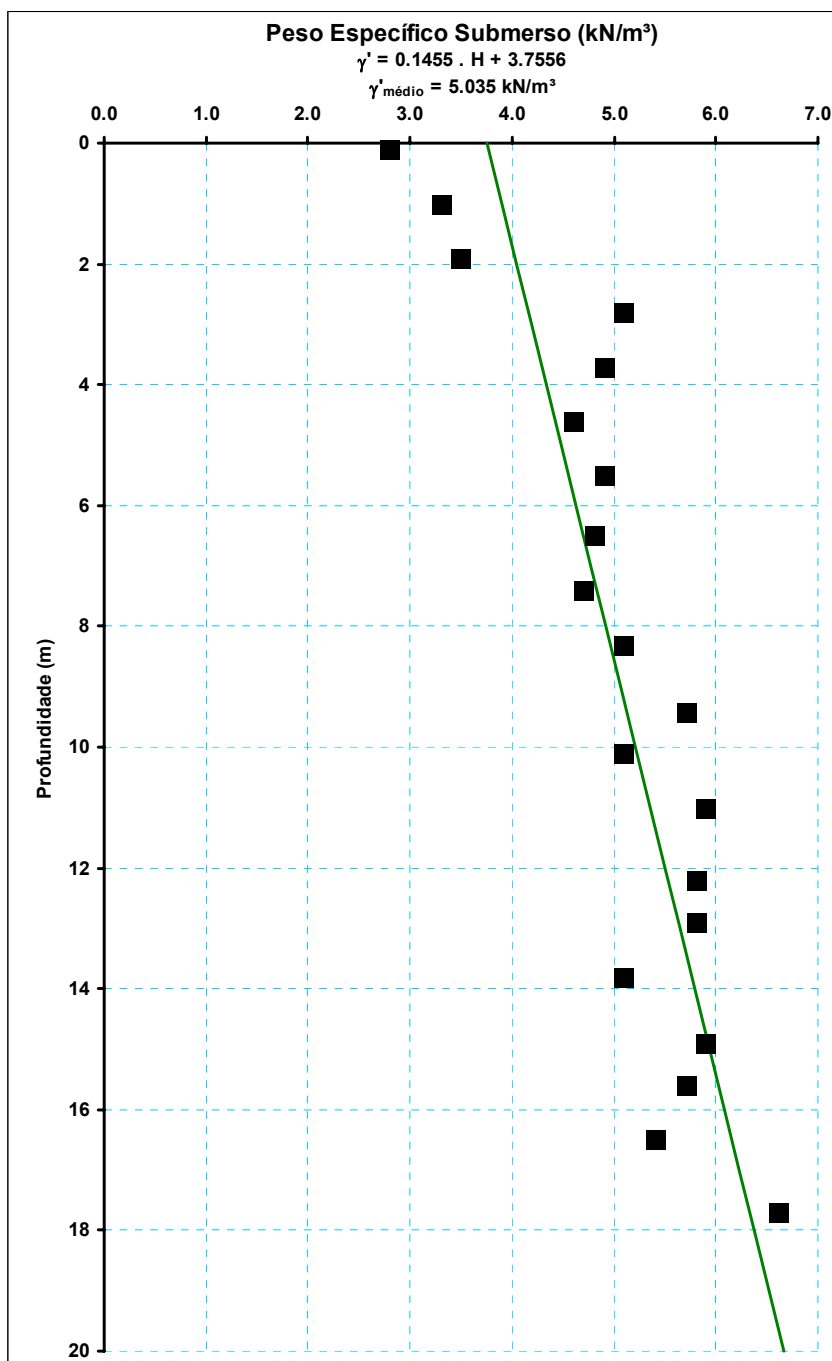


Figura 10 – Perfil de peso específico submerso para o furo JPC-694.

2.3.3 Furo GT/JPC-695

O furo geotécnico GT-695 se localiza nas coordenadas UTM E 351.414,52 m e N 7.481.770,09 m, em lâmina d'água de 995 m, com penetração de 41,10 m. Seu gráfico de resistência ao cisalhamento não-drenada *versus* profundidade pode ser visto na figura 11:

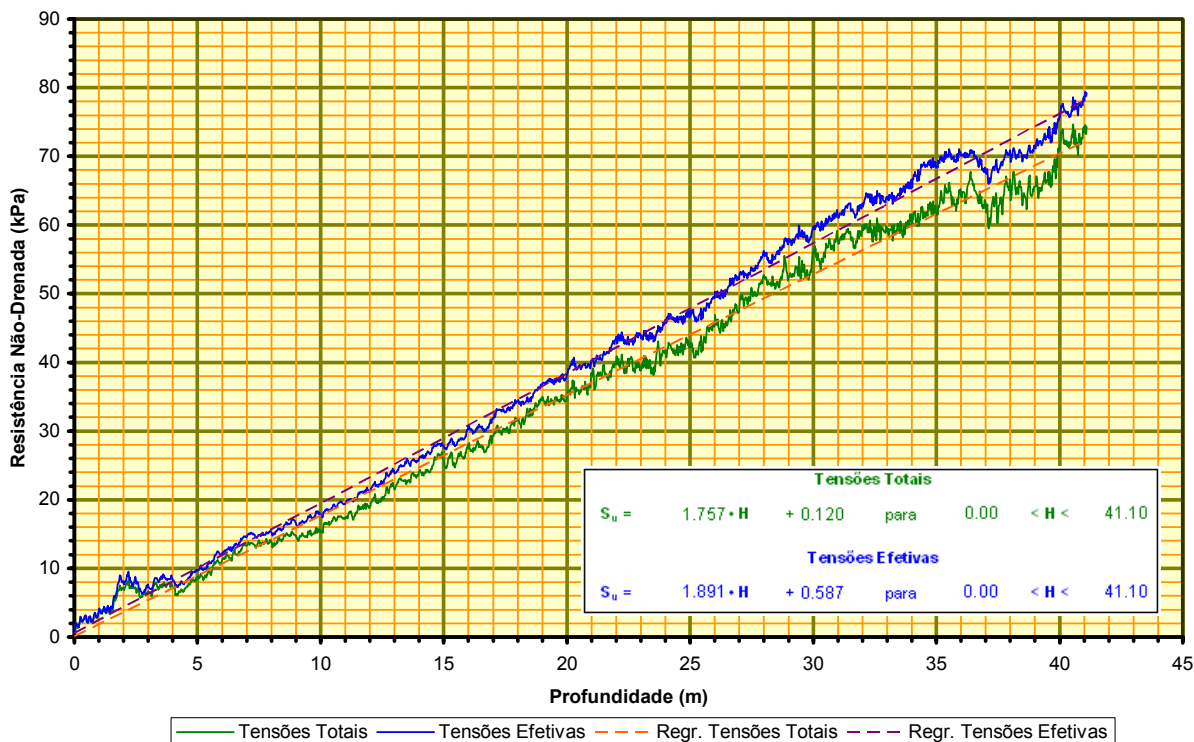


Figura 11 – Perfil de resistência não-drenada do furo GT-695.

A figura 12 apresenta o gráfico de peso específico submerso *versus* profundidade para o furo JPC-695, o qual se localiza nas coordenadas UTM E 351.412,74 e N 7.481.765,58 m, em lâmina d'água de 995 m, com recuperação de 18,60 m. O peso específico submerso (γ') foi obtido através de ensaios de bordo com amostras de solo indeformadas, sendo seu valor médio estimado em 5,1435 kN/m³:

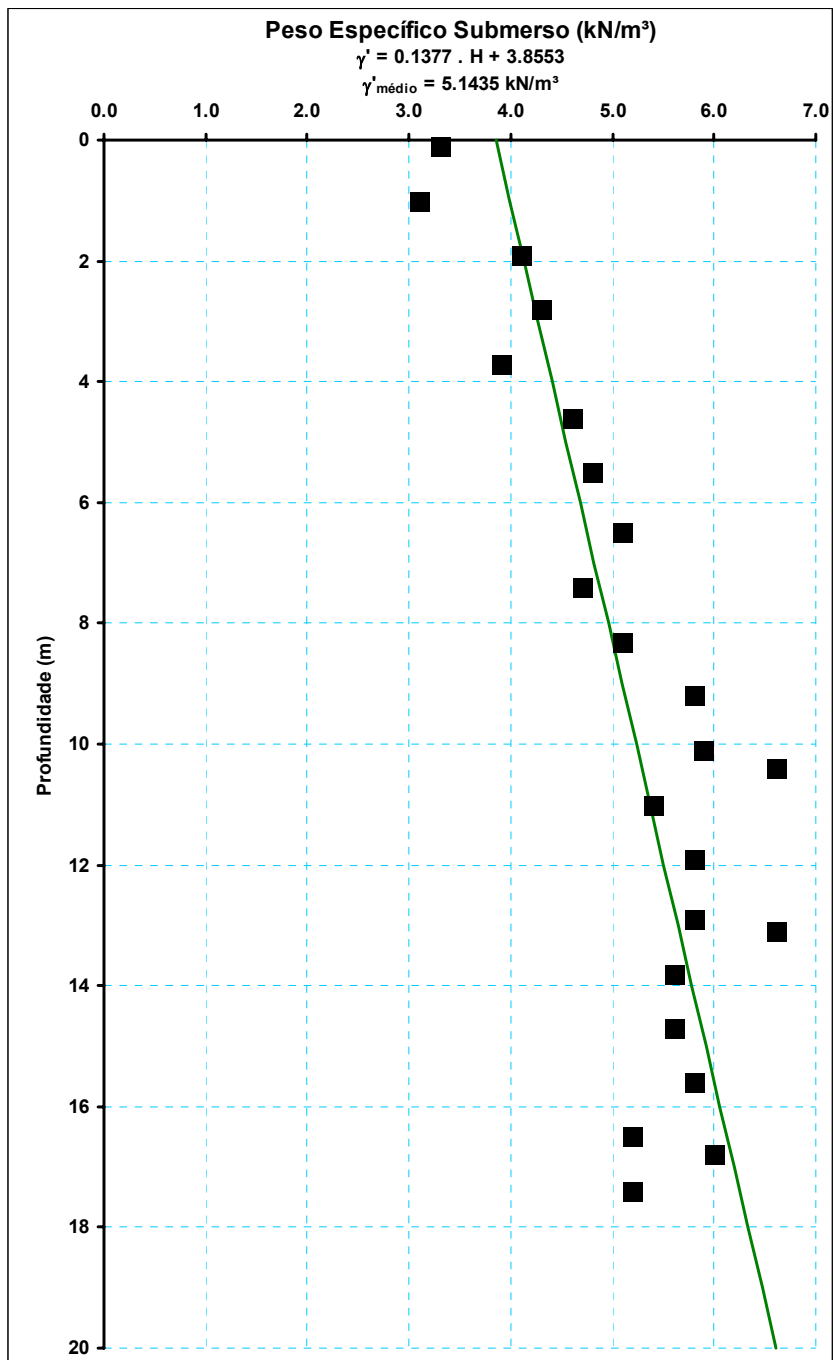


Figura 12 – Perfil de peso específico submerso para o furo JPC-695.

3 ANÁLISES DE EQUILÍBRIO LIMITE

A técnica analítica mais empregada em análises de estabilidade de taludes é a do equilíbrio limite, por meio da qual condições de equilíbrio de forças e/ou momentos são examinadas com base estática. Estas análises requerem informação sobre a resistência do material, mas não do comportamento tensão-deformação. O Método dos Elementos Finitos⁽⁶⁾, por exemplo, exige a definição do comportamento das tensões em função das deformações, e até mesmo da história das deformações em materiais que apresentam plasticidade.

Dada a dificuldade de obtenção experimental do comportamento tensão-deformação dos materiais geológicos, geralmente não-linear, e as incertezas experimentais na obtenção dos parâmetros de resistência e de rigidez, em que o erro dos métodos de equilíbrio limite mais avançados como o de Morgenstern-Price⁽⁷⁾ e o General Limit Equilibrium (GLE)^(8,9) é inferior a 6%, pelas hipóteses mais restritivas adotadas por estes métodos na solução da indeterminação hiperestática nas equações de equilíbrio, na maioria dos casos práticos o erro contido na determinação, *in situ* ou no laboratório, dos parâmetros de resistência é bem maior do que o erro numérico destes métodos. Conseqüentemente, o método do equilíbrio limite é mais do que satisfatório na grande maioria dos casos práticos.

A saída típica de uma análise por equilíbrio limite é o “Fator de Segurança” (FS), definido pela equação 1 – Paganelli⁽¹⁰⁾:

$$FS = \frac{\text{forças resistentes}}{\text{forças atuantes}} = \frac{\text{resistência ao cisalhamento do material}}{\text{tensão de cisalhamento requerida para o equilíbrio}} \quad (1)$$

Os conceitos fundamentais do método do equilíbrio limite para estabilidade de taludes são os seguintes – Borges⁽¹¹⁾:

- O mecanismo de escorregamento resulta no colapso do talude;
- As forças resistentes requeridas para equilibrar os mecanismos de instabilidade são obtidas da solução estática;
- A resistência ao cisalhamento requerida para o equilíbrio é comparada com a resistência ao cisalhamento disponível em termos do Fator de Segurança;
- O mecanismo correspondente ao menor fator de segurança é encontrado por iterações sucessivas.

No método do equilíbrio limite, a massa de solo inscrita acima da superfície de escorregamento é dividida em fatias de paredes verticais e com a base apoiada na

superfície de escorregamento assumida. As forças atuantes em cada face e na base da lamela são calculadas por equações de equilíbrio estático. A determinação do fator de segurança é efetuada testando-se o fator de segurança para cada superfície potencial de escorregamento arbitrária em um conjunto o mais completo possível.

Para cada superfície de escorregamento ensaiada, um fator de segurança FS é determinado (e nos métodos mais precisos o parâmetro λ , tangente do ângulo de inclinação da força interlamelar). Para cada superfície de escorregamento do conjunto de possíveis superfícies, o cálculo do equilíbrio de forças de cada lamela é repetido para todas as lamelas em conjunto.

Dado o fato de que os cálculos necessários à obtenção do valor do fator de segurança são muito numerosos, devido ao processo ser multiplamente iterativo, a utilização dos métodos mais avançados como o de Morgenstern-Price ou GLE é impraticável através de uma planilha de cálculo, mesmo no caso de planilhas Excel, uma vez que requerem a solução de um sistema de equações não-linear nas incógnitas FS e λ . O número de iterações necessário para resolver o sistema de equações é elevado e pode haver problemas de convergência numérica, dependendo do caso em análise.

Considerando as formas geométricas irregulares e estratigrafias complexas dos taludes a serem modelados para análise numérica nos casos mais freqüentes observados de problemas de engenharia, a única solução viável é o emprego de *software* de engenharia especialmente desenvolvido para análise por equilíbrio limite de taludes, especialmente no caso de taludes naturais.

Para as análises efetuadas neste trabalho, foi utilizado o aplicativo SLOPE/W⁽⁴⁾, que permite a análise dos mais variados tipos de geometria estratigráfica e condições de contorno, vários modelos de comportamento da resistência ao cisalhamento na ruptura para os mais variados materiais, com várias opções de tipos de lei de variação da resistência com a profundidade em função do adensamento ao longo do interior de cada camada, com ou sem efeito da poro-pressão na resistência ao cisalhamento, e ainda vários tipos de carregamento além do peso próprio. Além disso, o programa permite a escolha entre vários métodos de análise por equilíbrio limite e entre diversos tipos de funções de distribuição das forças interlamelares (a variedade existente de métodos de equilíbrio limite é igual à variedade existente de hipóteses diferentes usadas para tornar determinado o problema estaticamente indeterminado caso fossem usadas apenas as equações de equilíbrio).

Na modelagem das seções estratigráficas foi escolhido entre as opções oferecidas pelo programa SLOPE/W o modelo $S = f(\text{depth})$, que considera o comportamento não-drenado do material, com o parâmetro S variando linearmente com a profundidade. Os parâmetros utilizados como dados de entrada no programa são o valor S_0 da resistência não-drenada S para a profundidade $H = 0$, o valor da taxa de variação linear da resistência com a profundidade ζ e, se for o caso, o valor máximo $S_{máx}$ limitante da resistência não-drenada. Neste modelo, a profundidade é computada a partir da linha de topo do contorno da camada, onde H é igual a zero. Observe-se na figura 13 a variação espacial da resistência não-drenada $S = f(\text{depth})$ representada pela graduação na tonalidade da cor no interior da camada:

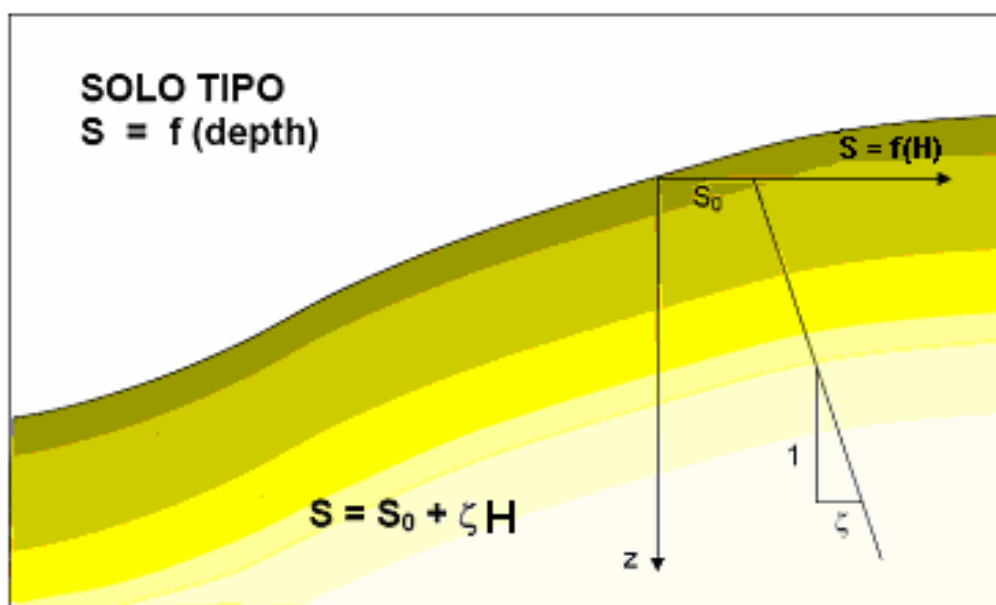


Figura 13 – Modelo de resistência ao cisalhamento não-drenada do solo S variando linearmente com a profundidade na camada, na opção $S = f(\text{depth})$ no programa SLOPE/W. Os parâmetros S e ζ definem, respectivamente, a propriedade de resistência e seu gradiente de variação ao longo da camada para a entrada dos dados da camada para o programa SLOPE/W.

O método de cálculo do fator de segurança de cada seção geológica analisada foi o de Morgenstern-Price, o qual é descrito no subitem 3.1 a seguir.

3.1 MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE

O método para avaliação da estabilidade de taludes escolhido para a verificação dos taludes críticos analisados em Espadarte foi o de Morgenstern-Price⁽⁷⁾. Neste método de cálculo do fator de segurança, todas as equações de equilíbrio são satisfeitas para cada das lamelas em que é dividida a massa de solo acima da superfície de escorregamento. Por isto, é bastante preciso, apesar da

indeterminação hiperestática, eliminada pela adoção de hipóteses sobre as forças interlamelares. Como o problema é estaticamente indeterminado, é assumida, por hipótese, uma função da coordenada horizontal x , $f(x)$, que expressa a relação entre as componentes vertical (força cortante) e horizontal (força normal) do empuxo na parede vertical da lamela (ver figura 14), a menos de um fator de proporcionalidade λ , a ser determinado pelo algoritmo numérico do método, juntamente com a determinação do fator de segurança F :

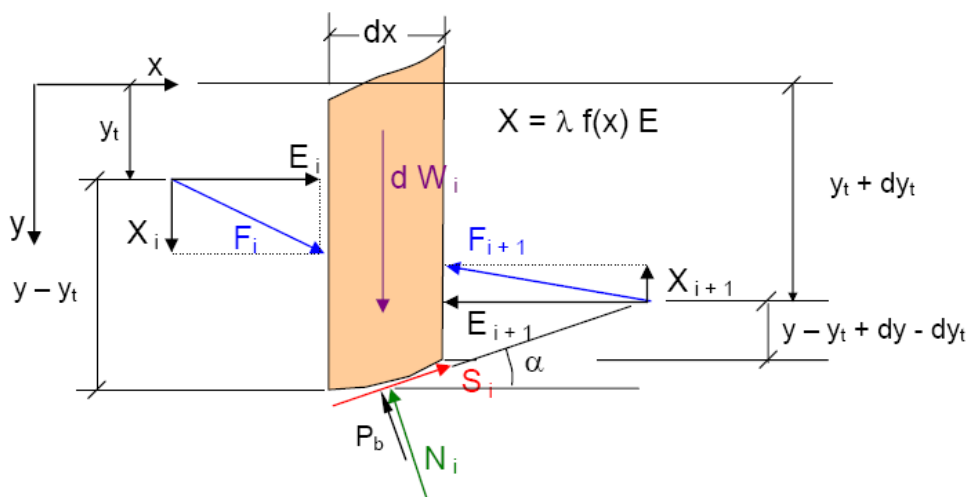


Figura 14 – Equilíbrio de forças na fatia e função $f(x)$ arbitrária.

Outra importante vantagem do método é que não é necessário que a superfície hipotética de escorregamento seja circular, como no método de Bishop⁽¹²⁾. O fator de segurança pode ser calculado para qualquer superfície arbitrária dada por uma poligonal. Esta última característica é extremamente importante quando se têm contrastes significativos de resistência ao cisalhamento nas interfaces entre materiais diferentes. No trabalho de Morgenstern-Price⁽⁷⁾, são citados diversos casos reais observados e muito bem documentados de superfícies não-circulares de deslizamento.

A formulação do método de Morgenstern-Price se baseia em uma equação de equilíbrio de momentos, uma equação de equilíbrio de forças na direção normal à superfície de escorregamento e outra equação de equilíbrio de forças na direção tangente à superfície de escorregamento. Nas equações de equilíbrio de forças, a força de resistência ao cisalhamento dS , aplicada na base da lamela, é computada pelo critério de Mohr-Coulomb, dividida por um fator F , igual para todas as lamelas. F é o fator de segurança associado à superfície de ruptura escolhida, cuja forma é arbitrária (várias superfícies de ruptura são analisadas de modo a se obter o fator de segurança mínimo). O fator de segurança F é definido como o fator pelo qual deve

ser dividida a resistência ao cisalhamento do solo, dada pelo critério de Mohr-Coulomb, de modo que o talude esteja na condição limite de equilíbrio estático.

Nesta condição, as forças de resistência ao cisalhamento minoradas pelo fator de segurança ao longo da superfície de escorregamento examinada, equilibram exatamente as cargas externas aplicadas, incluindo o peso próprio. Daí a denominação de Método do Equilíbrio Limite para esta categoria de métodos de análise geotécnica, em que se enquadra o método em referência.

O método de Morgenstern-Price⁽⁷⁾ é de formulação complexa, envolvendo soluções numéricas de equações diferenciais. Chega-se a um sistema de equações não-linear nas incógnitas λ e F , cujo método de solução numérica foi desenvolvido e implementado por Morgenstern-Price⁽¹³⁾. Quando foi publicado, o método já tinha sido usado satisfatoriamente nas análises de milhares de superfícies potenciais de deslizamento, examinadas em mais de quarenta seções geotécnicas diferentes.

Aumentando-se gradualmente as cargas aplicadas, mantendo-as proporcionalmente distribuídas, será atingida a condição limite, em que a massa de solo acima da superfície potencial de escorregamento se transforma em um mecanismo hipostático, pela perda do apoio por plastificação de toda a área apoiada. No instante imediatamente anterior a instabilização por plastificação completa da área de apoio, o maciço passa por uma condição limite isostática. Nestas condições se aplicam as equações de equilíbrio em que se baseiam os métodos de equilíbrio limite. Os diferentes métodos de equilíbrio limite existentes se distinguem pelas hipóteses próprias sobre as forças internas entre lamelas, ainda pelo número e tipo das equações de equilíbrio utilizadas. Normalmente, os *softwares* de engenharia disponíveis comercialmente oferecem uma gama variada de opções de métodos de análise e, nas opções de métodos mais elaborados, são oferecidas várias opções referentes à função $f(x)$, cujo significado é dado pela equação 2:

$$X = \lambda \cdot f(x) \cdot E \quad (2)$$

Onde:

X e E = componentes vertical e horizontal do empuxo na parede vertical da lamela, respectivamente, sendo funções da abscissa x ; e

λ = uma constante a ser determinada.

A escolha da função de força interlamelar $f(x)$ tem pequena influência no resultado do fator de segurança. Nas análises de todos os taludes de Espadarte, foi escolhida a função do tipo meio-seno.

O *software* utilizado nas análises foi o SLOPE/W⁽⁴⁾, versão 6.17, que é produzido pela GEO-SLOPE/W International Ltd., de Calgary, Alberta, Canadá. Este *software* calcula o fator de segurança estático ou dinâmico (pseudo-estático) de taludes de terra ou rocha, podendo-se optar entre onze diferentes métodos de análise. Nos métodos que utilizam a função de força interlamelar, pode-se optar entre oito diferentes tipos de funções. Este programa de computador permite determinar o fator de segurança para qualquer tipo de superfície potencial de escorregamento, dada por uma poligonal. O valor mínimo encontrado é exibido como o fator de segurança do talude. O programa SLOPE/W permite analisar taludes constituídos de camadas de diferentes materiais, com treze opções de modelos de resistência ao cisalhamento que podem ser combinados, podendo-se escolher um modelo independente para cada camada na modelagem do talude.

3.2 ANÁLISE DA SEÇÃO AA'

A seção geológica AA', com seus refletores sísmicos identificados e mapeados na figura 4, foi importada e digitalizada no programa SLOPE/W, onde sua geometria e propriedades foram definidas como dados de entrada. Foram selecionados os parâmetros geotécnicos apropriados e adotados os procedimentos computacionais adequados para modelagem do problema.

A resistência não-drenada da camada superficial foi obtida do furo geotécnico GT-693, cujo gráfico de variação com a profundidade está ilustrado na figura 7. As equações de variação da resistência S_u , em kPa, com a profundidade H , em metros, conforme indicado naquela figura, são as seguintes (para $0,00 \leq H < 41,00$ m):

- Tensões totais:

$$S_u = 1,915 \cdot H + 0,180 \quad (3)$$

- Tensões efetivas:

$$S_u = 1,994 \cdot H + 0,650 \quad (4)$$

Foi escolhida entre as equações de resistência a partir de tensões totais e efetivas, a equação 3, em termos de tensões totais, para ser usada como propriedade do solo constituinte da seção AA', por ser a favor da segurança. Assim, desta equação resultam os parâmetros de resistência não-drenada a serem usados como dados de entrada ao programa SLOPE/W – modelo f(depth):

- $\zeta = 1,915$ kPa/m; e
- $S_0 = 0,180$ kPa.

Estando todos os taludes analisados na condição submersa, o peso específico a ser adotado para o solo é o peso específico submerso γ' . Sendo γ o peso específico natural e γ_w o peso específico da água, o peso específico submerso a ser fornecido como dado de entrada ao programa é dado pela relação:

$$\gamma' = \gamma - \gamma_w \quad (5)$$

Para a análise de estabilidade da seção AA', foi adotado o peso específico submerso médio obtido a partir do ensaio JPC-693 (figura 8), ou seja:

- $\gamma' = 5,2619 \text{ kN/m}^3$.

Considerando o peso unitário da água, $\gamma_w = 9,8067 \text{ kN/m}^3$, o peso específico total médio do solo resulta:

- $\gamma = 15,0686 \text{ kN/m}^3$.

A modelagem da seção estratigráfica AA' para análise computacional pelo programa SLOPE/W é mostrada na figura 15. O resultado da análise de estabilidade é mostrado em detalhe na figura 16.

Na figura 16, a região colorida em vermelho identifica uma zona de ruptura potencial (mapa de segurança), cujos fatores de segurança são inferiores a 1,50, valor considerado como mínimo requerido para garantir a segurança do novo gasoduto do Campo de Espadarte. Este valor mínimo de fator de segurança se baseia nas diretrizes da CDA⁽¹⁴⁾ e ODS⁽¹⁵⁾. A superfície de escorregamento crítica (de menor fator de segurança associado), corresponde à linha branca mostrada na figura 16.

O mapeamento das superfícies de ruptura foi feito utilizando-se da técnica *Auto-Locate*, disponível na última versão do SLOPE/W. Baseando-se na geometria do problema, o SLOPE/W identifica as áreas de entrada e saída das superfícies de ruptura ao longo da superfície do terreno, e então faz uma série de análises tentativas usando o método *Entry and Exit*. Após estabelecer a posição da superfície de escorregamento crítica, o SLOPE/W aplica um procedimento de otimização da superfície subcrítica para encontrar o fator de segurança mínimo, o qual será o fator de segurança do talude.

AT-00003.02.0004

Análise de estabilidade para gasoduto em Espadarte

SEÇÃO GEOLÓGICA AA'

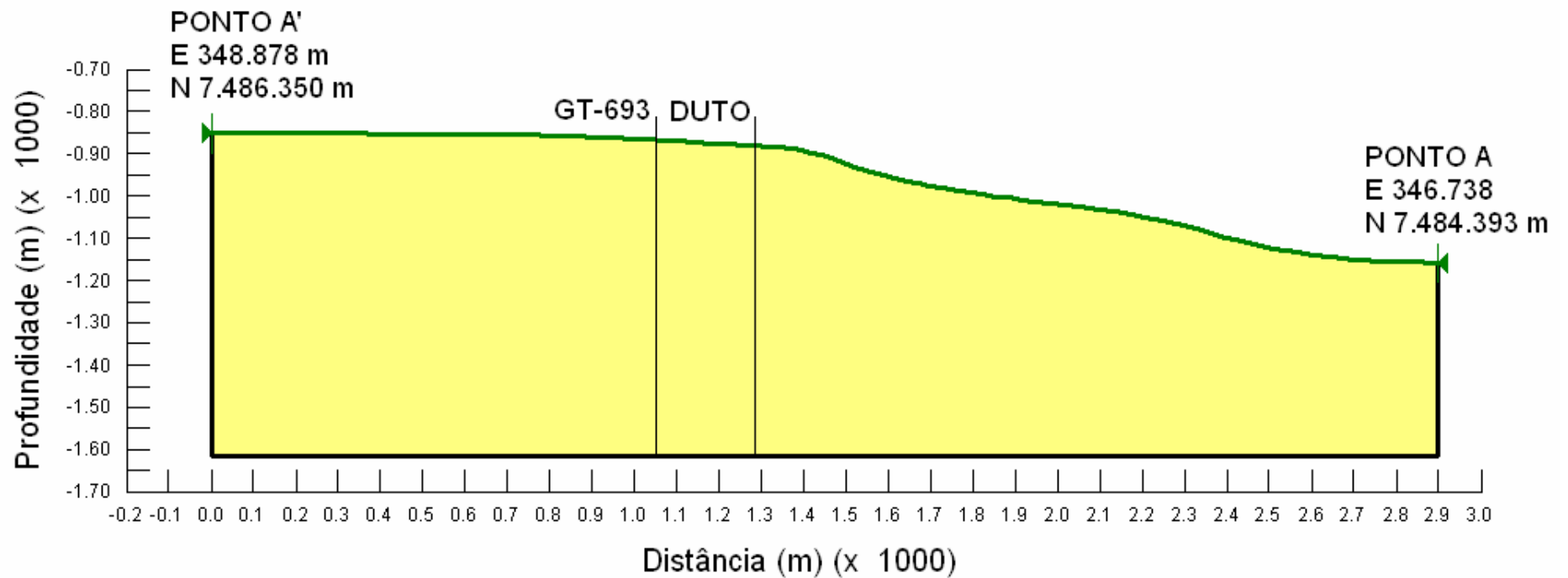


Figura 15 – Vista geral da seção AA' mostrando a modelagem pelo programa SLOPE/W.

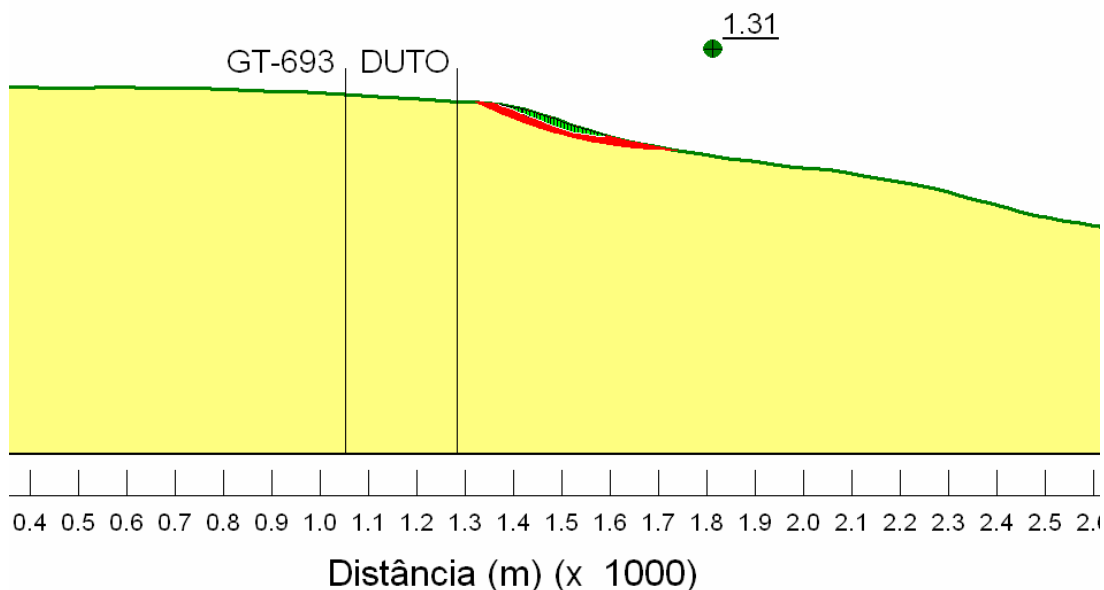


Figura 16 – Resultado da análise por equilíbrio limite da seção AA'. Fator de segurança = 1,31.

O fator de segurança estático associado à superfície de ruptura crítica para a seção geológica AA', resultou em 1,31 pelo método de cálculo de Morgenstern-Price, e a superfície crítica foi bem superficial, como pode ser visto pela parte do talude inscrita por esta superfície, representada em cor verde hachurada.

A região da figura 16 colorida em vermelho identifica uma zona potencial de ruptura, de fator de segurança variando entre 1,00 e 1,50. Nesta figura, nota-se que o fator de segurança na localização do gasoduto é superior a 1,50, com a extremidade da superfície de escorregamento crítica distando aproximadamente 87 metros do duto.

Assim, na localização da seção AA', a diretriz proposta para o novo gasoduto não necessita ser modificada, estando segura pelos critérios estabelecidos. Entretanto, caso haja interesse pela modificação do seu traçado, a posição do duto nesta seção pode ser movida com segurança talude acima ou por até 36 metros em direção à borda do cânion, que o fator de segurança mínimo adotado de 1,50 estará garantido.

Os resultados da análise de estabilidade da seção AA', calculados pelo SLOPE/W pelo Método de Morgenstern-Price, estão sumarizados na Tabela IV:

TABELA IV

Resultados da análise de estabilidade da seção AA', calculados pelo SLOPE/W

Parâmetro	Valor
Fator de Segurança	1,31
Volume Total	2.224,1 m ³ /m
Peso Total	11.703 kN/m
Momento Resistente Total	2,8149.10 ⁶ kN.m
Momento Atuante Total	2,1486.10 ⁶ kN.m
Força Resistente Total	4.299,2 kN
Força Atuante Total	3.290,9 kN

3.3 ANÁLISE DA SEÇÃO BB'

A seção geológica BB', com seus refletores sísmicos definidos e mapeados na figura 5, foi importada e digitalizada no programa SLOPE/W, onde sua geometria e propriedades foram definidas como dados de entrada. Foram selecionados os parâmetros geotécnicos apropriados e adotados os procedimentos computacionais adequados para modelagem do problema.

A resistência não-drenada da camada superficial foi obtida do furo geotécnico GT-694, cujo gráfico de variação com a profundidade está ilustrado na figura 9. As equações de variação da resistência S_u , em kPa, com a profundidade H , em metros, conforme indicado naquela figura, são as seguintes (para $0,00 \leq H < 41,50$ m):

- Tensões totais:

$$S_u = 1,780 \cdot H - 0,860 \quad (6)$$

- Tensões efetivas:

$$S_u = 1,901 \cdot H - 0,279 \quad (7)$$

Foi escolhida entre as equações de resistência a partir de tensões totais e efetivas, a equação 6, em termos de tensões totais, para ser usada como propriedade do solo constituinte da seção BB', por ser a favor da segurança. O valor negativo da resistência inicial do solo contém uma imprecisão na interpolação média. Por esta razão, será adotada a resistência nula ao nível do leito marinho – na realidade sempre existe uma resistência, por pequena que seja. Assim, desprezando a resistência inicial, a favor da segurança, da equação 6 resultam os parâmetros de resistência não-drenada a serem usados como dados de entrada ao programa SLOPE/W – modelo f(depth):

- $\zeta = 1,780 \text{ kPa/m}$; e
- $S_0 = 0 \text{ kPa}$.

Para a análise de estabilidade da seção BB', foi adotado o peso específico submerso médio obtido a partir do ensaio JPC-694 (figura 10), ou seja:

- $\gamma' = 5,0350 \text{ kN/m}^3$.

Considerando o peso unitário da água, $\gamma_w = 9,8067 \text{ kN/m}^3$, o peso específico total médio do solo resulta:

- $\gamma = 14,8417 \text{ kN/m}^3$.

A modelagem da seção estratigráfica BB' para análise computacional pelo programa SLOPE/W é mostrada na figura 17. O resultado da análise de estabilidade é mostrado em detalhe na figura 18.

Na figura 18, a região colorida em vermelho identifica uma zona de ruptura potencial (mapa de segurança), cujos fatores de segurança são inferiores a 1,50, valor considerado como mínimo requerido para garantir a segurança do novo gasoduto do Campo de Espadarte. Este valor mínimo de fator de segurança se baseia nas diretrizes da CDA⁽¹⁴⁾ e ODS⁽¹⁵⁾. A superfície de escorregamento crítica (de menor fator de segurança associado), corresponde à linha branca mostrada na figura 18.

O mapeamento das superfícies de ruptura foi feito utilizando-se da técnica *Auto-Locate*, disponível na última versão do SLOPE/W. Baseando-se na geometria do problema, o SLOPE/W identifica as áreas de entrada e saída das superfícies de ruptura ao longo da superfície do terreno, e então faz uma série de análises tentativas usando o método *Entry and Exit*. Após estabelecer a posição da superfície de escorregamento crítica, o SLOPE/W aplica um procedimento de otimização da superfície subcrítica para encontrar o fator de segurança mínimo, o qual será o fator de segurança do talude.

AT-00003.02.0004
Análise de estabilidade para gasoduto em Espadarte

SEÇÃO GEOLÓGICA BB'

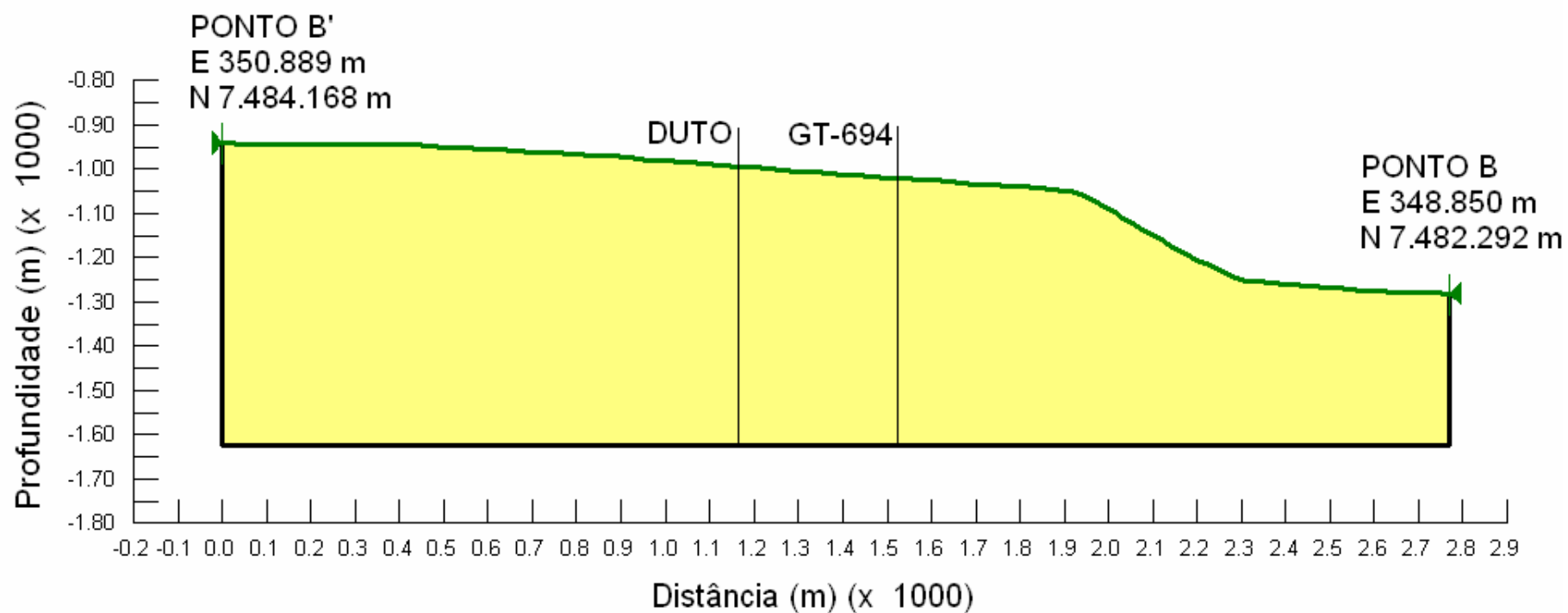


Figura 17 – Vista geral da seção BB' mostrando a modelagem pelo programa SLOPE/W.

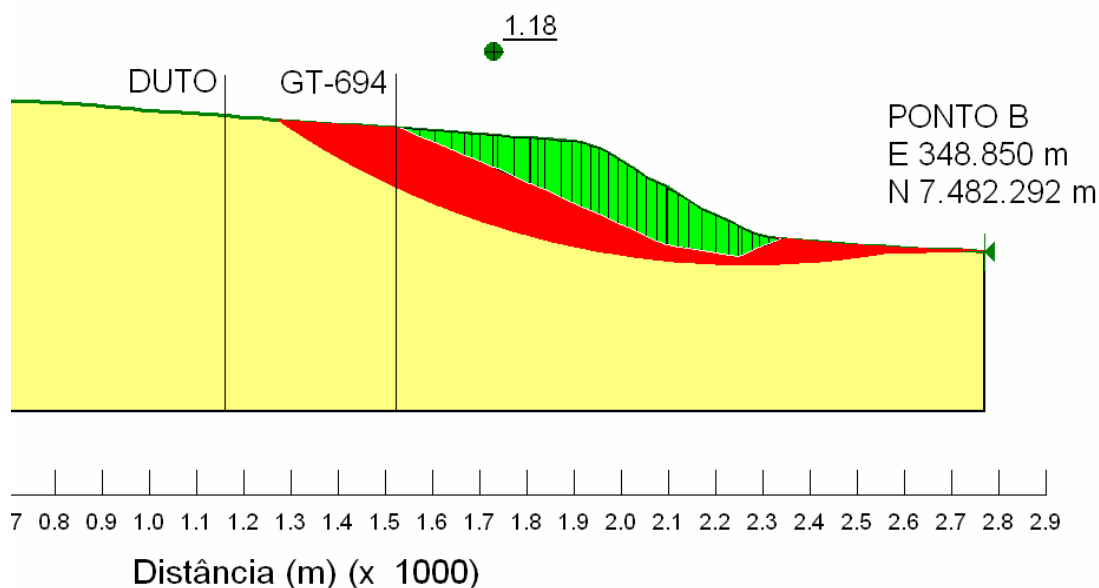


Figura 18 – Resultado da análise por equilíbrio limite da seção BB'. Fator de segurança = 1,18.

O fator de segurança estático associado à superfície de ruptura crítica para a seção geológica BB', resultou em 1,18 pelo método de cálculo de Morgenstern-Price, e a superfície crítica foi bastante profunda, como pode ser visto pela parte do talude inscrita por esta superfície, representada em cor verde hachurado.

A região da figura 18 colorida em vermelho denota uma zona potencial de ruptura, de fator de segurança variando entre 1,00 e 1,50. Nesta figura, nota-se que o fator de segurança na locação do gasoduto é superior a 1,50, com a superfície de escorregamento crítica distando em torno de 373 metros do duto.

Assim, na locação da seção BB', a diretriz proposta para o novo gasoduto não necessita ser modificada, estando segura pelos critérios estabelecidos. Entretanto, caso haja interesse pela modificação do seu traçado, a posição do duto nesta seção pode ser movida com segurança talude acima ou por até 109 metros em direção à borda do cânion, que o fator de segurança mínimo adotado de 1,50 estará garantido.

Os resultados da análise de estabilidade da seção BB', calculados pelo SLOPE/W pelo Método de Morgenstern-Price, estão reunidos na Tabela V:

TABELA V

Resultados da análise de estabilidade da seção BB', calculados pelo SLOPE/W

Parâmetro	Valor
Fator de Segurança	1,18
Volume Total	65.827 m ³ /m
Peso Total	3,3144.10 ⁵ KN/m
Momento Resistente Total	8,6641.10 ⁸ kN.m
Momento Atuante Total	7,3688.10 ⁸ kN.m
Força Resistente Total	1,1717.10 ⁵ kN
Força Atuante Total	99.780 kN

3.4 ANÁLISE DA SEÇÃO CC'

A seção geológica CC', com seus refletores sísmicos identificados e mapeados na figura 6, foi importada e digitalizada no programa SLOPE/W, onde sua geometria e propriedades foram definidas como dados de entrada. Foram selecionados os parâmetros geotécnicos apropriados e adotados os procedimentos computacionais adequados para modelagem do problema.

A resistência não-drenada da camada superficial foi obtida do furo geotécnico GT-695, cujo gráfico de variação com a profundidade está ilustrado na figura 11. As equações de variação da resistência S_u , em kPa, com a profundidade H , em metros, conforme indicado naquela figura, são as seguintes (para $0,00 \leq H < 41,10$ m):

- Tensões totais:

$$S_u = 1,757 \cdot H + 0,120 \quad (8)$$

- Tensões efetivas:

$$S_u = 1,891 \cdot H + 0,587 \quad (9)$$

Foi escolhida entre as equações de resistência a partir de tensões totais e efetivas, a equação 8, em termos de tensões totais, para ser usada como propriedade do solo constituinte da seção CC', por ser a favor da segurança. Assim, desta equação resultam os parâmetros de resistência não-drenada a serem usados como dados de entrada ao programa SLOPE/W – modelo f(depth):

- $\zeta = 1,757$ kPa/m; e
- $S_0 = 0,120$ kPa.

Para a análise de estabilidade da seção CC', foi adotado o peso específico submerso médio obtido a partir do ensaio JPC-695 (figura 12), ou seja:

- $\gamma' = 5,1435 \text{ kN/m}^3$.

Considerando o peso unitário da água, $\gamma_w = 9,8067 \text{ kN/m}^3$, o peso específico total médio do solo resulta:

- $\gamma = 14,9502 \text{ kN/m}^3$.

A modelagem da seção estratigráfica CC' para análise computacional pelo programa SLOPE/W é mostrada na figura 19. O resultado da análise de estabilidade é mostrado em detalhe na figura 20.

Na figura 20, a região colorida em vermelho identifica uma zona de ruptura potencial (mapa de segurança), cujos fatores de segurança são inferiores a 1,50, valor considerado como mínimo requerido para garantir a segurança do novo gasoduto do Campo de Espadarte. Este valor mínimo de fator de segurança se baseia nas diretrizes da CDA⁽¹⁴⁾ e ODS⁽¹⁵⁾. A superfície de escorregamento crítica (de menor fator de segurança associado), corresponde à linha branca mostrada na figura 20.

O mapeamento das superfícies de ruptura foi feito utilizando-se da técnica *Auto-Locate*, disponível na última versão do SLOPE/W. Baseando-se na geometria do problema, o SLOPE/W identifica as áreas de entrada e saída das superfícies de ruptura ao longo da superfície do terreno, e então faz uma série de análises tentativas usando o método *Entry and Exit*. Após estabelecer a posição da superfície de escorregamento crítica, o SLOPE/W aplica um procedimento de otimização da superfície subcrítica para encontrar o fator de segurança mínimo, o qual será o fator de segurança do talude.

AT-00003.02.0004
Análise de estabilidade para gasoduto em Espadarte

SEÇÃO GEOLÓGICA CC'

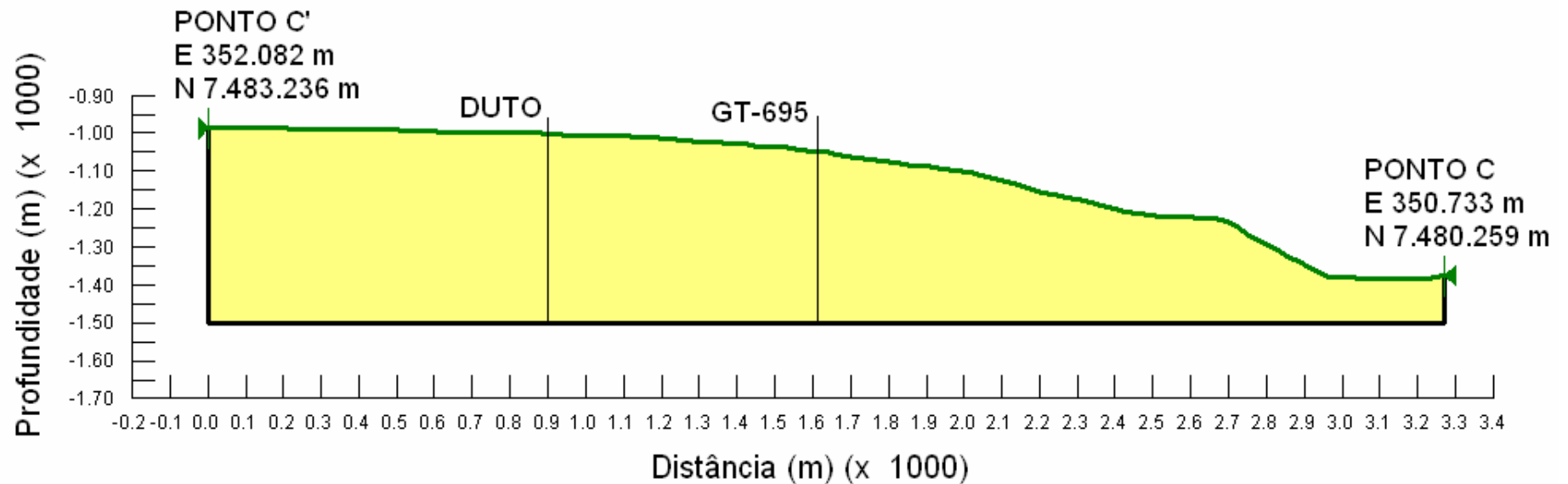


Figura 19 – Vista geral da seção CC' mostrando a modelagem pelo programa SLOPE/W.

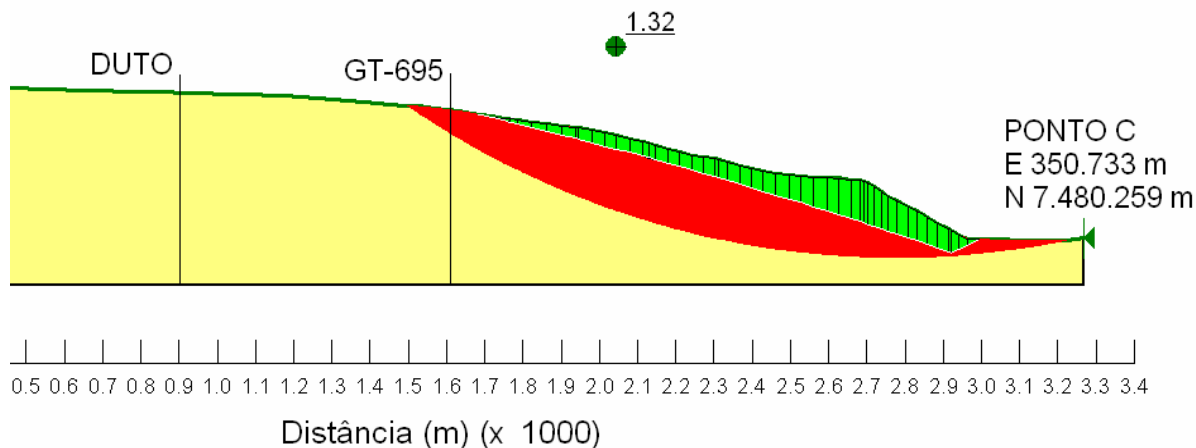


Figura 20 – Resultado da análise por equilíbrio limite da seção CC'. Fator de segurança = 1,32.

O fator de segurança estático associado à superfície de ruptura crítica para a seção geológica CC', resultou em 1,32 pelo método de cálculo de Morgenstern-Price, e a superfície crítica foi do tipo profunda, como pode ser visto pela parte do talude inscrita por esta superfície, representada em cor verde hachurado. A região da figura 18 colorida em vermelho denota uma zona potencial de ruptura, de fator de segurança variando entre 1,00 e 1,50. Nesta figura, nota-se que o fator de segurança na locação do gasoduto é superior a 1,50, com a superfície de escorregamento crítica distando aproximadamente 782 metros do duto.

Assim, na locação da seção CC', a diretriz proposta para o novo gasoduto não necessita ser modificada, estando segura pelos critérios estabelecidos. Entretanto, caso haja interesse pela modificação do seu traçado, a posição do duto nesta seção pode ser movida com segurança talude acima ou por até 596 metros em direção à borda do cânion, que o fator de segurança mínimo adotado de 1,50 estará garantido.

Os resultados da análise de estabilidade da seção CC', calculados pelo SLOPE/W pelo Método de Morgenstern-Price, estão agrupados na Tabela VI a seguir:

TABELA VI

Resultados da análise de estabilidade da seção CC', calculados pelo SLOPE/W

Parâmetro	Valor
Fator de Segurança	1,32
Volume Total	63.010 m ³ /m
Peso Total	3,2409.10 ⁵ KN/m
Momento Resistente Total	1,0688.10 ⁹ KN.m
Momento Atuante Total	8,0755.10 ⁸ kN.m
Força Resistente Total	1,1087.10 ⁵ kN
Força Atuante Total	83.789 kN

4 CONCLUSÕES

Nesta Comunicação Técnica do AT-00003.02.0004, são apresentados os resultados das verificações geotécnicas de estabilidade de um dos flancos do Cânion Goytacá, visto que um novo gasoduto está previsto para ser lançado no Campo de Espadarte ao longo deste cânion, próximo à sua borda, ligando o FPSO-Espadarte ao futuro FPSO que ficará ao sul do referido campo, na locação do poço 1-RJS-409.

Os fatores de segurança estáticos relacionados à superfície de ruptura crítica para as seções geológicas AA', BB' e CC', calculados pelo Método de Morgenstern-Price através do *software* SLOPE/W, estão reunidos na Tabela VII abaixo:

TABELA VII

Fatores de segurança mínimos obtidos pelas análises de estabilidade estática de taludes das seções AA', BB' e CC' do Campo de Espadarte

Seção	FS
AA'	1,31
BB'	1,18
CC'	1,32

A distância medida entre a extremidade da superfície de escorregamento crítica e a posição do duto projetada nas seções geológicas, medida na direção destas seções, apresentou os seguintes resultados, apresentados na Tabela VIII:

TABELA VIII

Distância da superfície de ruptura crítica à projeção do gasoduto na direção das seções geológicas

Seção	Distância (m)
AA'	87
BB'	373
CC'	782

Analisando-se os valores de fatores de segurança encontrados para as seções estudadas, bem como a distância da superfície de escorregamento potencial em relação à locação do gasoduto projetada nas seções geológicas, vê-se que este duto encontra-se com boa margem de segurança contra eventuais deslizamentos do flanco do Cânion Goytacá.

Entretanto, tendo-se em vista a modificação da diretriz do gasoduto, buscando por uma redução de sua extensão e, conseqüentemente, de custos ao projeto, mediu-se também nas seções analisadas a distância compreendida entre a intersecção do gasoduto com o plano da seção e a extremidade da zona de fator de segurança mínimo 1,50, que foi o valor limite adotado para garantir a segurança do duto estando o mesmo próximo à borda do Cânion Goytacá. Esta faixa de fator de segurança 1,50 aparece nas figuras 16, 18 e 20, resultados das análises das seções AA', BB' e CC', respectivamente, como a zona da seção que está colorida em vermelho.

Assim, o duto pode ser movido na direção da seção, talude acima, sem nenhum problema quanto à sua segurança, tendo em vista o aumento do fator de segurança com o afastamento do cânion. Para que o duto possa ser deslocado na direção da seção, de modo a ser locado mais próximo da borda do cânion que a rota original, recomenda-se que seja respeitada a distância medida entre a projeção do gasoduto e a zona de fator de segurança mínimo considerado de 1,50. Esta distância limite para posicionamento do duto em relação à borda do cânion, para cada seção analisada, pode ser vista na Tabela IX:

TABELA IX

Distância máxima para realocação do gasoduto, de sua posição original para outra mais próxima da borda do Cânion Goytacá (medida na direção das seções analisadas), respeitando o fator de segurança limite de 1,50

Seção	Distância (m)
AA'	36
BB'	109
CC'	596

Considerando a possibilidade de se alterar a diretriz deste gasoduto adotando as distâncias máximas acima, pode-se traçar uma rota alternativa para o duto, a qual comparada com a rota original, poderá trazer benefícios econômicos ao projeto, pois uma menor extensão para a linha de escoamento poderá ser obtida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (¹) BORGES, R. G. *Dados básicos do projeto de análise de estabilidade de taludes para a rota de gasoduto no Campo de Espadarte*. Rio de Janeiro, PETROBRAS/CENPES/PDP/MC, 2005. Comunicação Técnica n° 006/2005.
- (²) BORGES, R. G. *Caracterização geológica ao longo de rota de gasoduto no Campo de Espadarte para subsidiar análises de estabilidade do Cânion Goytacá*. Rio de Janeiro, PETROBRAS/CENPES/PDP/MC, 2005. Comunicação Técnica n° 007/2005.
- (³) SILVA, M. G. L. da; MERSCHMANN, M. A. de C. & VIEIRA, A. C. F. *Caracterização geológica para subsidiar análise de estabilidade do Cânion Goytacá – Ao longo de rota de gasoduto – Campo de Espadarte*. Macaé, E&P-SERV/US-SUB/GM, 18/02/2005. Relatório GM n° 972.001/05.
- (⁴) KRAHN, John. *Stability modeling with SLOPE/W – An engineering methodology*. Calgary, Canada, GEO-SLOPE/W International Ltd., mai/2004, 1st.ed.
- (⁵) BORGES, R. G. *Dados geotécnicos do Campo de Espadarte selecionados para análise de estabilidade de taludes ao longo de rota de gasoduto*. Rio de Janeiro, PETROBRAS/CENPES/PDP/MC, out/2005. CT MC n° 013/2005.
- (⁶) ZIENKIEWICS, O. *The finite element method*. New York, McGraw-Hill, 1977.
- (⁷) MORGENSTERN, N. R. & PRICE, V. E. *The analysis of the stability of general slip surfaces*. Géotechnique, v.15, p. 79-93, 1965.
- (⁸) FREDLUND, D. G. & KRAHN, J. Comparison of slope stability methods of analysis. Canadian Geotechnical Journal, 1977, v.14. n.3, pp. 429-439.
- (⁹) FREDLUND, D. G.; ZHANG, Z. M. & LAM, L. Effect of the axis of moment equilibrium in slope stability analysis. Canadian Geotechnical Journal, 1992, v.29, n.3.

- (¹⁰) PAGANELLI, L. M.; COSTA, A. M.; AMARAL, C. S.; KOWSMANN, R. O.; LIPSKI, M. & MACHADO, L. C. R. *Análise de estabilidade de taludes no Campo de Roncador para o duto 2 RO-G10-01*. Rio de Janeiro, PETROBRAS/CENPES/PDP/MC, jul/2004, CT MC n° 092/2004.
- (¹¹) BORGES, R. G. *Fundamentos da análise de estabilidade de taludes pelo método do equilíbrio limite*. Rio de Janeiro, PETROBRAS/CENPES/PDP/MC, set/2005. RT MC n° 087/2005.
- (¹²) BISHOP, A. W. *The use of the slip circle in the stability analysis of slopes*. Géotechnique, Great Britain, v.5, n.1, p. 148-152, 1955.
- (¹³) MORGENSTERN, N. R. & PRICE, V. E. *A numerical method for solving the equations of stability of general slip surfaces*. The Computer Journal, v.9, n.4, p. 388-393, feb/1967.
- (¹⁴) CANADIAN DAM ASSOCIATION. *Dam safety guidelines*. Canada, CDA, jan/1999.
- (¹⁵) ONTARIO DAM SAFETY. *Draft guidelines*. Canada, Ontario Ministry of Natural Resources, Lands and Natural Heritage Branch, sep/1999.