

4

EMPRESAS NUCLEARES BRASILEIRAS S.A. - NUCLEBRÁS  
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR  
DEPARTAMENTO DE RADIOPROTEÇÃO E APOIO AO LICENCIAMENTO  
Divisão de Engenharia Ambiental

OBSERVAÇÕES SOBRE O DESCALÇAMENTO DE OLEODUTO E  
GASODUTO DOS CAMPOS DE PRODUÇÃO DE UBARANA E  
AGULHA, NA REGIÃO DE PRAIA, EM GUAMARÉ-RN  
E SUGESTÕES DE MEDIDAS CORRETIVAS

Autor: Jefferson Vianna Bandeira

- DERL.CN-008/88 -

BELO HORIZONTE - BRASIL

- Março/1988 -

JB

## ÍNDICE

	PÁGINA
1. INTRODUÇÃO	1.
2. O COMPORTAMENTO HIDRÁULICO-SEDIMENTOLÓGICO NA COSTA DO RIO GRANDE DO NORTE, NA REGIÃO DE GUAMARÉ.	5.
2.1 Morfologia Costeira	5.
2.2 Os Agentes Hidrodinâmicos e Meteorológicos Atuantes	6.
3. A EVOLUÇÃO DA RESTINGA NA REGIÃO DE LANÇAMENTO DOS DUTOS E SUAS CONSEQUÊNCIAS.	9.
4. ALTERNATIVAS PARA A SOLUÇÃO DO PROBLEMA DO DESCALÇAMENTO DOS GASODUTO DE 26" E DO OLEODUTO DE 26".	20.
4.1 Primeira Alternativa	20.
4.2 Segunda Alternativa	21.
4.3 Terceira Alternativa	22.
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	30.
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	



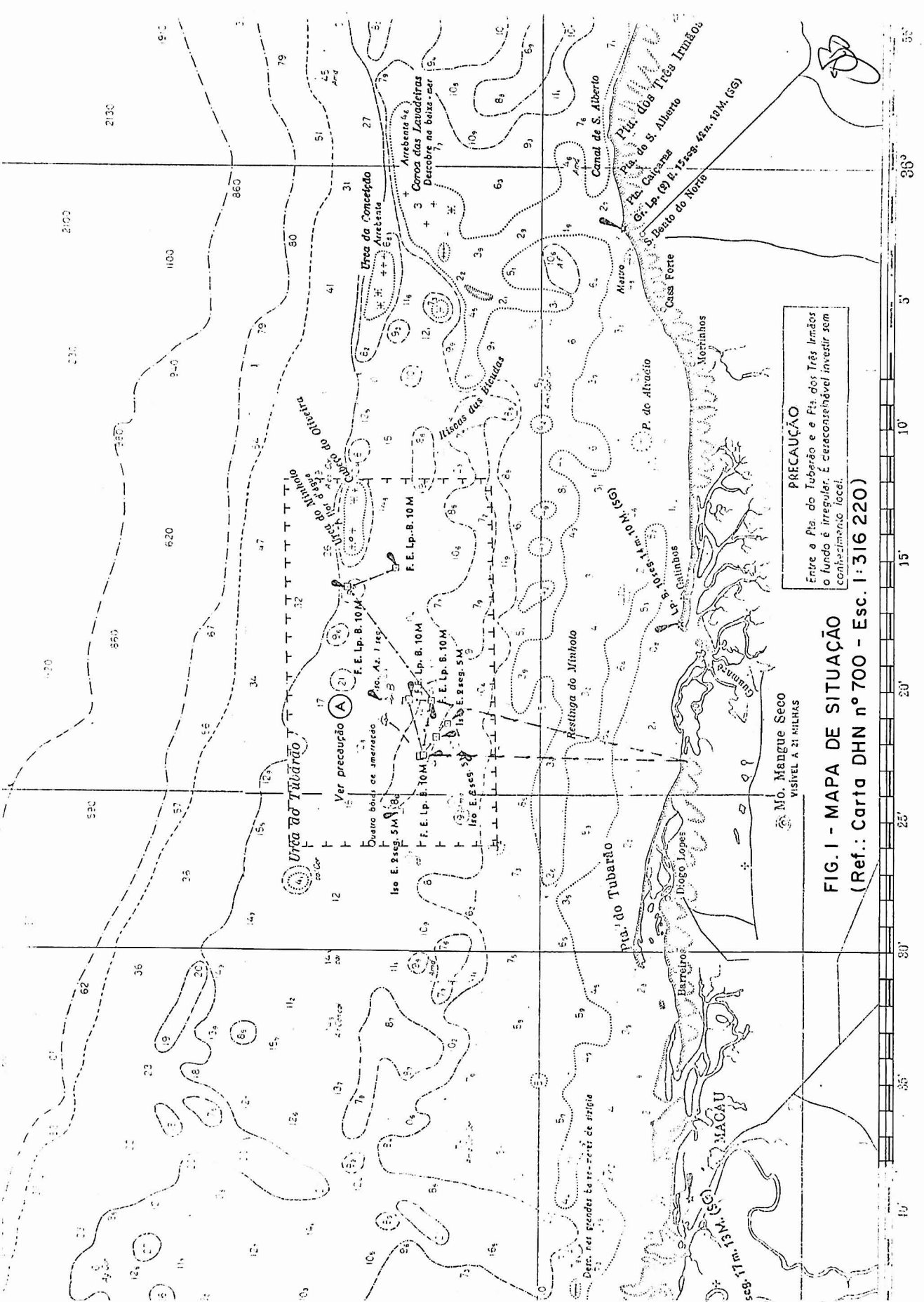
OBSERVAÇÕES SOBRE O DESCALÇAMENTO DE OLEODUTO E GASO  
DUTO DOS CAMPOS DE PRODUÇÃO DE UBARANA E AGULHA,  
NA REGIÃO DE PRAIA, EM GUAMARÉ-RN E  
SUGESTÕES DE MEDIDAS CORRETIVAS

1. INTRODUÇÃO

Para a exploração dos campos de gás e petróleo descobertos no mar, ao largo da região costeira de Guamaré-RN, bem como dos campos no continente, foi necessária a instalação de seis dutos ligando as regiões de produção ao polo de Guamaré e deste ao quadro de bóias, por onde o produto é exportado para os centros de refino e consumo.

A PETROBRÁS escolheu para a região de colocação dos dutos, ligando as facilidades de terra e aquelas instaladas no mar, um trecho da costa situado a cerca de 9,5 km a W do farol existente na ponta de Galinhos (Fig. 1). A partir de 1982 foram sendo instalados dutos que cruzavam a linha de praia, sendo a ordem cronológica de instalação de E para W, segundo informações da PETROBRÁS. Nesta época, uma "restinga" (que na verdade é uma ilha litorânea alongada que se desenvolve desde a região do canal de acesso a Guamaré, a E do local de mergulho dos dutos) tinha sua extremidade a E do ponto de mergulho do primeiro duto instalado. Deste modo, a região onde os dutos mergulhavam na praia era desimpedida (Fig. 2).

Neste trecho da costa o transporte de areia devido a ação das ondas, ventos, marés e das correntes por



**PRECAUÇÃO**  
 Entre a Pia. do Tubarão e Pia. dos Três Irmãos o fundo é irregular. É aconselhável investir sem contornar o local.

Mo. Mangue Seco  
 VISÍVEL A 21 MILHAS

**FIG. I - MAPA DE SITUAÇÃO**  
 (Ref.: Carta DHN nº 700 - Esc. 1:316 220)



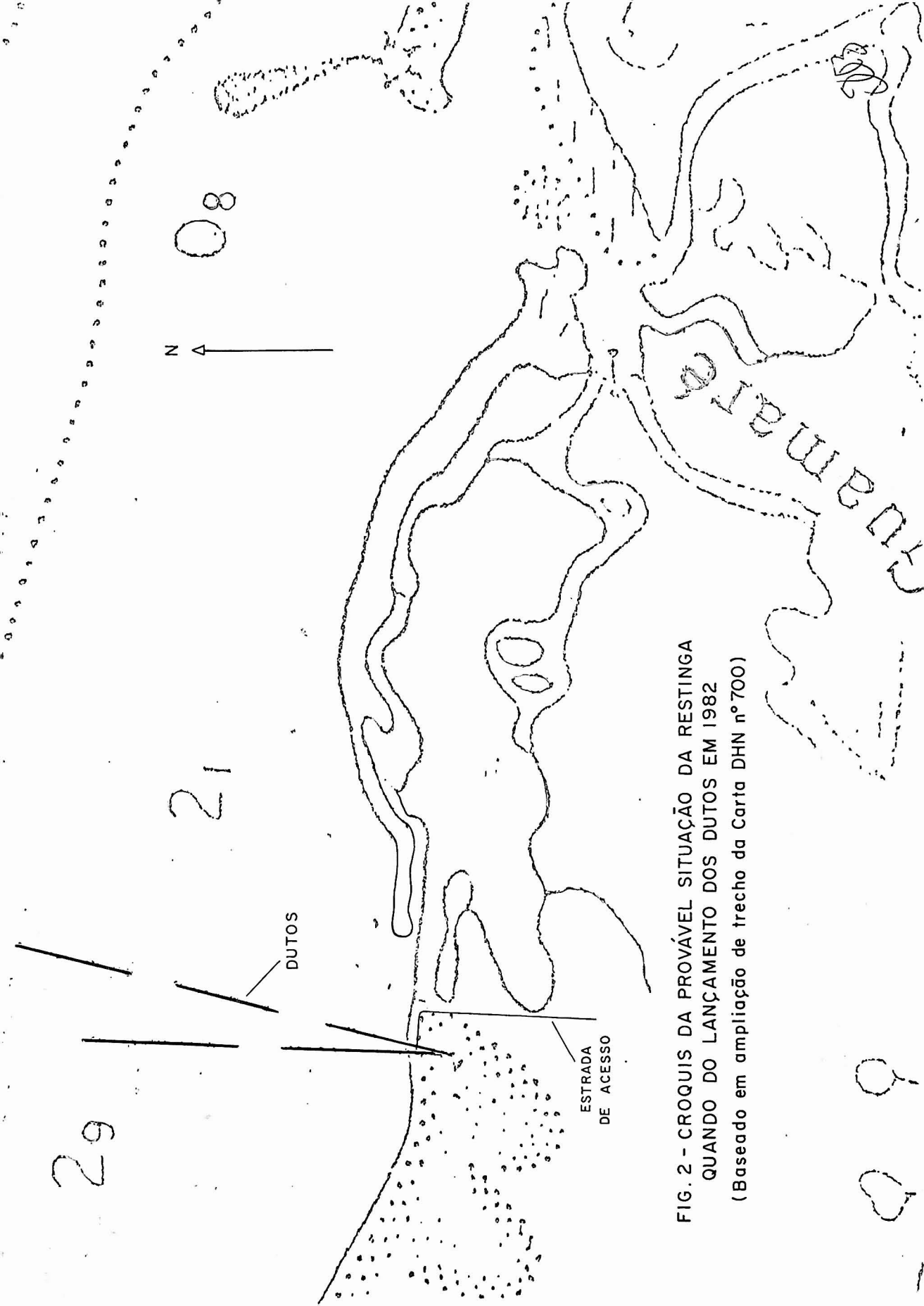


FIG. 2 - CROQUIS DA PROVÁVEL SITUAÇÃO DA RESTINGA QUANDO DO LANÇAMENTO DOS DUTOS EM 1982 (Baseado em ampliação de trecho da Carta DHN nº 700)

eles geradas se processa para W, ao passo que o devido a ação do vento, na parte emersa da costa, ocorre entre W e S.

Como resultado disto, as restingas situadas em frente aos canais de maré, em Galinhos, na região dos dutos, na Ponta do Tubarão e nas proximidades de Macau, migram para W. Com esta migração, trechos dos vários dutos ficaram sujeitos à ação da corrente de maré, produzida pelo enchimento e esvaziamento do volume contido entre a restinga e o continente. Já foram medidas correntes da ordem de 2,5 nós (1,3 m/s), conforme informações da PETROBRÁS, na região dos dois dutos mais a W.

Estas correntes transversais aos dutos provocam erosão no leito logo abaixo dos mesmos, deixando-os suspensos e sujeitos ao empuxo e à vibração causada pelas correntes. Esta vibração experimentada pelos dutos pode levá-los à fadiga e ao rompimento, segundo os técnicos da PETROBRÁS.

A situação é crítica para os dois dutos mais a W, o oleoduto PUB-3 de 26" de diâmetro e o gasoduto PUB-3 também com 26" de diâmetro. Situação semelhante, porém menos grave que a atual, já ocorreu com os quatro primeiros dutos instalados mais a E (ver Capítulo 3). O rompimento de qualquer dos dutos em situação crítica trará consequências econômicas para a PETROBRÁS porém, o rompimento do oleoduto terá graves consequências para o meio ambiente. É esta situação de emergência que a RPNS-PETROBRÁS procura atualmente contornar.



## 2. O COMPORTAMENTO HIDRÁULICO-SEDIMENTOLÓGICO NA COSTA DO RIO GRANDE DO NORTE, NA REGIÃO DE GUAMARÉ.

### 2.1 Morfologia Costeira

O alinhamento da costa na região entre a Ponta dos Tres Irmãos e Macau, no Rio Grande do Norte, segue a proximadamente a direção E-W. A declividade do fundo entre a costa e a isóbata de 10 m (Carta DHN nº 700) na região compreendida entre as longitudes  $36^{\circ}09'W$  e  $36^{\circ}36'W$ , a qual engloba a região de mergulho do dutos na linha de praia, é de 1:1360, ou seja: uma declividade muito baixa. A quebra da plataforma continental situa-se entre as isóbatas de 50 a 100 metros e está orientada na direção WNW-ESE no trecho considerado (Fig. 1).

O levantamento geofísico realizado pela Geomap S.A. (1), em uma área retangular de 2 km de largura por 17,9 km de extensão, na região entre a plataforma PUB-2 e o continente, apresentou a morfologia do fundo submarino com alternâncias de bancos e depressões alinhadas, em sua maioria na direção E-W (Fig. 5 da referência 1).

Estes bancos submarinos, bem como as restingas existentes na região: restinga submersa do Minhoto, delimitada pela isóbata de -5 m (Carta DHN nº 700), restinga de Galinhos, a restinga existente na região de mergulho dos dutos e a Ponta do Tubarão, são uma prova do intenso transporte de sedimentos na região e, além disso, mostram que este transporte se processa de E para W. A razão des



te sentido do transporte de areia neste trecho costeiro será esclarecida a seguir.

## 2.2 Os Agentes Hidrodinâmicos e Meteorológicos Atuantes

Os principais agentes hidráulicos e meteorológicos atuantes no trecho da costa do Rio Grande do Norte em estudo são as ondas, os ventos, a maré e as correntes geradas por estes agentes.

As ondas na região provêm do quadrante NE e, ao se propagar em direção à praia sofrem o fenômeno de refração, tendendo as suas cristas a se alinhar paralelamente à linha de costa. Geralmente, antes que este alinhamento seja obtido a onda arrebenta e sua energia e quantidade de movimento é dissipada na região de arrebentação. A componente dessa energia paralela à praia gera a corrente litorânea, a qual é responsável, em grande parte, pelo transporte de areia que se processa nesta região. A migração para W das restingas na linha de praia é devido sobretudo a este transporte de areia. Ao largo da zona de arrebentação as ondas também exercem influência sobre os sedimentos de fundo (a onda "sente" a presença do fundo) a partir de profundidades  $\underline{d}$  tais que:  $\frac{d}{L} \leq \frac{1}{2}$ , onde L é o comprimento da onda.

Assim, com a propagação ondulatória, antes do fenômeno da arrebentação, ocorre um deslocamento de massa líquida (devido à assimetria do movimento oscilatório) conhecido como corrente de transporte de massa. Ao largo





da arrebentação a velocidade de transporte da massa é no sentido da propagação da onda, próximo ao fundo e próximo à superfície, e no sentido oposto em profundidades intermediárias (7). Esta corrente de transporte de massa contribui para a movimentação dos sedimentos de fundo ao largo da arrebentação, na direção geral de W.

Sobreposta à ação das ondas a maré local, a qual possui amplitudes de até 3,2 m em ocasião de sizígia, gera correntes na costa aberta. Correntes medidas em profundidades maiores que 10 m, na região de PUB-3 (2) mostram que em fase de enchente o sentido dominante é para SW, enquanto que em fase de vazante elas se dirigem para NNE e NE.

Medições efetuadas mais próximo à costa, na isôbata de 6 metros, na região logo ao sul da restinga do Minhoto, próximo ao alinhamento dos dutos da PETROBRÁS, mostram que as correntes de enchente se dirigem sobretudo para SW e as de vazante para o setor NW até N (3,4). Assim, as correntes locais com uma forte influência da maré, tanto mais próximas à costa como mais ao largo, porém fora da zona de arrebentação, contribuem para o transporte de sedimentos para W. Esta contribuição é mais acentuada em fase de enchente quando as correntes são sensivelmente mais intensas (4,6) e elas se dirigem para SW.

Os ventos da região provêm sobretudo de N a SE (5,6) e exercem influência sobre a superfície do mar gerando vagas locais devido à flutuação (pulsação) no seu campo de velocidades. Estas vagas locais se sobrepõem às



ondulações vindas de regiões mais distantes e é este trem de ondas composto que atua na região costeira, como mencionado anteriormente.

A outra ação do vento é através da força tangencial que ele produz na superfície do mar, gerando uma corrente (corrente de deriva) a qual é função da velocidade do vento, da profundidade e da latitude do local (8). Na região costeira de Guamaré (5° de latitude S) a corrente de deriva desde a superfície da água até o fundo ocorre praticamente na mesma direção de propagação do vento.

Além da ação exercida no mar, gerando ondas e correntes, o vento também atua sobre a areia na faixa emersa da praia produzindo o transporte eólico (dunas, etc.). Dada a sua direção de propagação, o vento influencia no sentido de promover o transporte de sedimentos, tanto na parte imersa quanto na emersa da região costeira, para o quadrante W.

Em resumo, os principais agentes hidráulicos e meteorológicos (ondas, marés e ventos) atuam em maior ou menor grau para transportar a areia da região costeira de Guamaré, de um modo unidirecional, para W.



### 3. A EVOLUÇÃO DA RESTINGA NA REGIÃO DE LANÇAMENTO DOS DUTOS E SUAS CONSEQUÊNCIAS

Ao serem instalados os primeiros dutos, em 1982, a extremidade da restinga encontrava-se a E da região de mergulho dos mesmos na linha de praia. Não há registros, do conhecimento do autor, de levantamentos da morfologia da linha de costa (topográficos ou fotos aéreas) que permitam precisar a distância exata da localização da extremidade da restinga em relação ao ponto de mergulho do primeiro duto instalado. A figura 2 é, portanto, um croquis de como teria sido a situação.

Com a migração da formação para W, os dutos foram sendo influenciados pelo escoamento de maré que se processa no canal compreendido entre a restinga e o continente (Fig. 3). Assim, na maré enchente, se acumula um volume de água (prisma de maré) no corpo d'água confinado entre a restinga e o continente, o qual se escoar na maré vazante.

Na realidade, há duas entradas que alimentam o plano d'água existente entre a restinga e o continente. Como já foi dito anteriormente ela é uma ilha alongada. A principal entrada é a W dos dutos. A entrada secundária localiza-se no canal de Guamaré, do outro lado da cidade. As ondas de maré, penetrando por duas entradas, encontram-se numa região, conhecida em hidráulica marítima, como tomo de maré. Nesta região, as velocidades do escoamento são praticamente nulas ao longo do ciclo da maré. É de se esperar, portanto, que esta seja uma região mais



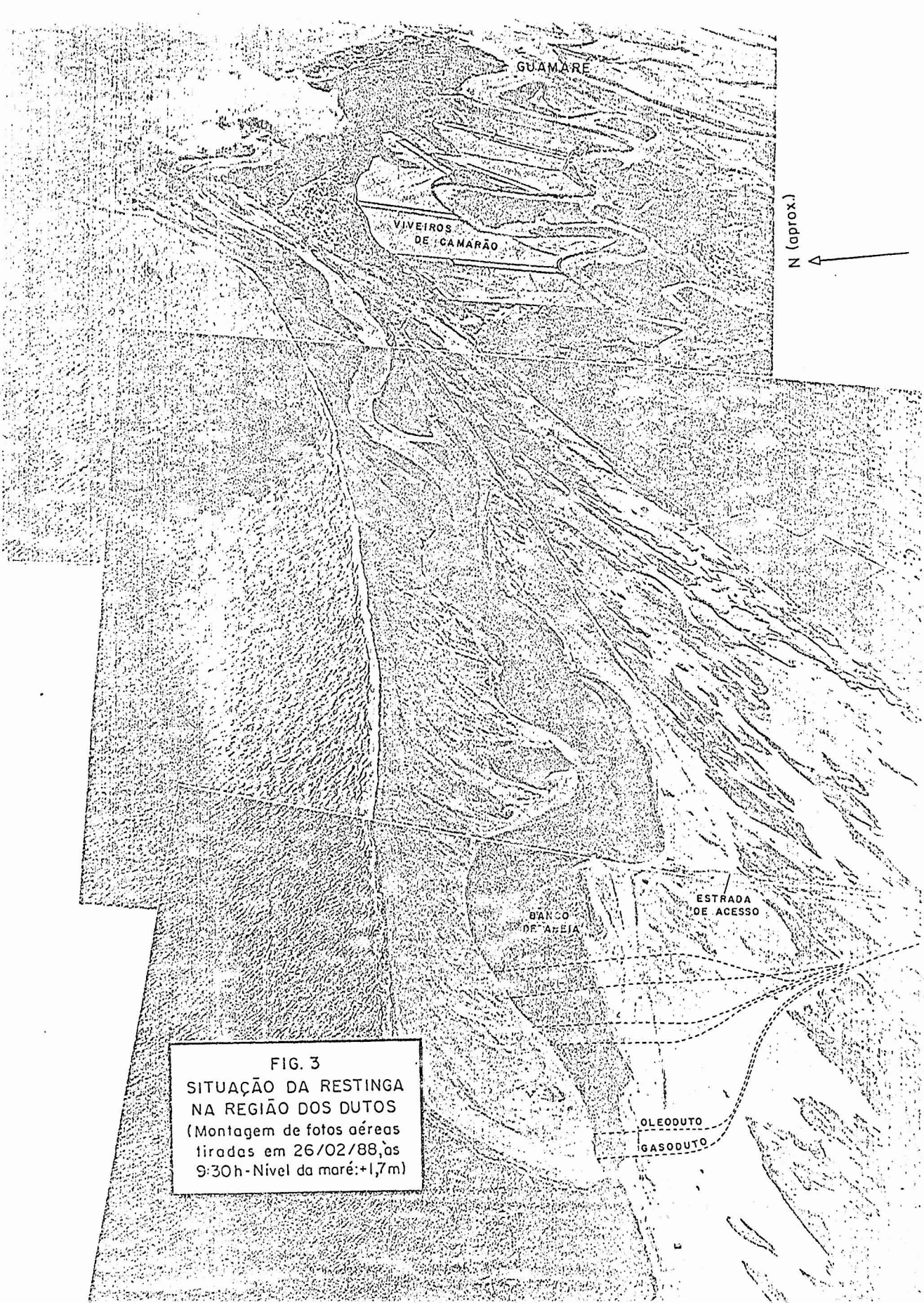


FIG. 3  
SITUAÇÃO DA RESTINGA  
NA REGIÃO DOS DUTOS  
(Montagem de fotos aéreas  
tiradas em 26/02/88, às  
9:30h - Nível da maré: +1,7m)

assoreada, com a presença generalizada de sedimentos mais finos no fundo.

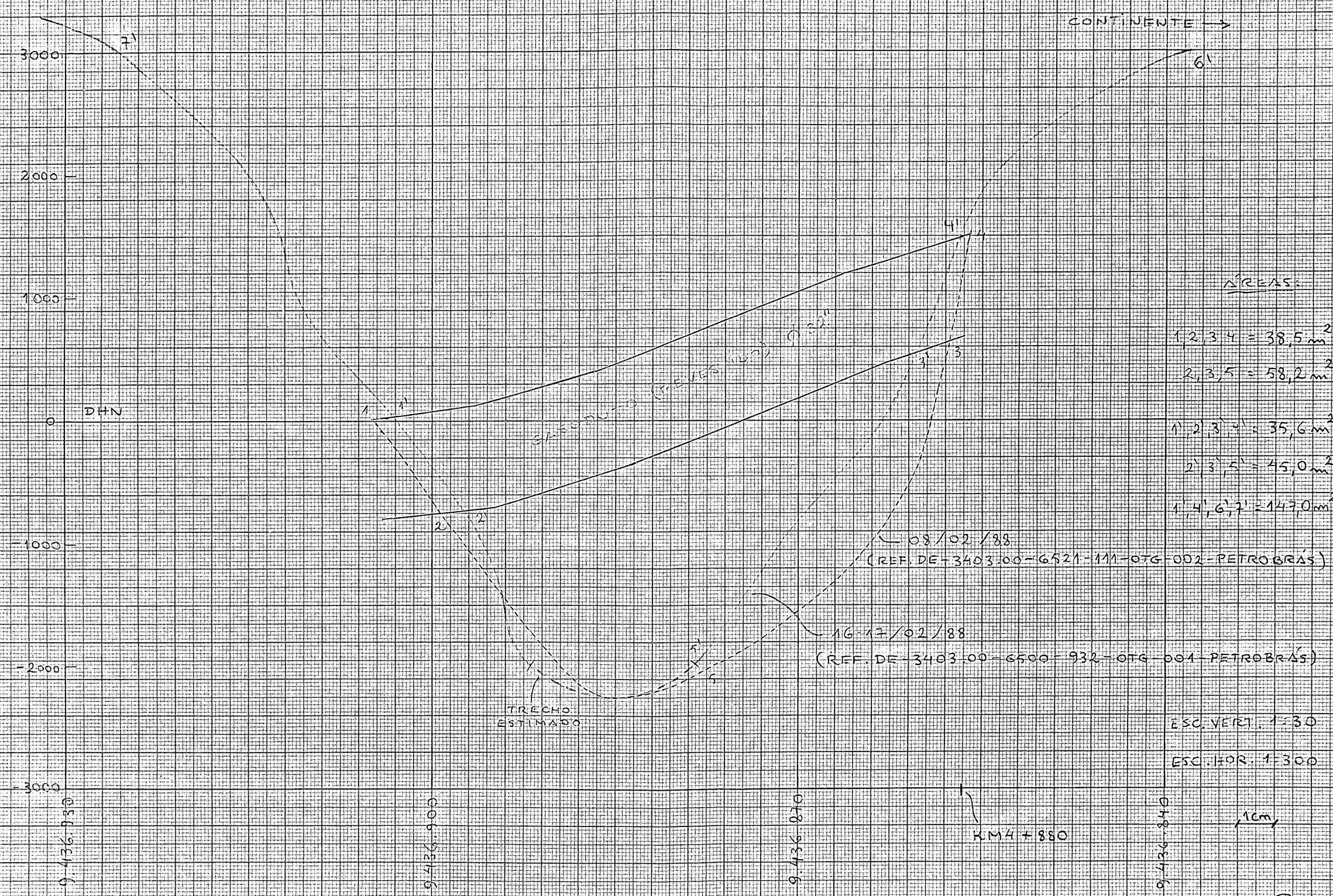
A observação levada a efeito, pelo autor, em 02/03/88, em sobrevoo da região, por ocasião da baixamar e da preamar, indicou que a região do tombo de maré, situa-se mais próxima a entrada de Guamaré, possivelmente na região do canal onde existe vegetação. Para o posicionamento mais preciso desta região, deverão ser realizadas medições topo-hidráulicas já discutidas entre o autor e os engenheiros da RPNS-PETROBRÁS, entre 2 e 4 de março e assinaladas no Capítulo 4.

O escoamento principal de maré na região dos dutos produz uma corrente transversal a eles com valores já medidos da ordem de 1,3 m/s.

A corrente transversal aos dutos provocou a erosão do leito imediatamente abaixo dos mesmos, deixando-os suspensos e sujeitos ao empuxo das correntes.

As áreas erodidas nas seções dos dutos, abaixo das geratrizes inferiores dos mesmos (Fig. 4 e 5) quando relacionadas com as áreas das seções suspensas dos dutos sujeitos ao escoamento, são da mesma ordem de grandeza entre si, comparativamente às áreas delimitadas pelas geratrizes superiores dos dutos, os taludes do canal e a cota +3 m (caso do gasoduto) e +2 m (caso do oleoduto) - maiores cotas levantadas dos dois lados em cada seção, atingidas e superadas pelo nível de maré (em preamar de sizígia o nível máximo é de +3,2 m, relativamente ao zero da DHN).





ÁREAS:

1, 2, 3, 4 = 38,5 m<sup>2</sup>

2, 3, 5 = 58,2 m<sup>2</sup>

1', 2', 3', 4' = 35,6 m<sup>2</sup>

2', 3', 5' = 45,0 m<sup>2</sup>

1', 4', 6', 7' = 147,0 m<sup>2</sup>

08/02/88  
(REF. DE-3403-00-6521-11-OTG-002-PETROBRAS)

16-17/02/88  
(REF. DE-3403-00-6500-932-OTG-001-PETROBRAS)

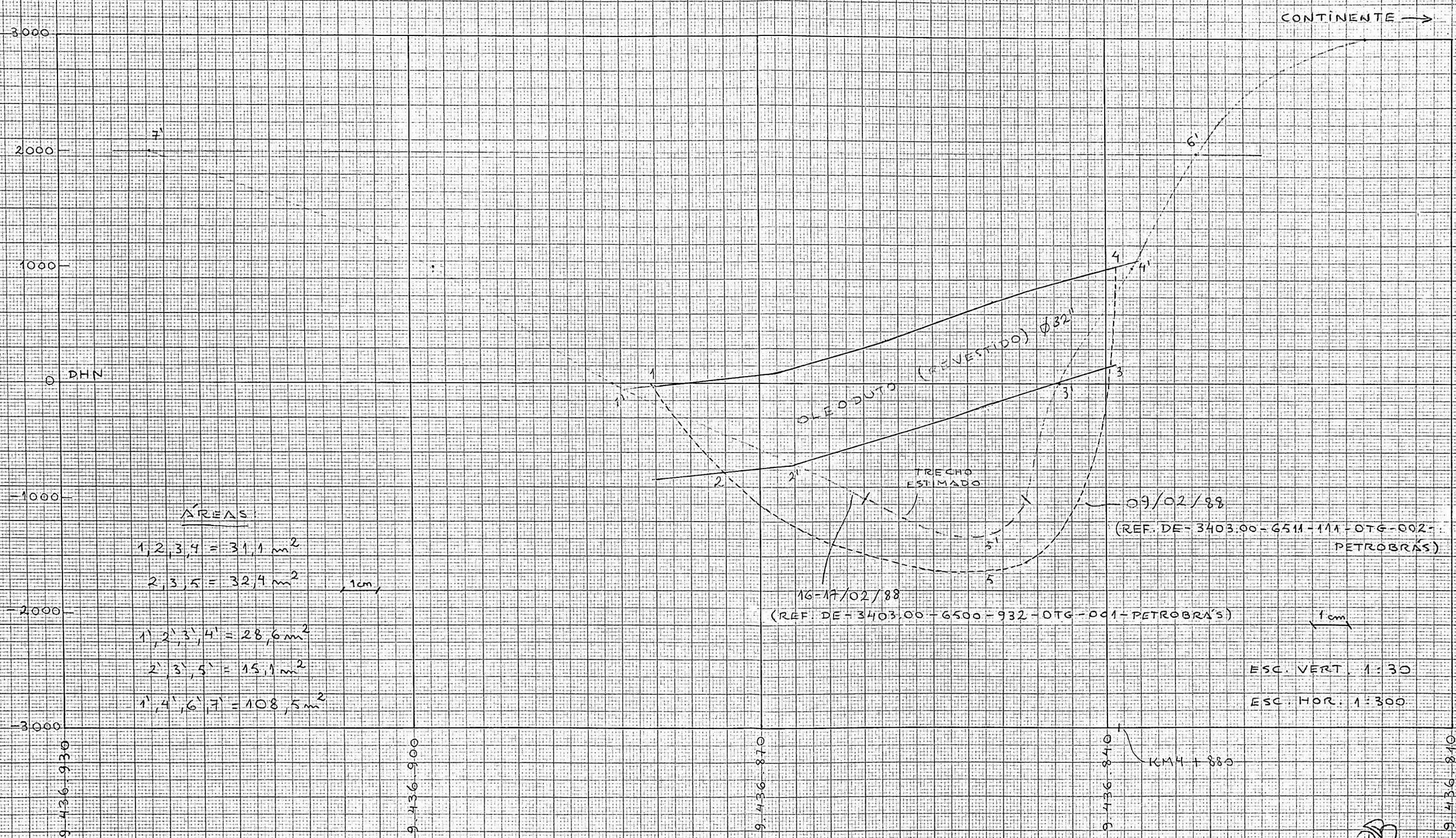
ESC. VERT. 1:30

ESC. HOR. 1:300

1cm

KM 4 + 880

FIG. 4 - SUPERPOSIÇÃO DE LEVANTAMENTOS NO ALINHAMENTO DO GASODUTO



ÁREAS:  
 1, 2, 3, 4 = 31,1 m<sup>2</sup>  
 2, 3, 5 = 32,4 m<sup>2</sup>  
 1', 2', 3', 4' = 28,6 m<sup>2</sup>  
 2', 3', 5' = 15,1 m<sup>2</sup>  
 1', 4', 6', 7' = 108,5 m<sup>2</sup>

FIG. 5- SUPERPOSIÇÃO DE LEVANTAMENTOS NO ALINHAMENTO DO OLEODUTO

*[Handwritten signature]*

Esta equivalência de áreas significa que o escoamento no canal, dado o seu prisma atual de maré e ao estreitamento provocado pela tendência de fechamento da restinga, necessita de uma área de equilíbrio. Como no seu processo de erosão, o fluxo de água encontrou as seções de resistência dos dutos, ele erodiu áreas mais ou menos e equivalentes abaixo dos mesmos as quais, somadas às áreas das seções acima das geratrizes superiores dos dutos, formam as seções de equilíbrio ao escoamento em questão.

O' Brien (9) estabeleceu que a área da seção de equilíbrio (A) está relacionada linearmente com o volume do prisma de maré (P), pela relação:

$$A = 6,56 \times 10^{-5} P \quad (1)$$

onde A e P são dados respectivamente em  $m^2$  e  $m^3$ . O coeficiente na equação (1) tem a dimensão do inverso de um comprimento (1/L).

Esta relação é válida só para entradas (embocaduras) arenosas onde a maré tem características predominantemente semi-diurnas, como é o caso da maré na costa do Rio Grande do Norte.

O valor absoluto da velocidade média da corrente em fase de enchente ou vazante na entrada do canal em estuário, onde não há influência da água doce, é calculado por:

$$|\bar{V}| = \frac{P}{A \times T} \quad (2)$$





onde  $T$  é o semi-período da maré:  $T = \frac{12,42H}{2} = 6,21H = 6,21 \times 3600 \text{ seg.}$

Substituindo (1) em (2), vem:

$$|\bar{V}| = \frac{1}{6,56 \times 10^{-5}} \times \frac{1}{6,21 \times 3600} = 0,68 \text{ m/s}$$

Observa-se que este é um valor constante válido para qualquer embocadura ou entrada em equilíbrio. Vê-se que é um valor médio bastante alto o que significa que em grande parte do ciclo da maré o escoamento é capaz de transportar a areia do fundo do canal. Nota-se que já foram medidas correntes com velocidades da ordem de 1,3 m/s na região dos dutos, na entrada do canal.

Note-se também, nas figuras 4 e 5, entre os levantamentos de 08/02/88, 09/02/88 e 16-17/02/88 uma elevação generalizada do fundo abaixo dos dutos. Não se deve interpretar de imediato, este fato, como uma tendência à reconstituição dos fundos sob os dutos, com a continuação da migração da restinga (2ª alternativa - Capítulo 4).

Conforme informação ao autor, dos técnicos da firma de topografia PROTÉGIA, as batimétricas de -2 m e -1 m existentes sob o gasoduto e o oleoduto, respectivamente, - desenho: DE-3403.00-6500-932-OTG-001 - PETROBRÁS, de 16 e 17/02/88, ficam deslocadas para E ou W conforme seja o fim da enchente ou vazante, respectivamente. Desse modo, levantamentos ou seções na região, para serem comparados,



devem ser executados na mesma ocasião de ciclos de marê, de mesma amplitude. Sugere-se o acompanhamento da evolução dos fundos na região dos dutos em estudo, tomando estas precauções.

O empuxo e a turbulência devidos à corrente provocam a vibração nos dutos sendo que o gasoduto e o oleoduto de 26", situados mais a W no campo de dutos, podem sofrer a fadiga e o conseqüente rompimento. Eles se encontram em situação mais crítica no momento, porque a extremidade emersa da restinga está posicionada atualmente na região dos mesmos, o que provoca uma concentração das linhas de fluxo do escoamento exatamente na região destes dois dutos.

Por esta situação já passaram os quatro primeiros dutos instalados mais a E, mas ela foi menos grave que a atual, pelos seguintes motivos:

Ao migrar para W, a extremidade da restinga tendeu a se aproximar do continente, logo a E e ao sul da curva pronunciada para a esquerda, da estrada de acesso a região dos dutos (Fig. 3). A linha de praia logo a E desta estrada foi sendo erodida. Havia, segundo informações da PETROBRÁS, próximo a esta curva acentuada da estrada, um equipamento para lançamento não convencional de dutos, o qual foi protegido, juntamente com o trecho da estrada, contra a erosão, por um enrocamento. Com a resistência maior oferecida a uma erosão imediata nesta região, houve um meandramento do canal para o norte.

Com o prosseguimento da migração da restinga o canal de marê tornou a tomar o alinhamento geral de W. Acontece, entretanto, que grande parte do material erodido logo a E da curva da estrada de acesso se depositou no canal logo ao norte da mesma estrada, na parte convexa da curva ligada ao continente, formando um banco de areia que se descobre na baixamar. O fluxo principal se concentrou na parte concava do canal, junto à restinga. Assim, na região de mergulho dos quatro primeiros dutos a seção do canal de marê era naturalmente larga quando a extremidade da restinga estava situada nesta região. As velocidades não deveriam ter sido tão intensas como as que ocorrem na situação atual com os dois dutos mais a W.

Prosseguindo para W a sua migração a extremidade da restinga tendeu a se unir ao continente, como aliás já havia ocorrido anteriormente, bastando para isto observar as reentrâncias na margem do canal do lado do continente correspondentes às formas convexas, emersas ou imersas, na margem do canal do lado da restinga. Um sobrevôo ao longo do canal de marê, em situação de baixamar, é bastante útil para observações neste sentido.

O processo de migração da restinga tem ocorrido a uma taxa elevada. Entre o início de outubro de 1987 e o dia 02/03/88 a extremidade emersa da restinga em preamar deslocou-se de cerca de 100 metros, o que representa uma taxa de 20 m/mes ou 0,67 m/dia.

Além do mais, o ponto da extremidade da restinga que apresentava uma elevação de + 3,0 metros no início de outubro/87, em 02/03/88 possuía uma cota de + 3,75 metros,

conforme medições topográficas efetuadas no local pela PROTÉGIA, firma contratada pela PETROBRÁS. Isto evidencia a migração acelerada atualmente ocorrendo na formação e o seu alteamento, este devido sobretudo à ação do vento e das ondas.

A migração da restinga não deve prosseguir indefinidamente. Apesar do volume do prisma de maré no canal aumentar com a migração da restinga para W e ser cada vez maior o volume a ser escoado na extremidade de W do canal, com o conseqüente aumento das velocidades máximas na vazante ou enchente nesta seção, pode ocorrer naturalmente a ruptura da restinga mais a E e o fenômeno de migração recomeça.

Tal ruptura já ocorreu com a Ponta do Tuburão situada entre Diogo Lopes e Barreiros (Fig. 1) conforme se constatou no sobrevôo realizado em 02/03/88. Aliás, é interessante ressaltar a semelhança existente, guardadas as devidas proporções, entre a restinga na região dos dutos e a da Ponta do Tubarão. A parte emersa de ambas, próxima a extremidade de W, forma um arco tendendo a se unir ao continente.

Os dois bancos imersos, na frente de ambas as restingas, observados no sobrevôo por ocasião da baixamar, delimitam 2 canais de maré, formando uma espécie de Y, com um canal desenvolvendo-se paralelamente a linha de praia, como um prolongamento do canal delimitado pela restinga e o continente (provavelmente canal onde domina o escoamento de vazante) e o outro orientado para NW, a partir da extremidade das restingas.



Na situação atual, a extremidade da restinga na região dos dutos, está bastante próxima do continente, um pouco a W do gasoduto de 26".

A observação levada a efeito no local em 02/03/88 pelos engenheiros Luiz Carlos Araújo, Francisco Martins Crisóstomo e Ivandro Barros Pereira da RPNS-PETROBRÁS, acompanhados do autor, mostrou ser de cerca de 50 a 60 metros a distância que separa a extremidade da restinga do continente. Nessa ocasião 9:15 horas, o nível d'água era da ordem de +1,0 m em relação ao zero da DHN (Tábua de Maré da DHN para Macau).

Assim, todo o prisma de maré armazenado no trecho do canal sujeito ao escoamento que se processa através dessa entrada, flui através dessa secção estreita produzindo as velocidades elevadas mencionadas anteriormente, com a conseqüente vibração nos trechos dos dutos suspensos e a possibilidade de seu rompimento por fadiga.

A seguir, são comentadas as alternativas levantadas para enfrentar esta situação de emergência.



4. ALTERNATIVAS PARA A SOLUÇÃO DO PROBLEMA DO DES  
CALÇAMENTO DO GASODUTO DE 26" E DO OLEODUTO DE  
26".

Várias alternativas para impedir o rompimento do gasoduto e do oleoduto foram discutidas nas reuniões efe  
tuadas na RPNS e nas inspeções no local, em Guamarê, entre  
1/3 e 4/3/88.

As duas primeiras alternativas apontadas a se  
guir não interferem com a evolução natural da restinga nem  
com os escoamentos que se processam no canal.

4.1 Primeira Alternativa

A primeira delas seria o enterramento dos dois  
dutos críticos abaixo do leito atual erodido sob eles. Es  
ta erosão subjacente aos dutos, como já foi visto, foi uma  
ação natural do escoamento de marê no canal, tendendo a a  
tingir uma área de equilíbrio. O simples abaixamento dos  
dutos desobstruindo as seções e evitando a turbulência nas  
linhas de fluxo (devido a presença deles) resolveria o pro  
blema pois, a área de equilíbrio ao escoamento das seç  
ões ficaria toda acima das geratrizes superiores dos dutos e,  
além disso, estes ficariam apoiados ou enterrados no fundo.  
No caso de um rompimento da restinga a E e de uma nova mi  
gração, os dutos em questão já estariam numa profundidade  
tal na linha de praia que o problema, agora em questão, di  
ficilmente iria novamente ocorrer.

Esta alternativa não deverá ser adotada devido ao  
risco de rompimento das tubulações e às dificuldades de e



execução alegadas por engenheiros da PETROBRÁS, na implementação de tal alternativa.

#### 4.2 Segunda Alternativa

Um segunda alternativa sugerida pelo autor, a qual não interfere com a evolução da restinga, seria aguardar a sua migração mais para W, com o objetivo de que o estreitamento nas linhas de fluxo do escoamento, que atualmente se dá na região do gasoduto e do oleoduto, se desloque mais para W. Com isto passará a existir nesta região um fluxo menos concentrado, o que implica em uma seção mais larga e menos profunda, tal como existe atualmente a E da região destes dois dutos, inclusive na região dos quatro dutos primeiramente lançados.

Os dutos poderiam voltar a se apoiar no fundo, com o alargamento da seção e mesmo poderiam vir a ser enterrados naturalmente. Cabe aqui uma sugestão para o levantamento do estado atual dos quatro dutos mais a E.

Conforme os engenheiros da PETROBRÁS, não se pode garantir a integridade dos dois dutos mais a W, enquanto durar a migração da restinga de modo a promover uma diminuição na concentração das linhas de fluxo no local dos dutos. O autor é de opinião que seja necessário para que tal ocorra, uma migração da ordem de mais 80 metros no mínimo, o que demandaria, mantidas as taxas atuais de migração, cerca de mais 4 meses.

Poder-se-ia tentar estaiar ou fazer suportes para

os trechos suspensos dos dutos mas esta alternativa, dado o risco implícito de rompimento dos dutos, não foi considerada como a solução para o problema.

#### 4.3 Terceira Alternativa

A alternativa seguinte é anular, através de fechamentos no canal de marê, a corrente na região dos dutos. Esta alternativa provoca alterações no comportamento hidráulico e sedimentológico do canal e deve ser analisada nos seus vários aspectos.

Conforme já mencionado anteriormente, o canal existente entre a formação arenosa alongada (que se desenvolve entre Guamarê e a região dos dutos da PETROBRÁS) e o continente, tem duas entradas. A principal logo a W dos dutos e a secundária, partindo do canal de acesso ao terminal portuário de Guamarê. Já foi discutida no Capítulo 3 a provável existência do tomo de marê e a sua possível localização.

A existência e a localização da região do tomo de marê devem ser objetos de estudos de campo antes do início de qualquer obra.

Recomenda-se a execução de levantamento batimétrico do canal e levantamento topográfico de ambas as margens até, pelo menos, a cota +4,0 m. Caso esta não exista em algum trecho, deve ser levantada e assinalada a maior cota existente. Este levantamento deve se estender até a(s) entrada(s) do canal em Guamarê, em seções espaçadas no máximo de 100 em 100 metros, podendo ser mais próximas em locais onde a geometria variar mais bruscamente (curvas, es



treitamentos, bancos no canal, etc.).

Paralelamente ao levantamento, sobretudo na região E do canal coberta por vegetação e onde se supõe estar localizado o tombo da maré, deve ser observado o sentido do escoamento da água em enchente e vazante e sobretudo nas vizinhanças da estufa de preamar e baixamar. Na região do tombo a velocidade do escoamento deve ser praticamente nula ao longo do ciclo de maré, à exceção da possível ação tangencial exercida pelo vento na superfície da água tendendo a criar uma corrente de deriva local para W (o vento provém sobretudo do quadrante E - Capítulo 2). Assim, esta observação expedita da circulação do canal, a qual pode ser feita com o auxílio de corpos flutuantes (discos de madeira, casca de coco, etc.) ou de um modo mais sofisticado, com o emprego de correntômetro, deve levar em conta os ventos atuantes na região. Uma vez definida a região do tombo, deverão ser feitas observações simultâneas do escoamento, a E e W da mesma, durante 1 ciclo completo de maré para se certificar que o escoamento é convergente (enchente) ou divergente (vazante) à mesma.

O panorama de circulação hidráulica no canal, associado ao relevo do seu fundo serão peças fundamentais na determinação da região do tombo de maré.

Tanto nos levantamentos batimétricos quanto no estudo da circulação hidráulica no canal, deverá ser usada, como base para correção da maré, a previsão dada na Tábua de Marés da DHN para o porto de Macau a qual, por verificações já efetuadas no campo, representa bem a variação de nível na região de Guamaré.

O fechamento puro e simples da extremidade de W do canal implicaria em que todo o escoamento se fizesse a través da entrada existente junto à Guamarê. Deixaria de existir a região do tombo da marê. Isto teria consequências imprevisíveis visto que a atual configuração do canal, o seu meandramento e formas, a existência da vegetação junto a Guamarê, estarem condicionados ao atual regime hidráulico do canal.

Poderíamos adiantar que a morfologia do canal não permaneceria a mesma. Deveria haver uma nova acomodação de formas e traçados que poderia resultar em ruptura da restinga, a E da região dos dutos, ou numa ligação do canal com os viveiros de camarão localizados imediatamente ao sul dele.

Além disso, a vegetação na região de Guamarê, circundando o canal, poderia ser afetada pela formação de canais secundários ou pelo aprofundamento do atual.

Qualquer fechamento do canal na região dos dutos deve ser precedido portanto, de um fechamento na região do canal mais próxima a Guamarê.

O ideal seria que o fechamento se desse na região do tombo de marê pois, desse modo, não se alteraria a circulação hidráulica no trecho do canal sujeito ao escoamento que se processa pela entrada de Guamarê. O papel desempenhado atualmente pelo escoamento que se processa pela entrada de W (barreira hidráulica) seria efetuado pela barreira constituída por dique(s).



A cota de coroamento do dique deverá ser, no mínimo +3,6 m pois o nível d'água devido à maré astronômica atinge até +3,2 m em ocasião de sizígia. Entretanto, deve-se levar em conta a maré meteorológica (devida à ação do vento e a existência de centros de baixa pressão) que se sobrepõe à maré astronômica. Não se deve esquecer também do problema de acomodação do dique devido ao seu peso próprio e a outros fatores, com a redução progressiva do nível do coroamento, uniformemente ou em regiões localizadas. Deve-se prever inspeções periódicas para acompanhar a variação da cota de coroamento do dique.

Uma vez separado o trecho E do canal, poder-se-ia promover o fechamento do mesmo diretamente a W dos dutos em estudo ou um fechamento intermediário logo a E do campo de dutos, próximo ao trecho em erosão da estrada de acesso aos dutos, como sugerido por engenheiros da PETROBRÁS.

Assim, este trecho do canal, incluindo a região dos dutos seria transformado em uma lagoa que tenderia a se colmatar com o tempo, devido ao transporte eólico de sedimentos a partir da barreira arenosa que a separaria do mar. A observação da região arenosa de praia mais interna à restinga, situada entre Guamaré e Diogo Lopes mostra várias lagoas "aprisionadas" pelo processo natural de transgressão da linha de praia.

O transporte litorâneo promoveria o assoreamento na região logo a W da extremidade da restinga, resultando



em um novo alinhamento de equilíbrio neste trecho de praia.

O processo de assoreamento no trecho da futura lagoa, cruzado pelos dutos, poderia ser apressado através da movimentação artificial de material de enchimento por intermédio de máquinas (dragas de sucção e recalque, equipamentos de terraplanagem, etc.). Desse modo seria estabilizada a linha da praia na região onde os dutos mergulham no mar.

Mantendo-se a estabilidade da linha de praia desde a entrada do canal de acesso ao terminal de Guamaré até a W da região dos dutos, há a possibilidade de que, no futuro, possa ocorrer o aparecimento de uma nova restinga mais ao largo, inicialmente pelo afloramento de um dos bancos submarinos próximo à linha de costa devido sobretudo à ação frontal das ondas e, posteriormente, pelos processos normais de migração para W dessas formações, conforme descrito no Capítulo 3.

Caso isto ocorra, ainda durante o tempo de exploração dos atuais campos petrolíferos servidos pelos dutos da região de Guamaré, os engenheiros da PETROBRÁS já estão alertados para o problema.

Deveria ser monitorada a estabilidade do cordão da antiga restinga mais para E do campo de dutos, sobretudo a parte mais estreita, bem como a estabilidade do(s) dique(s) de fechamento. Isto porque, transformando-se o trecho do canal em lagoa, cessa a comunicação direta com o mar exterior. Ocorrerá portanto uma diferença cíclica de

níveis d'água entre a futura lagoa e o mar, devido à variação do nível desse último com a maré. Os escoamentos subterrâneos resultantes e a variação do teor de água nos interstícios do material da restinga e dos diques poderá comprometer a estabilidade dos taludes internos e externos dessas formações, através de acomodações, deslizamentos, etc. Recomenda-se a consulta a um especialista em construção de diques de areia/argila e em mecânica de solos. A título de colaboração no levantamento desses problemas o autor enviou à PETROBRÁS cópia de notas sobre diques de areia, argila e outros materiais e a sua aplicação em estuários, rios, lagos e mar (correspondência DIEAM.CN-015/03.88).

Na adoção dessa terceira alternativa deve ser ainda apontado o aspecto de o fechamento a E não ser realizável, praticamente, na região do tombo de maré, caso este se localize na região de vegetação de tal forma que dificulte ou inviabilize o acesso de máquinas, ou que tenha que ser feito em uma grande extensão transversal ao canal até se atingir as cotas de +3,6 m em ambas as margens. Nesta última hipótese seria necessário o transporte de uma enorme quantidade de material através de terreno com vegetação e teria que ser construído um dique de areia, argila e outros materiais, de grande comprimento, o que causaria problemas à região já coberta pela vegetação. Neste caso, pode-se pensar em construir o dique de fechamento, na primeira seção julgada mais favorável a W da região do tombo de maré.

Deve-se observar que, neste caso, será acrescentado ao volume do prisma de maré que escoar pelo canal em Guama

rê, um volume igual à área da superfície d'água em meia ma  
rê, no trecho do canal entre a seção do dique e a do tomo  
de marê, multiplicada pela amplitude média da marê. Certa  
mente este aumento de volume no prisma de marê que se es  
coa pela entrada do canal em Guamarê causarã modificações  
em sua geometria. Não se tem meios de avaliar, com as in  
formações de que se dispõe no momento, quais seriam estas  
modificações.

Qualitativamente, baseado na relação (1), pode-se  
dizer que as áreas das seções transversais ao longo do ca  
nal aumentarã, devido ao aumento no volume do prisma de ma  
rê, compreendido entre cada seção e o novo limite do canal  
constituído pelo dique construído a W do tomo de marê.

Portanto, quanto mais próximo o dique ficar da re  
gião do tomo de marê, menor será alteração na circulação  
hidráulica na região.

Por outro lado, a maior alteração na circulação  
hidráulica no canal, como um todo, seria aquela produzida a  
penas pelo fechamento do mesmo, logo a W do gasoduto de  
26", como já se teve a oportunidade de abordar.

Os estudos e levantamentos hidráulicos e topogrã  
ficos recomendados neste relatório e já discutidos com os  
engenheiros da PETROBRÁS entre 1/3 e 4/3/88 em Natal, a  
crescentarã informações indispensáveis e essenciais para  
resolver o problema emergencial dos dutos, através da al  
ternativa de fechamento do canal. Eles também serão o pon  
to de partida para a monitoração das consequências que o

fechamento de trecho do canal produzirá nas regiões vizinhas.



## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Para solucionar a emergência existente na região de mergulho (na linha de praia) dos dutos do complexo petrolífero de Guamaré, onde um gasoduto e um oleoduto, ambos de 26" de diâmetro apresentam trechos em balanço e sujeitos a grandes velocidades de corrente, o que provoca vibrações, comprometendo a segurança dos dutos, três alternativas foram discutidas pelos engenheiros da PETROBRÁS ligados ao problema, o Eng<sup>o</sup> José Antônio dos Santos do Instituto de Pesquisas Hidroviárias INPH-PORTOBRÁS e o autor.

As duas primeiras praticamente não interferem na circulação hidráulica e sedimentológica do trecho costeiro entre Guamaré e a região dos dutos e são, resumidamente:

- a) Afundamento dos trechos em balanço dos dutos a um nível inferior ao do fundo atual do canal na seção dos dutos. Isto desobstruiria as seções e poderia até produzir um alteamento do fundo, abaixo das atuais geratrizes inferiores dos dutos, visto que a área da seção ficaria maior que a área de equilíbrio para o escoamento do atual prisma de maré;
- b) Deixar os trechos dos dutos em balanço na mesma posição, tratando de reduzir os esforços e vibrações por eles experimentados, com o emprego de estacas cravadas dos dois lados dos tubos (no meio dos vãos em balanço) sendo estes suportados por tirantes apoiados nas estacas.



Poderia também ser feito um estaiamento dos trechos em balanço dos dutos com o emprego de cabos presos a estacas cravadas do lado da restinga e do continente. Este suporte e sustentação provisórios aos trechos em balanço dos dutos ocorreria até que, com a migração mais para W da extremidade da restinga, a região estreita de concentração das linhas de fluxo do escoamento, que atualmente está localizada exatamente junto aos dois dutos, provocando as grandes velocidades e erosões, se desloque mais para W. A região dos dutos ameaçados passará a apresentar uma seção mais larga e, portanto, menos profunda, como aliás o é atualmente a região dos quatro dutos mais a E onde o escoamento de maré no canal não apresenta mais ameaças a integridade dos mesmos, segundo os engenheiros da PETROBRÁS. Estima-se em quatro a cinco meses, mantida a atual velocidade de migração da restinga (cerca de 20 m/mes), o prazo para que a região estreita de concentração das linhas de fluxo se desloque mais para W e a situação do oleoduto e do gasoduto em questão, passe a ser semelhante à atualmente experimentada pelos quatro dutos situados mais a E.

Ambas as alternativas não foram consideradas factíveis pela PETROBRÁS, dado o grau de risco alegado de rompimento dos dutos, na sua implementação.

Foi lembrado o prejuízo que poderia advir ao complexo de Guamaré pelo rompimento de qualquer um dos dois dutos e o impacto ecológico que resultaria, sobretudo da ruptura do oleoduto de 26", com o conseqüente derramamento de óleo na linha de praia. O Engº Ivandro, da PETROBRÁS, sugeriu inclusive que se instalasse, como precaução, enquanto não se equaciona o problema, barreiras de contenção de óleo dos dois lados do trecho em balanço do oleoduto.

5.2 Resta, portanto, a implementação da terceira alternativa que consiste em anular o escoamento de maré na região dos dutos, através do fechamento de trecho do canal compreendido entre a restinga e o continente.

Este fechamento deve ser precedido de levantamento batimétrico ao longo de todo o canal e levantamento topográfico das margens até a cota +4,0 m, bem como observações sobre o escoamento no canal, indicadas no Capítulo 4.

5.3 Deve-se definir, antes de qualquer fechamento, a região do tombo de maré, ou seja: a região onde as ondas de maré, penetrando pelas duas entradas do canal (a principal a W dos dutos e a secundária junto a Guamaré) se encontram. Este é o local onde são mínimas as velocidades ao longo do ciclo de maré e onde o fundo deve ser mais alto, devido à deposição de material.

5.4 O fechamento deve ser efetuado primeiramente na região do tombo de maré ou, na sua impossibilidade (ver item 4.3), o mais próximo possível a W dessa região, de modo a se alterar, o mínimo possível, o volume do prisma de



marê que se escoo através da entrada secundária do canal.

5.5 O fechamento seguinte poderá ser logo a E da área onde os seis dutos cruzam o canal, em local a ser escolhido de acordo com a facilidade de execução, a qual depende da geometria da seção e da quantidade de material necessária.

5.6 O terceiro e último fechamento poderá ser efetuado na extremidade W da restinga, logo a W do gasoduto de 26".

5.7 Os dois primeiros fechamentos podem vir a dispensar o terceiro pois, após eles, o escoamento através da entrada de W será reduzido, devido à redução no prisma de marê e o transporte litorâneo poderá vir a produzir naturalmente o fechamento dessa entrada.

5.8 Outra sequência para o fechamento seria, após a construção do dique mais a E, fechar diretamente a extremidade W do canal, dispensando o fechamento intermediário logo a E da região dos dutos. O aterramento da região dos dutos poderia ser feito logo após o fechamento da extremidade W da restinga. Esta sugestão já foi transmitida à PETROBRÁS na correspondência DIEAM.CN-015/03.88.

5.9 A construção dos diques deve obedecer normas que diminuam o risco de falhas nos mesmos durante e após a sua construção. Nota sobre diques de areia, argila e outros materiais e a sua aplicação em estuários, lagos, rios e mar foi enviada à RPNS-PETROBRÁS, juntamente com a corres

pondência citada em 5.8, com o intuito de auxiliar os trabalhos.

Recomenda-se a assessoria de um especialista em construção de diques, em ambiente sujeito a variação cíclica do nível d'água devido à maré, para o dimensionamento dos mesmos, metodologia e equipamentos necessários para o fechamento, previsão de proteção do fundo contra erosão, proteção do material já depositado, etc.

É bom lembrar que, à medida que a seção vai sendo estreitada, as velocidades vão aumentando (durante uma certa fase de fechamento) e, com isto, a erosão do fundo e das margens. Deve-se dimensionar, portanto, a colocação de material em quantidade maior que a que é erodida em cada estágio de obra (caso de fechamento com areia) ou prever uma proteção adequada contra a erosão. Assim, o fechamento depende de um projeto criterioso, para a garantia de seu maior sucesso e economia na obra. Ocorre que o tempo é escasso, tendo em vista a emergência apresentada pela situação atual dos dutos, como apontada pela PETROBRÁS.

5.10 Recomenda-se que o processo de fechamento das seções seja iniciado pelo trecho mais raso ligado a uma das margens. A conclusão do fechamento será feita no trecho mais profundo e deve ser processada de um modo rápido, iniciando-se nas vizinhanças da baixamar, ainda em fase de vazante. Caso haja um grande carregamento de material, o fechamento desse trecho mais profundo deve ser feito com o uso de areia ou outro material contido em sacos, ou lançando-se mão de anteparos rígidos. Pode ser necessária a proteção da extremidade da obra de fechamento da par

te mais rasa com a utilização de filtros, cascalho ou pedras de peso apropriado ou sacos de areia.

5.11 Recomenda-se que a cota inicial de coroamento dos diques deve ser de, no mínimo, +3,6 m em relação ao zero da DHN, dado que a máxima cota atingida pela maré astronômica na região, em ocasião de preamar de sizígia, é de +3,2 m. Além disso deve-se dar uma margem para levar em conta a elevação de nível, superposta à maré astronômica, devido à maré meteorológica, causada pela ação do vento (wind setup) e pela presença de centros de baixa pressão atmosférica que podem ocorrer na região.

5.12 Deve-se prever a execução de um monitoramento cuidadoso da estabilidade dos diques, após a sua construção, no que diz respeito a abatimentos, infiltração, etc., tendo-se à mão meios de reparar estas alterações, rapidamente.

5.13 Recomenda-se a monitoração da estabilidade do cordão de areia que separa o canal (futura lagoa) a ser fechado e o mar, após o fechamento, e do trecho arenoso entre o canal e as lagoas de criação de camarão.

5.14 Finalmente, enfatiza-se a necessidade de acompanhar, sistematicamente, a evolução do trecho do canal a E do fechamento próximo ao tobo de maré, na região coberta pela vegetação, até à sua extremidade, próximo à Guamaré. Quaisquer alterações significativas devem ser objeto de pronta ação corretiva.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Petróleo Brasileiro S.A. - PETROBRÁS, Levantamento Geofísico de Alta Resolução na Rota do Gasoduto Ligando PUB-2 ao Continente - Relatório Final - GEOMAP S.A. - Estudos Ambientais - Maio/1981 (Batimetria em nov/dz. - 1980).
- (2) ENCAL S.A., Relatório para a Construtora Mendes Júnior S.A. - "Serviços Efetuados na Área de Ubarana, RN, em Janeiro e Fevereiro de 1976" (27 de fevereiro de 1976).
- (3) ENCAL S.A., Relatório para a PETROBRÁS S.A., "Medições de Corrente na Área de Guamarê, RN (26/07/81 a 03/08/81).
- (4) CDTN/NUCLEBRÁS, "Estudo para o Descarte dos Efluentes da ETDI do Complexo de Guamarê via Emisário Submarino" - Divisão de Engenharia Ambiental - DERL.CN-008/87 - Belo Horizonte, Junho/87.
- (5) Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) - Marinha do Brasil, "Atlas de Cartas Piloto - Oceano Atlântico - de Trinidad ao Rio da Prata" - 1972.
- (6) INPH-PORTOBRÁS, "Investigações e Estudos Necessários ao Projeto de Disposição Oceânica dos Rejeitos Industriais e Sanitários a Serem Lançados ao Mar na Região de Macau-RN, INPH 163/81 (nov/81).

- (7) SWART, D.H., "Offshore Sediment Transport and Equilibrium Beach Profiles" - Tese de Doutorado - Publicação nº 131 do Laboratório de Hidráulica de Delft - Holanda - 1974.
- (8) MOREIRA DA SILVA, P.C., "Oceanografia Física" - Edição do Conselho Nacional de Pesquisas - Rio de Janeiro - setembro 1972.
- (9) O'BRIEN, M.P., "Equilibrium Flow Areas of Inlets on Sandy Coasts" - Journal of the Waterways & Harbors Division - Volume 92, Number WW1, pp.43-52 - February/1969. ASCE, New York.

/jms.

