

CARLOS HAKIO FUCATU

**ESTUDO DO EFEITO SOMBRA DA CORRENTE  
NA DINÂMICA DO SISTEMA FPSO/SHUTTLE  
CONECTADOS EM TANDEM**

Tese apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção  
do título de Doutor em Engenharia

**São Paulo**

**2003**

**CARLOS HAKIO FUCATU**

**ESTUDO DO EFEITO SOMBRA DA CORRENTE  
NA DINÂMICA DO SISTEMA FPSO/SHUTTLE  
CONECTADOS EM TANDEM**

Tese apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção  
do título de Doutor em Engenharia

Área de Concentração:

Engenharia Naval

Orientador:

Prof. Dr. Kazuo Nishimoto

**São Paulo**

**2003**

## AGRADECIMENTOS

À FAPESP, por ter financiado, parte desta pesquisa, através da concessão da bolsa de estudos de Doutorado.

Ao professor Hisaaki Maeda da Universidade de Tokyo, por ter possibilitado a realização dos ensaios nos tanques de provas da universidade. Ao técnico de laboratório Fumihito Suzuki, pelo inestimável auxílio recebido durante os ensaios.

Aos professores Júlio Meneghini, Celso Pesce e Alexandre Simos, pelos inúmeros conselhos recebidos.

Aos engenheiros da Petrobras, em especial, Isaias Masetti, por compartilhar seu extenso conhecimento na área de exploração de petróleo *offshore* e por ser um dos grandes incentivadores para o estreitamento da relação Petrobras-POLI, acreditando na capacidade dos pesquisadores do Departamento.

Ao meu grande amigo e orientador Kazuo Nishimoto, com quem tenho tido a grata experiência de trabalhar e aprender.

Finalmente, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

# ÍNDICE

Lista de Abreviaturas.....	i
Lista de Símbolos.....	ii
Índice de Figuras.....	iii
Índice de Tabelas.....	iv
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA.....	1
1.1.1 <i>Histórico</i> .....	1
1.1.2 <i>Comportamento dinâmico de navios amarrados</i> .....	4
1.1.3 <i>Motivação</i> .....	7
1.2 OBJETIVOS.....	8
1.3 JUSTIFICATIVA.....	8
1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
1.5 UTILIZAÇÃO DE CFD.....	14
1.6 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	17
<b>2. ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DO EFEITO SOMBRA DA CORRENTE.....</b>	<b>18</b>
2.1 ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA REGIÃO DE SOMBRA.....	19
2.2 ENSAIO DE MODELO CATIVO COM DOIS NAVIOS.....	21
2.2.1 <i>Descrição do Experimento</i> .....	22
2.2.2 <i>Aquisição dos dados</i> .....	27
2.2.3 <i>Resultados</i> .....	28
2.3 ENSAIO DE FREE RUNNING.....	35
2.3.1 <i>Descrição do Experimento</i> .....	37
2.3.2 <i>Aquisição dos dados</i> .....	38
2.3.3 <i>Resultados</i> .....	38
<b>3. DETERMINAÇÃO DO EFEITO SOMBRA ATRAVÉS DE MAPAS DE SOMBRA.....</b>	<b>42</b>
3.1 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE SOMBRA NO SIMULADOR DYNASIM.....	43
3.2 MAPAS DE SOMBRA USANDO PROGRAMA CFD.....	44
<b>4. EFEITO SOMBRA USANDO CAMPO DE VELOCIDADES À JUSANTE DO FPSO.....</b>	<b>49</b>
4.1 METODOLOGIA DE CÁLCULO.....	49
4.2 EQUAÇÕES DO MOVIMENTO.....	50
4.2.1 <i>Força Devido a Diferença de Velocidades nos Bordos do Navio</i> .....	52
4.3 CAMPO DE VELOCIDADES PERTURBADO PELO FPSO.....	54
4.3.1 <i>Avaliação do Campo de Velocidades Obtido no CFD</i> .....	55
4.3.2 <i>Determinação da Profundidade do Campo de Velocidade</i> .....	59
4.3.3 <i>Campo de Velocidade na Escala Real e do Modelo</i> .....	60
4.4 AVALIAÇÃO DO MODELO DE SOMBRA NO SIMULADOR DYNASIM.....	62
<b>5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>64</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>67</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>71</b>

## **Lista de Abreviaturas**

**CFD** – *Computational Fluid Dynamics*

**DICAS** – *Differentiated Compliant Anchoring System*

**DYNASIM** – *Dynamic Simulator* (Simulador de Navios amarrados)

**FPSO** – *Floating Production, Storage and Offloading*

**FSO** – *Floating Storage and Offloading*

**IPT** – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

**OCIMF** - *Oil Companies International Marine Forum*

**SALM** – *Single Anchor Leg Mooring*

**SPM** – *Single Point Mooring*

## Lista de Símbolos

- $C_F$  - Coeficiente de atrito viscoso
- CG – Centro de gravidade
- $F_{adc}$  – Força lateral devido efeito Bernoulli
- $I_z$  – Momento de inércia em *yaw*
- M – Massa do Navio
- $M_{adc}$  – Força lateral devido efeito Bernoulli
- $r, \dot{r}$  – Velocidade e aceleração angular de *yaw* no sistema local
- Re – Número de Reynolds
- $u, \dot{u}$  – Velocidade e aceleração longitudinal no sistema local
- $v, \dot{v}$  – Velocidade e aceleração lateral no sistema local
- $V_c$  – Velocidade da corrente
- $V_{c_r}(u_r, v_r)$  – Velocidade relativa da corrente
- $\mathbf{X}_{ext} = (X_{ext}, Y_{ext}, N_{ext})$  – Vetor das forças externas
- $\mathbf{X}_i$  – Vetor força inercial
- $\mathbf{X}_h$  – Vetor força de corrente mais amortecimento viscoso
- $\mathbf{X}_v$  – Vetor força de vento
- $\mathbf{X}_o$  – Vetor força de onda
- $\mathbf{X}_m$  – Vetor força de amarração
- $\psi$  - Ângulo de aproamento do navio
- $\psi_{cr}$  - Ângulo de incidência da corrente
- $\Psi_{cr}$  - Ângulo relativo de incidência da corrente
- $\rho$  - Densidade da água

## Lista de Figuras

Fig.1.1 - Amarração tipo SPM - SALM com corrente e monobóia .....	2
Fig.1.2 - FPSO com <i>turret</i> , e navio <i>shuttle</i> amarrado em tandem .....	3
Fig.2.1 – Tanque de corrente recirculante.....	19
Fig.2.2 – Secção longitudinal do tanque – Largura de 1.8m.....	20
Fig.2.3 – Campo de velocidades experimental. ....	21
Fig.2.4 – Tanque de provas oceânico de manobras .....	22
Fig.2.5 – Esquema do experimento.....	22
Fig.2.6 – Montagem do experimento .....	23
Fig.2.7 – Plano de balizas do modelo FPSO.....	25
Fig.2.8 – Plano de balizas do modelo <i>shuttle</i> .....	25
Fig.2.9 – Definição da zona de segurança para <i>offloading</i> .....	26
Fig.2.10 – Exemplo de posições de medição na sombra do FPSO .....	26
Fig.2.11 – Exemplo dos sinais de força/momento obtidos no ensaio.....	28
Fig.2.12 – FPSO 100% - Curvas de Cds.....	30
Fig.2.13 – FPSO 40% - Curvas de Cds.....	30
Fig.2.14 – <i>Shuttle</i> 100% - Curvas de Cds .....	31
Fig.2.15 – <i>Shuttle</i> 40% - Curvas de Cds .....	31
Fig.2.16 – Sistema de coordenadas.....	32
Fig.2.17 – Mapa de Sombra - Força X.....	33
Fig.2.18 – Mapa de Sombra - Força Y.....	34
Fig.2.19 – Mapa de Sombra – Momento Z.....	34
Fig.2.20 – Série temporal da velocidade no tanque de corrente recirculante.....	36
Fig.2.21 – Esquema do experimento de <i>free running</i> .....	37
Fig.2.22 – Montagem do experimento de <i>free running</i> .....	37
Fig.2.23 – Trajetória do movimento do <i>shuttle</i> .....	39
Fig.2.24 – Série temporal dos movimentos do <i>shuttle</i> com e sem FPSO .....	40
Fig.3.1 – Malha do modelo CFD – vista geral e detalhe dos navios.....	45
Fig.3.2 – Mapa de Sombra Numérico (Fluent) - Força X .....	46
Fig.3.3 – Mapa de Sombra Numérico (Fluent) - Força Y .....	47
Fig.3.4 – Mapa de Sombra Numérico (Fluent) – Momento Z.....	47
Fig.4.1 – Sistemas de coordenadas .....	50
Fig.4.2 – Campo de velocidades para FPSO a 90 graus .....	53
Fig.4.3 – Esquema para cálculo da força lateral adicional.....	53
Fig.4.4 – Campo de velocidades do Fluent – prof. 20mm .....	56
Fig.4.5 – Campo de velocidades do Fluent – prof. 50mm .....	57
Fig.4.6 – Campo de velocidades do Fluent – prof. 90mm .....	57
Fig.4.7 – Campo de velocidades do Fluent – prof. 120mm .....	58
Fig.4.8 – Campo de velocidades do Fluent – plano vertical .....	58
Fig.4.9 – Campo de velocidades do Fluent – prof. 3.6m (20mm esc.mod.).....	62
Fig.4.10 – Influência da força/momento adicional na dinâmica do <i>shuttle</i> .....	64

## Lista de Tabelas

Tabela - 2.1a – Características do modelo FPSO (1:180).....	24
Tabela - 2.1b – Características do modelo <i>shuttle</i> (1:180) .....	24
Tabela - 2.2 – Combinação dos aproamentos .....	25
Tabela - 2.3 – Velocidades de ensaio .....	27
Tabela - 2.4 – Tempo de ensaio .....	38
Tabela - 3.1 – Valores de $C_{d_y}(90^\circ)$ .....	48



## Resumo

A recente expansão na utilização de sistemas F(P)SOs na produção de petróleo *offshore* tem demandado estudos que prevejam o comportamento dinâmico de dois navios conectados em tandem, que é a configuração normalmente utilizada nas operações de *offloading*.

Apesar da amarração de navios em tandem ser um procedimento comum, ainda são poucos os trabalhos publicados relacionados ao assunto, e entre estes, nenhum leva em consideração o efeito da interferência da corrente que um navio causa no outro, aqui denominado como: **efeito sombra**.

Sabe-se que o comportamento dinâmico dos navios amarrados é fortemente afetado pelas forças ambientais, principalmente nos sistemas SPM, assim, supõe-se que o efeito sombra tenha grande influência no comportamento dinâmico do navio *shuttle*, que irá, por consequência, alterar o comportamento do sistema como um todo. De fato, ensaios realizados em tanques de provas com navios *shuttles*, com e sem a presença do FPSO na posição de montante, comprovam esse fato. Portanto, pode-se dizer que o efeito de sombra é fundamental no estudo do comportamento dinâmico de navios amarrados em tandem.

Os poucos programas comerciais existentes, que possibilitam a simulação dinâmica de dois navios em tandem, também não levam em consideração o efeito sombra, tornando sua utilização um tanto limitada.

O presente trabalho apresenta o estudo do efeito sombra da **corrente** e sua influência no comportamento dinâmico de sistemas com dois navios em tandem. Foi desenvolvido um modelo de sombra da corrente baseado no campo de velocidades perturbado pelo navio à montante, que foi implementado no simulador de navios amarrados, DYNASIM. Os resultados numéricos foram avaliados através de comparações com resultados experimentais, onde se obteve uma boa aderência em várias situações.

## Abstract

The ship based Floating Production Storage and Offloading system (FPSO) has been largely used in the recent offshore oil exploration. In most of the cases the oil stored in FPSO is offloaded to a shuttle ship that is connected by a hawser in tandem configuration.

Although the tandem mooring is a common procedure in the offshore oil industry, there are few publications related to the theme. Among these, there is none concerned with the current forces interference caused by FPSO on the shuttle ship, here called **shadow effect**.

It is well known that the dynamic behavior of a moored ship, in particular SPM system, is hardly affected by the environmental forces. Therefore, it is expected that the shadow effect on the hydrodynamic forces acting on the shuttle ship will cause great influence on its dynamic behavior, and consequently in the dynamics of whole FPSO-shuttle system. This phenomenon could be observed in experiments with single point moored shuttle ships with and without the FPSO in upstream position. Therefore, for the sake of reality, the shadow effect must be considered in analysis of dynamic behavior of two ships connected in tandem.

Among the commercial simulators that analyze tandem systems there is none that considers the shadow effect, providing an analysis different from the real world.

This thesis presents a study of the current shadow effect. The shadow effect model, based on the disturbed current field was developed and implemented in a numerical simulator named DYNASIM. The comparison between numerical results and experimental ones showed that the proposed model is effective.

# 1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os problemas inerentes à dinâmica de navios amarrados, em particular o comportamento dinâmico do navio *shuttle* conectado em tandem com um navio FPSO, em virtude do efeito sombra dos agentes ambientais. Mostra-se a importância em se prever o comportamento dinâmico do sistema, e os meios para isso, enfatizando-se as vantagens da simulação numérica. Ainda são apresentados a revisão bibliográfica, os objetivos principais do trabalho e as justificativas.

## 1.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

### 1.1.1 Histórico

Uma das experiências pioneiras na exploração de petróleo no mar ocorreu no México em 1946, onde eram utilizadas plataformas fixas de madeira, sendo que a lâmina d'água era de aproximadamente 5.0 m. Com a intensificação da busca, a exploração deixou a costa em direção a águas cada vez mais profundas, onde foram desenvolvidas as primeiras plataformas metálicas fixas e as auto-elevatórias.

Pelo fato destas plataformas apresentarem custos em progressão geométrica com a lâmina d'água, no final da década de 70 surgiram as primeiras plataformas semi-submersíveis posicionadas através de linhas em catenária.

Uma vez que as plataformas semi-submersíveis possuem baixa capacidade de armazenamento, faz-se necessária a presença de um navio tanque (FSO – *Floating Storage and Offloading*) por perto para armazenar a produção, sendo que este é invariavelmente posicionado através de uma monobóia (SPM – *Single Point Mooring*), Fig.1.1.

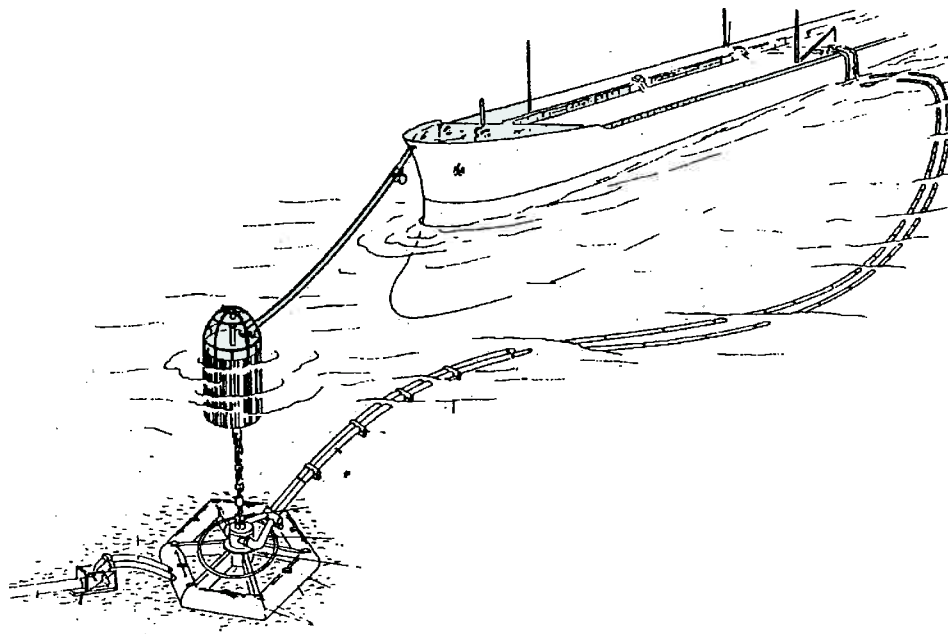


Fig.1.1 - Amarração tipo SPM - SALM com corrente e monobóia

Atualmente, a tecnologia FPSO (*Floating Production, Storage and Offloading System*) vem se firmando como uma nova tendência em unidades de produção flutuantes em detrimento das atuais plataformas semi-submersíveis. Tal fato ocorre devido ao alto custo desta última e relativamente baixo da primeira. A conversão de antigos petroleiros em FPSOs, com sistemas de amarração do tipo *Turret*, Fig.1.2, ou DICAS<sup>(1)</sup>, é uma solução interessante não só economicamente como ecologicamente correta, pelo fato de se criar uma destinação para os antigos petroleiros, resultado do contínuo sucateamento da atual frota mundial esperado para os próximos anos.

(1) DICAS- *Differentiated Compliant Anchoring System* – Desenvolvida pioneiramente pela Petrobras, é uma variante do *Spread Mooring System*, que através de pré-tensões diferenciadas nas linhas, permite um certo grau de liberdade em *yaw*, possibilitando um maior alívio no sistema de amarração.

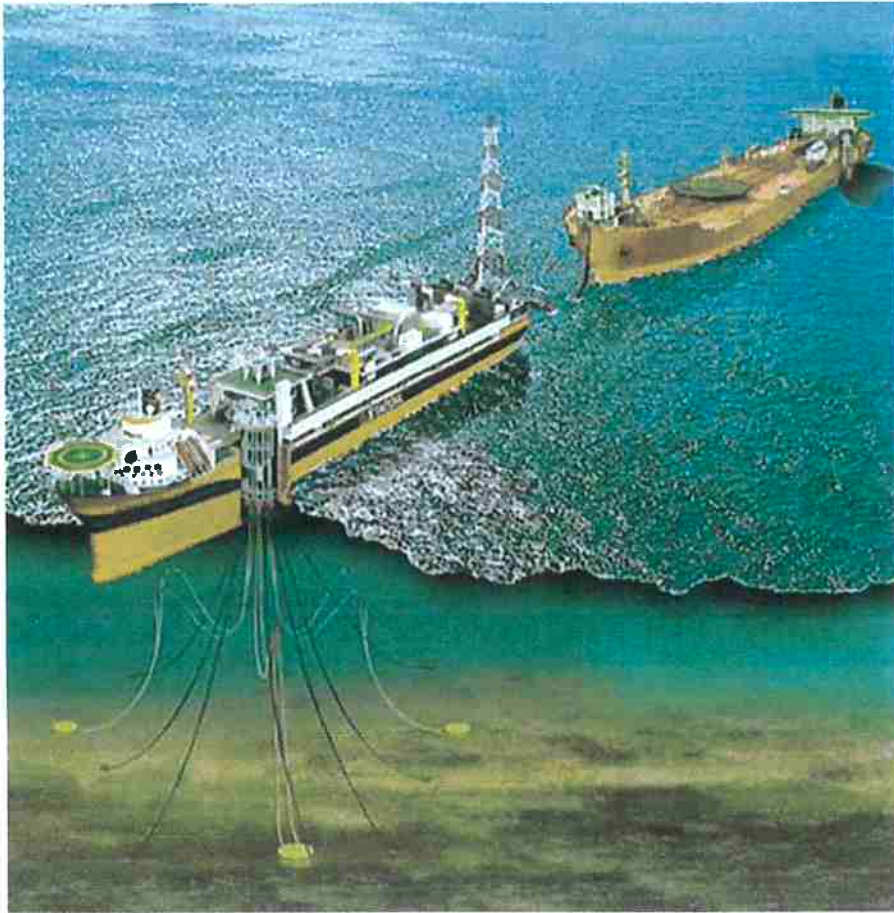


Fig.1.2 - FPSO com *turret*, e navio *shuttle* amarrado em tandem.

Com isso, os sistemas de amarração começaram a desempenhar um papel cada vez mais importante na viabilização da exploração de petróleo em águas profundas.

O petróleo produzido é temporariamente armazenado em navios cisternas ou no próprio FPSO e é transportado para o continente através de navios aliviadores (*shuttles tankers*). O transbordo de petróleo é feito através de mangotes conectando o FPSO/cisterna com o navio *shuttle*, para isso, estes são amarrados em tandem, como ilustrado na Fig.1.2. O descarregamento do *shuttle* é feito em terminais junto à costa, onde este é amarrado em uma monobóias (SPM).

### **1.1.2 Comportamento dinâmico de navios amarrados**

Em função de suas características construtivas, as plataformas semi-submersíveis não apresentam problemas de aproamento em relação ao vento e são praticamente transparentes à ação de ondas. No caso de plataforma com *pontoons*, esta deve estar aproada preferencialmente na direção da corrente predominante. De uma maneira geral, pode-se dizer que as plataformas são estruturas menos sujeitas às condições ambientais.

Já no caso de navios, qualquer que seja o sistema de amarração, dependendo da combinação entre as inúmeras variáveis envolvidas, tais como porte do navio, condição de calado, direção e intensidade de corrente, vento e ondas, comprimento do *hawser*, no caso de SPM, posição do *turret*, pré-tensão das linhas, etc., o navio pode apresentar um comportamento instável, executando movimentos de baixa frequência e de grande amplitude, no caso de SPM, tandem ou DICAS. E no caso do *turret*, pode ainda apresentar uma instabilidade estática (bifurcação). Em todos os casos, tais instabilidades têm como consequência o aparecimento de altos picos de tensão no sistema de amarração. (Nishimoto, 1996).

Assim, a predição da estabilidade, no plano horizontal, de navios amarrados é de extrema importância para o projeto do sistema de amarração. Existem várias formas de se fazer a predição do comportamento dinâmico.

a) Ensaio com modelos reduzidos em tanque de provas. É uma análise bem completa fornecendo muitas informações inerentes ao comportamento do navio amarrado. Porém, possui desvantagens como: alto custo; tempo demandado (entre a confecção do modelo, o ensaio propriamente dito e o tratamento dos dados); limitada flexibilidade para se ensaiar as inúmeras combinações possíveis dos parâmetros envolvidos, dentre outras.

Outro problema é o efeito de escala, consequência da diferença entre os números de Reynolds do modelo com o da escala real, fazendo com que o escoamento entre as duas escalas não sejam exatamente iguais. Isso decorre devido ao fato da velocidade do modelo ser obtida através da igualdade do número de Froude, mesmo sabendo que nem todos os fenômenos envolvidos são escaláveis com ele. O coeficiente de atrito viscoso ( $C_F(Re)$ ), por exemplo, varia inversamente com o número de Reynolds. Assim, as forças viscosas, que têm efeito preponderante sobre a força longitudinal, resultam proporcionalmente maiores no modelo do que na escala real, em função da grande discrepância nos números de Reynolds entre as escalas de modelo e real, que são da ordem de  $10^5$  e  $10^8$  respectivamente. Com isso, a força hidrodinâmica longitudinal, que possui papel determinante no comportamento de sistemas SPM, será maior na escala do modelo do que na escala real, fazendo com que o modelo seja mais estável que seu equivalente real. Este problema é parcialmente contornado com a utilização de excitadores de turbulência no modelo. Porém, cabe ressaltar que esta é uma prática puramente empírica, que não garante a igualdade de escoamentos entre as duas escalas.

b) Estudo da estabilidade do sistema através das equações características. Em função da complexidade do sistema, nem sempre é possível considerar os efeitos não lineares, limitando a abrangência deste tipo de análise. O resultado da análise é mais macroscópico, fornecendo regiões de estabilidade, e não fornecendo dados importantes para o projeto do sistema de amarração, tais como, os valores de pico de força e máxima excursão do navio, por exemplo. Mais recentemente, técnicas modernas de matemática aplicada, tal como o Teorema da Variedade Central, vem sendo empregada para o estudo de problemas de bifurcação estática e dinâmica na área de engenharia *offshore*, Bueno (2003). Sua vantagem sobre métodos usuais como o de Routh-Horwitz, por

exemplo, é que com este, obtém-se um cenário mais completo da estabilidade do sistema, onde é possível obter resultados tanto qualitativos como quantitativos, e não apenas resultados do tipo estável-instável.

c) A análise do comportamento no domínio da frequência, apesar de fornecer dados importantes para o projeto de amarração, possui limitações devido à impossibilidade em se considerar os efeitos não lineares.

d) Simulação dinâmica no domínio do tempo. Dentre as simulações numéricas é a mais versátil permitindo a inclusão dos fenômenos não lineares conseguindo-se com isso um resultado mais fiel à realidade.

A grande vantagem da simulação numérica, frente aos tradicionais ensaios em tanque de provas, está na grande flexibilidade em se alterar os vários parâmetros que podem influenciar a dinâmica do sistema, tais como: condição de calado, posição do *fairlead*, comprimento do *hawser*, direção e intensidade do vento, corrente e onda, etc. Além disso, o custo para a realização de simulações numéricas é muito mais baixo, possibilitando ainda a realização de análises com grande agilidade, limitadas somente pelo tempo de processamento.

Apesar das vantagens do simulador numérico, os ensaios em tanque de provas ainda são insubstituíveis, pois, o simulador não deixa de ser um modelo matemático, que não representa a totalidade dos fenômenos envolvidos em um sistema real. Mas pode-se dizer que a simulação numérica é uma importante ferramenta onde se pode “ensaiar” uma infinidade de casos, identificando situações críticas, que podem mais tarde ser investigadas e confrontadas com testes em tanque de prova. O procedimento ideal para o desenvolvimento do estudo seria a calibração do simulador com resultados



de ensaios físicos e com isso, extrapolar o comportamento do sistema para outras condições ambientais, configuração do sistema de amarração, lâmina d'água, etc.

### **1.1.3 Motivação**

Dentre os sistemas de navios amarrados, os sistemas SPM são os mais difíceis de serem analisados devido à sua grande sensibilidade aos parâmetros envolvidos, em particular às **forças hidrodinâmicas** resultantes do movimento do navio e/ou presença de corrente. O autor, em sua dissertação de mestrado, Fucatu (1998), mostrou que dependendo do modelo hidrodinâmico adotado o sistema poderia ser tanto estável como instável, apresentando movimentos de *fishtailing*, caracterizado por ser um movimento oscilatório de grande amplitude e baixa frequência.

Como nas operações de *offloading*, o navio *shuttle* fica conectado em tandem ao FPSO/cisterna através de um *hawser*, ou seja, através de um único ponto, o navio *shuttle* acaba apresentando os mesmos problemas de instabilidade observados em sistemas SPM. Assim, dada a grande sensibilidade destes sistemas às forças hidrodinâmicas, espera-se que o efeito sombra dos agentes ambientais geradas por um corpo de grandes dimensões como o de um FPSO tenha alguma influência no comportamento dinâmico do navio *shuttle*, que irá, por conseqüência, alterar o comportamento do sistema como um todo. De fato, em experimentos realizados em tanque de provas confirmou-se a influência do efeito sombra do FPSO no comportamento dinâmico do navio *shuttle*. Em experimentos de *free running* (onde o modelo é amarrado e rebocado através do *hawser* e é "livre" para se movimentar) com o navio *shuttle* sem o FPSO a montante, o primeiro apresentava movimentos de *fishtailing* de grande amplitude. Por outro lado, com o FPSO a montante, o *shuttle* tendeu assintoticamente a uma posição de equilíbrio.

Apesar da amarração de navios em tandem ser um procedimento comum na indústria *offshore*, ainda são poucos os trabalhos publicados relacionados ao assunto e entre estes, com exceção dos trabalhos do próprio autor, nenhum leva em consideração o efeito da interferência da corrente, que o navio a montante provoca no escoamento, aqui denominado como **efeito sombra**.

Os poucos programas comerciais existentes, que possibilitam a simulação dinâmica de dois navios em tandem, também não levam em consideração o efeito sombra, reduzindo a confiabilidade dos resultados gerados pelos mesmos.

## 1.2 OBJETIVOS

Os principais objetivos desta tese são:

- O estudo do efeito sombra da **corrente** e sua influência no comportamento dinâmico de sistemas com dois navios em tandem.
- O desenvolvimento de um modelo empírico do efeito sombra da corrente.

O modelo do efeito sombra desenvolvido é implementado no DYNASIM, simulador de navios amarrados desenvolvido pelo autor em seu projeto de pesquisa no curso de mestrado. O modelo do efeito sombra é avaliado através de comparações entre os resultados apresentados nas simulações com os resultados de ensaios com modelos reduzidos em tanque de provas.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

A não consideração do efeito sombra nas simulações de sistemas tandem nem sempre resulta numa análise conservativa, principalmente em sistemas sensíveis como o SPM. Neste sistema, simulações com velocidade de corrente menor podem produzir picos de tensão maiores no *hawser* do que para velocidades maiores. Isso decorre da

instabilidade dinâmica do sistema que pode levar o navio a oscilar em movimentos de baixa frequência e grande amplitude (*fish tailing*). Portanto, um simulador que considere o efeito sombra pode ser de grande valia para o dimensionamento do sistema de amarração, bem como para a otimização do procedimento de *offloading*, definindo o melhor comprimento do *hawser* de conexão, por exemplo.

A escolha do estudo do efeito sombra de corrente, em detrimento do vento e da onda, foi baseada nos seguintes fatores:

- É sabido que em regiões com condições ambientais mais severas, como no Mar do Norte, os esforços referentes ao vento e às ondas são os que mais carregam o sistema. Por outro lado, em regiões com condições ambientais mais amenas, como o caso brasileiro, a corrente é o agente predominante.
- As operações de *offloading* só são realizadas com condições de mar mais amenas.
- As forças de onda são hoje bem conhecidas podendo ser calculadas com grande precisão, considerando inclusive a interferência entre corpos.
- As forças devido à corrente são as que mais afetam o comportamento dinâmico de sistemas SPM.

Para escoamentos de fluidos não viscosos ao redor de sólidos, ainda é possível obter soluções analíticas, porém, ao se considerar escoamentos viscosos, tal tarefa torna-se praticamente impossível dada a não linearidade dos vários fenômenos envolvidos. Face às essas dificuldades, optou-se por desenvolver um modelo de sombra da corrente baseado em resultados experimentais e numéricos, estes últimos, obtidos através de programas CFDs comerciais. (*Computational Fluid Dynamics*).

#### 1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A partir do final da década de 70, pesquisadores de diversos institutos começavam a desenvolver simuladores de navios amarrados dando ênfase especial à modelagem das forças hidrodinâmicas, resultantes da interação entre o casco do navio com o meio fluido, que englobam as forças devido ao arrasto e ao amortecimento viscoso. Em razão da grande influência das forças hidrodinâmicas na dinâmica do sistema, aliada à difícil modelagem da mesma, esta recebeu uma atenção especial onde cada autor apresentou um modelo que melhor tentava reproduzir este fenômeno físico. A seguir, são listados alguns dos autores que mais contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Wichers, desde seus primeiros trabalhos (1976), percebeu a importância do amortecimento viscoso no comportamento dinâmico do sistema, dando uma atenção especial a este termo, realizando extensos estudos e experimentos culminando com sua tese de doutorado em 1988. As forças hidrodinâmicas são calculadas através de duas parcelas: a “parcela estática” equivalente à força obtida pela tradicional fórmula de arrasto hidrodinâmico, utilizando as curvas de coeficientes da OCIMF (1993) ( $C_d$  em função do ângulo de ataque); e a “parcela dinâmica” que considera o efeito do movimento de rotação do navio, no plano horizontal, calculadas através de coeficientes obtidos com análise de Fourier sobre os resultados de ensaios. É de sua autoria o simulador TERMSIM II, desenvolvido no MARIN. (*Maritime Research Institute Netherlands*)

Em 1979, Faltinsen, do MARINTEK (*Norwegian Marine Technology Research Institute*), propôs a utilização do “*local cross flow principle*” para o cálculo das forças hidrodinâmicas, nos movimentos de *sway* e *yaw*, integrando as forças/momentos

seccionais ao longo do eixo do navio. Com isso, o efeito da velocidade de *yaw* do navio era implicitamente considerado ao se calcular a velocidade seccional.

Em 1980, Molin, responsável pelo desenvolvimento do simulador ARIANE do Bureau Veritas, apresentou um modelo mais simplificado. A força estática de arrasto é obtida de modo análogo ao de Wichers, e para a parcela dinâmica, devido ao movimento de *yaw*, Molin desenvolveu uma fórmula empírica para o amortecimento viscoso linear em *yaw*, denominada “momento de *yaw* de Molin”. A fórmula é muito parecida com o “*local cross flow principle*”, porém, a integração ao longo do comprimento do navio é feita com a velocidade seccional linear e usa o “coeficiente de Molin”, que no caso de navios tanque é dado por:  $0.3.Cd_y(90^\circ) \leq C_{Molin} \leq 0.4.Cd_y(90^\circ)$ .

Fujino, 1983, publicou um trabalho apresentando uma nova proposta para o cálculo das forças hidrodinâmicas. Ele utilizava as derivadas hidrodinâmicas (coeficientes hidrodinâmicos de manobrabilidade) para o cálculo destas forças no estudo de sistemas SPM. Sua proposta era muito interessante, pois aproveitava as derivadas hidrodinâmicas levantadas para o estudo de manobrabilidade, possuindo assim uma grande biblioteca de dados, diferentemente dos coeficientes de arrasto em função do ângulo de ataque (OCIMF,1993), que começaram a ser estudados mais recentemente (anos 80). Porém, pelo fato deste utilizar derivadas hidrodinâmicas para manobras de alta velocidade, seu modelo tinha uma aplicação um tanto limitada para o estudo de navios amarrados. Quando o navio se desloca em alta velocidade, o ângulo de ataque em relação ao escoamento dificilmente supera os 45°. Por outro lado, no caso de navios amarrados, quando as condições ambientais não são colineares, o ângulo de ataque em relação ao escoamento frequentemente ultrapassa este valor.

Obokata (1986), seguindo a mesma linha de Faltinsen, utilizou o “*local cross flow principle*” para o cálculo das forças hidrodinâmicas, nos movimentos de *surge*, *sway* e *yaw*. No caso, Obokata utiliza os coeficientes de arrasto em função do ângulo de incidência relativo (curvas do tipo OCIMF).

Em 1991, Kat & Wichers publicam um trabalho sobre navios amarrados a monobóias, onde a parcela dinâmica das forças hidrodinâmicas é calculada através do *local cross flow principle*.

Leite et al. (1998), propuseram um modelo hidrodinâmico heurístico (Modelo de Asa Curta) para o cálculo das forças e momento estáticos, no plano horizontal, atuante no navio devido à corrente. Este modelo utiliza os coeficientes hidrodinâmicos baseados na teoria de asa de baixa razão de aspecto e o *cross flow drag* para o cálculo da parcela estática. O modelo, além de apresentar boa aderência com resultados em tanque de provas, surpreende pela sua simplicidade, dependendo basicamente de parâmetros geométricos do navio e de alguns coeficientes hidrodinâmicos. Este modelo foi aprimorado por Simos (2001), sendo que para a parcela dinâmica utilizou-se o *local cross flow principle*, acoplado a uma função de correção do coeficiente de arrasto lateral ao longo do comprimento do navio.

O estudo do comportamento de navios em manobras, no plano horizontal vem sendo estudado há muito mais tempo. Os modelos desses estudos consideravam o navio operando em velocidade de projeto e têm como finalidade estudar a estabilidade direcional e a controlabilidade da embarcação. Como exemplos destes trabalhos pode-se citar o de Abkowitz (1969) e Norbinn (1971).

Mais tarde, na década de 80, Takashina (1986) desenvolveu um modelo de manobras para baixas velocidades para estudar manobras de atracação de navios. Em

função das grandes diferenças na hidrodinâmica das manobras de alta e baixa velocidade, Takashina desenvolveu um novo método para a obtenção das derivadas hidrodinâmicas, visando quantificar a influência do movimento de *yaw* nos movimentos de *surge* e *sway*.

Dada a grande similaridade dinâmica entre as manobras de baixa velocidade com o comportamento de um navio amarrado sujeito à corrente, o autor (1998) seguindo a mesma idéia de Fujino, desenvolveu em seu projeto de pesquisa no curso de mestrado o simulador de navios amarrados que contemplava o modelo de Takashina, onde obteve bons resultados.

O estudo do comportamento dinâmico de dois navios amarrados em tandem ainda tem sido muito pouco explorado, em especial, quando se trata de simulações no domínio do tempo. Em 1996, o autor em co-autoria com Nishimoto, desenvolveu um simulador para análises de navios conectados em tandem. Neste trabalho foram obtidos resultados muito interessantes, onde o sistema, de acordo com as condições de carregamento e/ou condições ambientais, assumia configurações de aproamento inesperadas. Entretanto, tais resultados foram obtidos com a hipótese de não interferência dos agentes ambientais de um navio sobre outro.

Em 2000, Lee & Choi também fizeram um estudo similar, considerando somente a interferência na onda. Os coeficientes hidrodinâmicos referentes às ondas foram obtidos através do método de distribuição de singularidades, porém, não foram dados maiores detalhes da implementação no simulador.

Morishita (2002) vem desenvolvendo uma série de trabalhos estudando a estabilidade de sistemas de dois navios em tandem, mas este também ignora o efeito sombra dos agentes ambientais.

Em 2000, Koh em seu projeto de formatura realizou uma série de ensaios considerando apenas a corrente para analisar a influência do navio *shuttle* na dinâmica de um FSO, estando o *shuttle* conectado em tandem com o FSO e este último conectado a uma bóia (SPM). Apesar do objetivo não ter sido o estudo do efeito sombra, este apresenta alguns resultados que evidenciam a sua influência.

Em 2001, Buchner apresentou um estudo preliminar para avaliar o efeito sombra do vento. O estudo, baseado em ensaios de túnel de vento, mostrou que o efeito sombra do vento é bastante significativo.

Dada a sua complexidade, a interferência no escoamento entre dois corpos ainda têm sido bastante estudada no meio acadêmico, principalmente através de soluções numéricas (CFD) e utilizando corpos de formas “simples e rombudas” como cilindros circulares ou quadrados.

### 1.5 UTILIZAÇÃO DE CFD

Neste trabalho o CFD (*Computational Fluid Dynamics*) foi utilizado apenas como ferramenta de análise para o levantamento do campo de velocidades perturbado pelo FPSO. A seguir, são apresentados alguns conceitos básicos referentes aos programas de CFD, bem como algumas limitações ainda presentes nesta ferramenta.

Em virtude da complexidade, para não dizer impossibilidade, em se modelar analiticamente todos os fenômenos envolvidos num escoamento, em particular o escoamento turbulento, as soluções numéricas através do CFD começaram a ganhar força, principalmente, com o desenvolvimento e barateamento dos computadores das últimas décadas. As análises através de programas CFD praticamente não apresentam restrições quanto à geometria, condição de contorno ou dimensões do sistema a ser analisado, a não ser àquelas relacionadas com a capacidade computacional disponível.



Com isso, nas últimas décadas o CFD deixou de ser uma exclusividade do ambiente acadêmico para se tornar uma importante ferramenta de projeto para a indústria. No atual estágio de desenvolvimento, o CFD ainda não substitui por completo os ensaios em laboratórios, mas uma vez que os resultados do CFD estejam calibrados com os experimentais, este pode ser utilizado para otimizações de sistemas, proporcionando grande flexibilidade e baixo custo no desenvolvimento de projetos.

Um dos pontos fracos dos programas CFD, ainda hoje sem uma solução definitiva, está na dificuldade em se modelar escoamentos turbulentos. Os escoamentos turbulentos são caracterizados pelas intensas flutuações de diferentes escalas no campo de velocidades. Como estas flutuações podem conter parcelas de pequena escala e alta frequência, que necessitam de um grande esforço computacional para a sua resolução, a sua consideração torna a análise demasiadamente demorada e cara para problemas de engenharia. Os programas CFD driblam esse problema através de métodos como *time-averaged*, *ensemble-averaged* ou qualquer outro método que “remova” esses efeitos de menor escala, resultando num sistema de equações computacionalmente mais barato. Estes métodos basicamente aproximam os valores instantâneos de algumas variáveis da equação de Navier-Stokes por valores médios. O sistema de equações obtido desta forma acaba ganhando incógnitas adicionais, deixando-o incompleto. São os modelos de turbulência que fornecem as equações necessárias para o fechamento do sistema. São vários os modelos de turbulência disponíveis nos programas CFD, tais como: Spalart-Allmaras,  $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$ , Reynolds Stress (RSM) e Large Eddge Simulation (LES), entre outros. Como cada um destes modelos oferece vantagens para um determinado tipo de problema, é impossível afirmar que um modelo seja superior a outro. Para a melhor escolha, o usuário deve estar ciente das capacidades e limitações de cada um dos

modelos, levando em consideração a natureza do problema, nível de precisão, capacidade computacional, etc.

A análise do escoamento em torno de navios é uma tarefa complicada dado que este é extremamente turbulento apresentando um No. de Reynolds da ordem de  $10^8$ , na escala real. Devido a forte interação entre as turbulências e o escoamento médio, as análises numéricas de escoamentos turbulentos tendem a ser mais suscetíveis à qualidade da malha do que os escoamentos laminares. Assim, é recomendada uma malha mais refinada para análise de escoamentos turbulentos no CFD, principalmente nas regiões com grandes variações de velocidades e próximas à camada limite. Entretanto, nem sempre é possível refinar a malha da maneira desejada, dada a limitação de *hardware* e do tempo de processamento elevado, que o número elevado de elementos provocaria.

Os modelos de Spalart-Allmaras e  $k-\omega$  foram desenvolvidos para serem aplicados inclusive na camada limite, desde que a malha nesta região esteja devidamente refinada. Por outro lado, os modelos  $k-\epsilon$ , RSM e LES são eficientes, a princípio, somente nas regiões longe de paredes, esta limitação é contornada através da utilização das chamadas “funções de parede” (*wall functions*). As funções de parede são fórmulas semi-empíricas que modelam o escoamento na região próxima à parede.

A função de parede proporciona uma grande economia no tempo de processamento, pelo fato de não necessitar que o modelo tenha uma malha muito refinada na região próxima à parede, e porque com ela, a região viscosa próxima à parede não precisa ser resolvida numericamente. As funções de parede têm sido bem aceitas em soluções de engenharia por ser um método econômico, robusto e relativamente preciso.

O programa FLUENT, baseado no Método dos Volumes Finitos, foi utilizado neste trabalho para o levantamento dos campos de velocidades perturbado pelo FPSO. O modelo de turbulência adotado foi o k- $\epsilon$ , por ser um dos modelos que permite a utilização de função de parede e também por ter apresentado uma melhor aderência com alguns resultados experimentais.

## 1.6 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O Capítulo 2 apresenta os experimentos realizados em tanque de provas para avaliar o efeito sombra da corrente. Foram realizados três experimentos diferentes: o primeiro para avaliar a extensão da região de sombra, o segundo experimento foi feito para “mapear” o efeito sombra da corrente e um terceiro para verificar a influência do efeito sombra na dinâmica do navio *shuttle*.

O Capítulo 3 apresenta a abordagem inicial para o desenvolvimento do modelo do efeito sombra, que é baseada em “mapas de sombra”, obtidos experimentalmente.

O Capítulo 4 apresenta uma nova abordagem para a modelagem do efeito sombra, baseada no campo de velocidade perturbado pelo FPSO. Por este método, o efeito sombra é modelado através do campo de velocidade perturbado da corrente, sendo este obtido através do programa CFD, Fluent. Os resultados obtidos com o modelo proposto são confrontados com resultados experimentais.

No Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões do trabalho desenvolvido e, finalizando, são feitas algumas recomendações para a continuação desta pesquisa.

## 2. ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DO EFEITO SOMBRA DA CORRENTE

A existência do efeito sombra de corrente em sistemas tandem, e a sua importância na dinâmica do navio *shuttle*, tem sido verificada tanto em ensaios com modelos reduzidos, que não tinham como objetivo o estudo do efeito sombra, bem como nas operações de *offloading* na vida real. Porém, não há registro de nenhum trabalho que tenha quantificado tal efeito.

Neste estudo foram realizados três ensaios com modelos de escala reduzida a fim de avaliar quantitativa e qualitativamente o efeito sombra. O primeiro foi feito para avaliar o comprimento da esteira, ou seja, a região onde existe o efeito sombra.

O segundo, foi um ensaio de modelo cativo para levantar os “mapas de sombra”, mapas estes que mostram como as forças/momento atuantes no navio *shuttle* variam dentro da região de sombra.

O terceiro ensaio foi o de *free running* onde se mediu os movimentos do navio *shuttle* conectado em tandem, através de um *hawser*, com um navio rigidamente fixo, FPSO.

Cabe aqui ressaltar que todo o estudo foi conduzido tendo em mente que os resultados experimentais e os fenômenos observados nos ensaios não poderiam ser simplesmente escalados para a escala real, devido ao efeito de escala, anteriormente comentado (Seção 1.1.2). De maneira a minimizar este problema, foram empregados excitadores de turbulência nos modelos. No caso, foram colados fios em balizas próximas à proa e popa dos modelos, para induzir a geração de turbulência.

Os experimentos foram realizados nas instalações da estação experimental de Chiba, pertencente à Universidade de Tokyo, no Japão. Na época, a estação contava

com dois tanques de provas, um tanque menor de corrente recirculante e um outro oceânico de manobras de grandes dimensões.

Os experimentos foram realizados com algumas dificuldades tais como: restrições orçamentárias, más condições de alguns dos equipamentos utilizados, pouco tempo disponível e inexistência de um técnico especializado em ensaios. Apesar das dificuldades, ainda foi possível obter bons resultados, que serviram de base para o desenvolvimento do modelo do efeito sombra.

## **2.1 ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA REGIÃO DE SOMBRA**

Este ensaio foi feito com o objetivo de avaliar a extensão da região onde o efeito sombra era significativo. Esta informação era necessária para a preparação do ensaio de modelo cativo para o levantamento do mapa de sombra. O ensaio foi realizado num tanque de corrente recirculante, ilustrada na Fig.2.1. Este tanque permite ensaios não apenas de corrente, mas também de vento e ondas. A Fig.2.2 mostra um corte longitudinal esquemático do tanque, mostrando as dimensões principais. O tanque apresenta uma depressão de 2.0m no centro do tanque, o que poderia afetar o escoamento próximo à superfície livre, mas foi comprovado através de um medidor de corrente que a perturbação ficava restrita à região da depressão.



Fig.2.1 – Tanque de corrente recirculante

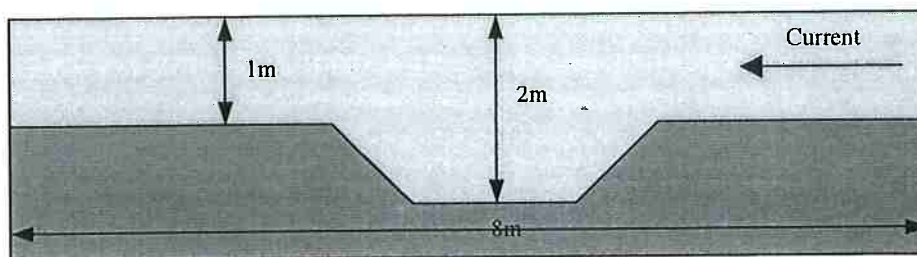


Fig.2.2 – Seção longitudinal do tanque – Largura de 1.8m.

O experimento consistiu na visualização das linhas de corrente na região de jusante do FPSO, este rigidamente fixado com um aproamento de 20 graus. A visualização das linhas de corrente foi feita injetando tinta branca em vários pontos a jusante do FPSO, para uma determinada profundidade. O experimento foi filmado e para facilitar o posterior tratamento de dados, a superfície do tanque foi quadriculada com barbante, que funcionava como referência. As linhas de corrente a jusante foram esboçadas manualmente como mostrado na Fig.2.3.

O modelo do FPSO ensaiado é o mesmo utilizado nos ensaios posteriores. As características principais do modelo estão descritas na Tab.2.1 da próxima seção. A condição de calado era a de um FPSO 100% carregado com 140 mm, equivalente a 25.2m na escala real. A velocidade da corrente ao longe era de 0.075 m/s, equivalente a 1.0 m/s na escala real. A Fig.2.3 mostra o campo de velocidades obtido no experimento a uma profundidade de 20mm a partir da superfície, equivalente a 3.6m na escala real. Pode-se ver que para esta configuração, a perturbação do campo de velocidades atinge um pouco mais que um comprimento do navio (1.8m).

Cabe ressaltar que o objetivo do ensaio era de apenas verificar a extensão da região de sombra e não de levantar o campo de velocidades. Por esse motivo, não se fez um ensaio mais rigoroso.

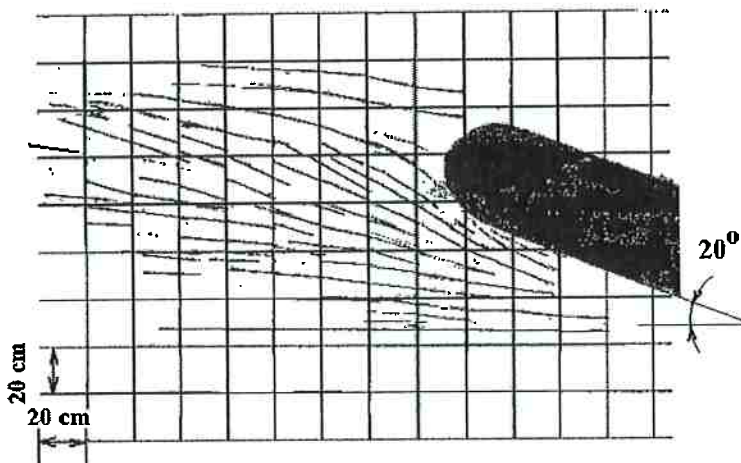


Fig.2.3 – Campo de velocidades experimental.

## 2.2 ENSAIO DE MODELO CATIVO COM DOIS NAVIOS

Para a quantificação do efeito sombra, idealizou-se o “mapa de sombra”, que indica o valor da força/momento atuante no *shuttle* em função de sua posição à jusante do FPSO.

Para o levantamento dos mapas de sombra foi executado um extenso conjunto de ensaios, onde foram consideradas as mais diversas combinações de posições e ângulos relativos entre os navios FPSO e *shuttle*. Devido ao grande número de combinações dos parâmetros envolvidos, procurou-se reduzir ao máximo o número de ensaios, que mesmo assim resultou em aproximadamente 600 corridas.

Este ensaio foi realizado no tanque de provas oceânico de manobras, cujas dimensões são: 30x50x2.5m. O tanque possui um carro dinamométrico XY que permite correr com o modelo sobre o tanque em qualquer trajetória. Fig.2.4. O sistema de controle da velocidade do carro dinamométrico permitia regulagens da ordem de 0.001m/s, sendo que durante a corrida podia se observar flutuações na velocidade da ordem de  $\pm 0.002$  m/s. Infelizmente, o rolamento de umas das rodas do carro principal

estava avariado, o que fazia o carro apresentar “trancos”, periodicamente, introduzindo ruídos nos sinais das forças medidas.



Fig.2.4 – Tanque de provas oceânico de manobras

## 2.2.1 Descrição do Experimento

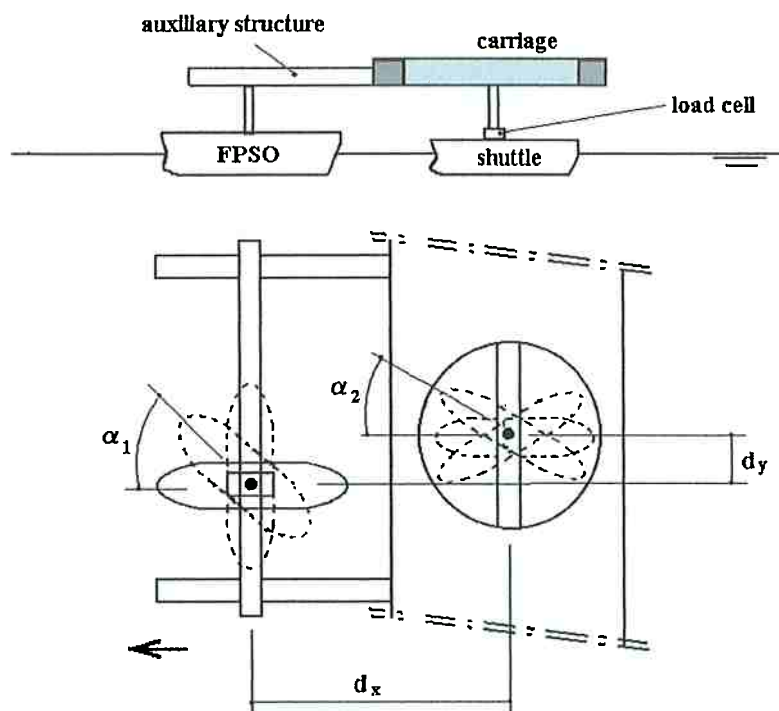


Fig.2.5 – Esquema do experimento

O experimento foi montado conforme esquema da Fig.2.5. O navio *shuttle* foi fixado ao carro dinamométrico através de uma barra vertical, que permitia ajustar o ângulo de aproamento do mesmo. As forças em *surge* e *sway* e o momento de *yaw* do



navio *shuttle*, na sombra do FPSO, foram medidos através de uma célula de carga. A célula de carga era um modelo integrado que media as forças em X e Y, mais o momento em Z e tinha o fundo de escala de 20N para as componentes de força e de 2N.m para o momento. A resolução da célula era de  $\pm 3 \times 10^{-4}$  N e a precisão de medição de  $\pm 4 \times 10^{-3}$  N.

Uma estrutura auxiliar foi montada no carro dinamométrico para fixar o navio FPSO nas mais diversas posições à montante. Esta estrutura foi montada com vigas de aço e alumínio conectadas através de parafusos, tendo como resultado uma estrutura razoavelmente rígida. Os modelos foram fixados em balanço (0.8m) através de um tubo circular, que permitia acertar o ângulo de aproamento dos mesmos. Fig.2.6.



Fig.2.6 – Montagem do experimento

Os modelos do FPSO e *shuttle* utilizados foram reaproveitados de experimentos anteriores, apresentando ambos as mesmas dimensões principais, porém, o casco de um dos modelos não era o de um petroleiro típico. As características principais dos modelos estão listadas nas Tabelas 2.1a e 2.1b. Apesar de simplificado, tinha-se disponível o plano de balizas de ambos os modelos, mostrados nas Figs.2.7 e 2.8. O modelo que não possuía casco de petroleiro apresentava uma proa mais afilada, que se

refletia no coeficiente de bloco,  $C_b$ , menor. Em todos os experimentos, utilizou-se o modelo de  $C_b$  menor como FPSO, uma vez que sua função era a de gerar a sombra no navio *shuttle*, e também por se achar mais interessante ter o mapa de sombra de um petroleiro típico. Para a determinação das velocidades de ensaio, fixou-se a relação modelo/ real como sendo de 1 / 180, de maneira a obter um FPSO de dimensões usuais.

Tabela - 2.1a – Características do modelo FPSO (1:180)

Parâmetro	Esc. Real	Modelo
Comprimento	329.4m	1.83m
Boca	61.2m	0.34m
Pontal	32.4m	0.18m
$C_b$	0.71	0.71
Calado 100%	25.2m	0.14m
Calado 40%	10.8m	0.06m
Massa 100%	$3.41 \times 10^5$ ton	58.54kg
Massa 40%	$1.24 \times 10^5$ ton	21.28kg
Izz 100%	$9.62 \times 10^5$ ton.m <sup>2</sup>	5.09Kg.m <sup>2</sup>
Izz 40%	$5.97 \times 10^5$ ton.m <sup>2</sup>	3.16Kg.m <sup>2</sup>

Tabela - 2.1b – Características do modelo *shuttle* (1:180)

Parâmetro	Esc. Real	Modelo
Comprimento	329.4m	1.83m
Boca	61.2m	0.34m
Pontal	32.4m	0.18m
$C_b$	0.81	0.81
Calado 100%	25.2m	0.14m
Calado 40%	10.8m	0.06m
Massa 100%	$3.88 \times 10^5$ ton	66.54kg
Massa 40%	$1.46 \times 10^5$ ton	25.00kg
Izz 100%	$1.52 \times 10^6$ ton.m <sup>2</sup>	8.02Kg.m <sup>2</sup>
Izz 40%	$5.97 \times 10^5$ ton.m <sup>2</sup>	4.11Kg.m <sup>2</sup>

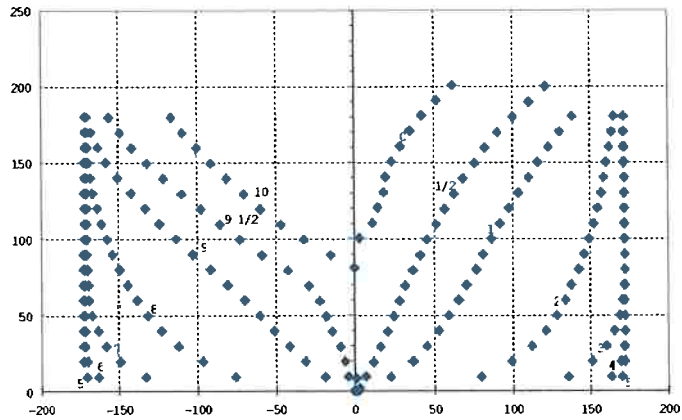


Fig.2.7 – Plano de balizas do modelo FPSO

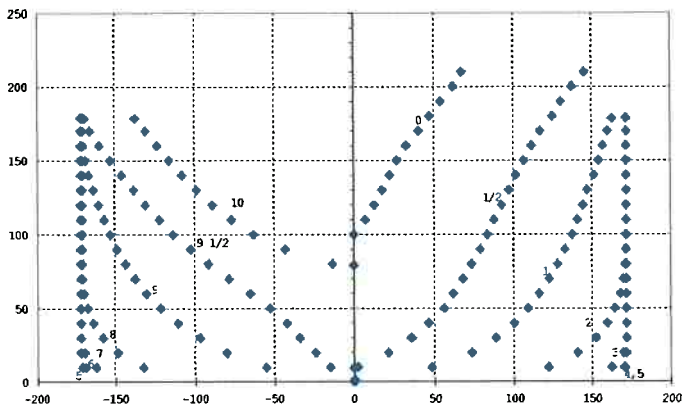
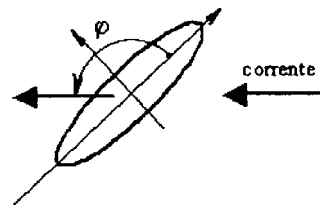


Fig.2.8 – Plano de balizas do modelo shuttle

Tabela -2.2 – Combinação dos aproamentos

		FPSO		
		180°	135°	90°
Shuttle	-130°		*	
	-160°		*	
	0°	*	*	*
	160°	*	*	*
	130°	*	*	*
	90°			*



As combinações dos aproamentos dos navios FPSO e shuttle ensaiadas são dadas pela Tab.2.2. Devido ao grande número de combinações, adotou-se apenas três aproamentos para o FPSO. Optou-se também por não realizar ensaios para ângulos menores que 90° para o FPSO, uma vez que nesta situação a operação de *offloading* não

poderia ser feita pela popa, por motivo de segurança. Existe uma norma operacional que define uma zona de segurança onde o *shuttle* pode permanecer durante a operação, conforme ilustrado na Fig.2.9, sendo que o ângulo  $\alpha$  é de aproximadamente  $45^\circ$ .

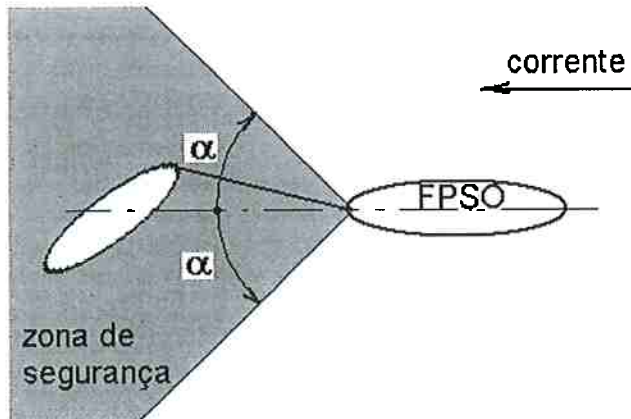


Fig.2.9 – Definição da zona de segurança para *offloading*

O número de posições relativas entre navios para medição das forças/momento variou conforme o ângulo de aproamento relativo, procurando, no entanto, varrer a região de sombra, como ilustrado na Fig.2.10. Para cada combinação de aproamentos  $\alpha_1$  -  $\alpha_2$  tomou-se uma média de 15 a 20 posições ( $d_x$ ,  $d_y$ ) de medição. (ver Fig.2.5).

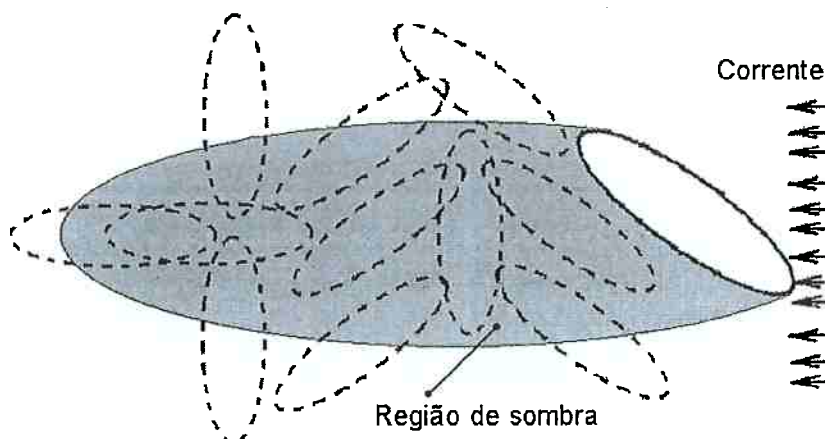


Fig.2.10 – Exemplo de posições de medição na sombra do FPSO

Os ensaios foram feitos com duas velocidades de avanço A e C da Tabela-2.3 e para algumas configurações utilizou-se a velocidade B com o intuito de se verificar a variação do efeito sombra em função da velocidade.

Tabela - 2.3 – Velocidades de ensaio

	Velocidade (m/s)	
	Esc. Modelo	Esc. Real
A	0.075	1.0
B	0.112	1.5
C	0.149	2.0

A princípio, pretendia-se ensaiar três combinações de calados FPSO-*shuttle*, 100%-40%, 70%-70% e 40%-100%, porém, por falta de disponibilidade do tanque, foi possível ensaiar apenas a combinação de calados FPSO 100% - *shuttle* 40%.

### 2.2.2 Aquisição dos dados

Para a medição das forças atuantes no navio *shuttle* foi adotado o seguinte procedimento:

- a) 0 a 15 s – aquisição do sinal da célula de carga com o sistema em repouso, para se ter um valor de referência inicial.
- b) 16 a 85s – acionamento do carro dinamométrico com a velocidade programada.
- c) 86 a 100s - aquisição do sinal da célula de carga com o sistema em repouso, para se ter um valor de referência final.

A célula de carga foi instalada de forma a fornecer as forças atuantes no navio *shuttle*, em relação ao seu eixo local. A aquisição do sinal foi feita com uma frequência de 50Hz e com o filtro “passa-baixa” em 10Hz.

A Fig.2.11 mostra um exemplo dos sinais de força obtidos em umas das corridas, onde o *shuttle* estava com um aproamento de 160 graus com a corrente e a velocidade era de 0.149m/s.

Apesar do nível de ruído relativamente alto, principalmente no sinal da força em *surge*, os valores médios obtidos nos ensaios mostraram-se bastante consistentes. No

caso, a amplitude do ruído no sinal da força em *surge* chega a ser quase 10 vezes maior que o próprio valor médio medido. Os valores médios dos sinais em *surge*, *sway* e *yaw* são respectivamente: 0.057N, -0.120N e 0.026 N.m.

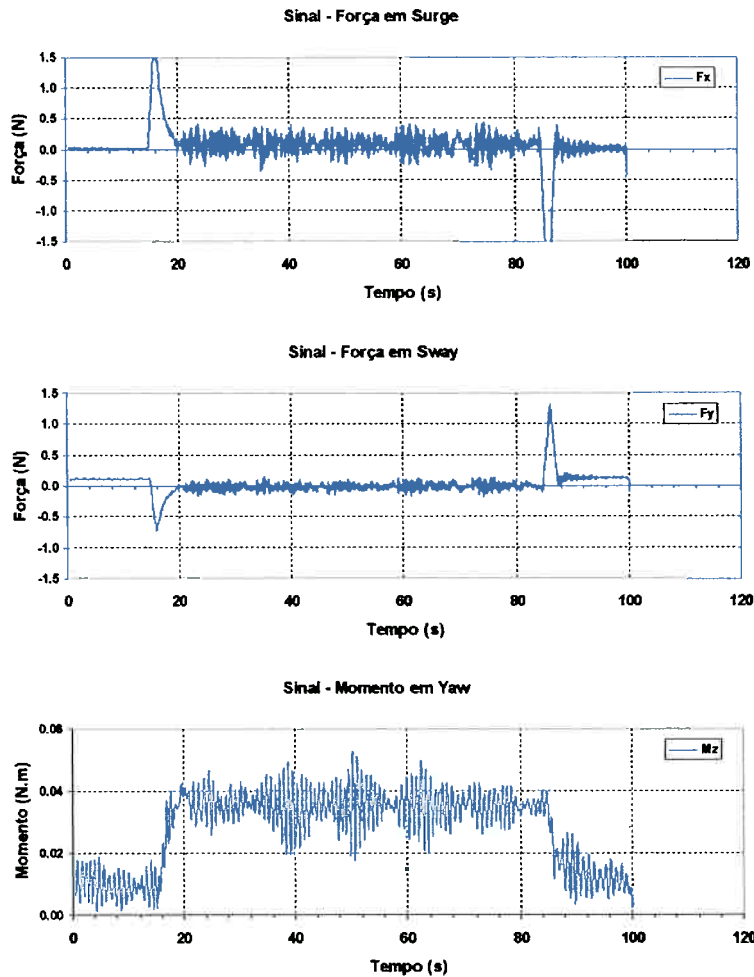


Fig.2.11 – Exemplo dos sinais de força/momento obtidos no ensaio

O batimento apresentado pelos sinais, com período de aproximadamente 13s, é consequência do rolamento avariado, anteriormente comentado. Os picos inicial e final correspondem aos instantes de partida e parada do carro dinamométrico.

### 2.2.3 Resultados

Preliminarmente ao ensaio para o mapeamento do efeito sombra, foram feitos ensaios de modelo cativo para o levantamento das curvas de  $C_d$  dos dois modelos

utilizados nos experimentos. As curvas de  $C_d$ s experimentais do FPSO, para condições de calado 100 e 40%, são mostradas nas Fig.2.12 e 2.13, e as do *shuttle* estão nas Fig.2.14 e 2.15. As forças/momento,  $F_x$ ,  $F_y$  e  $M_z$ , foram adimensionalizadas da forma usual, como segue.

$$\text{- força em } surge : C_{d_x} = \frac{2 F_x}{\rho L T v^2}$$

$$\text{- força em } sway : C_{d_y} = \frac{2 F_y}{\rho L T v^2}$$

$$\text{- momento de } yaw : C_{d_z} = \frac{2 M_z}{\rho L^2 T v^2}$$

onde:  $\rho$  - densidade da água

$L$  – comprimento entre perpendiculares do navio

$T$  – calado do navio

$v$  – velocidade da corrente

Pelas Figs.2.12 a 2.15, pode-se ver que, com exceção de alguns pontos, as curvas de  $C_d$ s obtidas são relativamente suaves, reforçando a idéia de que à despeito do elevado nível de ruído nos sinais das forças medidas, o valor médio obtido é de boa qualidade. No caso do navio *shuttle*, tanto as características das curvas como os valores obtidos são muito semelhantes aos encontradas na literatura, OCIMF (1993). Pode-se perceber, também, que as curvas não são perfeitamente simétricas, como deveriam ser. Após uma minuciosa inspeção, verificou-se que o eixo de rotação do aparato, que fixava o modelo, não estava exatamente na vertical. O que acabava por induzir forças extras no modelo. Tal deficiência foi sanada para a realização dos experimentos para o mapeamento do efeito sombra.

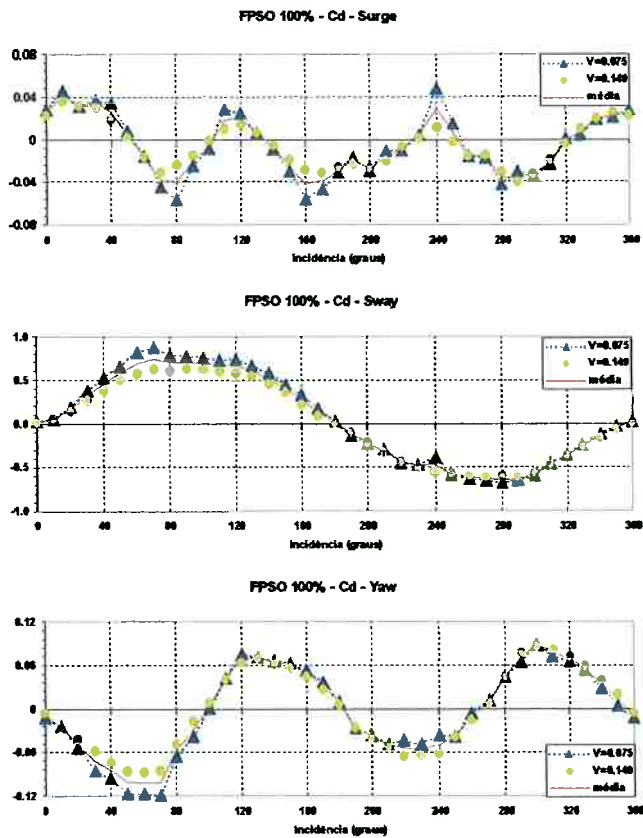


Fig.2.12 – FPSO 100% - Curvas de Cds

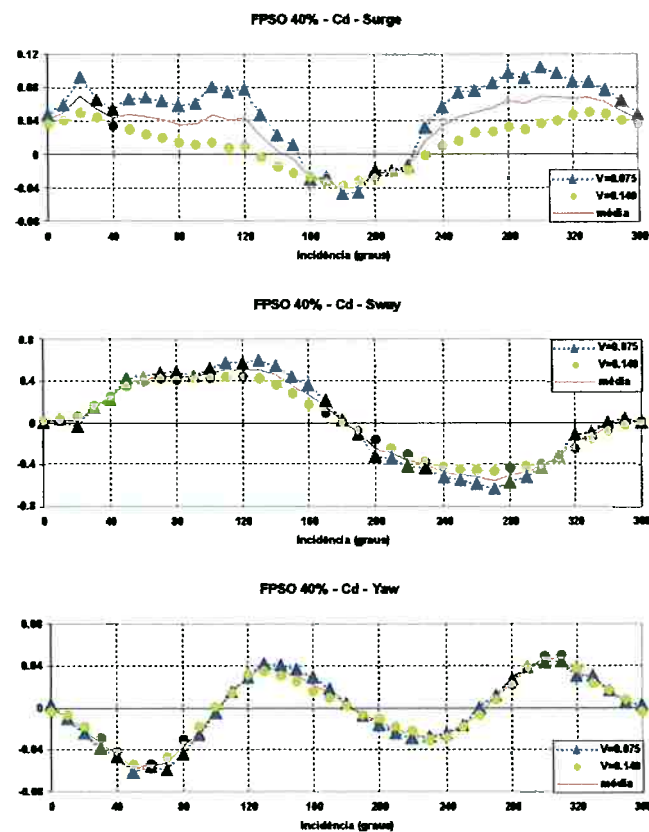


Fig.2.13 – FPSO 40% - Curvas de Cds



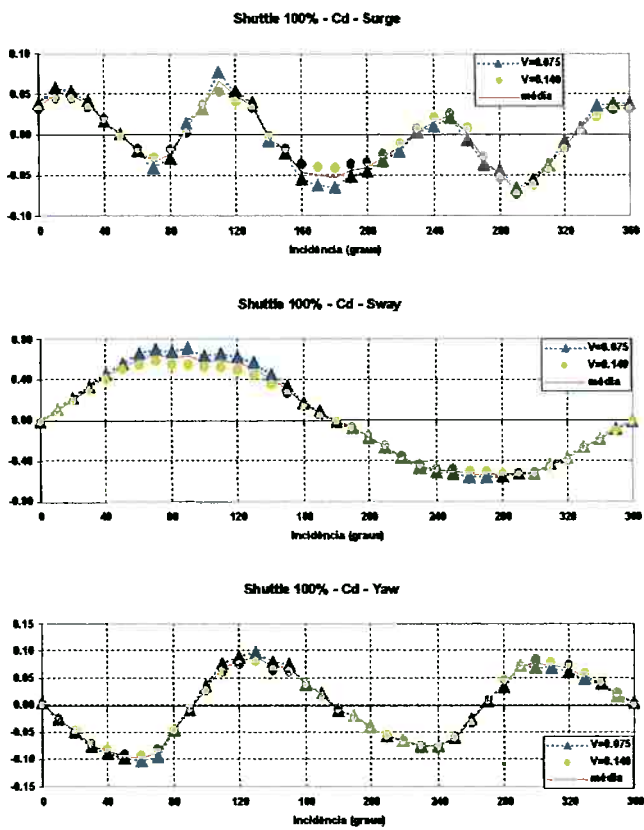


Fig.2.14 – Shuttle 100% - Curvas de Cds

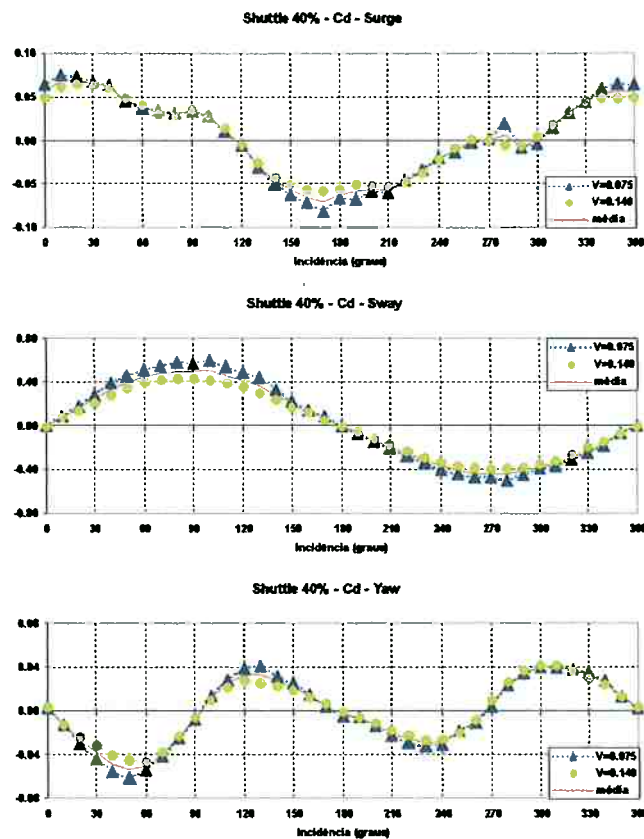


Fig.2.15 – Shuttle 40% - Curvas de Cds

Os sinais das forças e momento medidos nos ensaios de modelo cativo de dois navios foram tratados para o levantamento dos mapas de sombra. Os mapas mostram as forças/momento adimensionais de corrente atuante no navio *shuttle*, em função de sua posição à jusante do FPSO.

As figuras 2.17 a 2.19 mostram um exemplo de mapa de sombra experimental retirado do Anexo-A, cuja configuração é dada a seguir:

- a) Aproamento do FPSO: 135 graus
- b) Aproamento do *shuttle*: 180 graus
- c) Combinação de calados: FPSO 100% com *shuttle* 40%
- d) Velocidade de avanço: 0.075 m/s (equivalente a 1.0m/s na escala real)

Nos mapas da figuras 2.17 a 2.19 bem como de todos os mapas do Anexo-A, o plano x-y representa o plano à jusante do FPSO. A escala de cores representa os valores adimensionais das forças/momento atuantes no navio *shuttle* quando este está à jusante do FPSO. As forças/momento obtidas experimentalmente,  $F_x$ ,  $F_y$  e  $M_z$ , foram adimensionalizadas da seguinte maneira:

- força em *surge* :  $Cd_x = \frac{2 F_x}{\rho L T v^2}$

- força em *sway* :  $Cd_y = \frac{2 F_y}{\rho L T v^2}$

- momento de *yaw* :  $Cd_z = \frac{2 M_z}{\rho L^2 T v^2}$

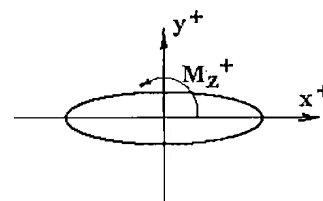


Fig.2.16 – Sistema de coordenadas

Os sinais de  $F_x$ ,  $F_y$  e  $M_z$  são definidos segundo o sistema de coordenadas local, fixo ao navio, conforme esquema da Fig.2.16.

As coordenadas x-y das figuras estão em metros e para facilitar a identificação do mapa, quanto a combinação de aproamentos, são mostrados esquematicamente o

FPSO, na coordenada (0,0), e o navio *shuttle* com os respectivos ângulos de aproamento.

Como pode ser visto nas figuras 2.17 a 2.19, o efeito sombra nesta configuração é bastante significativo, onde se pode destacar:

- a) A força em *surge* do *shuttle*, dependendo da posição, reduz para 60% do valor da força na região não perturbada pelo FPSO. Pela escala de cores, de 0.065 para 0.04.
- b) O efeito sombra gera uma força em *sway* e um momento de *yaw*, inexistentes fora da região de sombra do FPSO, uma vez que o aproamento do *shuttle* é de 180 graus.

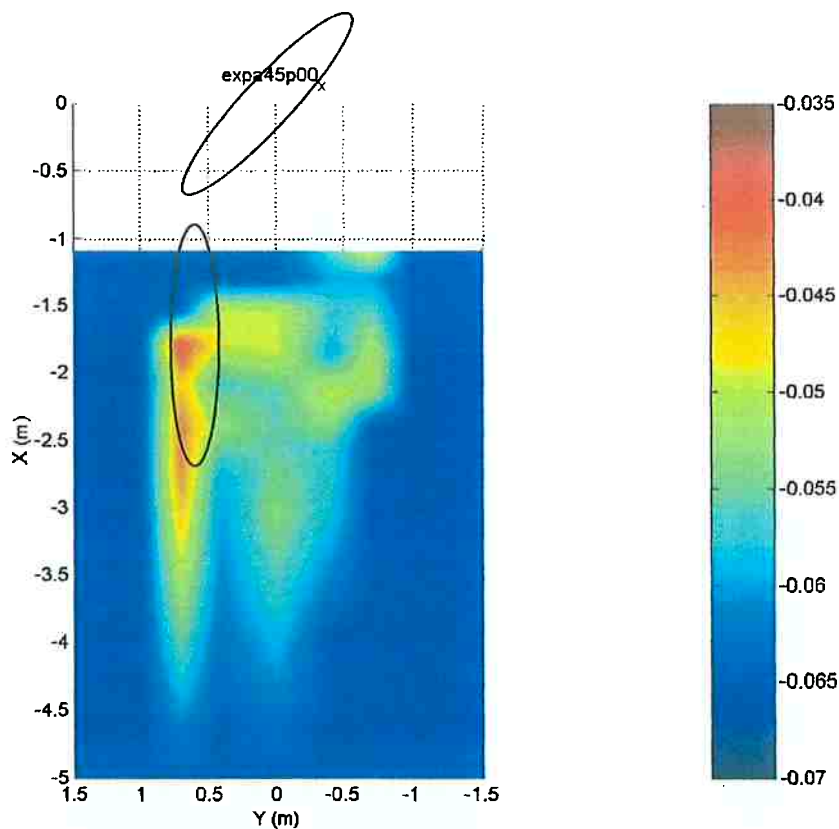


Fig.2.17 – Mapa de Sombra - Força X

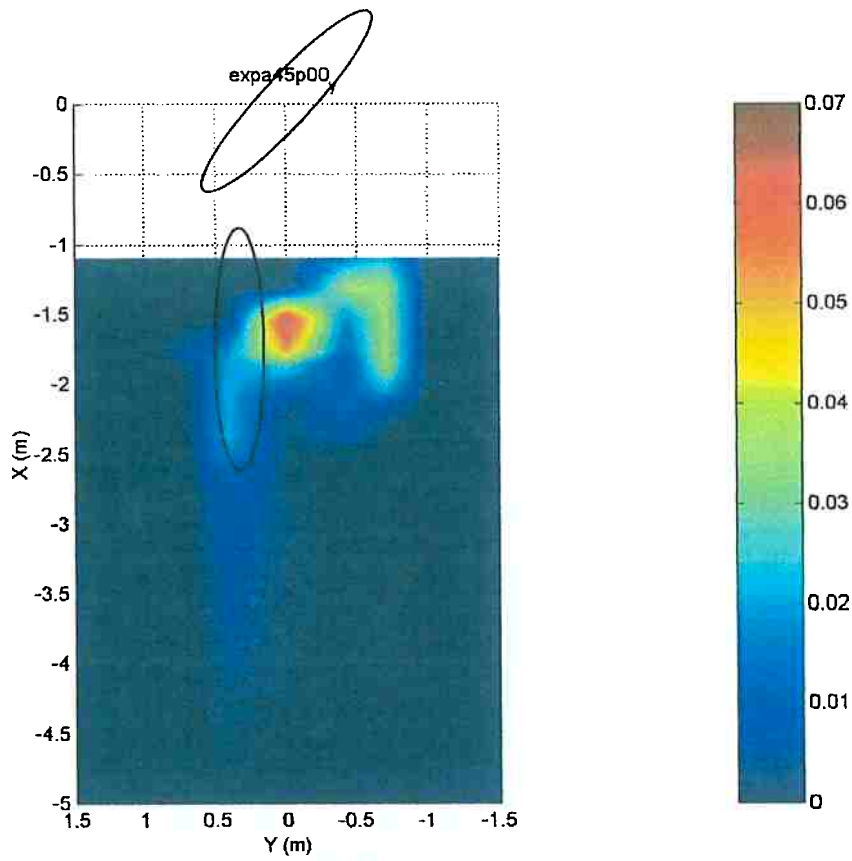


Fig.2.18 – Mapa de Sombra - Força Y

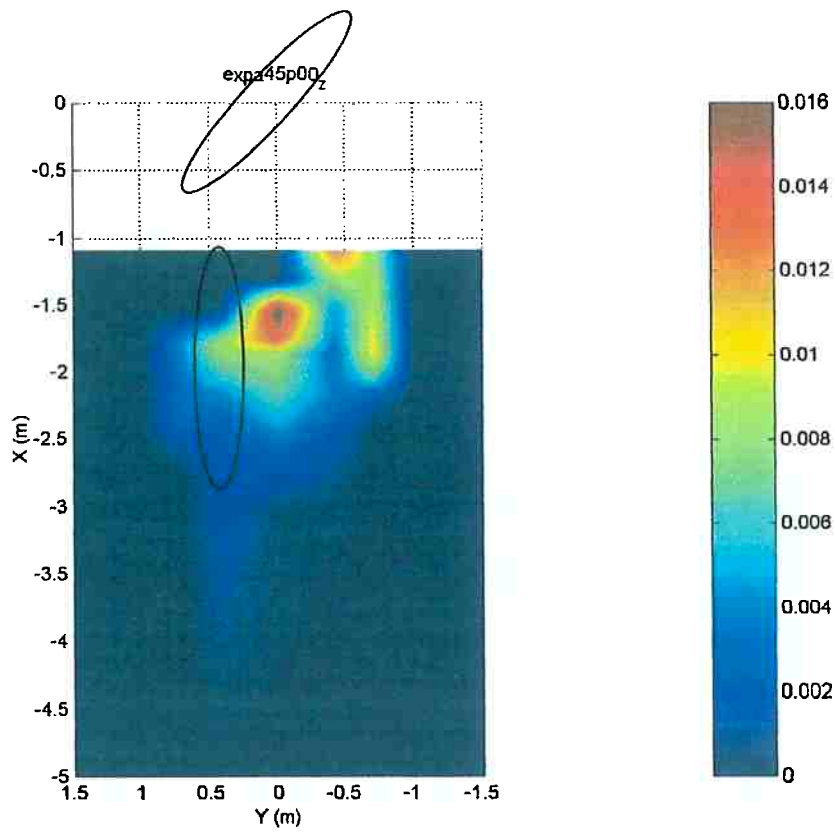


Fig.2.19 – Mapa de Sombra – Momento Z

As figuras do Anexo-A com índice 'a' mostram os mapas experimentais do efeito sombra de *surge*, *sway* e *yaw*, para as velocidades de 0.075 e 0.149m/s, de todas as combinações de aproamentos ensaiadas. As Figs.A-1a a A-33a correspondem aos mapas de sombra para a velocidade de 0.149m/s, 2.0m/s na escala real, enquanto que as Figs.A34a a A-66a apresentam os mapas para a velocidade de 0.075m/s, 1.0m/s na escala real. Para facilitar a comparação entre os mapas de mesma configuração, mas com velocidades diferentes, normalizou-se a escala dos mesmos.

A maioria dos mapas apresentou superfícies com variações suaves, indicando que as dificuldades experimentais não tiveram maiores conseqüências na qualidade dos ensaios.

O efeito sombra é significativo na maioria dos casos, o que é evidenciado pelas variações das forças/momento apresentadas pelos mapas.

### 2.3 ENSAIO DE FREE RUNNING

O ensaio de *free running*, neste caso, consiste no reboque do *shuttle* através de um *hawser* de proa, de forma que este é "livre" para oscilar. Para verificar a influência do efeito sombra no comportamento dinâmico do navio *shuttle*, fixou-se rigidamente o FPSO com diversos aproamentos na posição de montante. O movimento do *shuttle* assim obtido é comparado com o movimento do mesmo sem a presença do FPSO na posição de montante.

Este ensaio foi executado no tanque oceânico de manobras, que apesar de limitado pelo seu comprimento, pareceu ser a melhor opção em razão do melhor controle sobre a velocidade da corrente, conseguida com o deslocamento do carro.

A outra opção seria o tanque de corrente recirculante, que teria a vantagem de permitir ensaios sem limite de tempo, o que seria interessante devido ao longo período de oscilação do movimento de *fishtailing* do *shuttle*, que chegava na ordem dos 200s. Porém, este apresentava sérias restrições à realização deste ensaio, tais como:

- Largura limitada (1.8m) – o que poderia induzir efeito de parede e impossibilidade de se ensaiar o FPSO com ângulos maiores.
- Velocidade de corrente flutuante – como em todos os tanques de corrente recirculante, este também apresentava grandes flutuações na velocidade da corrente. Tais flutuações induzem o *shuttle* a movimentos indesejáveis, “contaminando” a análise. A Fig.2.20 mostra um exemplo de série temporal da velocidade decorrente medida ao longo de uma hora.

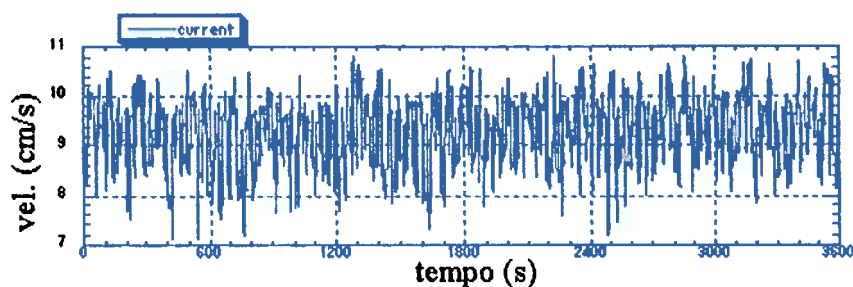


Fig.2.20 – Série temporal da velocidade no tanque de corrente recirculante

### 2.3.1 Descrição do Experimento

O movimento do navio *shuttle* foi monitorado através de um *video tracker*, dispositivo que rastreia e calcula a posição de um alvo através da digitalização de imagens. A Fig.2.21 mostra o esquema do experimento e a Fig.2.22 a montagem do mesmo.

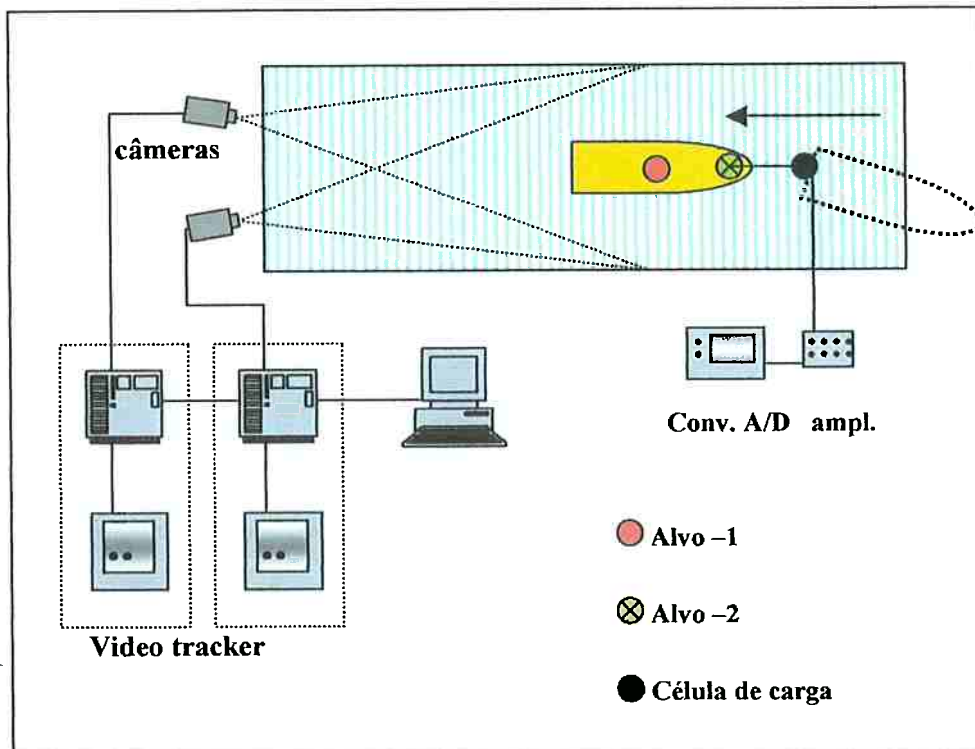


Fig.2.21 – Esquema do experimento de *free running*



Fig.2.22 – Montagem do experimento de *free running*

Os parâmetros analisados nos ensaios foram:

- a) Comprimento do *hawser*
  - 520 e 850mm
  - (incluía uma mola de 98mm com constante  $k=0.1186\text{N/mm}$ )
- b) Aproamento do FPSO
  - 180, 160, 135 e 90 graus
- c) Combinação de calados
  - FPSO 100% com *shuttle* 40%
  - FPSO 40% com *shuttle* 100%
- d) Velocidade de avanço
  - 0.037, 0.075, 0.149m/s

Além das combinações acima, ensaiou-se o *shuttle* sem o FPSO à montante para verificar o comportamento deste num campo sem perturbação.

### 2.3.2 Aquisição dos dados

Em virtude do longo período de oscilação do *shuttle*, buscou-se aproveitar o comprimento útil do tanque ao máximo. Com isso, o tempo de corrida para cada uma das velocidades ensaiadas ficou como mostrada na Tabela 2.4.

Tabela - 2.4 – Tempo de ensaio

Veloc.(m/s)	Tempo (s)
0.037	210.0
0.075	420.0
0.149	600.0

A frequência de aquisição do sinal foi de 5Hz.

Em virtude do comprimento limitado do tanque, procurou-se começar as corridas com o *shuttle* deslocado de sua suposta posição média de equilíbrio, para acelerar o *fishtailing*, se fosse o caso.

### 2.3.3 Resultados

Apesar de terem sido feitas corridas de teste para verificar se o equipamento de *video tracker* estava capturando os movimentos do *shuttle* corretamente, após os ensaios



ensaios constatou-se que houve problemas de aquisição dos movimentos. Estranhamente, os movimentos capturados pelo *video tracker* estavam num sistema de coordenadas diferente do inicialmente estabelecido durante os testes. Os dados de cada uma das corridas possuíam uma origem e uma orientação diferentes. Além disso, em alguns casos ocorreram grandes saltos no movimento, como se o sistema de monitoração tivesse perdido o alvo. Nestes casos os experimentos foram desconsiderados.

Apesar dos problemas, verificou-se que, desconsiderando a origem e a orientação, os movimentos capturados estavam coerentes. Assim, os dados foram tratados de forma a corrigir os problemas apontados (Fig.2.23), fazendo com que as médias dos movimentos de *sway* e *yaw* tivessem médias em torno do zero. Assim, das séries temporais dos movimentos, deve-se desconsiderar a posição absoluta, considerando apenas as oscilações.

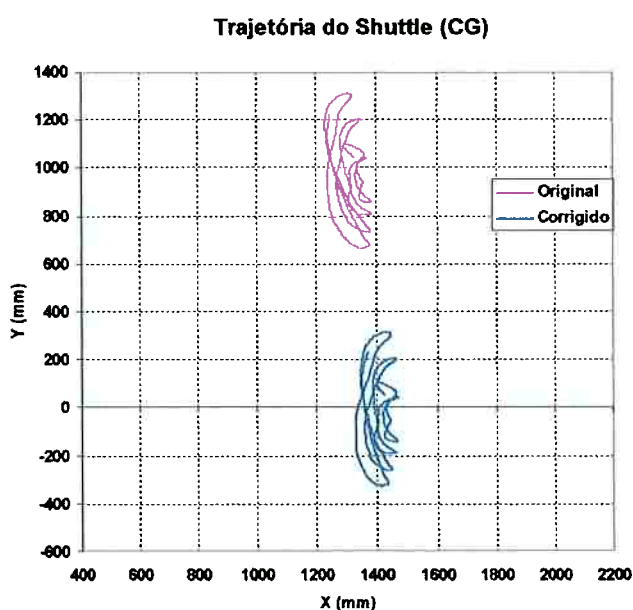


Fig.2.23 – Trajetória do movimento do *shuttle*

Os gráficos da Fig.2.24, retirado do Anexo-B mostram um exemplo das séries temporais dos movimentos do CG do navio *shuttle* obtidos nos ensaios. Os parâmetros do exemplo são:

- a) Comprimento do *hawser* : 850mm
- b) Aproamento do FPSO : 135 graus
- c) Combinação de calados : FPSO 100% com *shuttle* 40%
- d) Velocidade de avanço : 0.075m/s (equivalente a 1.0m/s na escala real)

O caso acima foi propositalmente escolhido, correspondendo ao mapa de sombra apresentado na seção anterior (Figs.2.17 a 2.19). Como se pode ver, para este caso, a presença do FPSO altera completamente a dinâmica do navio *shuttle*.

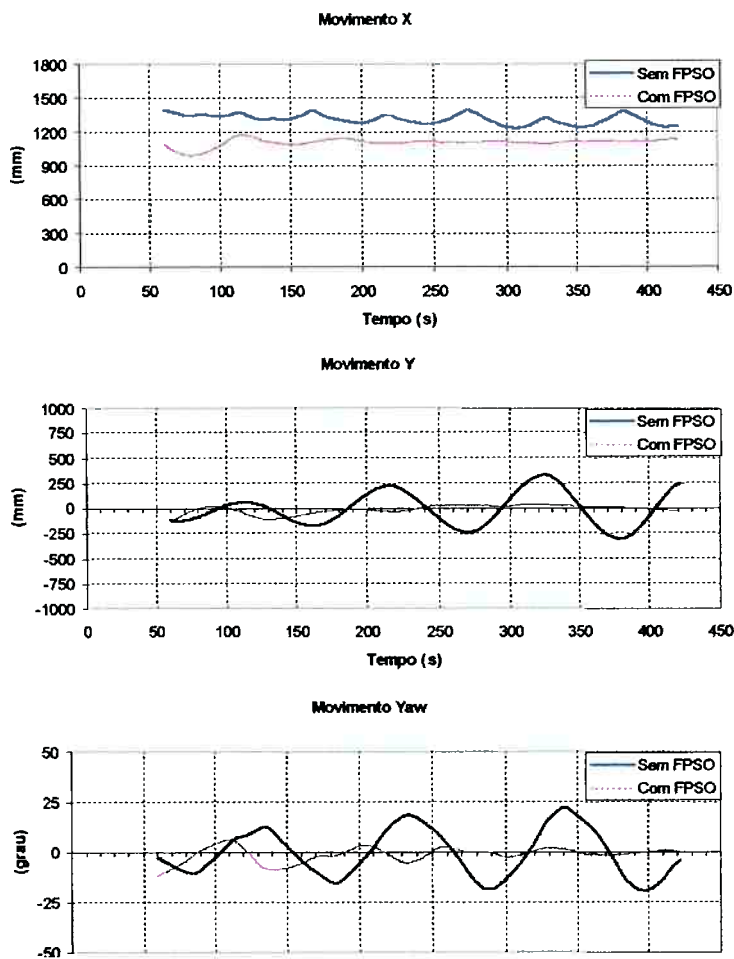


Fig.2.24 – Série temporal dos movimentos do *shuttle* com e sem FPSO

As figuras do Anexo-B com índice “a” mostram as séries temporais dos movimentos do navio *shuttle* obtidas nos ensaios. Para se ter uma melhor noção do efeito sombra, as figuras comparam o movimento do *shuttle* com e sem a presença do FPSO à montante.

Pelos gráficos do Anexo-B, quando o FPSO está na condição de calado leve, 40%, (Fig.B-25a a B-40a) não se pode perceber uma influência mais efetiva do efeito sombra na dinâmica do *shuttle*. Intuitivamente, tal resultado já era esperado. Pensando em termos de campos de velocidades no plano horizontal, o FPSO com calado leve perturba apenas os campos mais próximos à superfície livre, fazendo com que o *shuttle* fique sujeito majoritariamente aos campos não perturbados. Os experimentos desta série foram os mais prejudicados pelo comprimento limitado do tanque. Como o período de oscilação de *fishtailing* do *shuttle* 100% carregado chegava a 200s, o *shuttle* tinha tempo suficiente para apenas dois ciclos de oscilação durante a corrida. Sendo assim, torna-se difícil afirmar que o efeito sombra seja inexistente nesta condição, pois com dois ciclos o *shuttle* ainda estria no transiente. Mas de qualquer forma, pôde-se perceber que seu efeito não foi significativo, quando comparado aos casos com o FPSO a 100%.

Por outro lado, quando o FPSO encontra-se 100% carregado, o efeito sombra tem papel determinante na dinâmica do navio *shuttle* (Fig.B-1a a B-24a). Com exceção dos casos onde o FPSO estava com aproamento de 180 e 90 graus com a corrente, ficou patente a influência do efeito sombra. Nestes casos, o *shuttle* que possui movimentos de *fishtailing* crescente, sem a presença do FPSO à montante, tende assintoticamente à estabilidade, quando o FPSO está presente.

No caso do FPSO a 180 graus, com *hawser* mais longo (850mm), parece não haver influência do efeito sombra. Já com o *hawser* mais curto (520mm) (Fig.B-6a) ocorreu um fato inesperado durante os ensaios, na primeira corrida o *shuttle* foi atraído

para a esteira do FPSO e assim permaneceu até o fim (curva verde); na segunda, o *shuttle* apresentou um movimento de amplitude e período maior para o caso com o FPSO a montante (curva rosa).

No caso do FPSO a 90 graus, com *hawser* mais curto e para as velocidades mais altas (Figs. B-23a e B-24a), o efeito sombra é claro, o *shuttle* era expulso de dentro da região de sombra, permanecendo praticamente estático na fronteira da mesma. Para os outros casos, o comportamento não ficou muito definido, mas percebeu-se, durante os experimentos, que a região de fronteira da sombra influenciava o movimento do *shuttle*, fato este que pode ser visto na Fig.B-20a, quando o *shuttle* tendia a amplitudes de oscilações menores, ocorreu um aumento repentino nos últimos segundos.

### **3. DETERMINAÇÃO DO EFEITO SOMBRA ATRAVÉS DE MAPAS DE SOMBRA**

A primeira abordagem idealizada para a quantificação do efeito sombra da força de corrente atuante no navio *shuttle* foi baseada na utilização direta dos mapas de sombra experimentais.

O modelo numérico implementado no simulador DYNASIM consistia no tabelamento dos mapas de sombra. Assim, durante a simulação as forças instantâneas atuantes no navio *shuttle* eram calculadas através da interpolação dos mapas de sombra em função dos aproamentos dos navios e da posição do *shuttle* em relação ao FPSO.

### 3.1 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE SOMBRA NO SIMULADOR

#### DYNASIM

Inicialmente, pensou-se em desenvolver uma expressão analítica que reproduzisse os mapas de sombra, tarefa essa que se mostrou impossível dada à sutileza de detalhes que os mapas apresentam.

Assim, decidiu-se tabelar os mapas para que o DYNASIM pudesse consultá-los durante a simulação e interpolá-los de acordo com a posição relativa instantânea dos navios FPSO e *shuttle*, para o cálculo da força de corrente atuante no último.

Infelizmente, a diferença de comportamento dinâmico observado nos ensaios de *free running*, com e sem o FPSO à montante (Anexo-B), não foi obtida nos resultados das simulações. Ou seja, o comportamento do *shuttle* com o FPSO à montante ficou muito próximo ao caso sem o FPSO, apresentando a mesma amplitude de oscilação, muito diferente do ensaio onde muitas vezes o *shuttle* tendia à estabilidade assintoticamente.

As possíveis causas que levaram o modelo de sombra a não conseguir reproduzir o comportamento observado nos ensaios são listados a seguir.

a) Imprecisão nas medições das forças de corrente atuante no *shuttle*

Apesar dos mapas de sombra parecerem estar bons qualitativamente, as imprecisões experimentais deixam dúvidas quanto aos valores efetivamente medidos, em razão da pequena magnitude das forças/momento medidas. A grande diferença entre as magnitudes das forças de *surge* e *sway* aliado aos ruídos nas medições podem ter contribuído para a imprecisão dos resultados.

b) Método para quantificação do efeito sombra

A hipótese de se reproduzir o efeito sombra a partir dos mapas de sombra pode ser equivocada. Os mapas representam apenas as forças estáticas médias, medida nos

experimentos. É possível que a parcela dinâmica das forças de corrente, que só pode ser obtida através de ensaios com PMM (*Planar Motion Mechanism*) e YRM (*Yaw Rotating Mechanism*), seja mais importante para o efeito sombra.

c) Discretização insuficiente

A discretização da matriz de combinação de aproamentos FPSO/*shuttle* executadas nos ensaios (Tab.2.2) pode ter sido grosseira demais, prejudicando a reprodução do efeito dinâmico da sombra.

De fato, sabe-se que em sistemas SPM, a força hidrodinâmica longitudinal tem papel fundamental na definição do comportamento dinâmico do navio. Simos (2001), mostra em sua tese de doutorado que em movimentos de *fishtailing*, o ângulo de incidência efetivo da corrente ( $\phi = \text{atan}(-v/u)$ ) é muito menor (ordem de 3 graus), que o ângulo aparente. Assim, a discretização das curvas de  $C_d$ s próximo à incidência de proa acaba sendo determinante para a definição do comportamento dinâmico. No caso, os aproamentos do FPSO ensaiados foram de 180, 135 e 90 graus, apenas.

### 3.2 MAPAS DE SOMBRA USANDO PROGRAMA CFD

Uma vez que, aparentemente, o problema principal do modelo proposto, na seção anterior, foi decorrência da discretização grosseira dos experimentos para o levantamento dos mapas de sombra, pensou-se na possibilidade de se fazer o mesmo “ensaio” usando um programa CFD ( Fluent ), uma vez que a realização de um novo ensaio físico seria impossível, pelo menos a curto prazo.

Inicialmente, modelou-se um dos casos que foi ensaiado no tanque de provas, com o intuito de se verificar o nível de aderência entre os mapas experimental e numérico e também para “calibrar” o modelo CFD, se fosse o caso. O Caso adotado foi:

- a) Aproamento do FPSO: 135 graus
- b) Aproamento do *shuttle*: 180 graus
- c) Combinação de calados: FPSO 100% com *shuttle* 40%
- d) Velocidade: 0.149m/s

Para a confecção do mapa de sombra numérico foram modelados e rodados 30 modelos CFD, variando-se a posição do *shuttle* dentro da região de sombra. A Fig.3.1 mostra um dos modelos rodados. As paredes que delimitam a massa fluida e a superfície livre foram modeladas como paredes sem atrito. O modelo de turbulência adotado foi o k- $\epsilon$ , e foi utilizada a função de parede para modelar a camada limite dos navios. Os modelos tinham em média 300.000 elementos. As análises foram feitas em escala real, uma vez que os ensaios físicos simulavam o escoamento real através do uso de excitadores de turbulência.

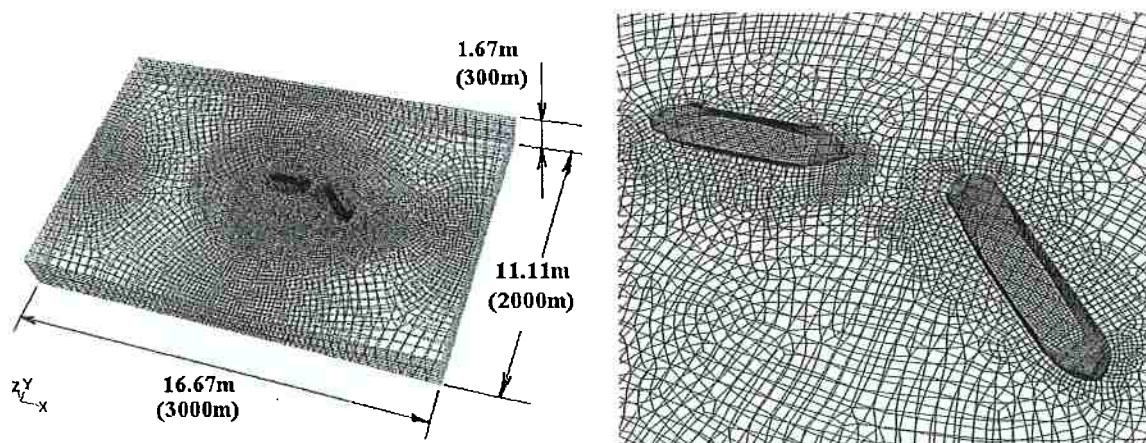


Fig.3.1 – Malha do modelo CFD – vista geral e detalhe dos navios.

As forças atuantes no *shuttle* foram obtidas diretamente do programa Fluent. As forças/momentos para cada uma das posições simuladas foram adimensionalizadas de maneira análoga àquela feita para os dados experimentais (seção 2.2.3), para a montagem dos mapas de sombra. As Figs.3.2 a 3.4 mostram os mapas de sombra numéricos obtidos com o Fluent. Comparando com os mapas experimentais equivalentes (Fig.A-1a a A-3a), percebe-se que o mapa de sombra numérico da força em *surge* está razoável, apesar de apresentar uma região de sombra mais longa. Por outro lado, os mapas numéricos de força em *sway* e o de momento em *yaw* apesar de apresentarem uma tendência parecida com as experimentais, elas indicam um efeito sombra mais pronunciado. No mapa experimental a força em *sway* máxima vale aproximadamente 0.065 enquanto que no numérico vale 0.16. Para o momento de *yaw* os máximos são respectivamente: 0.016 e 0.05.

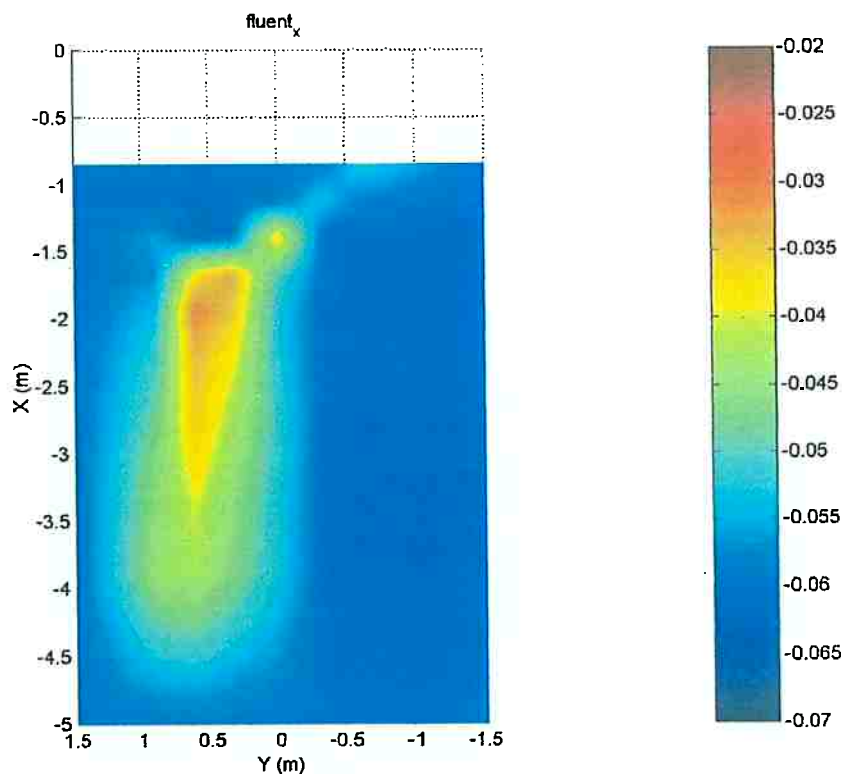


Fig.3.2 – Mapa de Sombra Numérico (Fluent) - Força X



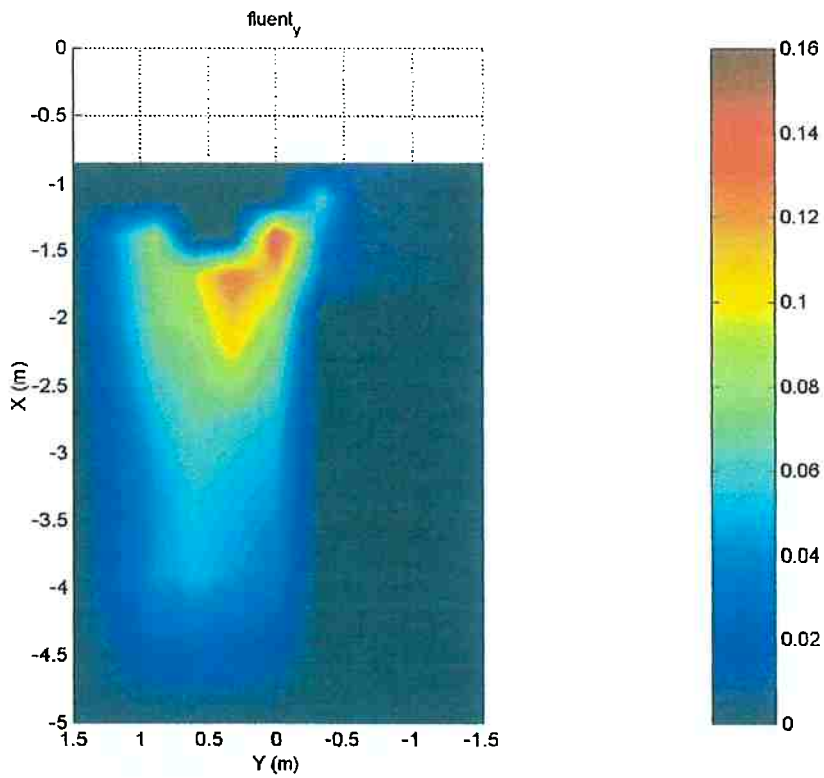


Fig.3.3 – Mapa de Sombra Numérico (Fluent) - Força Y

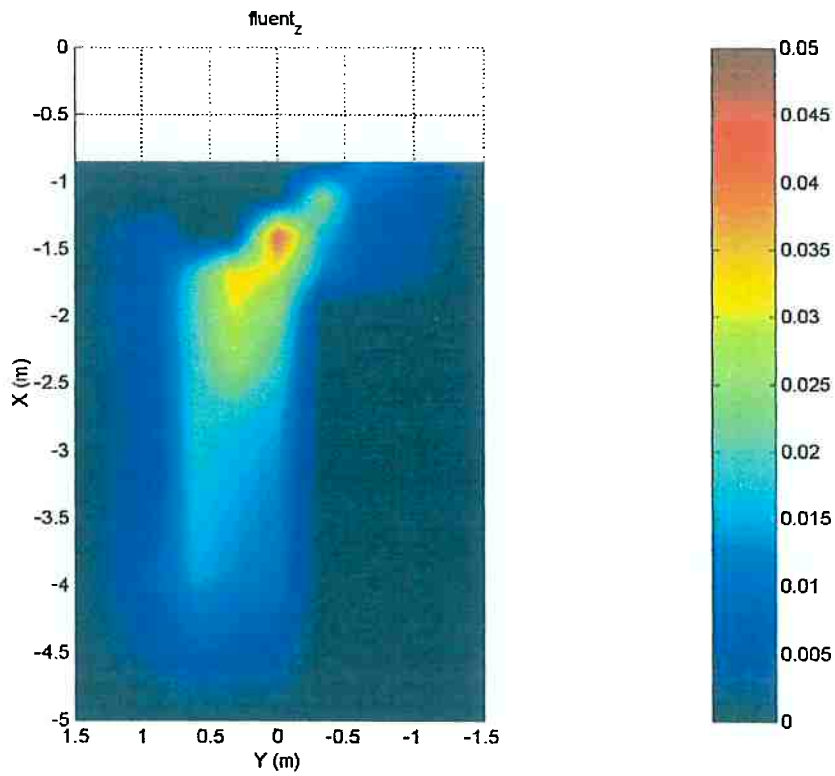


Fig.3.4 – Mapa de Sombra Numérico (Fluent) – Momento Z

Em virtude das discrepâncias acima apontadas, foram feitas várias análises variando-se os modelos de turbulência e o refinamento da malha, porém, não se conseguiu resultados melhores que os aqui apresentados. Um fator que pode ter contribuído para as discrepâncias da análise numérica foi a baixa definição dos planos de baliza dos modelos, Fig.2.7 e 2.8, que foram utilizados para a geração dos modelos CFD.

Face às dificuldades, fez-se um teste mais simples para verificar os valores de força calculados pelo CFD. Foi modelado apenas o navio *shuttle* a 90 graus com a corrente. A força lateral assim obtida foi confrontada com o valor obtido no ensaio. A Tabela 3.1 compara os valores das forças laterais adimensionalizadas,  $Cd_y(90^\circ)$ , do ensaio e os obtidos com o CFD, na escala real e na do modelo. O CFD foi rodado nas duas escalas, para verificar a diferença das forças, em função do regime de escoamento diferente, conseqüência da grande diferença entre os números de Reynolds das duas escalas. O escoamento subcrítico do modelo favorece o descolamento da camada limite desde o bordo de montante, fazendo com que a força de arrasto seja maior em relação à escala real, onde o escoamento é transcrito (Faltinsen, 1990). Os valores obtidos no CFD confirmam a tendência, porém, o valor de  $Cd_y(90^\circ)$  na escala real ainda ficou bem maior que o valor experimental.

Tabela - 3.1 – Valores de  $Cd_y(90^\circ)$

Método	$Cd_y(90^\circ)$
Ensaio	0.52
CFD-modelo	1.16
CFD-real	0.92

Dado o pouco tempo disponível para a conclusão dos trabalhos, resolveu-se deixar a abordagem do cálculo do efeito sombra através dos mapas de sombra de lado, para experimentar uma nova abordagem, baseada no campo de velocidades perturbado pelo FPSO, que é descrita no capítulo seguinte.

## 4. EFEITO SOMBRA USANDO CAMPO DE VELOCIDADES À JUSANTE DO FPSO

Em virtude das dificuldades encontradas na abordagem anterior, imaginou-se um método alternativo para a modelagem do efeito sombra. O método propõe a utilização do campo de velocidades perturbado pelo FPSO, para calcular as forças hidrodinâmicas atuantes no *shuttle*. Com isso, o efeito sombra é obtido implicitamente.

O campo de velocidade perturbado é obtido numericamente através do programa de CFD, Fluent.

Os resultados do modelo proposto são avaliados através de comparações com os resultados experimentais apresentados no Capítulo 2.

### 4.1 METODOLOGIA DE CÁLCULO

Como alternativa à metodologia de quantificação do efeito sombra através dos mapas de sombra experimentais, foi idealizado um novo método baseado no campo de velocidades perturbado pelo FPSO. O campo de velocidades é obtido através de análises tridimensionais (3D) em um programa CFD. Apesar da tridimensionalidade do campo de velocidades, o método adota o campo de velocidades bidimensional (2D) para uma dada profundidade. Este é tabelado e implementado no simulador DYNASIM. Durante a simulação, o programa verifica a posição instantânea do *shuttle* em relação ao FPSO fornecendo a velocidade da corrente local. Para o cálculo das forças de corrente atuante no *shuttle* é utilizado o modelo de “*local cross flow*”, que considera a velocidade de corrente relativa seccional do navio. Neste caso, ao invés da velocidade de corrente nominal, utiliza-se o campo de velocidades perturbado para a determinação da velocidade de corrente relativa em cada uma das secções do navio.

## 4.2 EQUAÇÕES DO MOVIMENTO

As equações do movimento do navio são desenvolvidas em relação ao sistema de coordenadas local, com origem no seu centro de gravidade. Como neste estudo a preocupação principal está nas forças devido à corrente, são apresentadas apenas as equações no plano horizontal. As equações foram desenvolvidas para um navio, mas podem ser estendidas para  $N$  navios. No sistema tandem, por exemplo, a compatibilidade entre os movimentos dos navios é obtida através da força no cabo de ligação, comum aos dois navios. Para o estudo do movimento do navio são adotados dois sistemas de coordenadas, como mostrado na Fig.4.1.

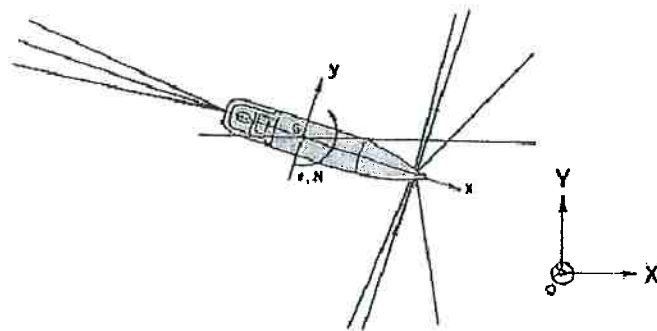


Fig.4.1 – Sistemas de coordenadas

- OXYZ - sistema inercial.
- $G_ixyz$  - sistema local fixo no CG do  $i^{\text{ésimo}}$  navio.

Aplicando a Segunda lei de Newton em relação ao sistema local  $G_ixyz$  obtém-se as seguintes equações.

$$\begin{aligned} M(\dot{u} - rv) &= X_{\text{ext}} \\ M(\dot{v} - ru) &= Y_{\text{ext}} \\ Iz \dot{r} &= N_{\text{ext}} \end{aligned} \quad (4.1)$$

onde:  $M$  é a massa e  $Iz$  é o momento de inércia em *yaw* do navio.  $u$  e  $v$  são respectivamente as velocidades em *surge* e *sway* e  $r$  é a velocidade angular em *yaw*.  $\dot{u}$ ,  $\dot{v}$

e  $\dot{r}$  são as derivadas temporais de  $u$ ,  $v$  e  $r$ .  $X_{ext}$ ,  $Y_{ext}$  e  $N_{ext}$  representam as forças externas atuantes.

As forças externas englobam vários fatores, tais como:

$$X_{ext} = X_i + X_h + X_v + X_o + X_m \quad (4.2)$$

$X_i$  – força inercial, decorrente da análise em um sistema não inercial

$X_h$  – força de corrente mais amortecimento viscoso

$X_v$  – força de vento

$X_o$  – força de onda

$X_m$  – força de amarração

A força de amortecimento viscoso e a de arrasto hidrodinâmico decorrente da corrente é aqui tratada genericamente como força hidrodinâmica.

O modelo de *local cross flow* implementado no DYNASIM é baseado no modelo de Obokata, 1987. Aqui, ao invés de supor um campo de velocidade uniforme, utiliza-se o campo de velocidade perturbado pelo FPSO para o cálculo da velocidade seccional relativa da corrente. A velocidade relativa do navio é definida como:

$$\begin{aligned} u_r &= u - V_c \cos \psi_{cr} \\ v_r &= v - V_c \sin \psi_{cr} \end{aligned} \quad (4.3)$$

onde:  $V_c$  é a velocidade local da corrente e  $\psi_{cr}$  é ângulo relativo de incidência da corrente, dado por:

$$\psi_{cr} = \psi_c - \psi$$

onde:  $\psi_c$  é a direção local da corrente e  $\psi$  é o ângulo de aproamento do navio.

As forças hidrodinâmicas podem ser escritas como:

$$\begin{aligned} X_h &= -m_x \dot{u} + m_y v_r - (m_y - m_x) V_c r \sin \psi_{cr} + X'_h \\ Y_h &= -m_y \dot{v} - a_{26} \dot{r} + m_x u_r - (m_y - m_x) V_c r \cos \psi_{cr} + Y'_h \\ N_h &= -J_z \dot{r} + a_{62} \dot{v} - N'_h \end{aligned} \quad (4.4)$$

onde:  $m_x$  e  $m_y$  são as massas adicionais nas direções de *surge* e *sway*, respectivamente,  $J_z$  é o momento adicional de inércia em *yaw* e  $a_{26}$  e  $a_{62}$  são termos de inércia adicional acoplada. Os termos  $X'_h$ ,  $Y'_h$  e  $N'_h$  são definidos como segue:

$$\begin{aligned}
 X'_h &= -\frac{1}{2}\rho D \int_{-L/2-x_G}^{L/2-x_G} C d_x(\psi_{crx}) V_{crx}^2 dx \\
 Y'_h &= -\frac{1}{2}\rho D \int_{-L/2-x_G}^{L/2-x_G} C d_y(\psi_{crx}) V_{crx}^2 dx \\
 N'_h &= -\frac{1}{2}\rho D \int_{-L/2-x_G}^{L/2-x_G} \left[ \begin{array}{l} C d_y(\psi_{crx}) V_{crx}^2 + \\ - C d_x(\psi_{crx}) V_{crx}^2 \end{array} \right] x dx - \frac{1}{2}\rho D L^2 C d_z(\psi_{cr}) V_{cr}^2 \\
 V_{cr}^2 &= u_r^2 + v_r^2 \\
 V_{crx} &= \sqrt{(u_r)^2 + (v_r + x r - V_c \sin \psi_{cr})^2} \\
 \psi_{crx} &= \tan^{-1} \left( \frac{v_r + x r - V_c \sin \psi_{cr}}{u_r} \right)
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

$$\tag{4.6}$$

onde:  $\rho$  é densidade d'água,  $L$  é o comprimento do navio,  $cd_x$ ,  $cd_y$  e  $cd_z$  são as curvas dos coeficientes de arrasto hidrodinâmico para as direções de *surge*, *sway* e *yaw*, como ilustrado nas Fig.2.12 a 2.15 do Capítulo 2.

#### 4.2.1 Força Devido a Diferença de Velocidades nos Bordos do Navio

Verificou-se durante o desenvolvimento, que além de perturbar a direção da velocidade de corrente, a presença do FPSO também provoca um grande gradiente de velocidade, na região limítrofe da sombra. A Fig.4.2 mostra um campo de velocidades que evidencia esse fato. Na mesma figura, desenhou-se esquematicamente o *shuttle*, para evidenciar a diferença nas velocidades de corrente que atuam em cada bordo. Em razão da diferença significativa, imaginou-se que isso poderia gerar uma força lateral no *shuttle*. De fato, verificou-se que esta parcela de força é considerável e é essencial para

reproduzir o comportamento dinâmico do *shuttle*, em alguns dos casos observados nos ensaios de *free running*.

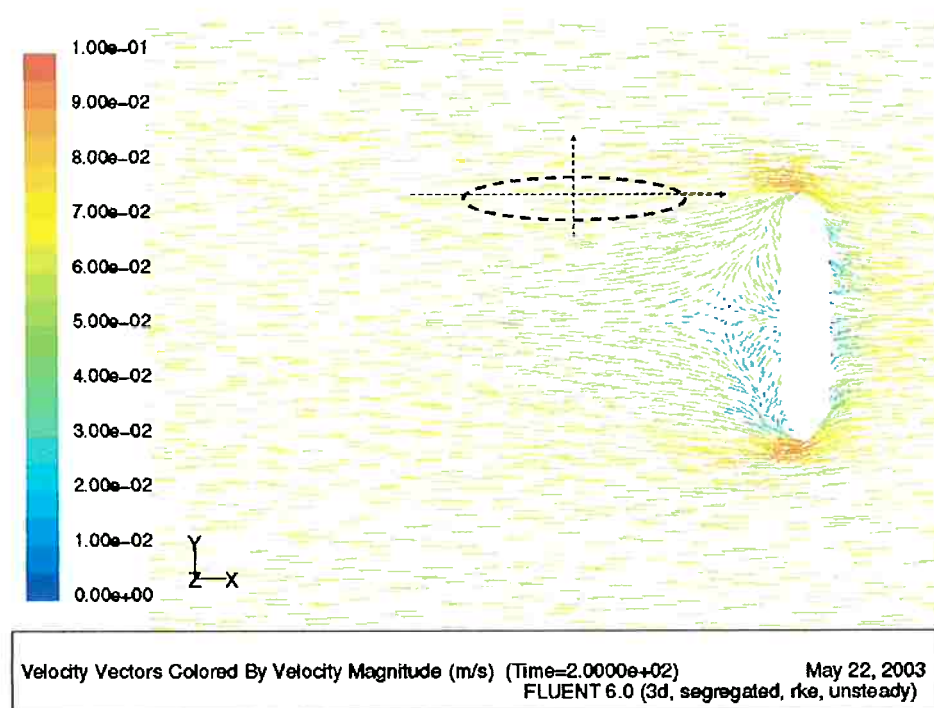


Fig.4.2 – Campo de velocidades para FPSO a 90 graus

A força lateral “adicional”, resultante da diferença de velocidades nos bordos do navio, é calculada através da equação de Bernoulli. A Fig.4.3 mostra as velocidades nos bordos direito e esquerdo,  $v_d$  e  $v_e$ , mais as variáveis utilizadas nas equações.

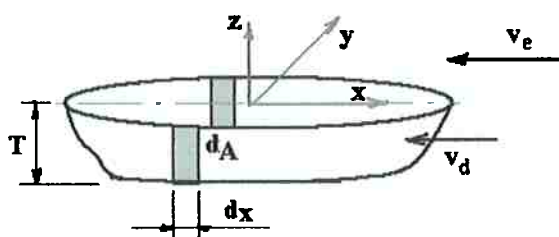


Fig.4.3 – Esquema para cálculo da força lateral adicional

Impondo a igualdade da equação de Bernoulli nos elementos de área,  $d_A$ , nos dois bordos:

$$\frac{v_d^2}{2} + \frac{p_d}{\rho} = \frac{v_e^2}{2} + \frac{p_e}{\rho} \quad (4.7)$$

$$\text{ou : } 0.5 \rho (v_e^2 - v_d^2) = (p_d - p_e) = \frac{1}{d_A} (f_d - f_e) \quad (4.8)$$

assim, a força lateral adicional fica:

$$F_{\text{adc}} = 0.5 \rho T C_C \int_{-L/2}^{L/2} (v_e^2 - v_d^2) dx \quad (4.9)$$

onde,  $C_C = 0.1$  é um coeficiente de correção tridimensional, ajustado empiricamente. Tal correção foi necessária devido à tridimensionalidade do escoamento, ou seja, a diferença de pressão entre os bordos é menor do que a calculada pela equação de Bernoulli, devido à existência de fluxo entre os bordos, por debaixo do navio.

O momento adicional fica:

$$M_{\text{adc}} = 0.5 \rho T C_C \int_{-L/2}^{L/2} (v_e^2 - v_d^2) x dx \quad (4.10)$$

A influência dos termos adicionais, acima formulados, é evidenciada na Seção 4.5, onde o modelo do efeito sombra é avaliado.

### 4.3 CAMPO DE VELOCIDADES PERTURBADO PELO FPSO

Como dito anteriormente, o campo de velocidades é obtido através de um programa de CFD, no caso foi utilizado o programa Fluent. Para a obtenção do campo de velocidades perturbado, foi feito um modelo 3D, contendo apenas o FPSO.

Porém, surgem aqui algumas dúvidas, que são discutidas nos sub itens a seguir.

- a) Validade do campo de velocidades obtido numericamente no CFD.
- b) Correlação entre os campos de velocidades na escala real e do modelo.
- c) Profundidade na qual, o campo de velocidades 2D deve ser calculado.



#### 4.3.1 Avaliação do Campo de Velocidades Obtido no CFD

A avaliação do campo de velocidades obtido numericamente no CFD foi feita comparando-se este com o campo obtido experimentalmente. O campo experimental corresponde àquele obtido no experimento apresentado na seção 2.1, Fig.2.3. Como o objetivo daquele experimento era apenas de avaliar a extensão da sombra, este foi feito sem maiores rigores experimentais. Portanto, deve-se tomar o campo experimental apenas como uma referência e não um padrão.

Para recordar, no experimento, o modelo do FPSO foi ensaiado com calado de 140mm, 100% carregado, aproamento de 20 graus e a velocidade de 0.075m/s. A largura da seção de testes do tanque de provas era de 1.8 m e a profundidade de 1.0 m. No modelo analisado no Fluent, modelou-se o tanque com as mesmas dimensões, visto que a largura limitada do tanque poderia causar algum bloqueio no escoamento. A superfície livre foi modelada como sendo uma parede sem atrito. O modelo de turbulência adotado foi o k- $\epsilon$ , e foi utilizada a função de parede para modelar a camada limite do navio e das paredes que delimitam a massa fluida. O modelo tinha aproximadamente 468.000 elementos.

A Fig.4.4 mostra o campo 2D de velocidades numérico fornecido pelo Fluent para a mesma profundidade do experimento, 20mm. Comparando com o campo experimental equivalente, Fig.2.3, nota-se que a perturbação do campo numérico é bem mais amena. Apesar da aderência entre os campos não ter sido satisfatória, deu-se prosseguimento a nova abordagem, para verificar de que forma o campo perturbado poderia alterar o comportamento do *shuttle*.

Para ilustrar a variação do campo de velocidades em função da profundidade, as Figs.4.5 a 4.7 mostram os campos para diferentes valores. Já a Fig 4.8 mostra o campo de velocidades através de um plano vertical passando pela popa do navio.

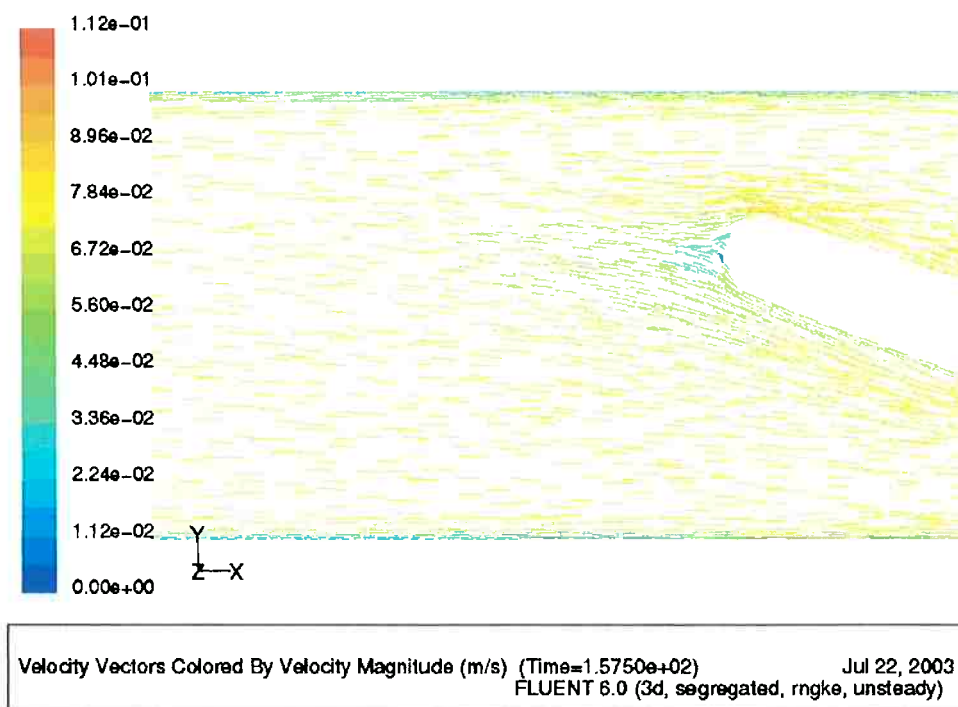


Fig.4.4 – Campo de velocidades do Fluent – prof. 20mm

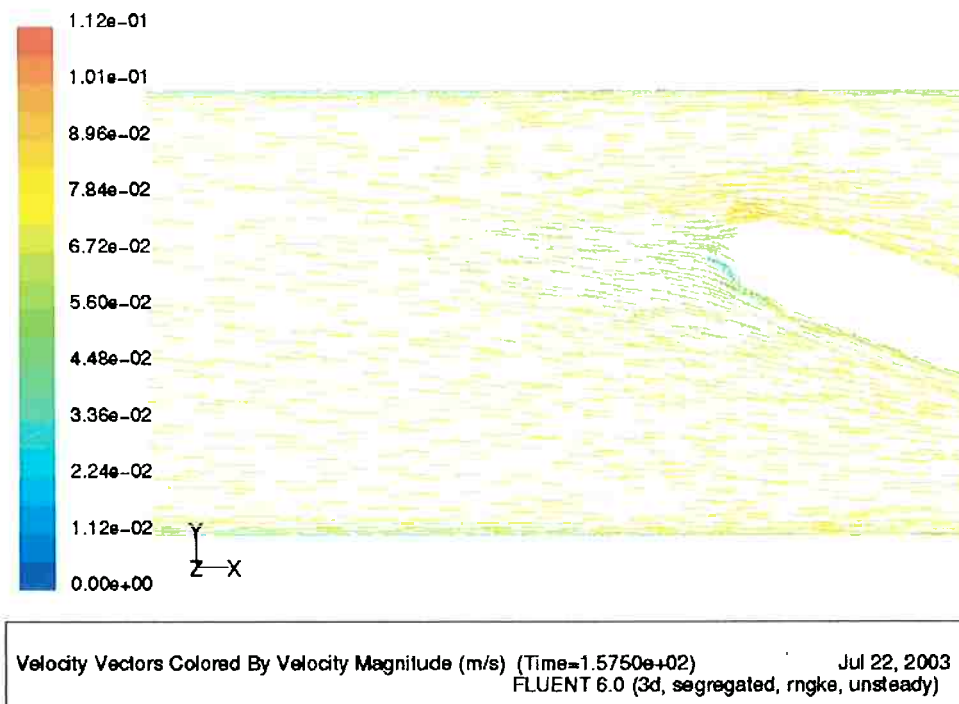


Fig.4.5 – Campo de velocidades do Fluent – prof. 50mm

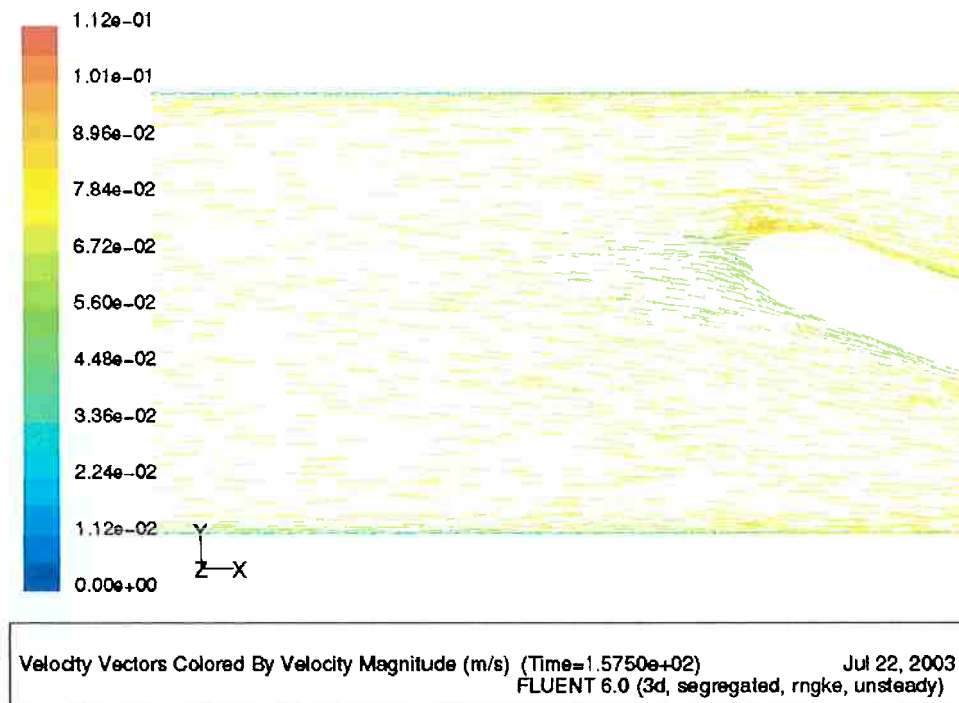


Fig.4.6 – Campo de velocidades do Fluent – prof. 90mm

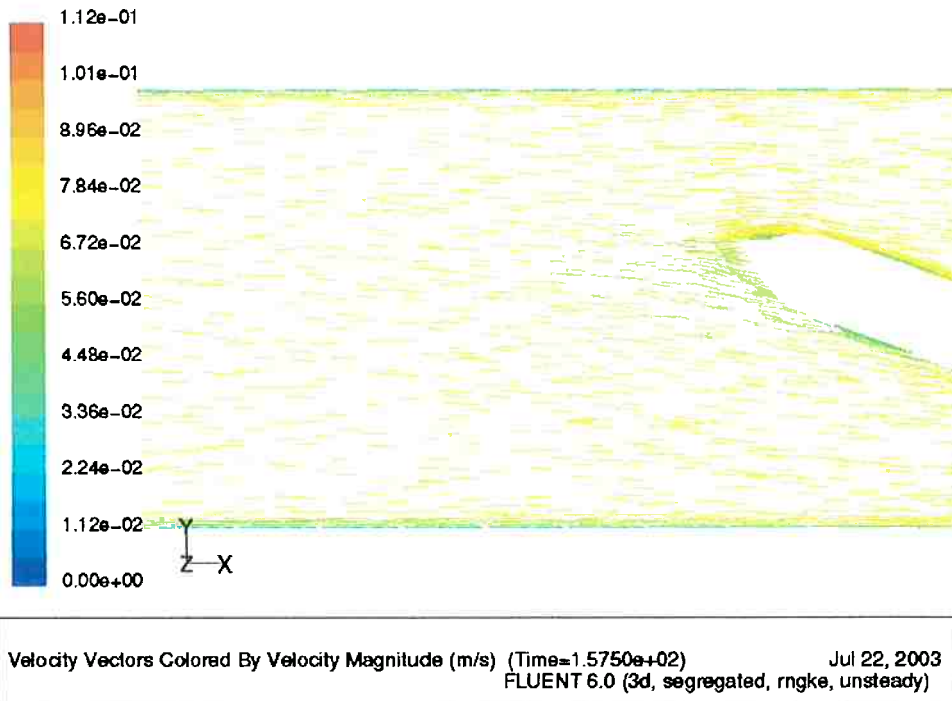


Fig.4.7 – Campo de velocidades do Fluent – prof. 120mm

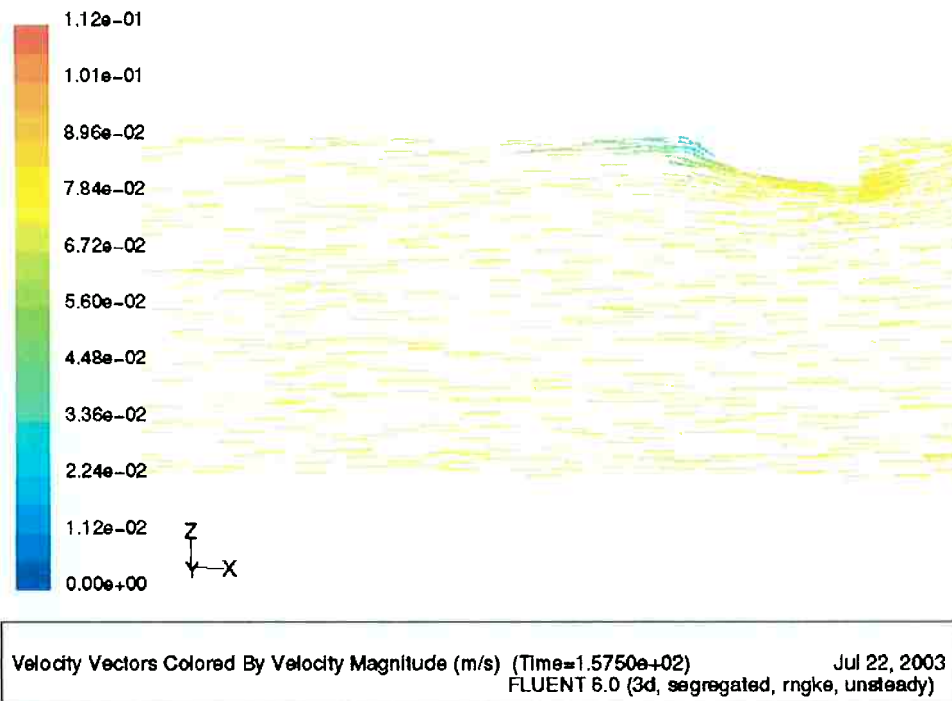


Fig.4.8 – Campo de velocidades do Fluent – plano vertical

### 4.3.2 Determinação da Profundidade do Campo de Velocidade

Como visto na secção anterior, o campo de velocidades é função da profundidade. Como a variação do campo de velocidade se dá de maneira gradativa com a profundidade, supôs-se a existência de um o campo de velocidades “médio” (2D), que reproduzisse as mesmas forças atuante no navio *shuttle*, quando sujeito ao campo real (3D). E que tal campo seria equivalente ao campo de uma profundidade intermediária entre zero e o calado do *shuttle*.

A determinação da profundidade do campo de velocidades médio foi feita de maneira interativa. O modelo proposto na Seção 4.2 foi implementado numa versão especial do DYNASIM, que calculava as forças/momento atuantes no *shuttle* através do método de *local cross flow*, considerando o campo de velocidades perturbado. Nesta versão, a análise era estática e numa única rodada, o simulador fornecia as forças/momentos do *shuttle* para uma série de posições (iguais às ensaiadas) à jusante do FPSO. Com isto, levantou-se os mapas de sombra numéricos para serem comparados com os experimentais. Este procedimento foi repetido com campos de velocidades de diferentes profundidades, até se conseguir a melhor aderência entre os mapas numéricos e experimentais. Concluiu-se que o campo de velocidades de profundidade correspondente à metade do calado do navio *shuttle* é o que melhor reproduz as forças/momento atuantes no *shuttle*, quando este está na região de sombra do FPSO. No caso, a profundidade foi de 28 mm, equivalente a 5.04m na escala real. Concluiu-se também que uma variação de  $\pm 20\%$  no valor da profundidade não alterava o mapa de sombra numérico de forma significativa.

As figuras do Anexo-A com índice “b” mostram os mapas numéricos calculados pelo DYNASIM e as com índice “a” mostram os mapas experimentais. Pelas

comparações do Anexo-A pode-se perceber que a aderência entre os resultados experimentais e numéricos é razoável em boa parte dos mapas, apresentando a mesma tendência e reproduzindo até sutis variações nas forças. Porém, em alguns casos, as discrepâncias entre os mapas numéricos e experimentais foram consideráveis. Vários fatores podem ter contribuído para tal resultado:

- a) Os mapas experimentais com velocidade menor estão mais sujeitos a erros, haja vista a menor magnitude das forças envolvidas.
- b) Incertezas no campo de velocidades calculado pelo Fluent
- c) Incertezas nas curvas de Cds experimentais (anteriormente mostrada na Seção 2.2, Figs.2.12 a 2.15), usadas para o cálculo das forças/momento.

#### **4.3.3 Campo de Velocidade na Escala Real e do Modelo**

Uma das grandes questões quanto à realização de ensaios em escala reduzida está na validade da extrapolação dos fenômenos observados nos experimentos para a escala real. É sabido que o regime de turbulência na escala do modelo é diferente da escala real, assim, numa tentativa em igualar os escoamentos em torno dos corpos são colocados excitadores de turbulência no modelo, sendo que esta prática é puramente empírica.

Da mesma maneira, uma das maiores dificuldades dos programas CFD está na análise de escoamentos turbulentos. Para que os resultados tenham um certo grau de confiabilidade, o ideal seria a calibração dos resultados numéricos com experimentais. Além da escolha do modelo de turbulência ideal para um determinado caso, estes ainda possuem uma série de parâmetros que podem ser ajustados para ajudar na calibração. Isto, aliado à qualidade da malha influem de forma decisiva nos valores calculados das

forças de arrasto e/ou sustentação atuantes no corpo. Neste caso, as forças obtidas com análises, nas escalas de modelo e real, não devem apresentar uma correlação direta, uma vez que o modelo trabalha num regime de turbulência diferente do caso real.

Como já foi dito, a compreensão do estudo do efeito sombra aqui desenvolvido deve ficar restrito à escala do modelo, uma vez que a sua extrapolação para a escala real não é uma tarefa fácil, em razão do efeito de escala.

A título de curiosidade, experimentou-se rodar o Fluent na escala real, para verificar como ficaria o campo de velocidades perturbado. Foi adotado o mesmo caso apresentado na Seção 4.3.1, ou seja: FPSO com calado de 25.2m (140mm na escala de modelo), aproamento de 20 graus e a velocidade de 1.0m/s (0.075m/s na escala de modelo).

A Fig. 4.9 mostra o campo de velocidades obtido na escala real, equivalente ao campo na escala de modelo apresentado na Fig.4.4. Para facilitar a comparação, os fundos de escala de ambas figuras são equivalentes (0.112m/s no modelo e 1.5m/s na escala real). De uma maneira geral, pode-se dizer que não houve uma mudança radical no aspecto do campo de velocidades. Porém, o campo de velocidades na escala real apresenta uma perturbação um pouco mais pronunciada, a exemplo do campo de velocidades experimental da Fig.2.3. Uma explicação para isso deve estar na utilização de excitadores de turbulência no modelo ensaiado, fazendo com que o regime de turbulência ficasse próximo ao da escala real.

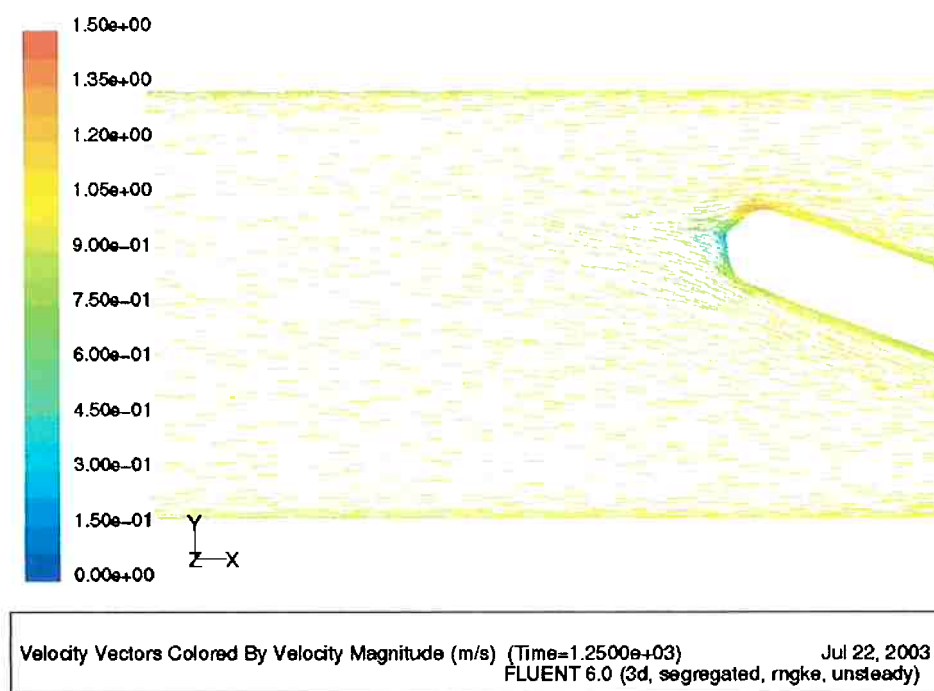


Fig.4.9 – Campo de velocidades do Fluent – prof. 3.6m (20mm esc.mod.)

#### 4.4 AVALIAÇÃO DO MODELO DE SOMBRA NO SIMULADOR DYNASIM

A avaliação do modelo de sombra baseado no campo de corrente perturbado foi feita através de comparações diretas entre os resultados experimentais e os numéricos, fornecidos pelo DYNASIM. Os resultados dos experimentos da Seção 2.3 apresentados nas figuras com índice “a” no Anexo-B são utilizados como paradigmas.

As figuras com índice “b” no Anexo-B (Figs.B-1b a B24b) mostram as séries temporais dos movimentos do *shuttle* fornecidas pelo DYNASIM, considerando ou não o efeito sombra da corrente. Aqui foram analisados apenas os casos em que o FPSO estava com 100% do calado, ou seja, onde o efeito sombra era mais notável.

Comparando os resultados, percebe-se que nas configurações em que o efeito sombra de corrente era mais nítido (FPSO com aproamento de 135 e 90 graus), as análises numéricas conseguiram reproduzir as mesmas tendências dos experimentos, ou seja, movimentos do *shuttle* que eram de grande amplitude e crescentes, sem o FPSO à



montante, passaram a apresentar movimentos de amplitude decrescente ou, em alguns casos, o *shuttle* tendia assintoticamente à posição de equilíbrio.

A Fig.4.10 mostra a influência da força/momento adicional, decorrente da diferença de velocidades nos dois bordos, modeladas na Seção 4.2.1, na dinâmica do *shuttle*. Os gráficos mostram as séries temporais dos movimentos do *shuttle*, calculadas com o DYNASIM, para a seguinte condição: FPSO (100%; -90°); *shuttle* (40%); *hawser* 520mm; vel. 0.075m/s. A curva azul corresponde ao caso sem o FPSO à montante; a curva rosa mostra o caso com o FPSO à montante, com o modelo de sombra completo e a curva verde, o caso com o FPSO à montante, sem a força/momento adicional no modelo de sombra. Como se pode ver, a força/momento adicional influencia de forma decisiva o comportamento dinâmico do *shuttle*. O movimento que deveria tender a estabilidade estática, com o FPSO à montante, conforme resultados experimentais (Fig.B-23a), acaba apresentando movimento de *fishtailing* com amplitude crescente, quando se tira o efeito da força/momento adicional. Aliás, a amplitude de movimentos ficou até maior que o caso sem o FPSO à montante.

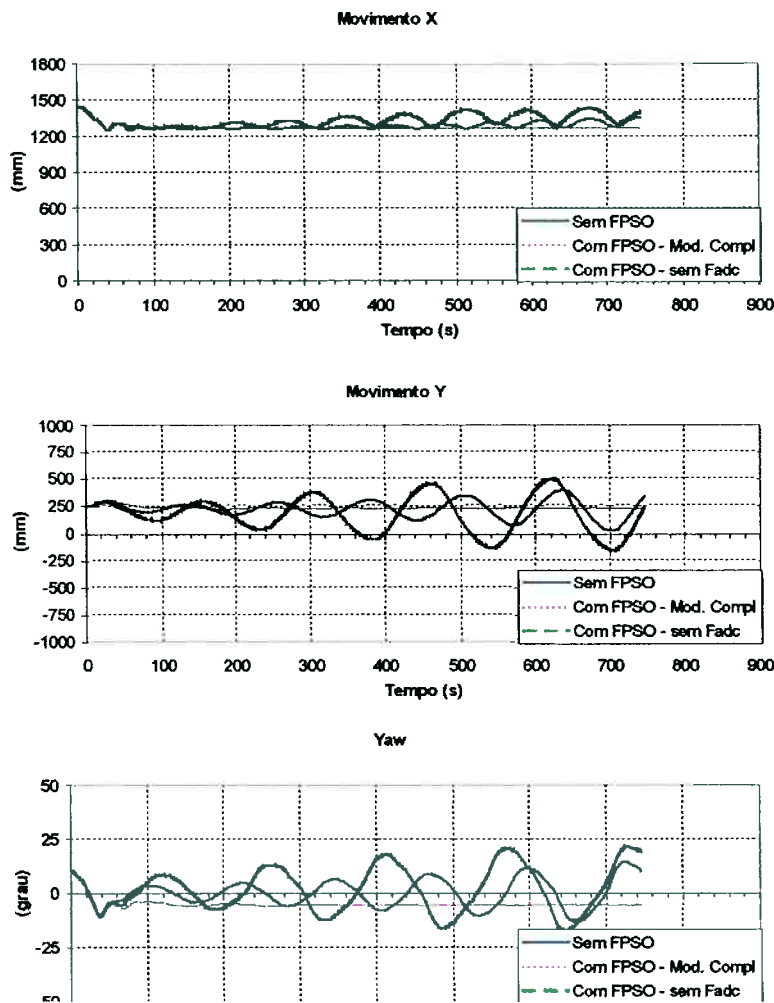


Fig.4.10 – Influência da força/momento adicional na dinâmica do *shuttle*

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões sobre o estudo realizado, e ainda são feitas algumas recomendações para a melhoria do modelo de sombra proposto, apontando os pontos fracos.

O modelo numérico do efeito sombra, baseado na consulta direta aos mapas de sombra, não foi capaz de reproduzir o comportamento dinâmico do *shuttle* observado nos ensaios de *free running*. É possível, que uma maior discretização nos mapas

consiga resolver este problema. Porém, acredita-se que o modelo apresentado na segunda abordagem, baseado no campo de velocidades perturbado, seja uma opção mais interessante, principalmente pelo aspecto prático, onde a preparação de dados seria muito mais fácil. Enquanto no último método são necessários apenas os campos de velocidades perturbados, no primeiro seria necessário o levantamento de vários mapas para a reprodução do efeito sombra.

Preliminarmente, o modelo do efeito sombra baseado no campo de velocidades perturbado mostrou-se eficiente, reproduzindo qualitativamente boa parte dos experimentos de *free running* (Anexo-B). Seria necessário, porém, uma nova análise para verificar as causas das diferenças entre os mapas de sombra experimentais e numéricos, obtidos com o DYNASIM (Anexo-A). Certamente, uma aderência melhor entre os mapas irá melhorar o comportamento dinâmico do *shuttle*, obtido na simulação numérica.

É necessário um estudo mais profundo e detalhado para a obtenção dos campos de velocidades através de programas CFD. Dado o tempo disponível, investiu-se apenas o tempo mínimo necessário para realizar as análises desejadas. Seria interessante a realização de um ensaio mais criterioso para o levantamento do campo de velocidades perturbado pelo FPSO, para possibilitar a calibração do programa CFD.

Uma das causas das diferenças entre os mapas de sombra experimentais e numéricos, obtidos com o CFD, pode estar na discretização insuficiente, no caso, por limitação do *hardware*, as malhas possuíam no máximo 600.000 elementos.

Apesar das incertezas envolvidas no modelo de sombra baseado no campo de velocidades perturbado, tais como: - utilização de curvas de coeficientes  $C_{ds}$  experimentais, - utilização do campo de velocidades obtido com programa CFD, entre

outros, os resultados obtidos com a simulação foram animadores, indicando ser este um caminho a ser seguido.

## **6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**Abkowitz**, M.A. "Stability and Motion Control of Ocean Vehicles", Cambridge, Mass., M.I.T. Press, 1969

**Bernitsas**, M.M.; Garza-Rios L.O. "Effect of Mooring Line Arrangement on the Dynamics of Spread Mooring Systems", OMAE - 1995.

**Brinati**, H.L.; Nishimoto, K.; Masetti, I.Q.; Fuljahn, M. "The Effects of Mooring Line Damping & Wave Drift Damping on Moored Tanker Dynamic", ISOPE-97

**Buchner**, B.; Bunnik, T.; "Wind Shielding Investigations for FPSO Tandem Offloading"; ISOPE 2002.

**Bueno**, J.F.; Pesce, C.P.; Ragazzo, C.G.; "Hopf Bifurcation of FPSO Moored Systems with Terms of Type  $\nu^{1/2}$ : Na Analysis Using the Central Manifold Theorem and Integral Averaging Techniques", COBEM, 2003.

**Bureau Veritas** "Quasi-Dynamic Analysis of Mooring Systems - recommended practice", tentative issue october 1995.

**Chen**, G.R.; Fang, M.C.; "Hydrodynamic Interactions Between Two Ships Advancing in Waves"; Ocean Engineering, No.28, 2001.

**Dercksen**, A. "Dynamic Analysis of Moored Tankers", OMAE 1995.

**Faltinsen**, O.M., at al. "Hidrodynamic Analysis of Tankers at Single-Point-Mooring-Systems", BOSS'79.

**Faltinsen**, O.M., "Sea Loads on Ships and Offshore Structures", Cambridge University Press; 1990.

**Fernandes**, A.C. "Estabilidade do Sistema SPM", monografia, Petrobrás, 1994

**Fucatu**, C.H.; "Desenvolvimento de um Simulador Dinâmico para Análise de Navios Amarrados"; Dissertação de Mestrado, 1998, EPUSP.

**Fucatu**, C.H.; Nishimoto, K; Maeda H.; Masetti, I.Q.; "The shadow effect on the dynamics of a *shuttle* tanker"; OMAE 2001.

**Fujino, M.; Maki, T.** “A Practical Methods to Predict the Slewing Motion of a Ship Under The Single Point Mooring”,. Journal of The Society of Naval Architects of Japan, vol.154, Nov. 1983.

**Fujino, M.; Ishiguro, T.** “A Study of the Mathematical Model Describing Maneuvering Motion in Shallow Waters”, Journal of The Society of Naval Architects of Japan, vol.156, Nov. 1984.

**Jiang, T.; Schellin, T.E.; Sharma, S.D.** “Motion Prediction of a Single Point Moored Tanker Subjected to Current, Wind and Waves”, OMAE-1988.

**Kat, J.O. & Wichers, J.E.W.** “The Behaviour of a Moored Ship in Unsteady Current, Wind and Waves”, Marine Technology, september 1991.

**Koh, C.W.;** “Assessment of Slow Motion Dynamics of a Single Point Moored FSO with Tandem Offloading”; Trabalho de Formatura apresentado ao Dep. Arctetura Naval e Eng. Oceânica da Universidade de Tokyo; 2000

**Leite, A.J.P.; Aranha, J.A.P.; Umeda, C.; Conti, M.B.** “Current Forces in Tankers and Bifurcation of Equilibrium of Turret Systems: Hydrodynamic model and Experiments”; Applied Ocean Research, 1998

**Molin, B.; Bureau, G.** “A Simulation Model for the Dynamic Behavior of Tankers Moored to SPM”, International Symposium on Ocean Engineering and Ship Handling, Gothenburg, 1980.

**Morishita, H.M.; Souza Júnior, J.R.;** “Dynamic behaviour of a DICAS EPSO and shuttle vessel under the action of wind, current and waves”;. ISOPE 2002

**Newman, I.N.** “Second Order Slowly Varying Forces on Vessels in Irregular Waves”, Proc. Int. Symp. on Dynamics of Marine Vehicle and Structure, 1974

**Nishimoto, K.; Fucatu, C.H.; Yamauchi, L.W.** “Dinâmica do Sistema Navio Monobóia”, SOBENA 1994.

**Nishimoto, K.; Brinati, H.L.; Fucatu, C.H.** “Analysis of Single Point Moored Tanker Using Maneuvering Hydrodynamic Model”, OMAE 1995.

**Nishimoto, K.; Brinati, H.L.; Fucatu, C.H.** “Dynamic Analysis of FPSO with a Tandem Offloading System”, OMAE 1996.

**Nishimoto, K.; Brinati, H.L.; Fucatu, C.H.** “Dynamics of Moored Tankers - SPM and Turret”, ISOPE 1996.

**Nishimoto, K.; Aranha, J.A.P.; Matsuura, J.P.J.; Kaster, F.; Namba, H.; Masetti, I.Q.;** “Full Scale Decay Test of Moored Tanker: Measurement Procedure of Surge Damping”, OMAE 1997.

**Nishimoto, K.; Fucatu, C.H.; Masetti, I.Q.;** “Dynamim : a time domain simulator of anchored FPSO”; OMAE 2001

**Norbinn, N.A.** “Theory and Observations on the Use of a Mathematical Model for Ship Maneuvering in Deep and Confined Waters”, Góterborg, Stantena Skeppsprovninganstalt 1971.

**Numata, T. and Sao, K.** “Analysis Method for Single Point Mooring (1st report)”, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, vol. 162, Dec. 1987.

**Numata, T. and Sao, K.** “Analysis Method for Single Point Mooring (2nd report)”, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, vol. 163, june 1988.

**OCIMF** - Oil Companies International Marine Forum, "Prediction of Wind And Current Loads on VLCCs", 1993.

**Obokata, J.** "On the Basic Design of Single Point Mooring Systems (1st report)", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, vol.161, june 1987.

**Obokata, J.; Nakashima, T.** "On the Basic Design of Single Point Mooring Systems (2nd report)", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, vol.163, june 1988.

**Pesce, C. P. & Tannuri, E. A.;** “Stability And Dynamics Of Offshore Single Point Mooring Systems”; 1997, Revista Brasileira de Ciências Mecânicas

**Simos, A.N.;** "Modelo Hidrodinâmico Heurístico para Análise de Navios Petroleiros Amarrados sujeitos à Ação de Correnteza", Tese de Doutorado, 2001, EPUSP

**Siqueira, C.R.;** "Resolução de Escoamentos Bidimensionais Viscosos Turbulentos e Incompressíveis em Regime Permanente Através da Utilização de Mecânica dos Fluidos Computacional", Dissertação de Mestrado, 1995, EPUSP

**Souza Jr, J.D.R, Brinati, H.L.;** "Development and Application of the Slow Speed Maneuvering Simulator", Master Thesis, 1990, EPUSP

**Takashina, J.** "Ship Maneuvering Motion Due to Tug boats and Its Mathematical Model", Jornal of the Society of Naval Architects of Japan, vol. 160, Dec 1986.

**Takashina, J.;** Hirano, M. "Ship Maneuvering Motion by Tugs in Deep and Shallow Water", MARISIM&ICSM'90, June 1990.

**WAMIT**, version 5.0, Reference Manual, 1993

**Wichers, J.E.W.** "The Prediction of the Behaviour of Single Point Moored Tankers", Developments in Marine Technology, Vol.4, Floating Structures and Offshore Operations, november. 1987.

**Wichers, J.E.W.** "A Simulation Model for a Single Point Moored Tankers", Maritime Research Institute Netherlands, Publication No. 797, 1988.



## ***ANEXOS***

## **ANEXO – A**

*Comparações Numérico-Experimentais dos Mapas do Efeito Sombra*

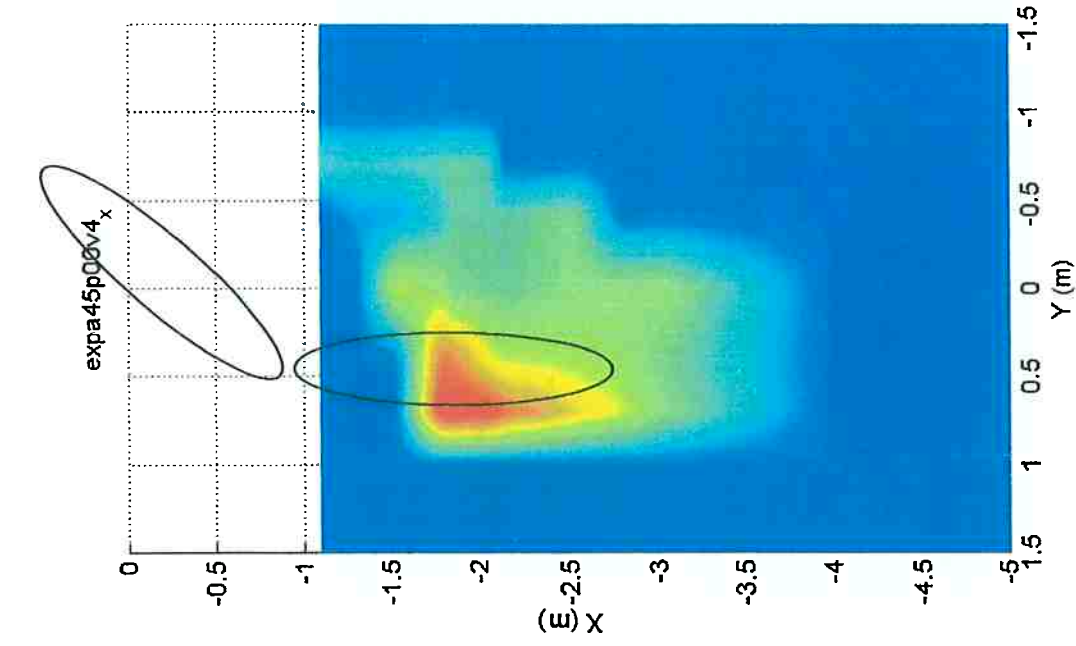


Fig.A-1a – Mapa experimental; Força X; vel. 0.149m/s

FPSO (100% calado; -135°); shuttle (40% calado; 180°)

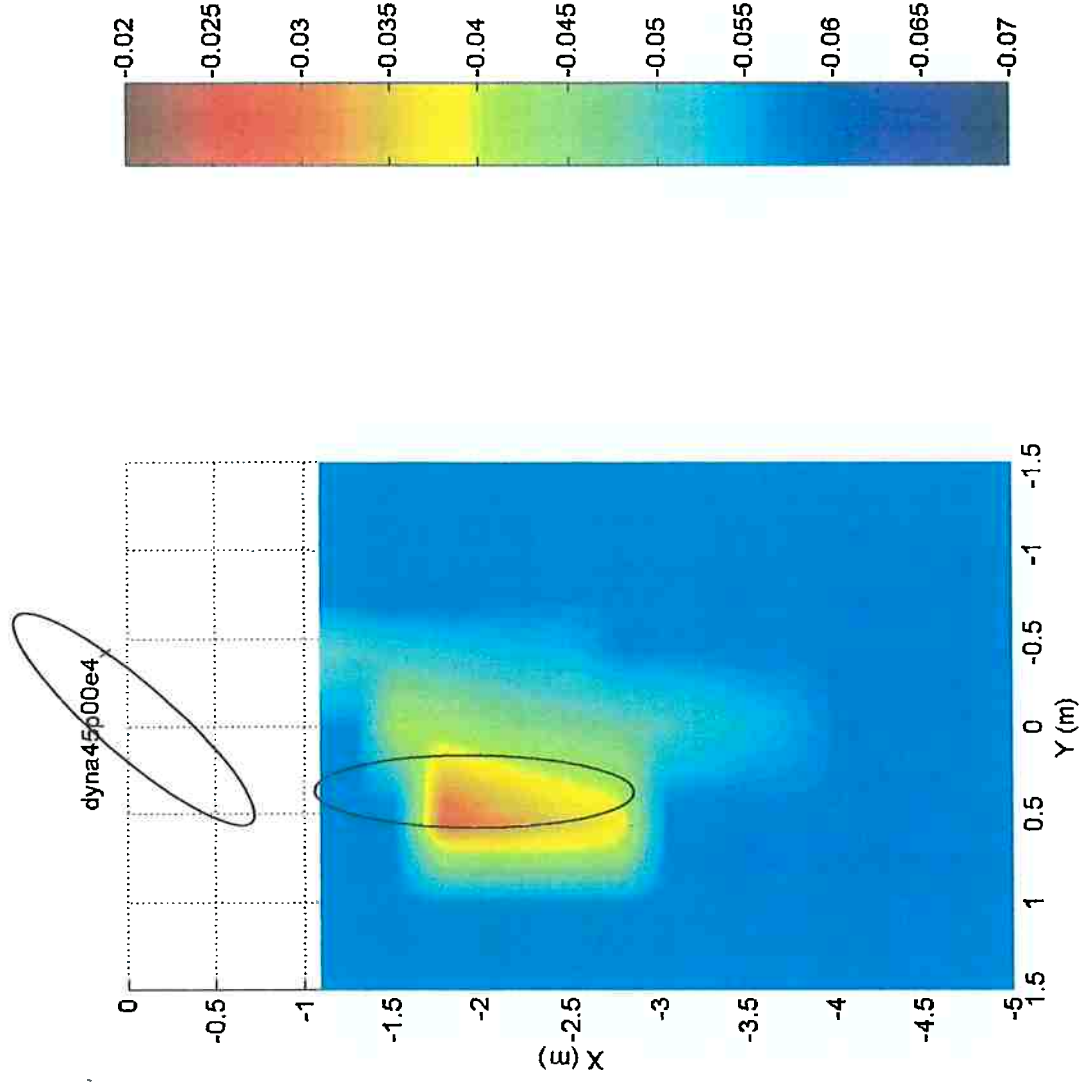


Fig.A-1b – Mapa numérico; Força X; vel. 0.149m/s

FPSO (100% calado; -135°); shuttle (40% calado; 180°)

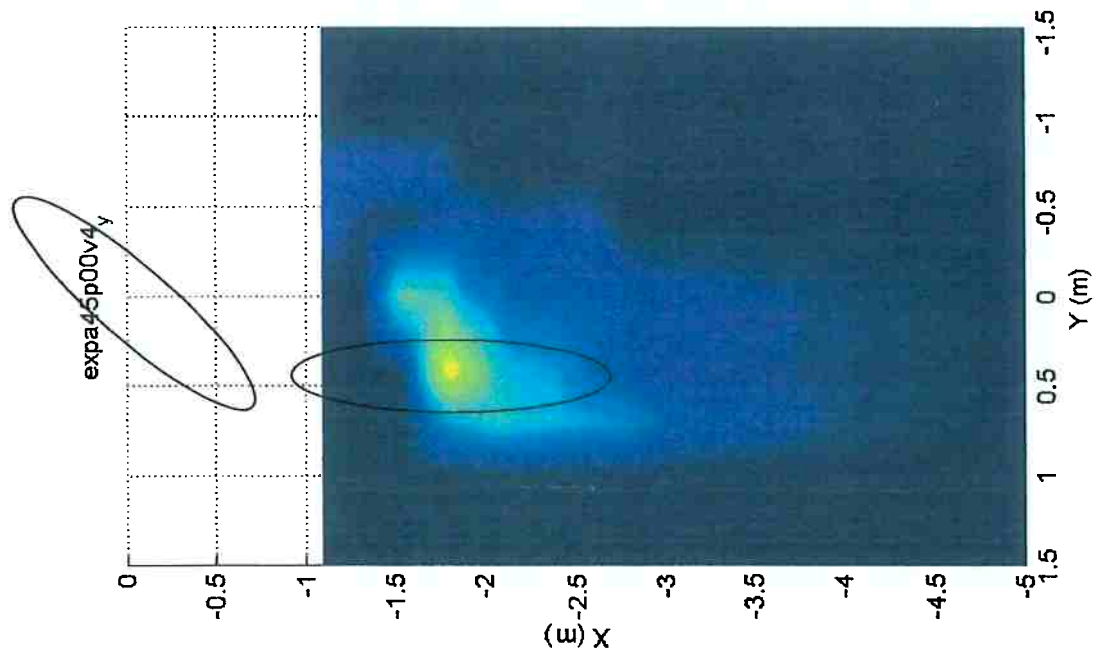


Fig.A-2a – Mapa experimental; Força Y; vel. 0.149m/s

FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; 180°)

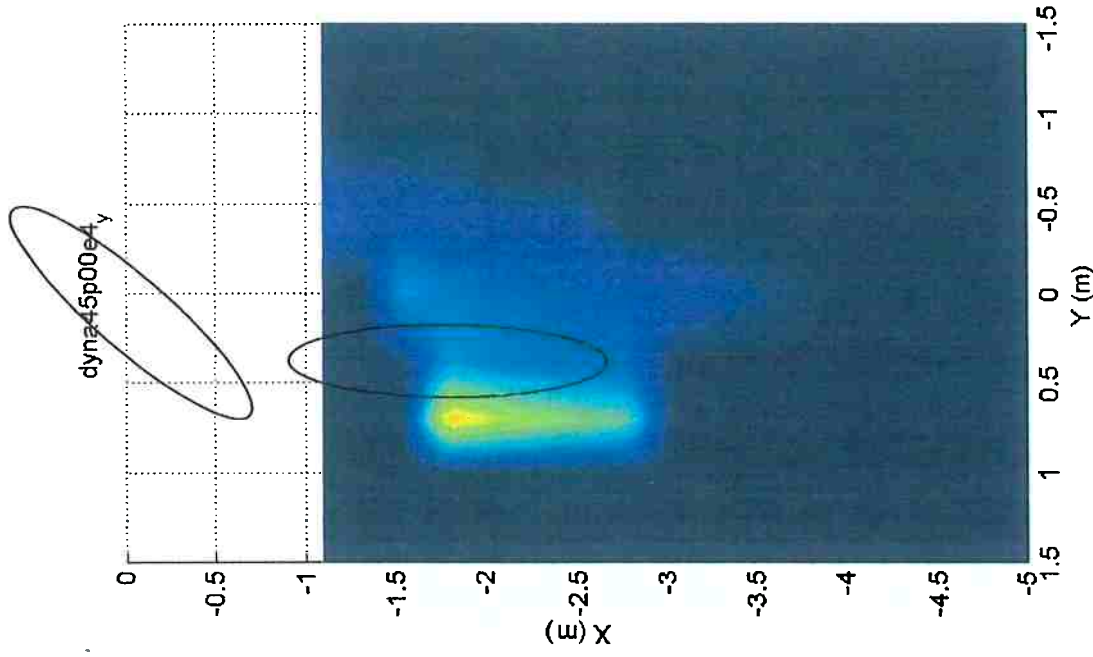


Fig.A-2b – Mapa numérico; Força Y; vel. 0.149m/s

FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; 180°)

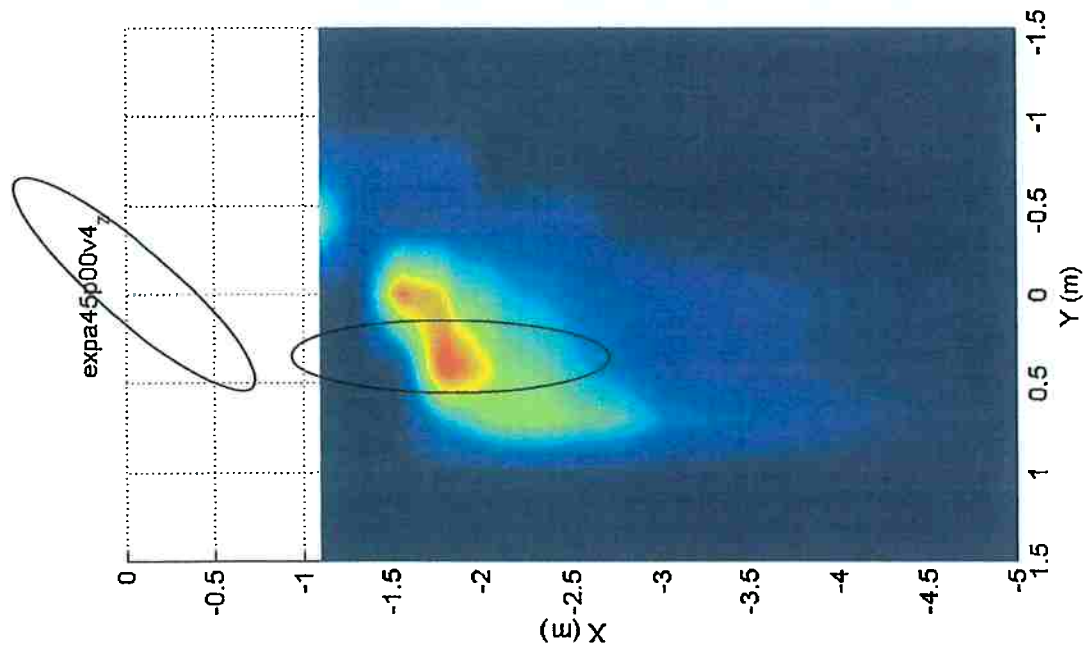


Fig.A-3a – Mapa experimental; Momento Z; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -135°); shuttle (40% calado; 180°)

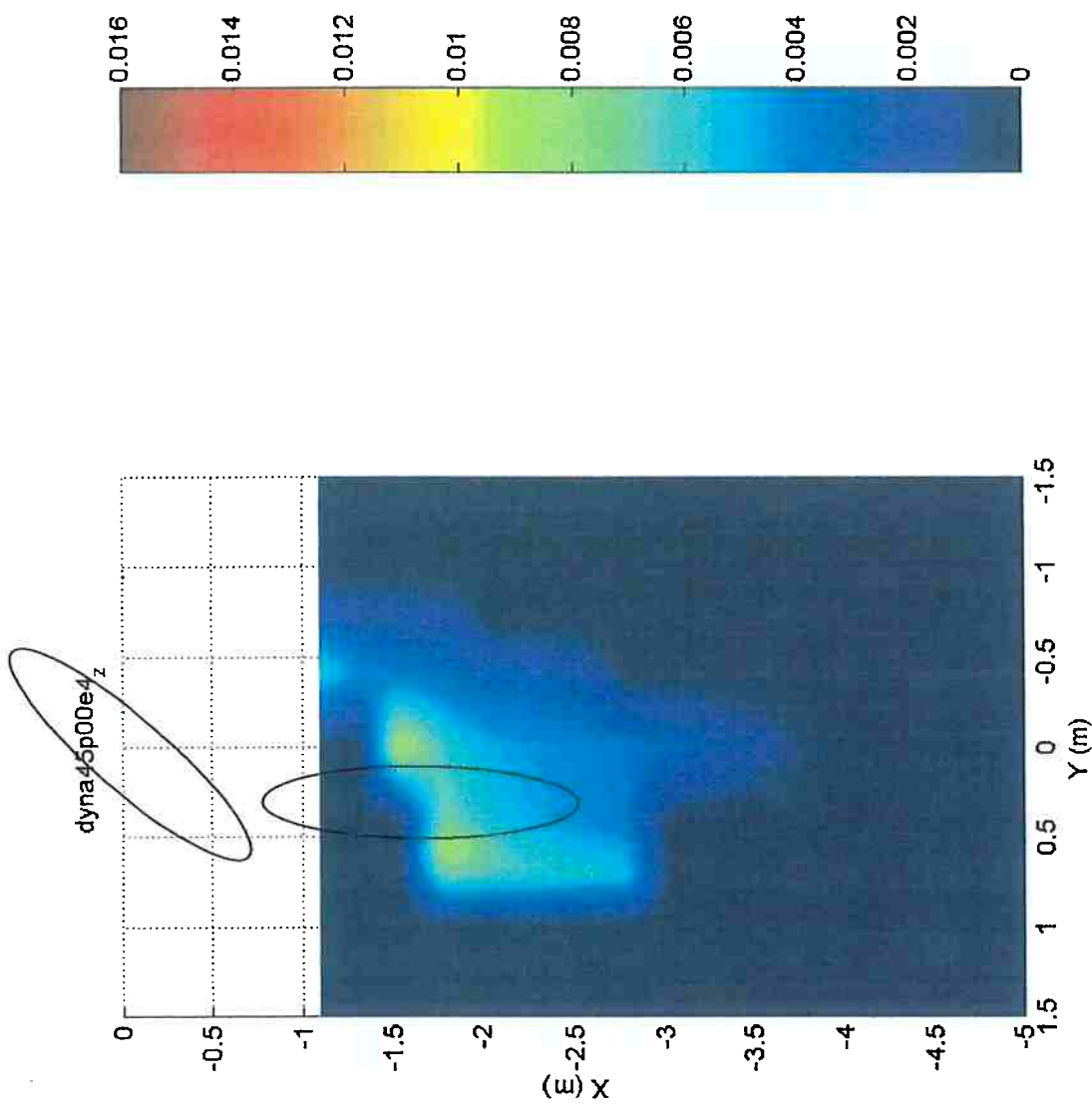


Fig.A-3b – Mapa numérico; Momento Z. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -135°); shuttle (40% calado; 180°)

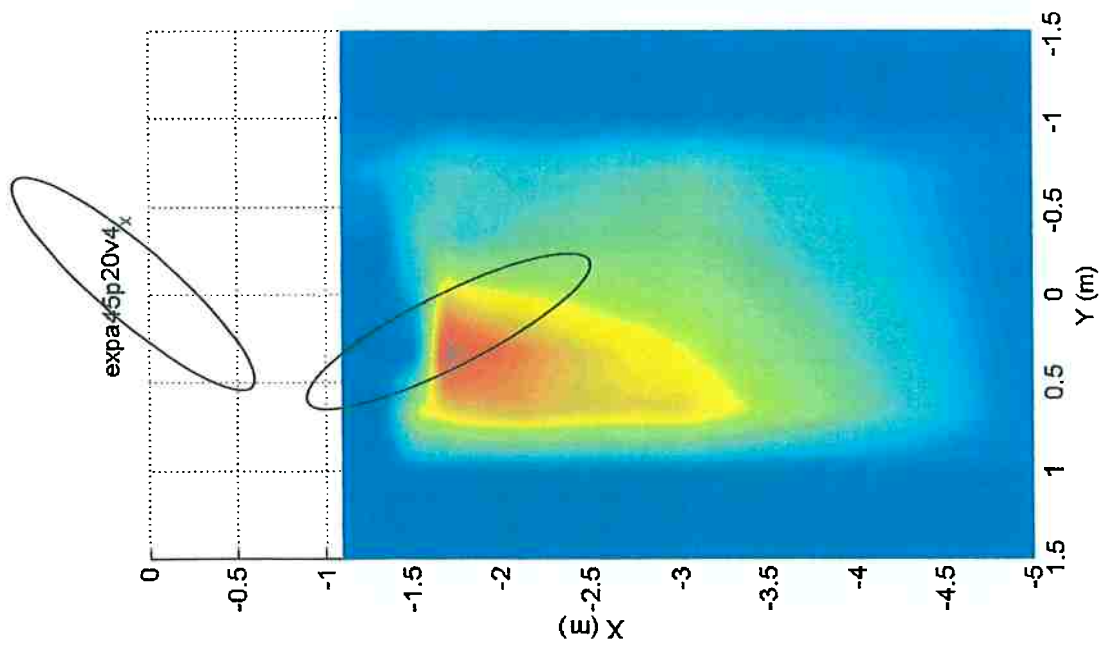


Fig.A-4a – Mapa experimental; Força X; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; 160°)

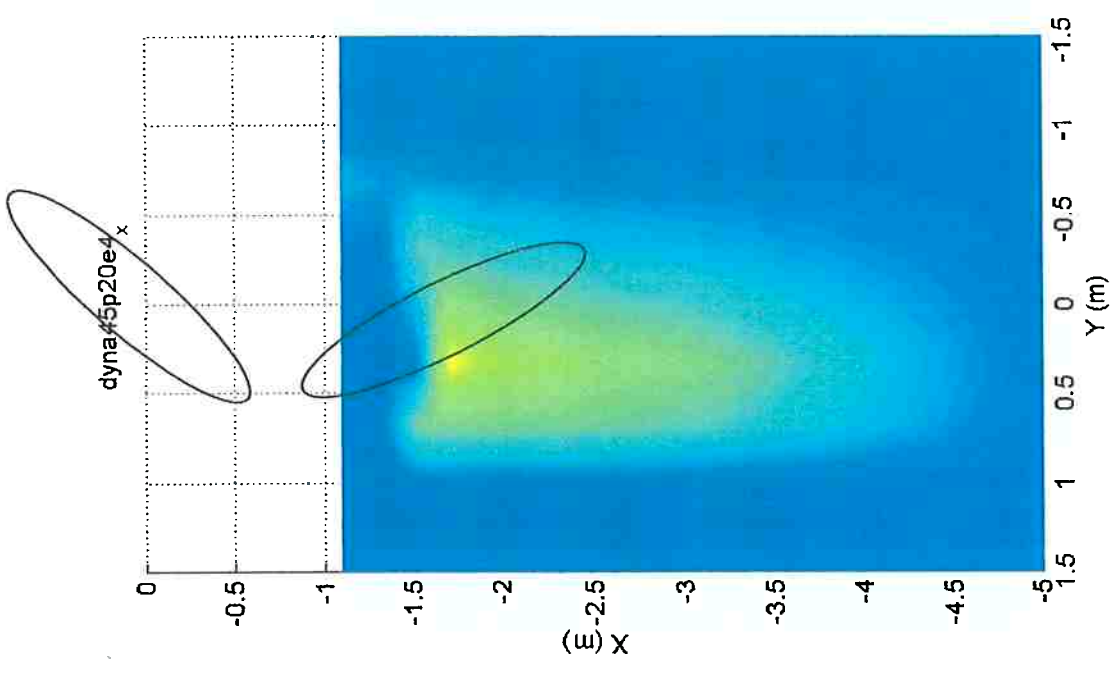
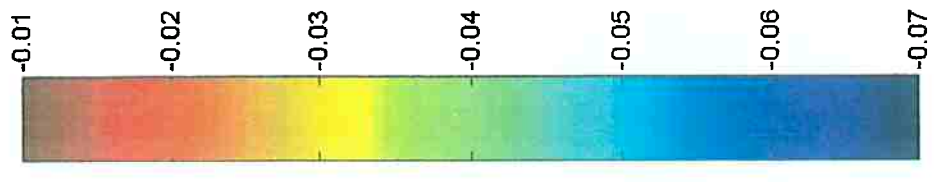


Fig.A-4b – Mapa numérico; Força X; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; 160°)



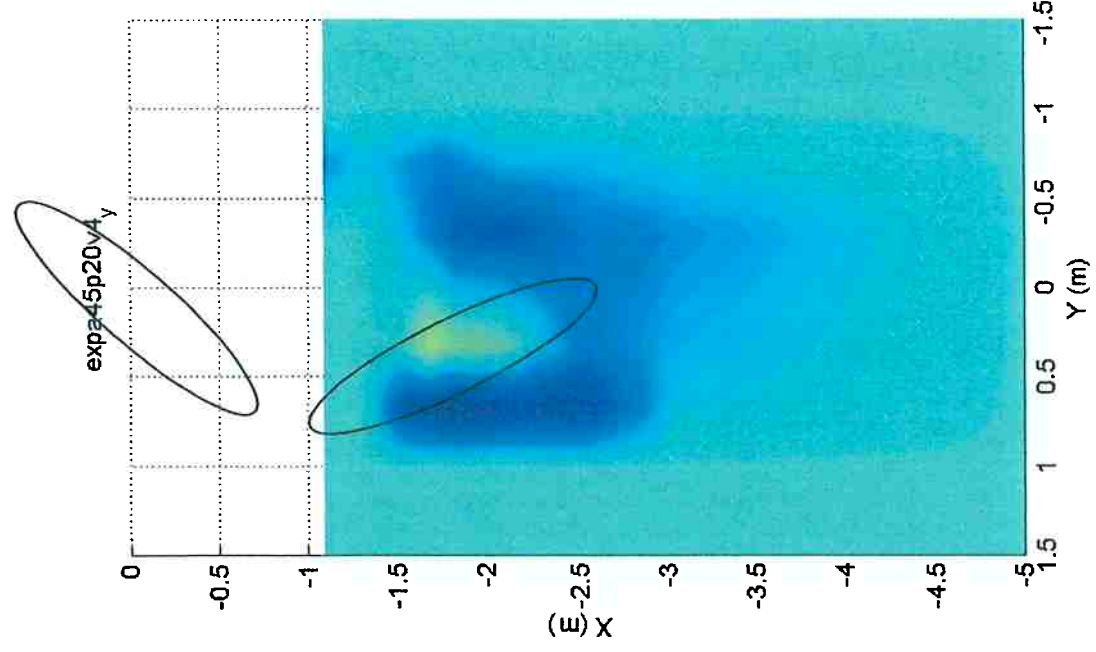


Fig.A-5a – Mapa experimental; Força Y; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; 160°)

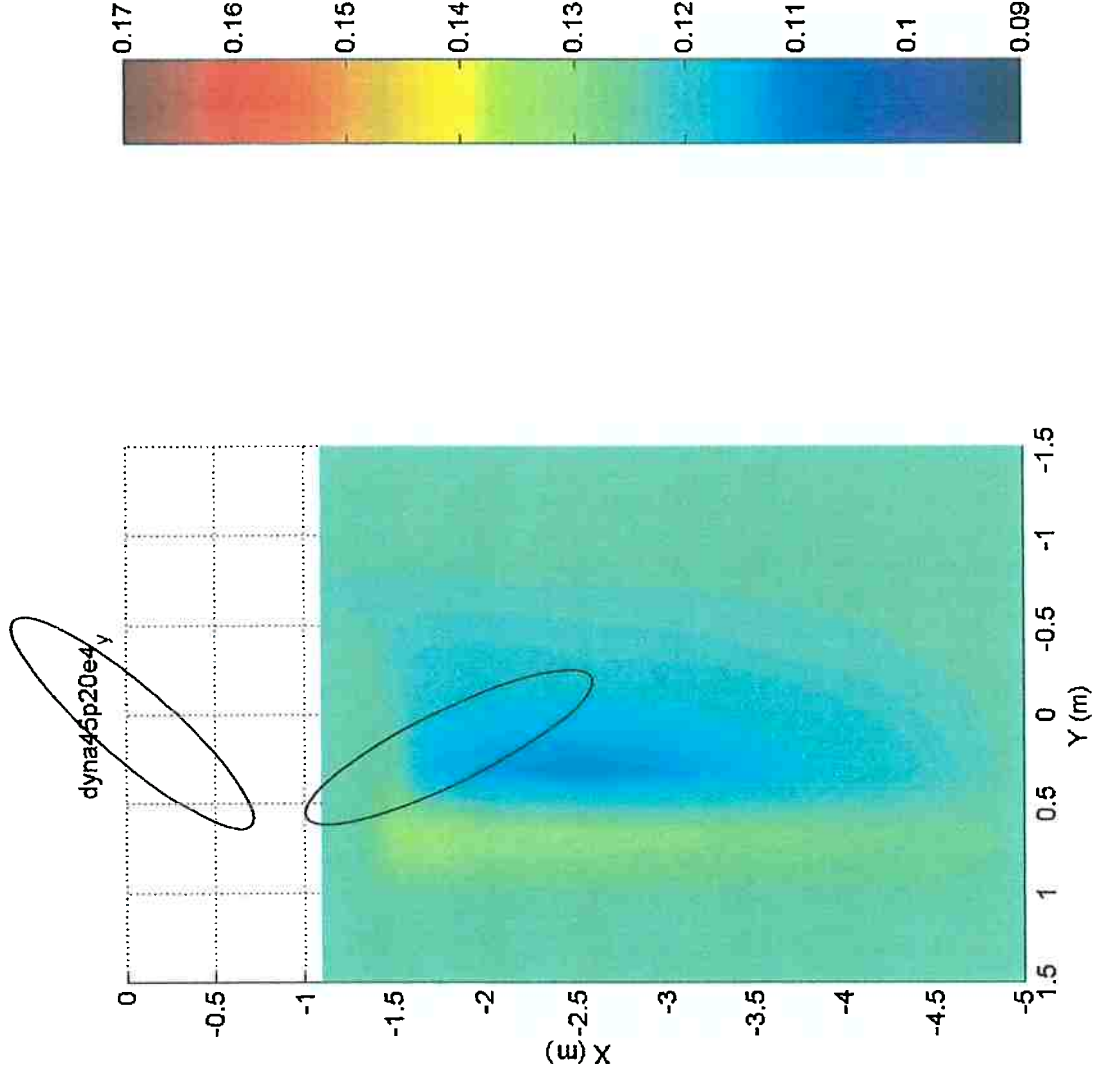


Fig.A-5b – Mapa numérico; Força Y; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; 160°)

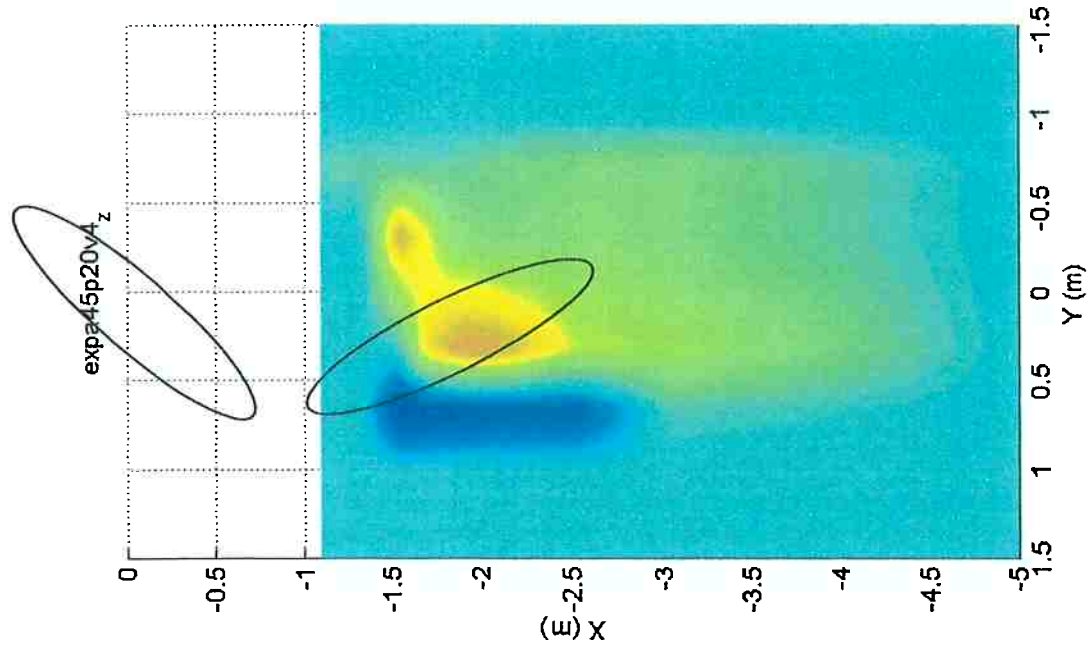


Fig.A-6a – Mapa experimental; Momento Z; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -135°); shuttle (40% calado; 160°)

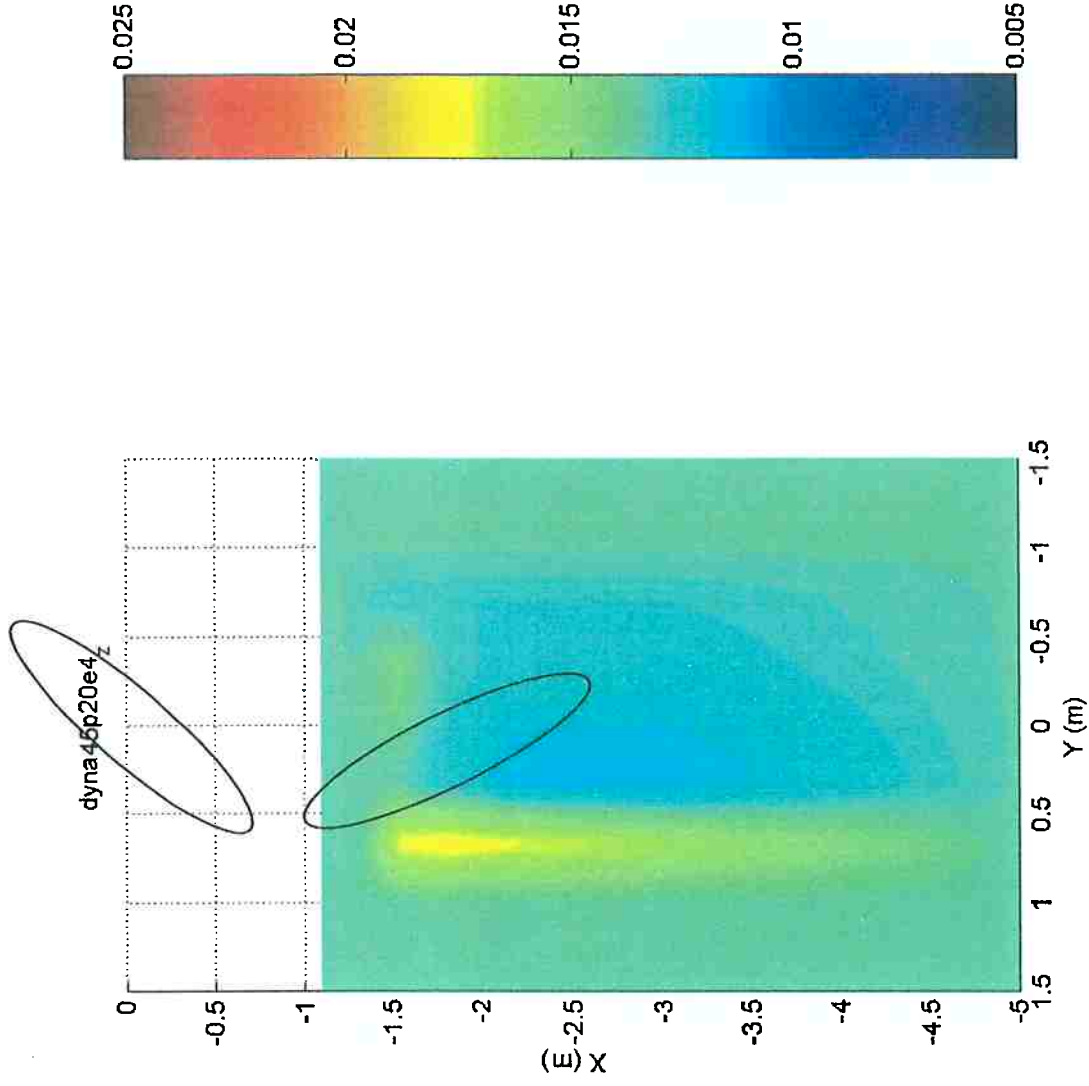


Fig.A-6b – Mapa numérico; Momento Z; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -135°); shuttle (40% calado; 160°)



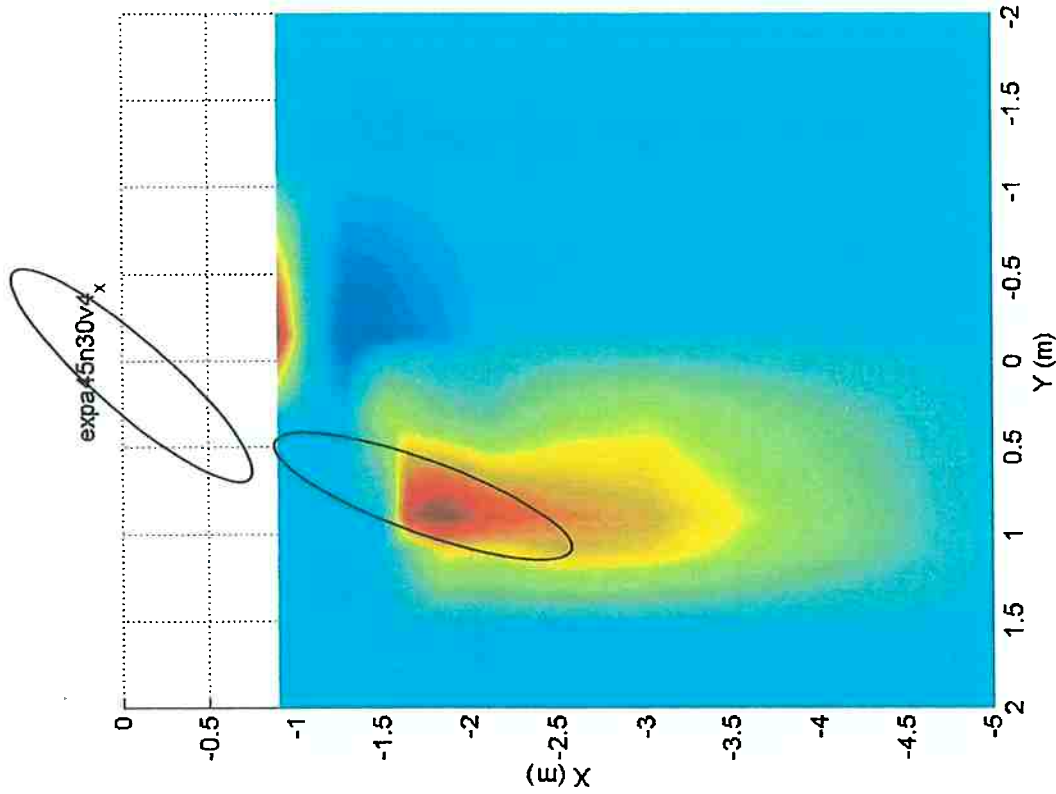


Fig.A-7a – Mapa experimental; Força X; vel. 0.149m/s

FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; -160°)

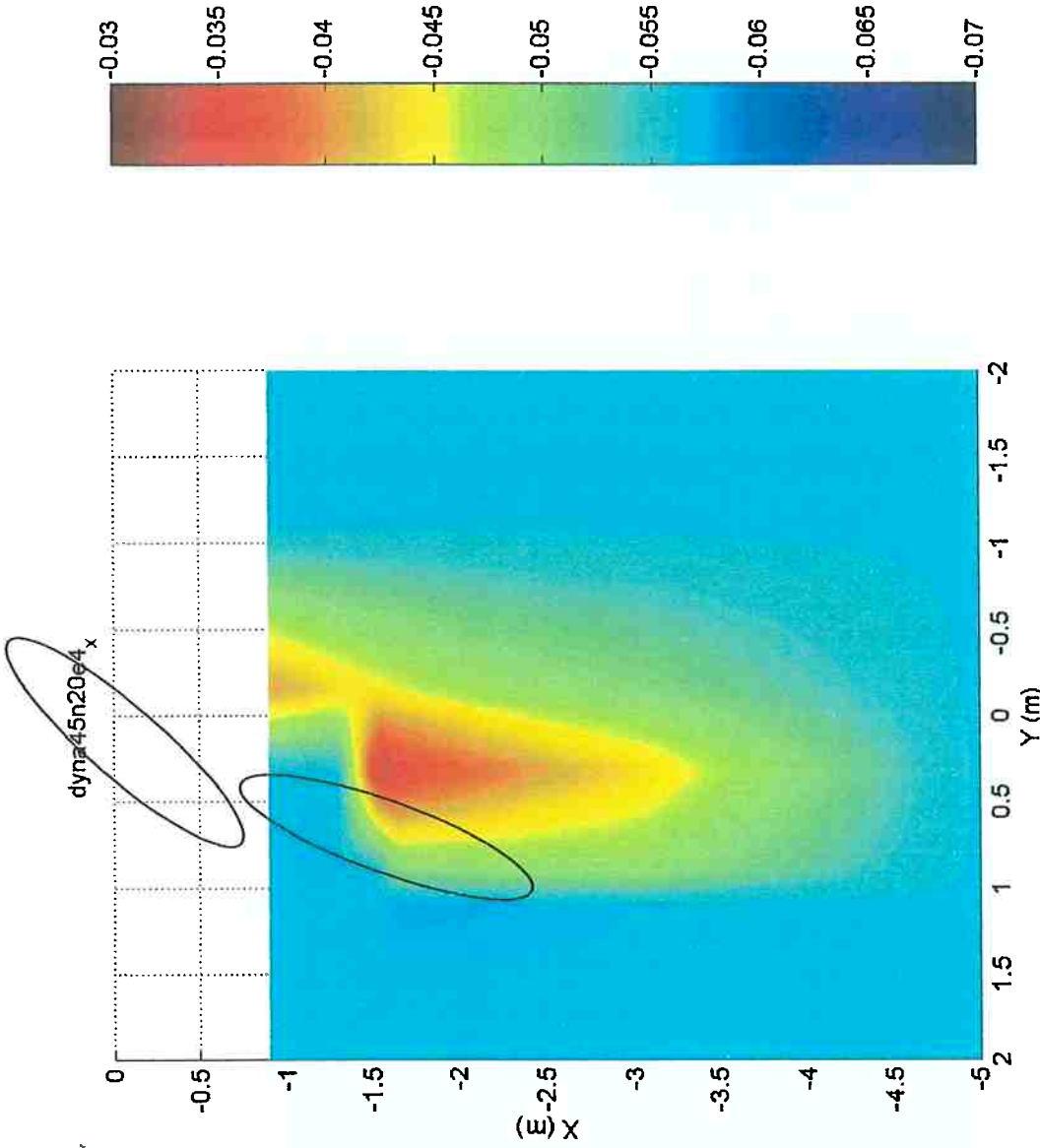


Fig.A-7b – Mapa numérico; Força X; vel. 0.149m/s

FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; -160°)

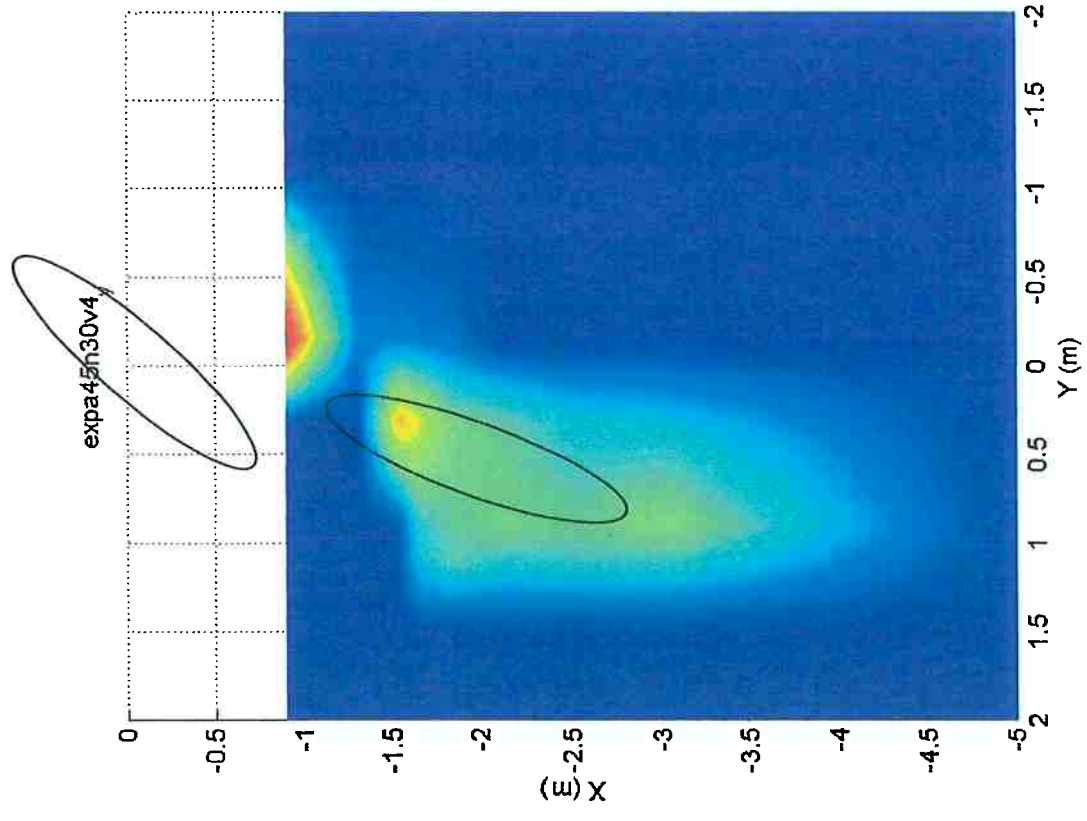


Fig.A-8a – Mapa experimental; Força Y; vel. 0.149m/s

FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; -160°)

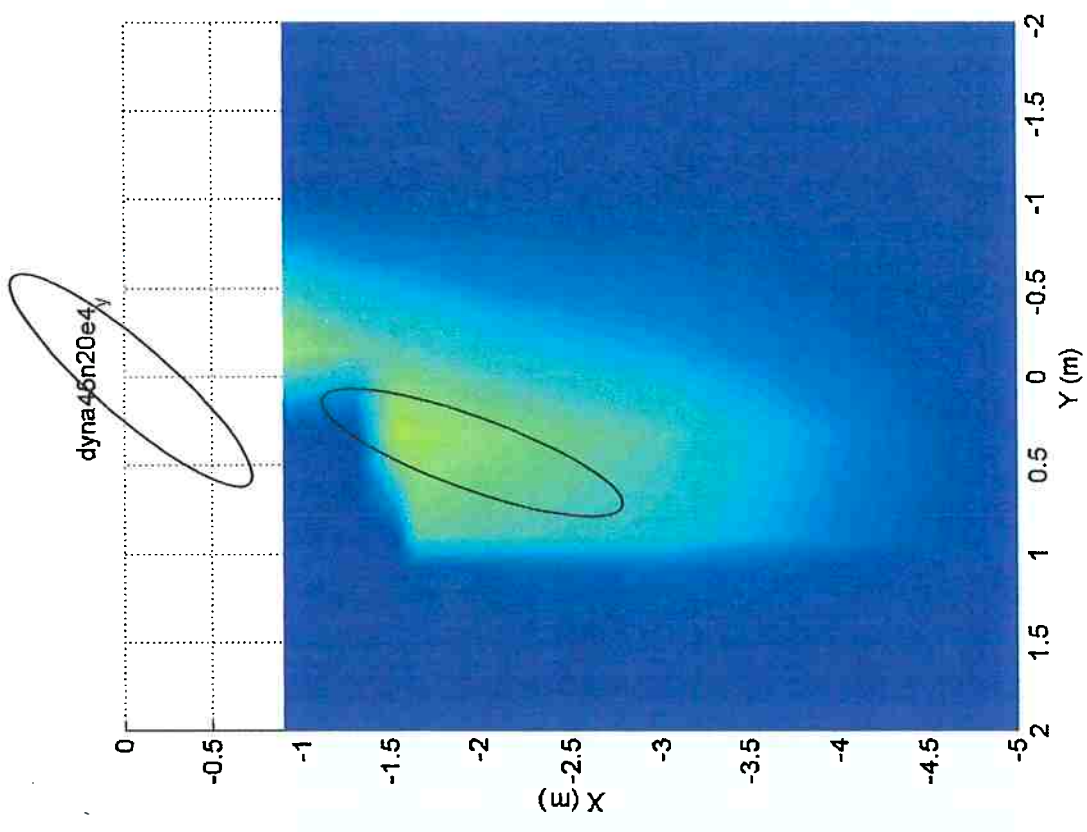


Fig.A-8b – Mapa numérico; Força Y; vel. 0.149m/s

FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; -160°)

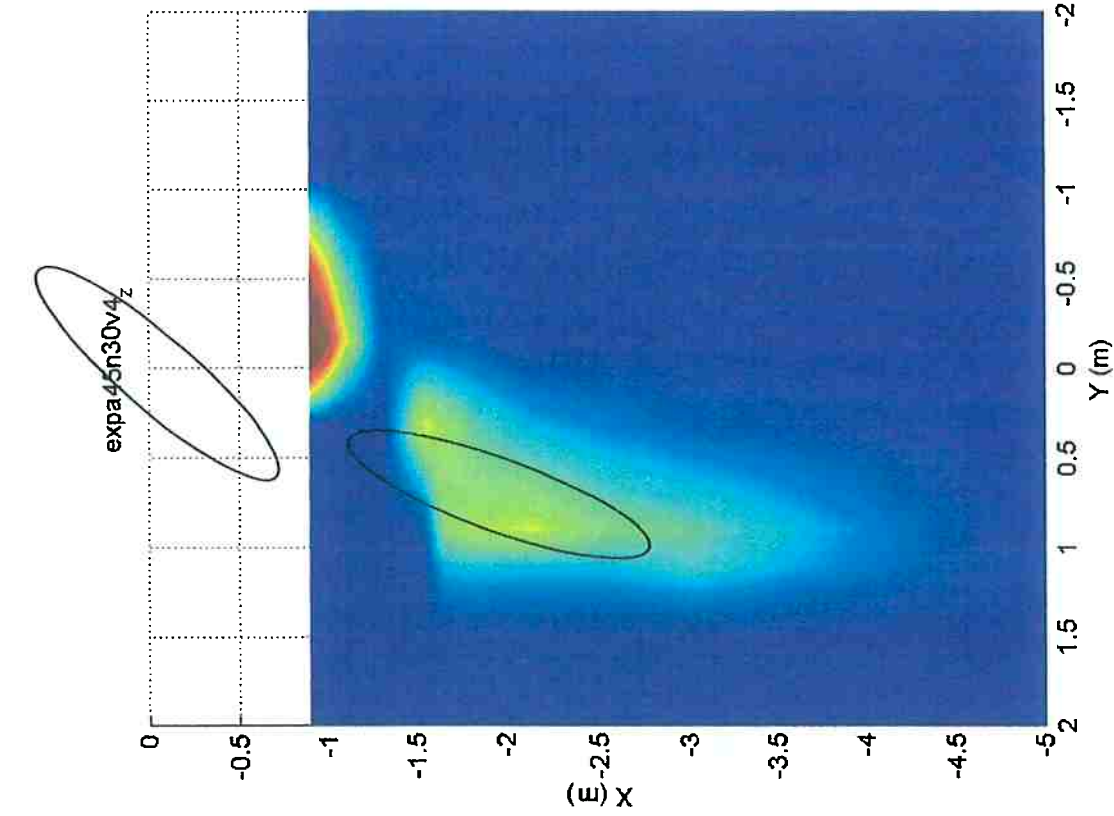


Fig.A-9a – Mapa experimental; Momento Z; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; -160°)

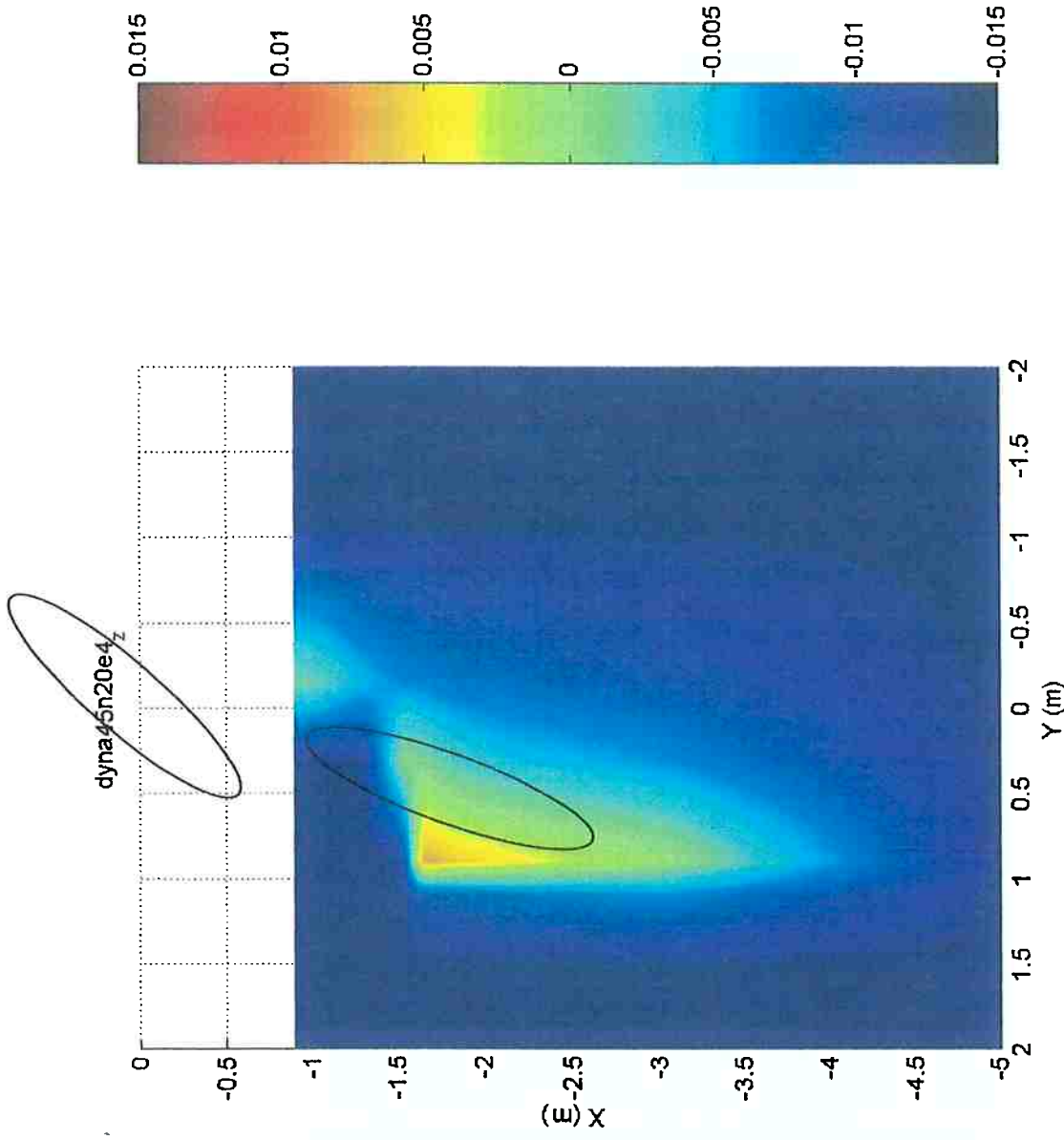


Fig.A-9b – Mapa numérico; Momento Z; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; -160°)

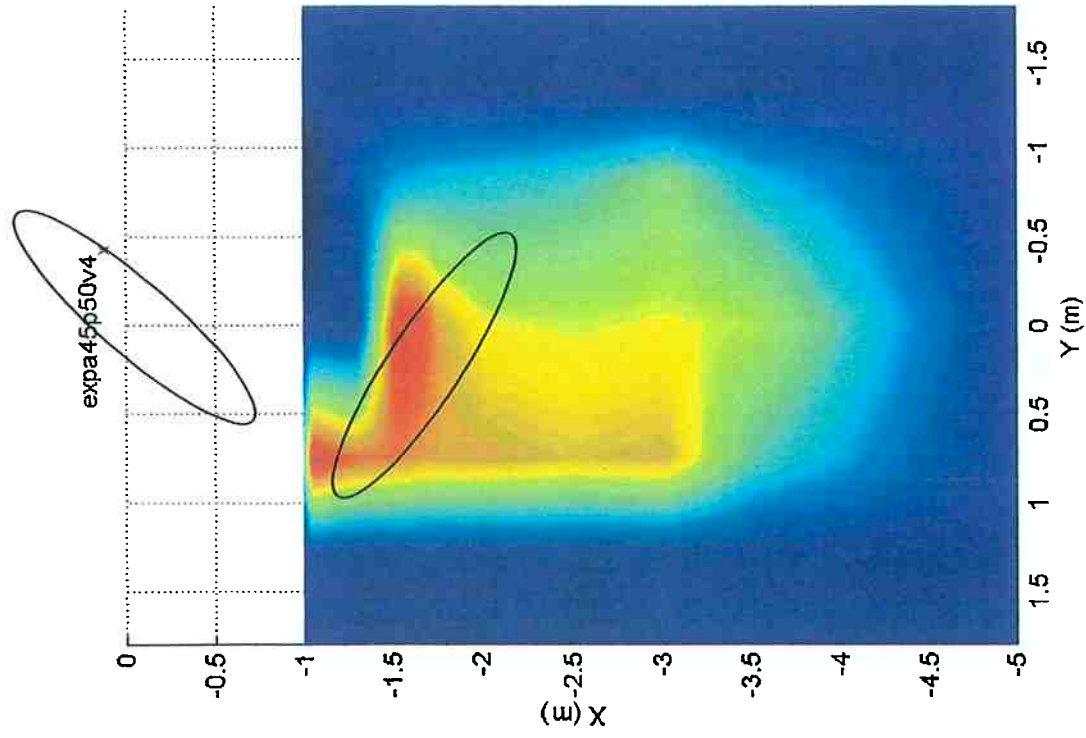


Fig.A-10a – Mapa experimental; Força X; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; 130°)

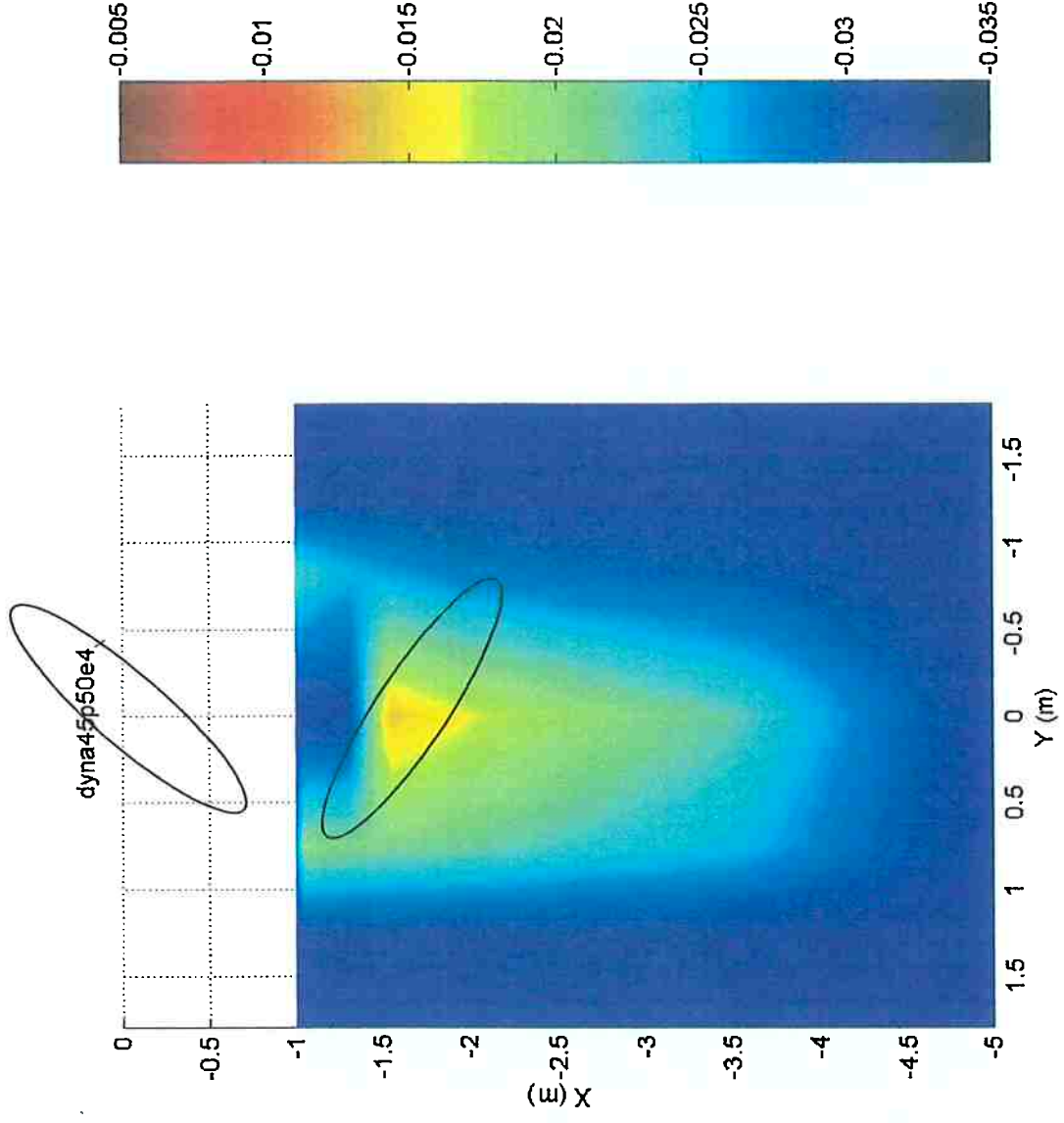


Fig.A-10b – Mapa numérico; Força X; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; 130°)

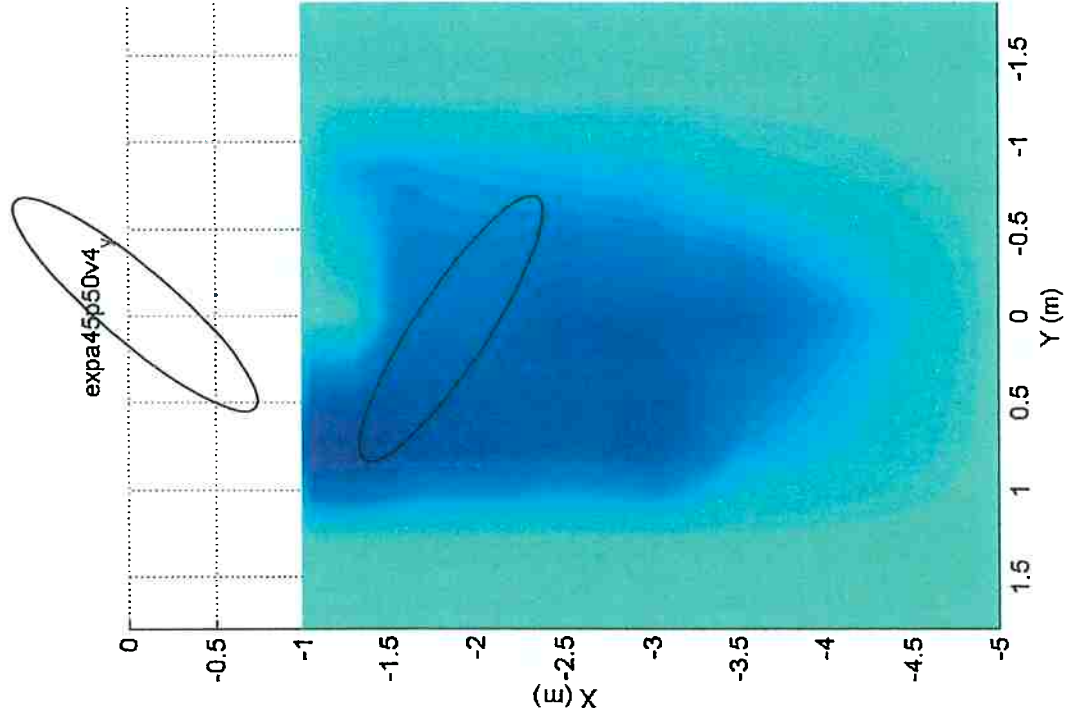


Fig.A-11a – Mapa experimental; Força Y; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -135°); shuttle (40% calado; 130°)

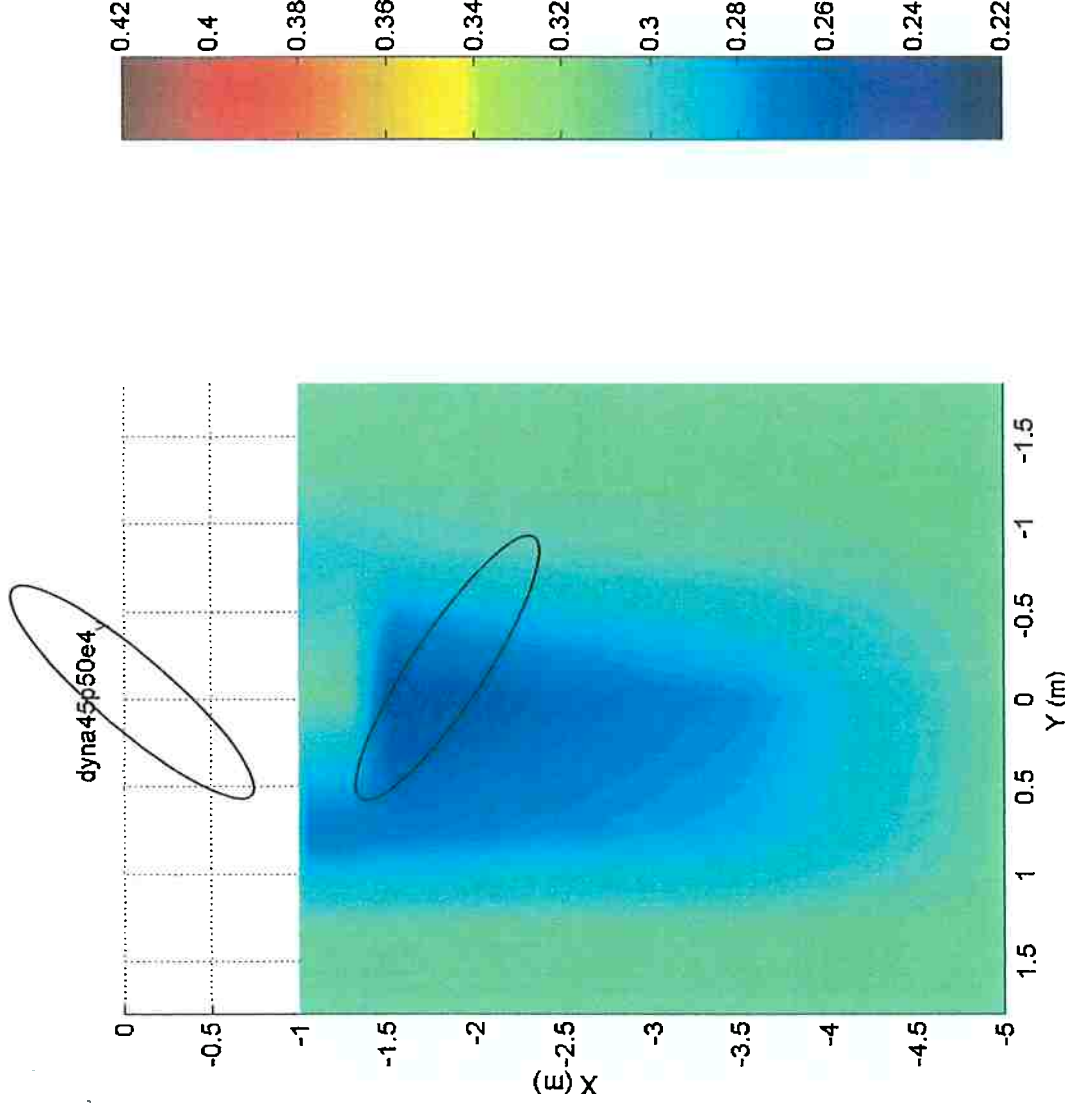


Fig.A-11b – Mapa numérico; Força Y; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -135°); shuttle (40% calado; 130°)

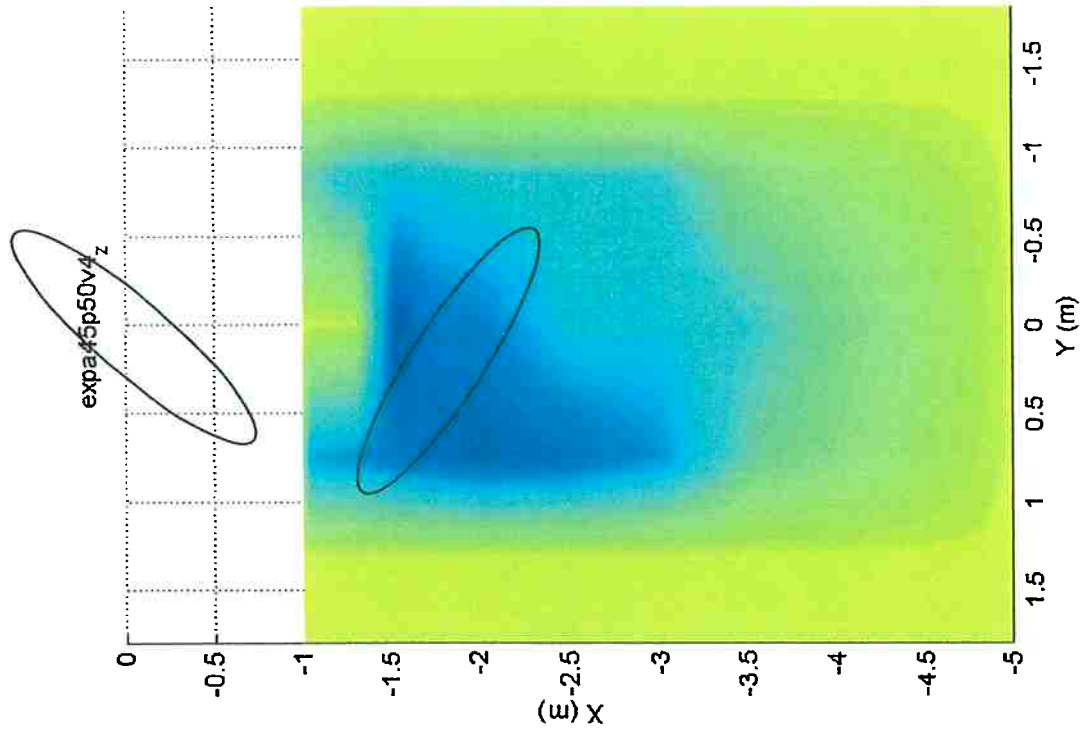


Fig.A-12a – Mapa experimental; Momento Z, vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; 130°)

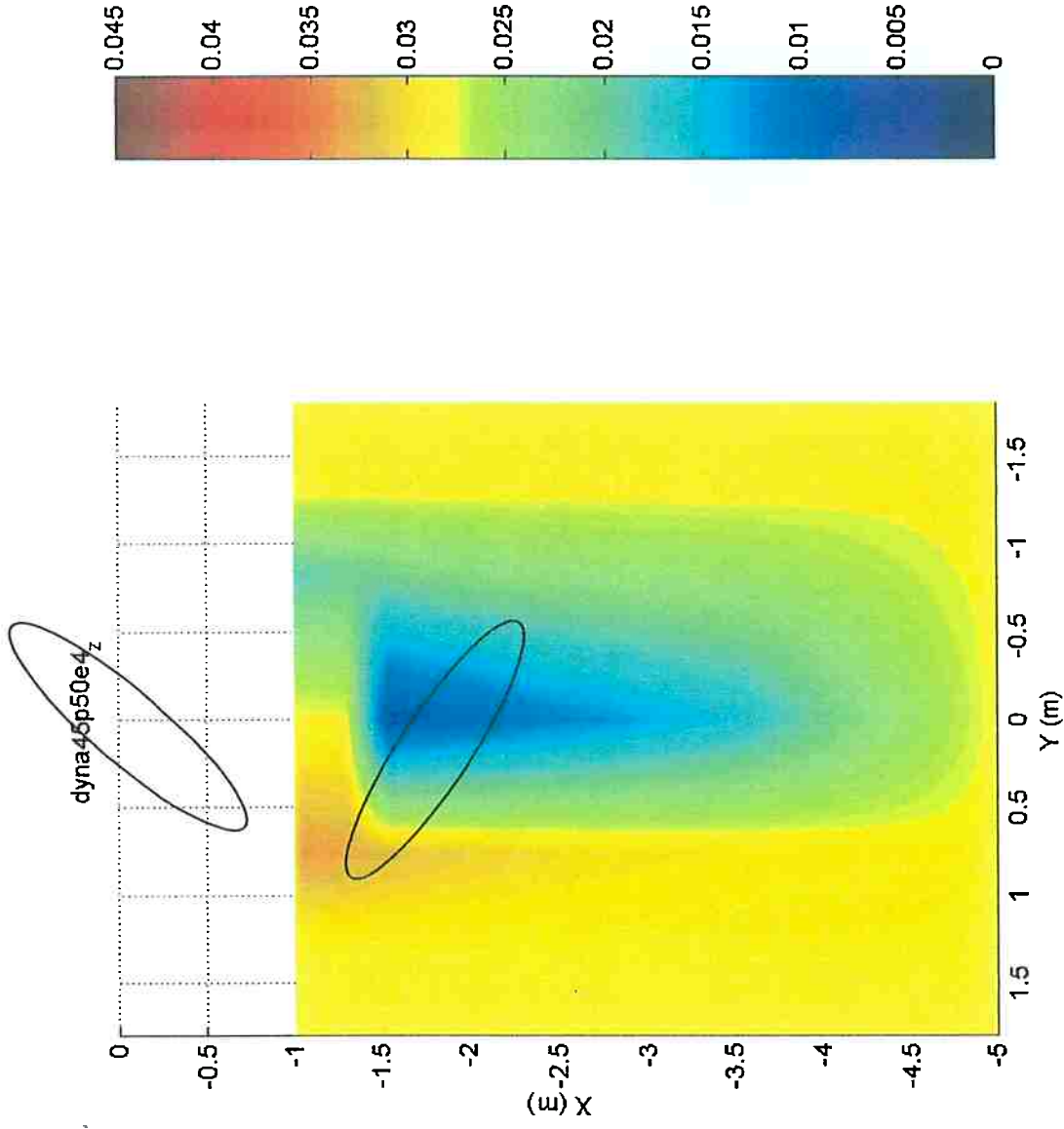


Fig.A-12b – Mapa numérico; Momento Z; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; 130°)

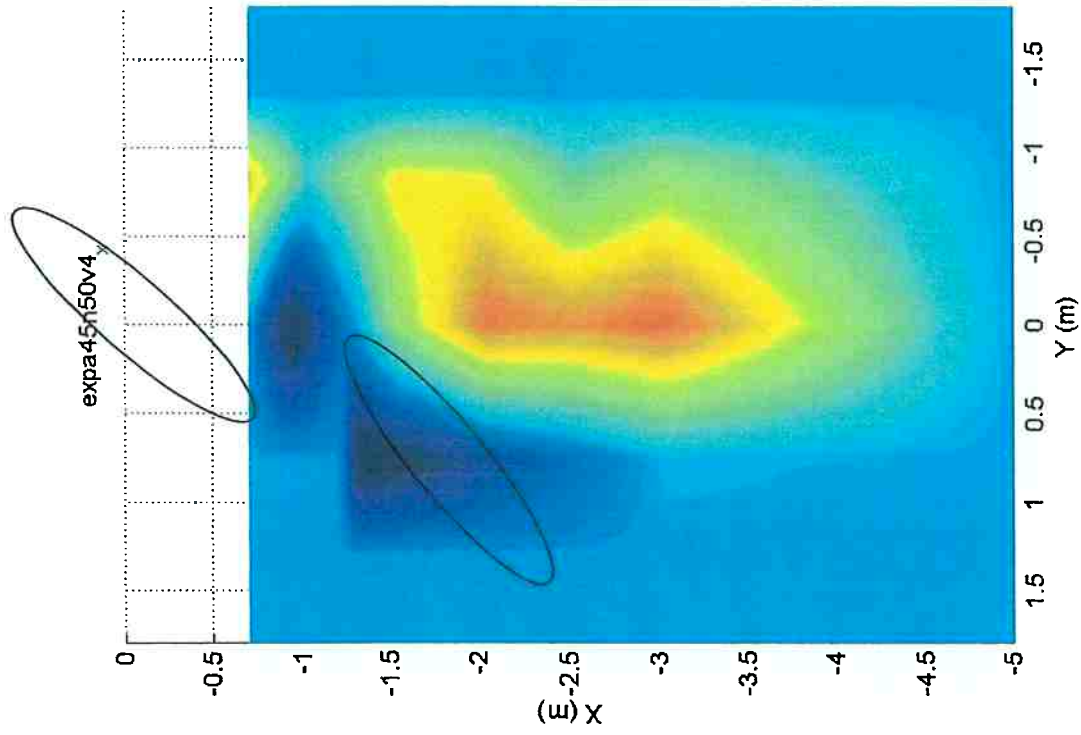


Fig.A-13a – Mapa experimental; Força X; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; -130°)

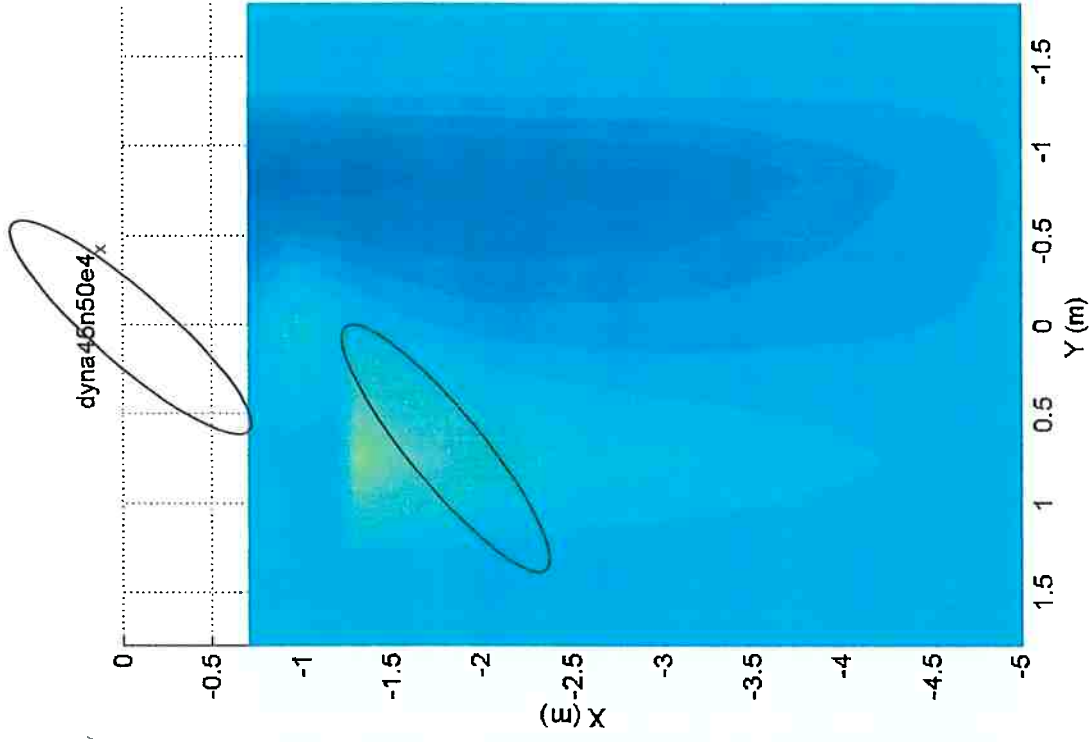


Fig.A-13b – Mapa numérico; Força X; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; -130°)

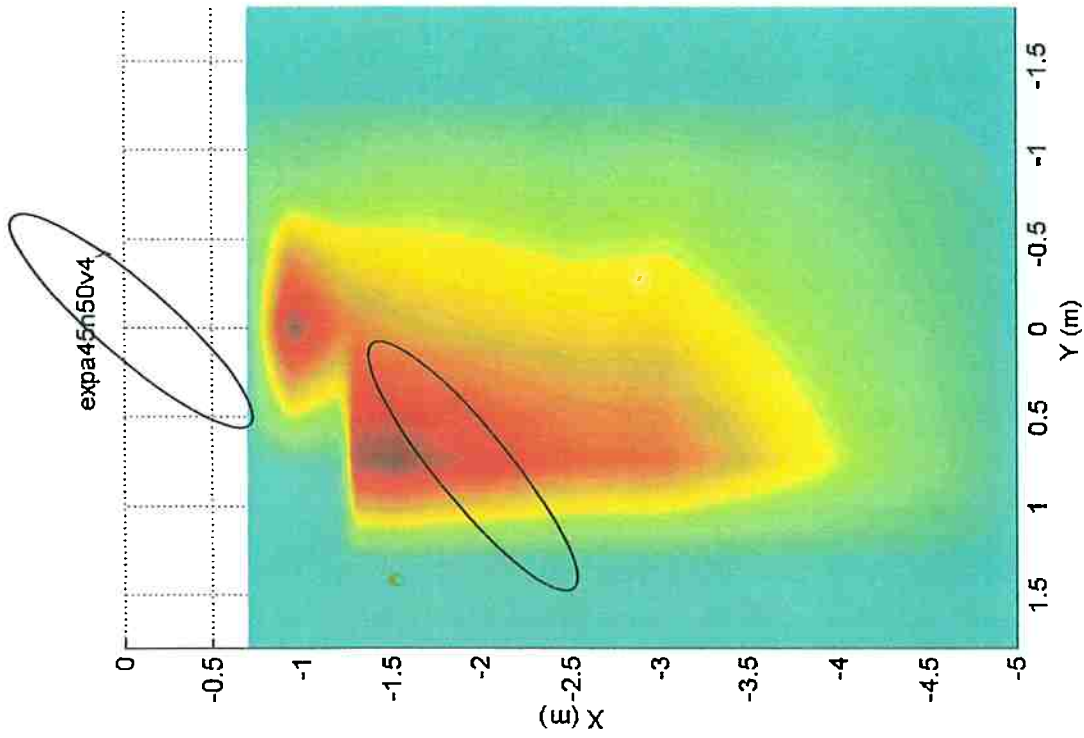


Fig.A-14a – Mapa experimental; Força Y; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; -130°)

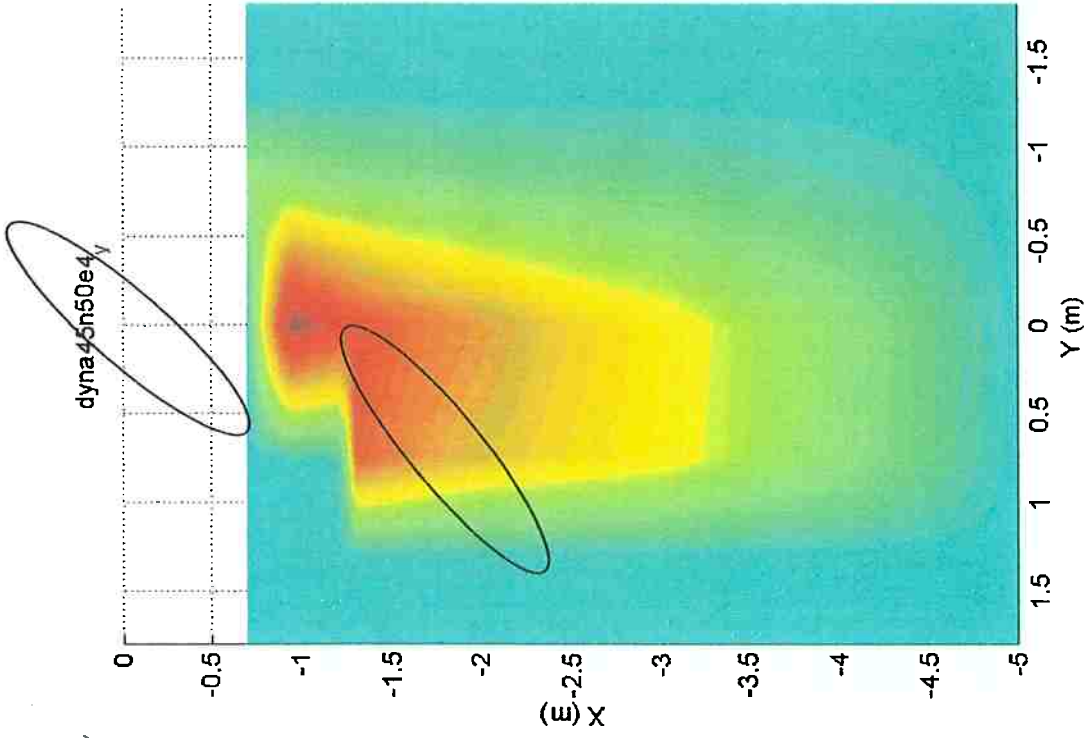
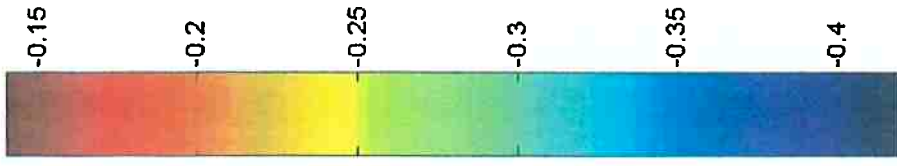


Fig.A-14b – Mapa numérico; Força Y; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; -130°)





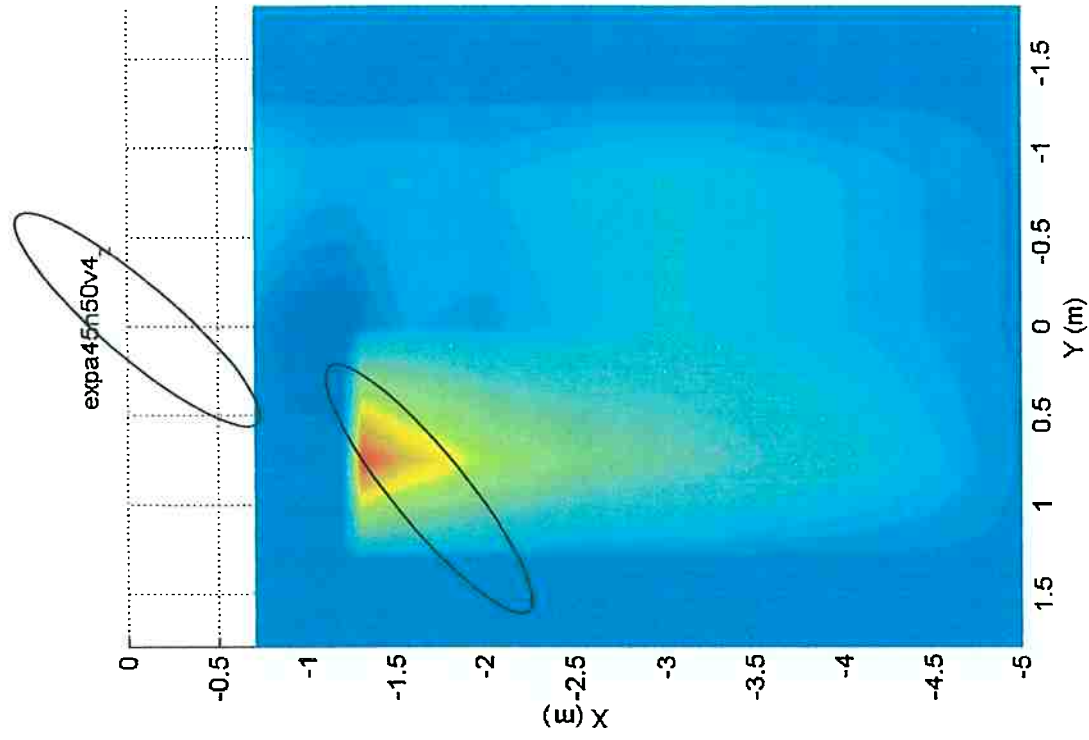


Fig.A-15a – Mapa experimental; Momento Z, vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; -130°)

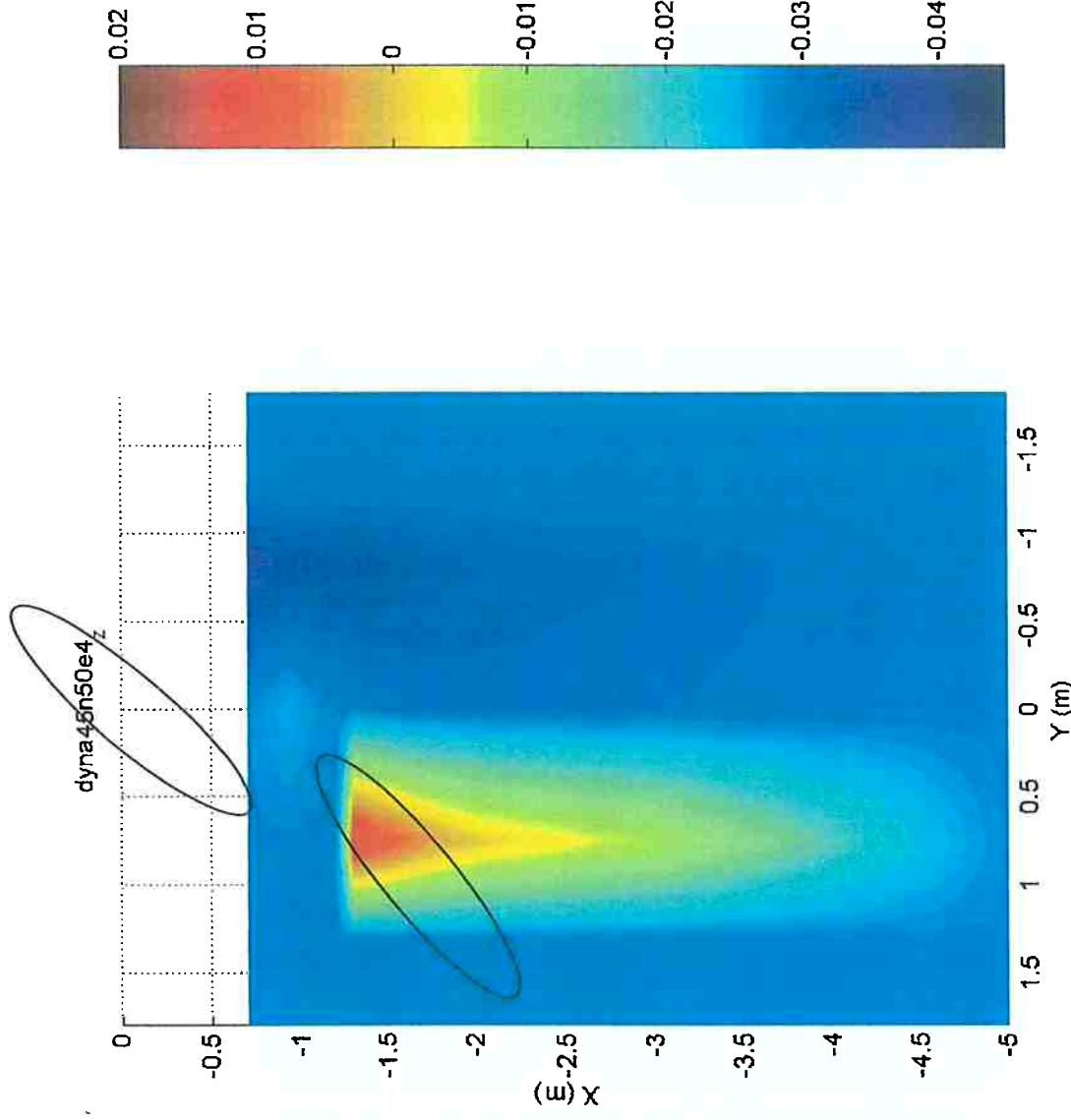


Fig.A-15b – Mapa numérico; Momento Z, vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; -130°)

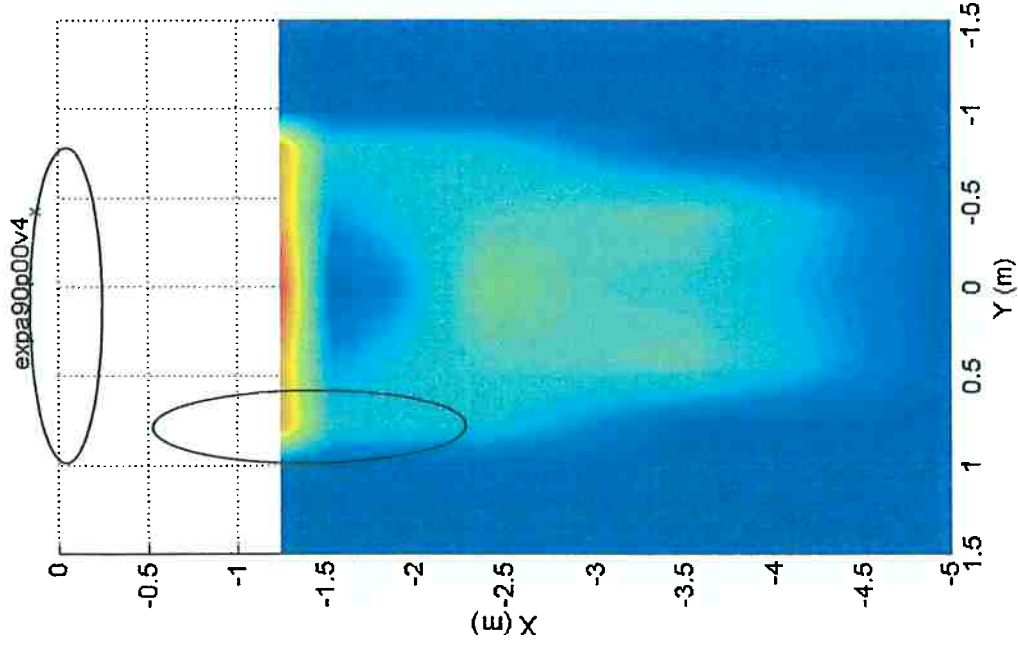


Fig.A-16a – Mapa experimental; Força X; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; 180°)

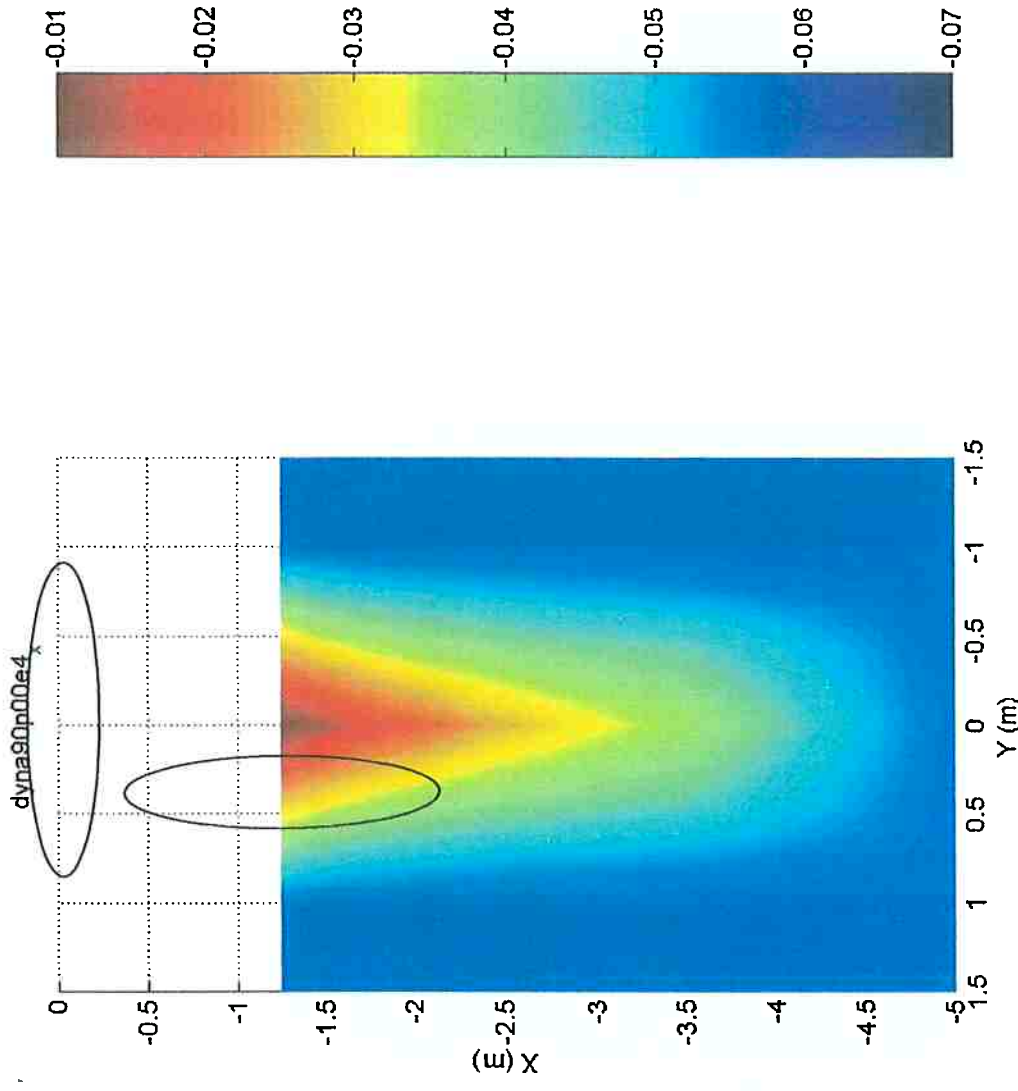


Fig.A-16b – Mapa numérico; Força X; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; 180°)

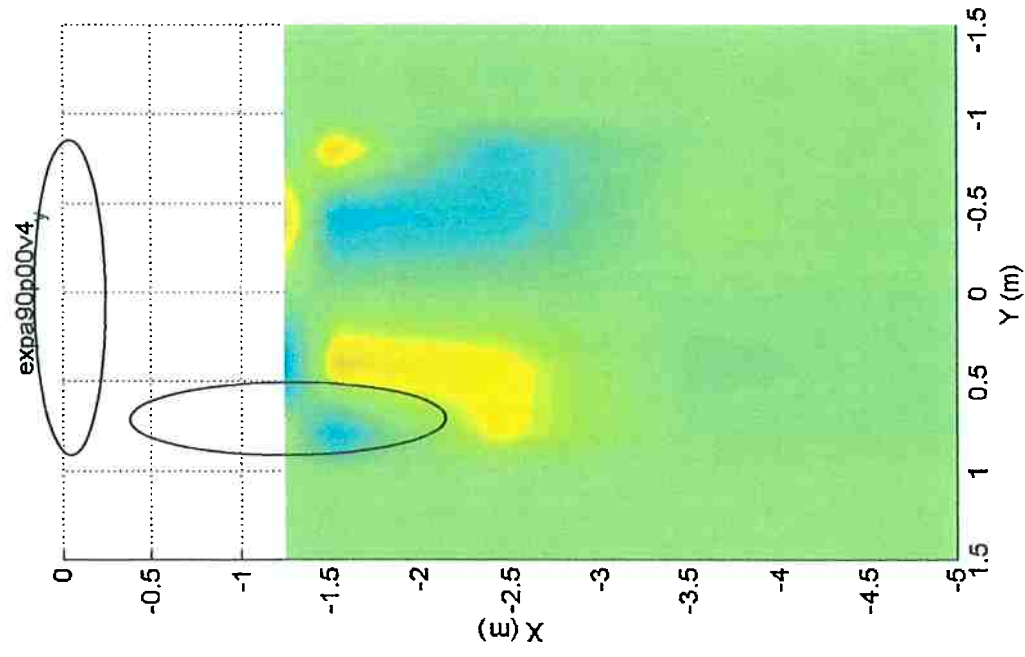


Fig.A-17a – Mapa experimental, Força Y, vel. 0.149m/s

FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; 180°)

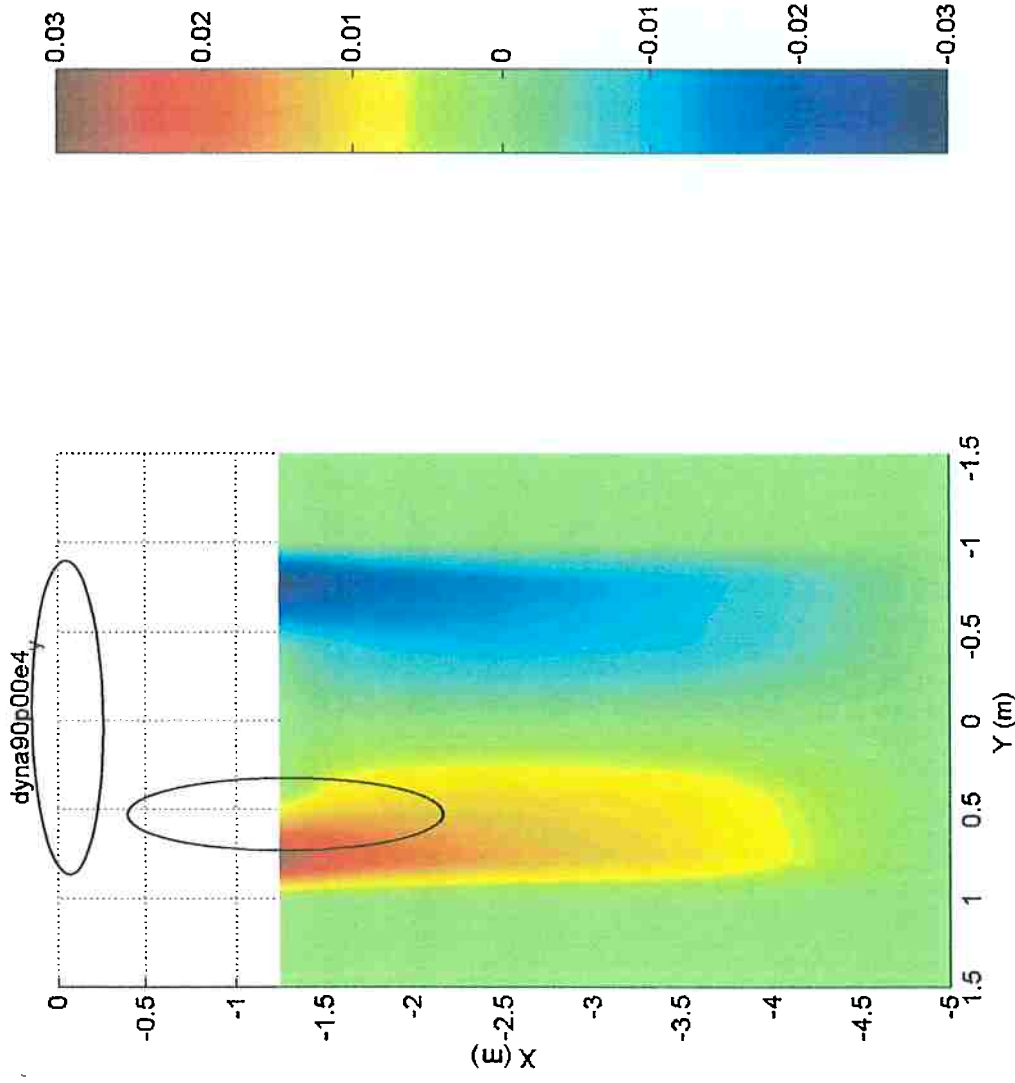


Fig.A-17b – Mapa numérico, Força Y, vel. 0.149m/s

FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; 180°)

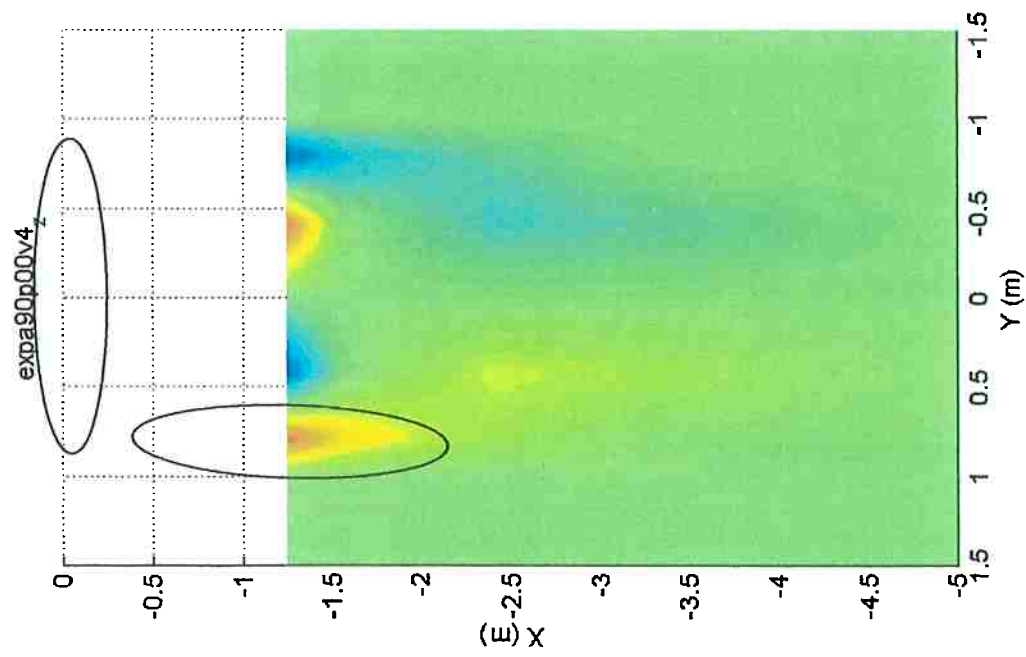


Fig.A-18a – Mapa experimental; Momento Z; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; 180°)

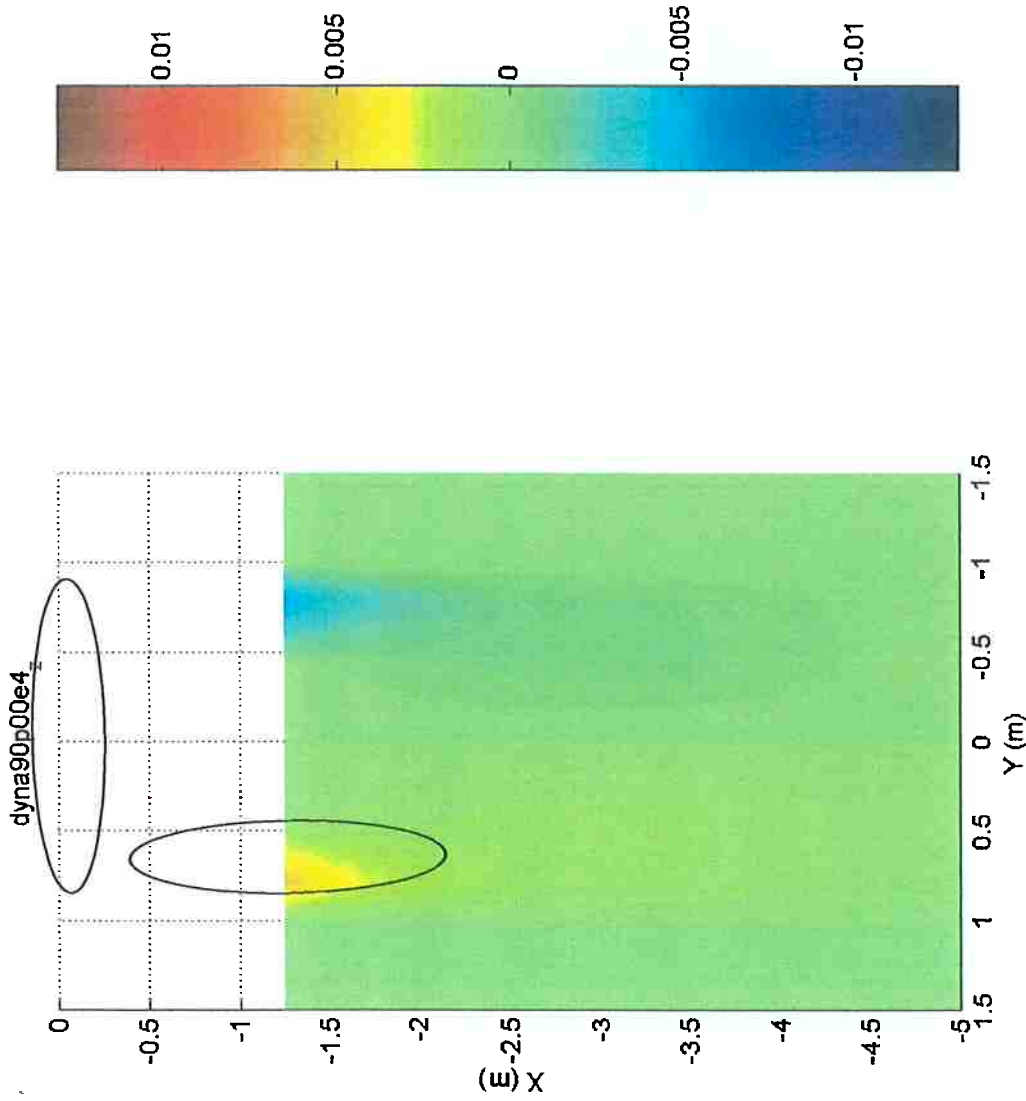


Fig.A-18b – Mapa numérico; Momento Z; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; 180°)

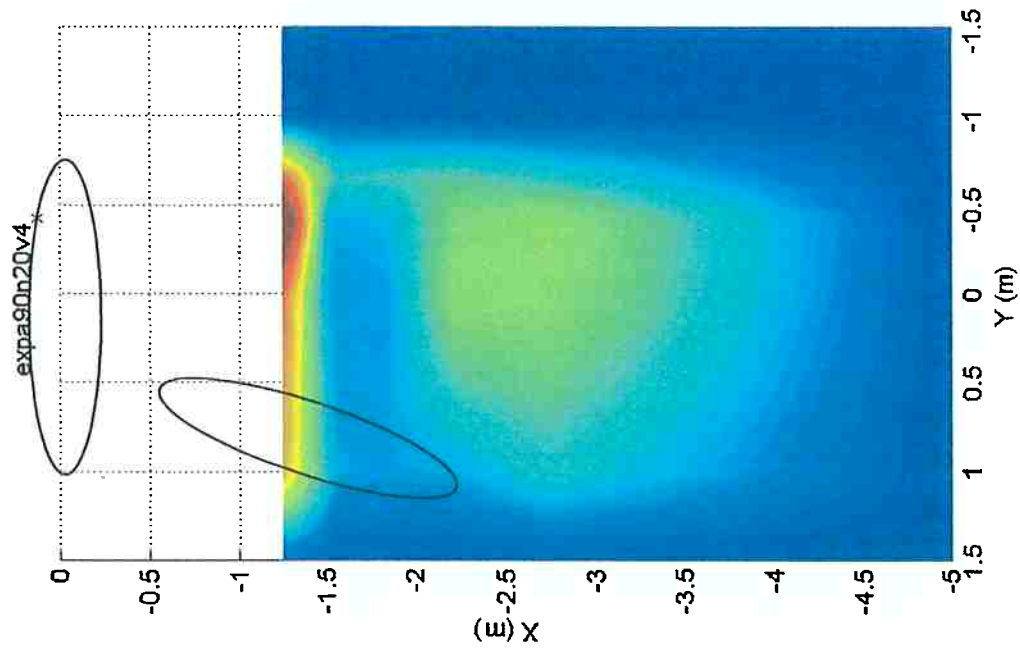


Fig.A-19a – Mapa experimental; Força X; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; -160°)

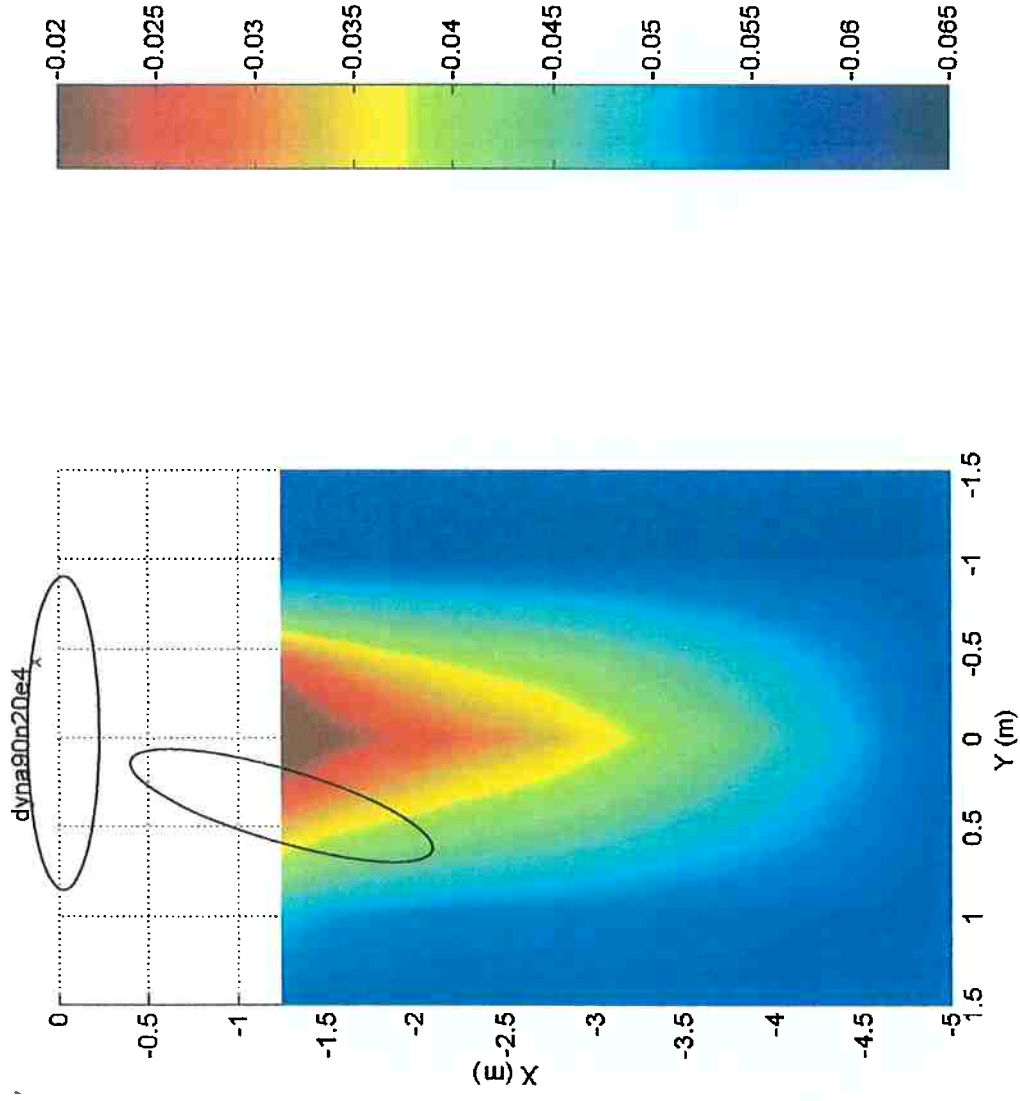


Fig.A-19b – Mapa numérico; Força X; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; -160°)

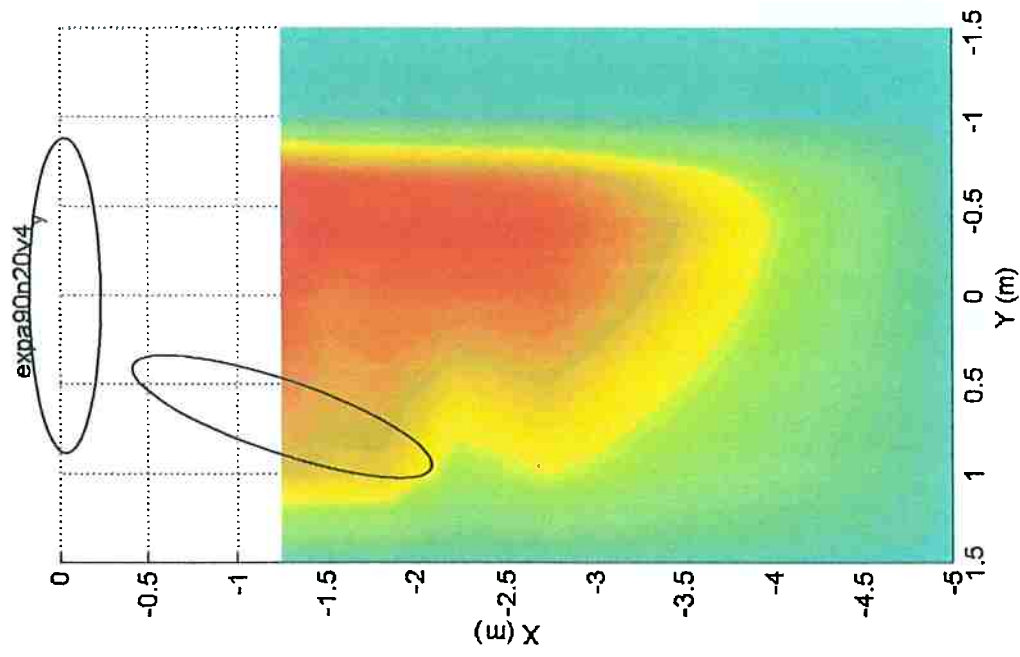


Fig.A-20a – Mapa experimental; Força Y; vel. 0.149m/s

FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; -160°)

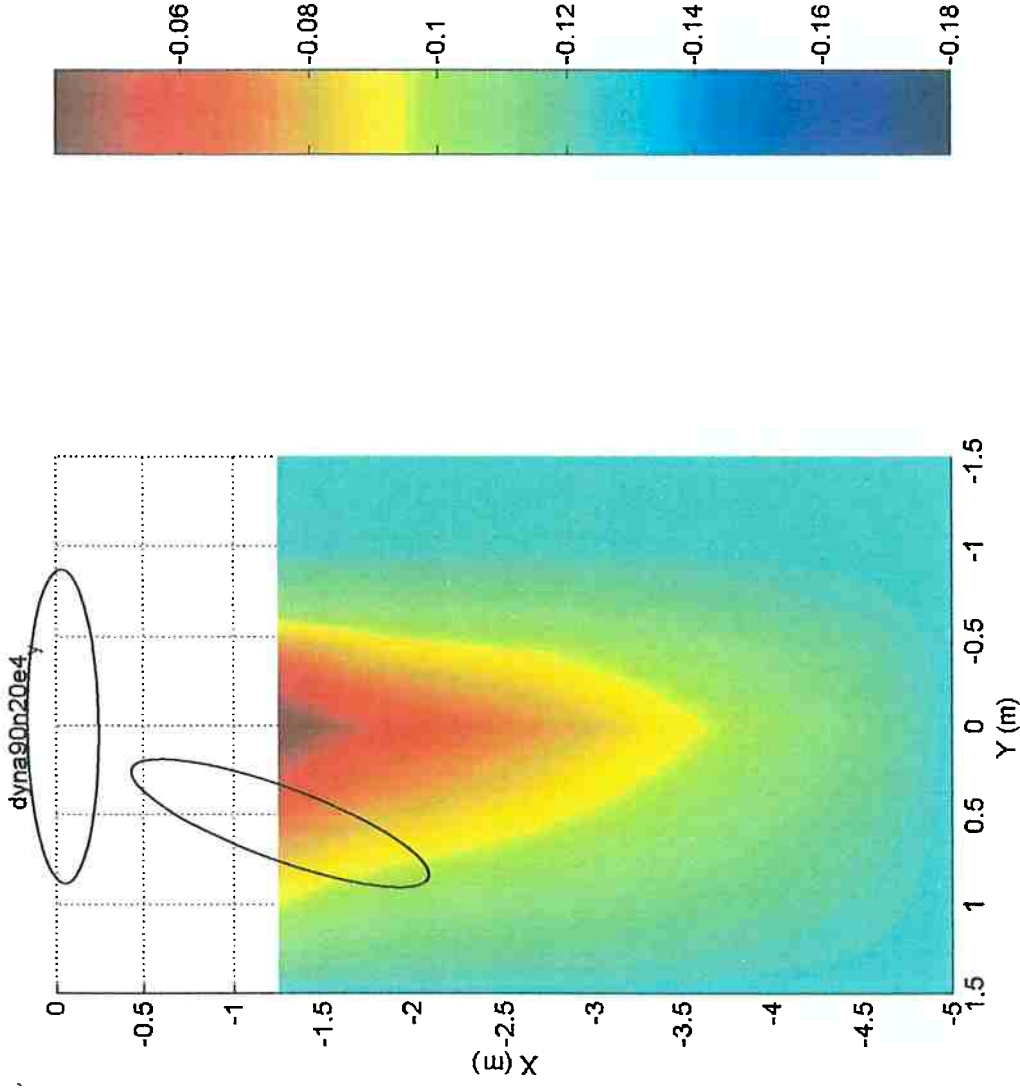


Fig.A-20b – Mapa numérico; Força Y; vel. 0.149m/s

FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; -160°)

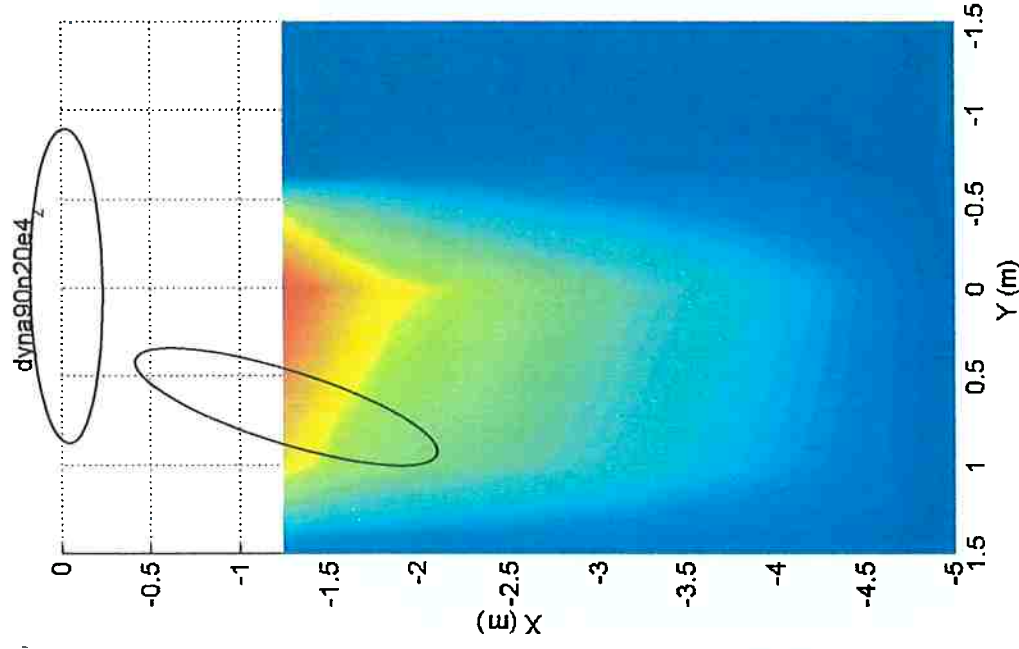
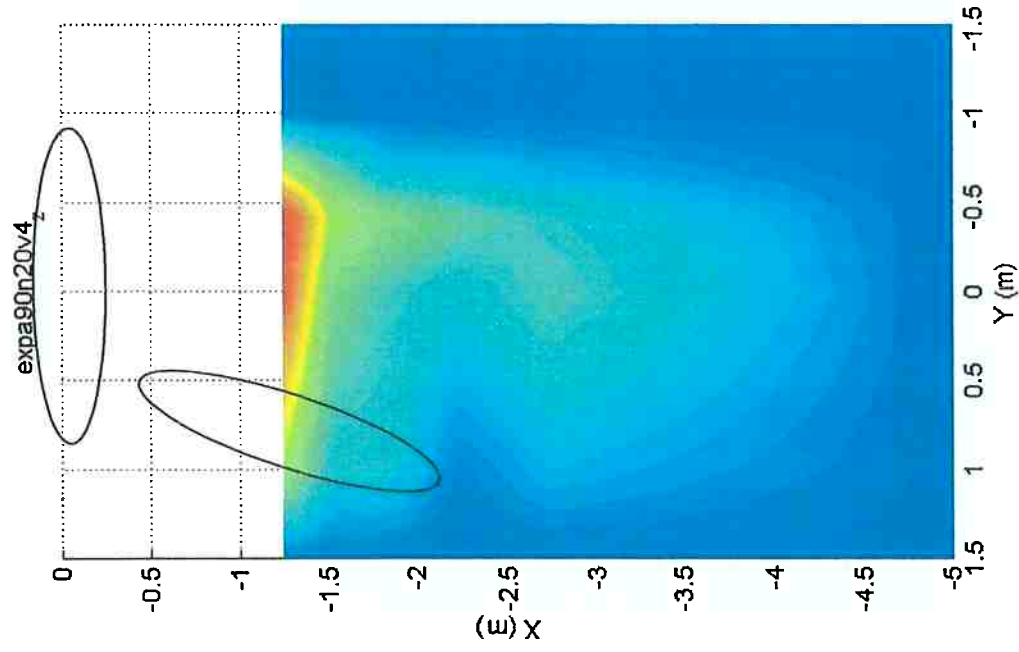


Fig.A-21a - Mapa experimental; Momento Z; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -90°); shuttle (40% calado; -160°)

Fig.A-21b - Mapa numérico; Momento Z; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -90°); shuttle (40% calado; -160°)

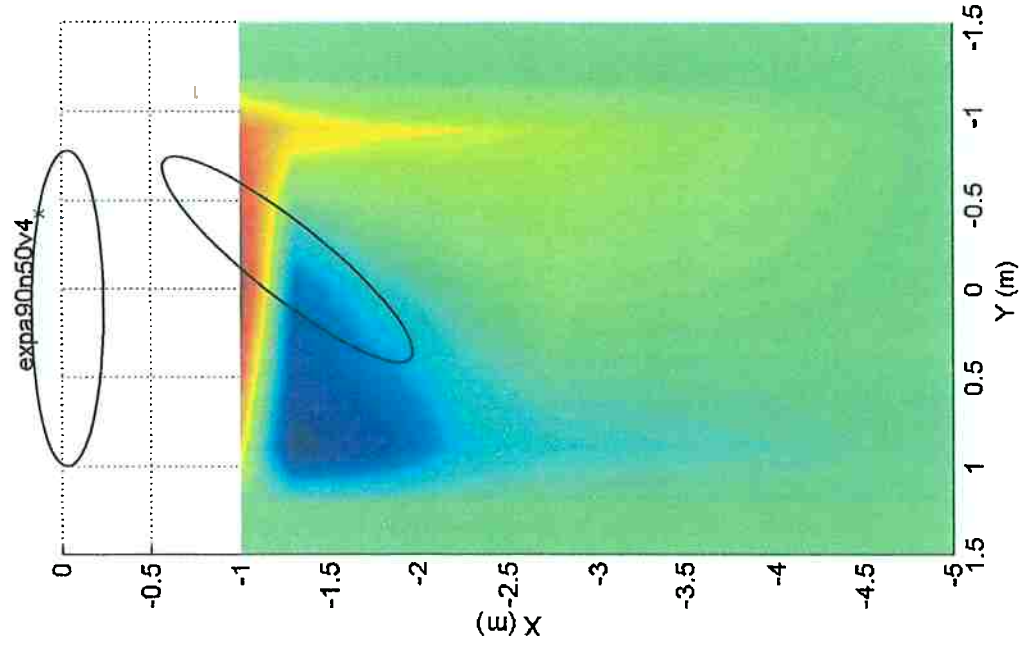


Fig.A-22a – Mapa experimental; Força X, vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; -130°)

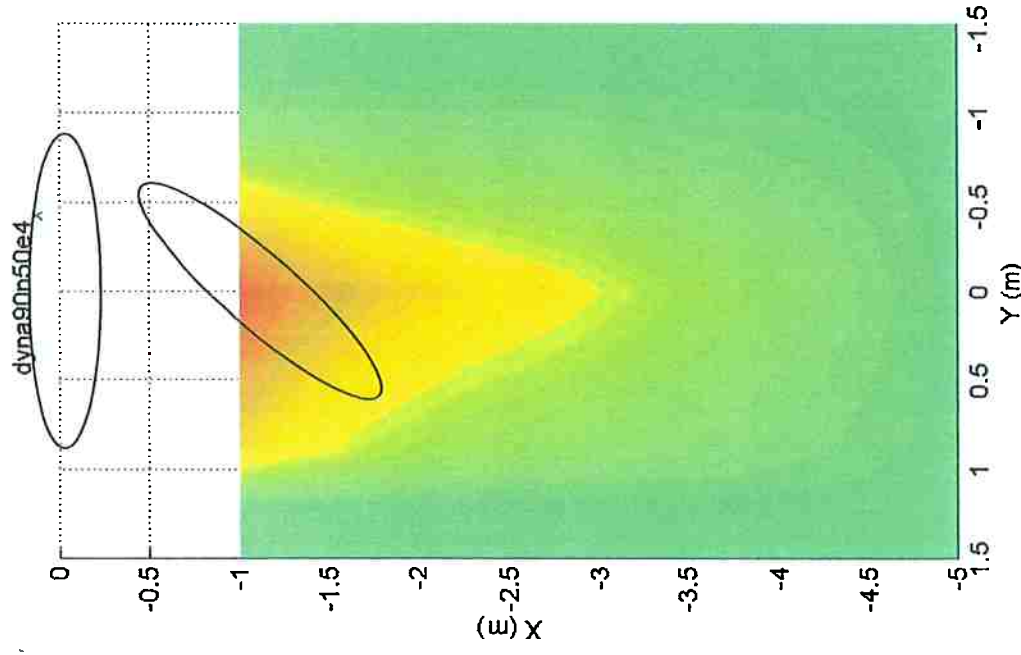


Fig.A-22b – Mapa numérico; Força X, vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; -130°)



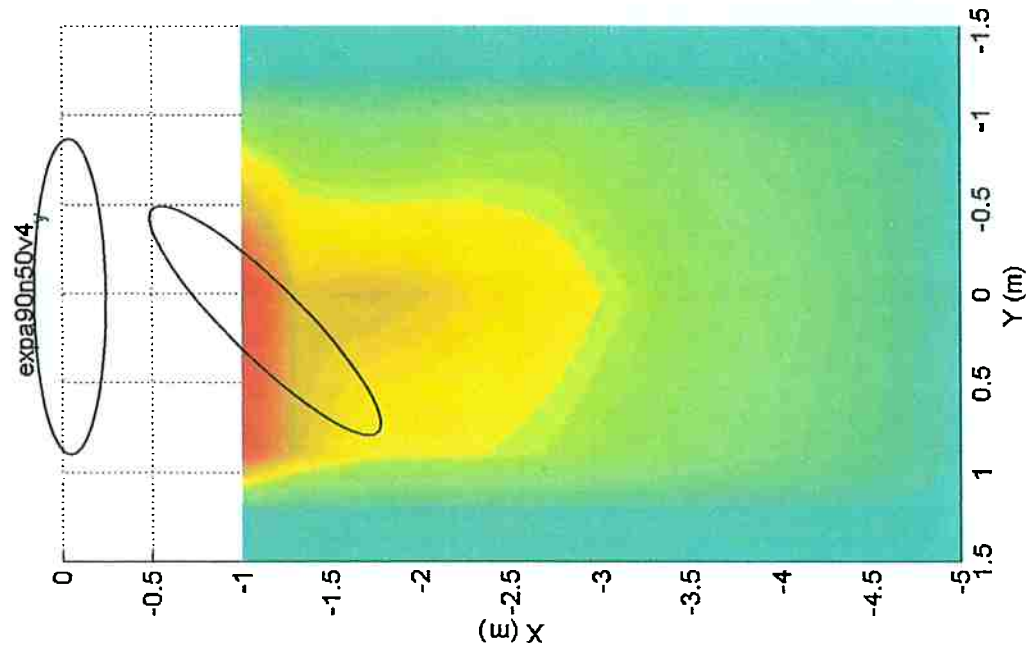


Fig.A-23a – Mapa experimental; Força Y; vel. 0.149m/s

FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; -130°)

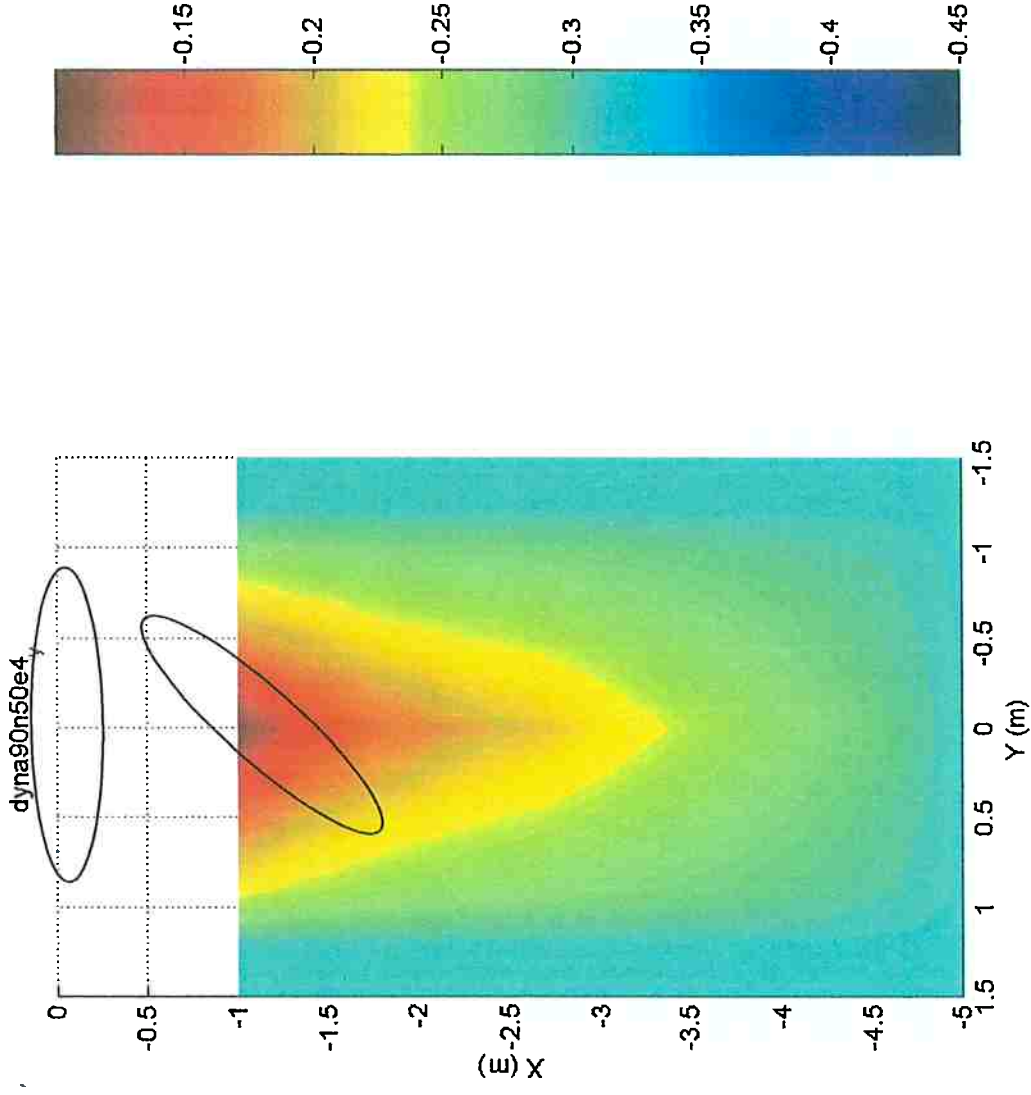


Fig.A-23b – Mapa numérico; Força Y; vel. 0.149m/s

FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; -130°)

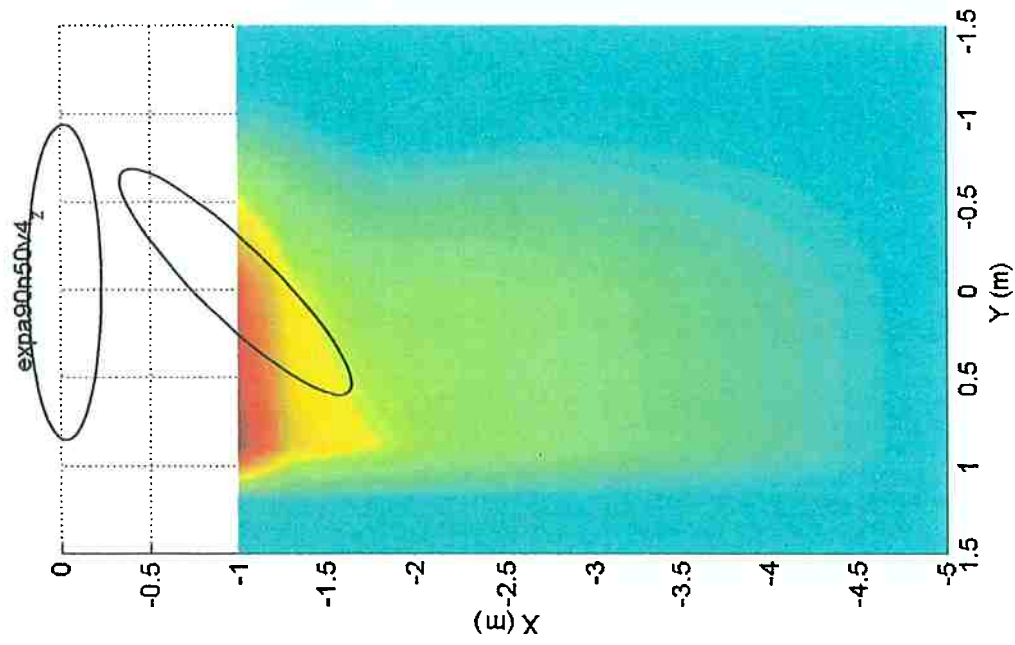


Fig.A-24a – Mapa experimental; Momento Z; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; -130°)

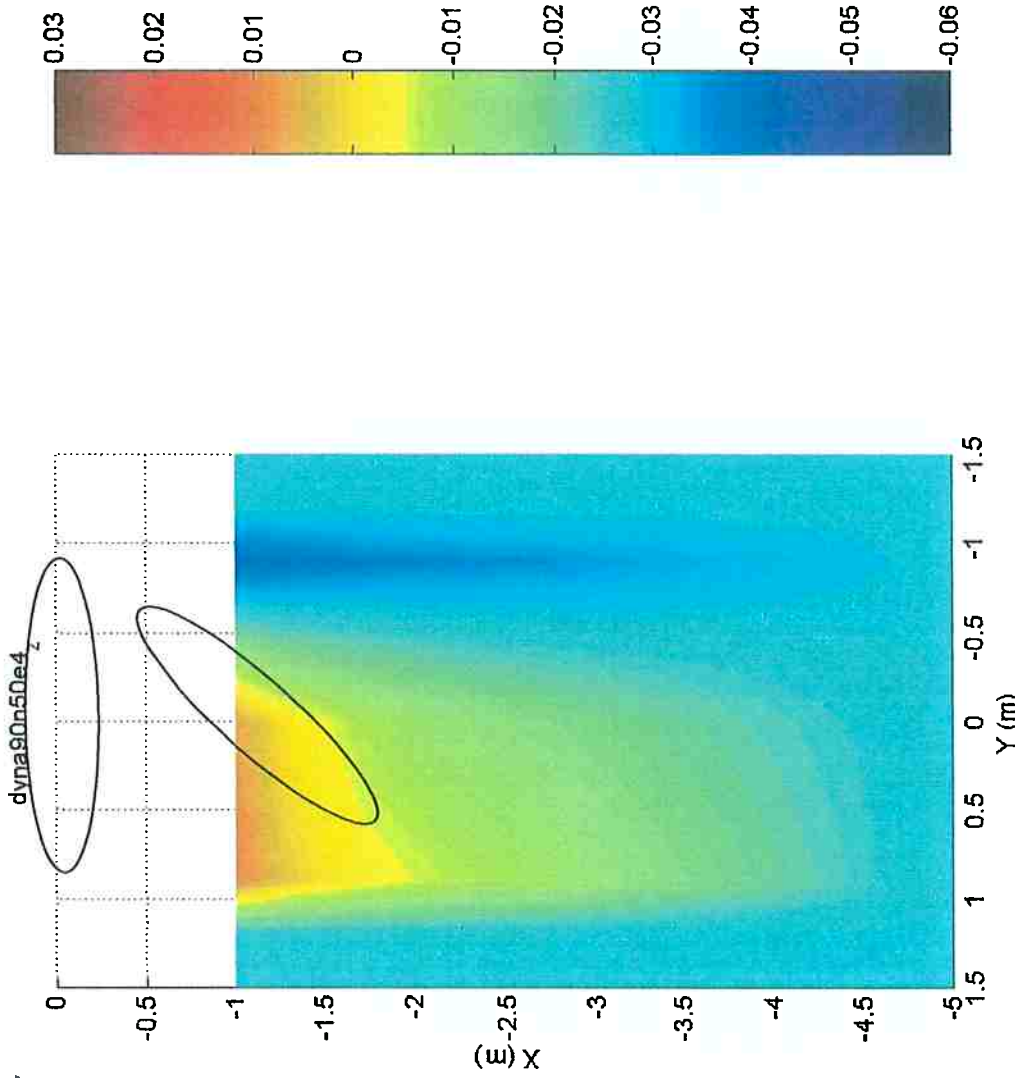


Fig.A-24b – Mapa numérico; Momento Z; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; -130°)

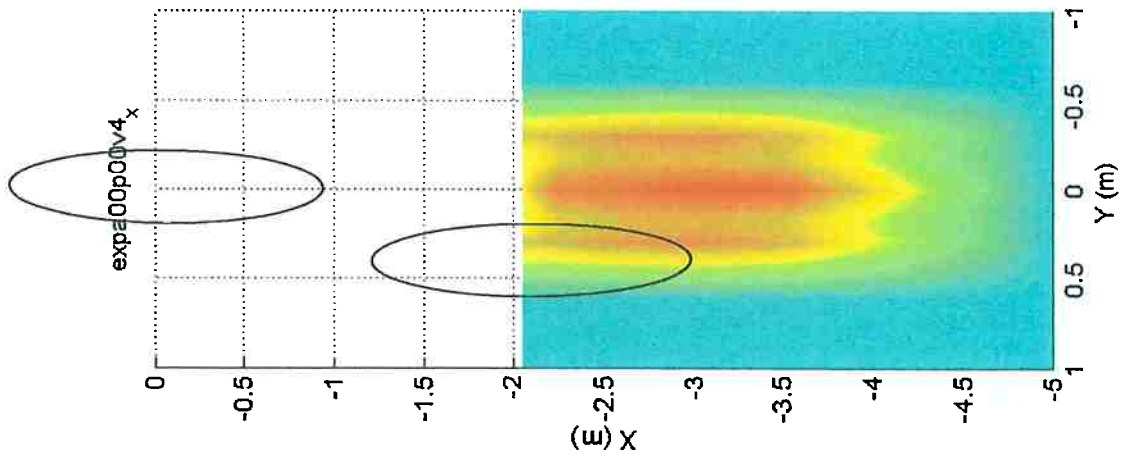


Fig.A-25a – Mapa experimental, Força X; vel. 0.149m/s

FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; 180°)

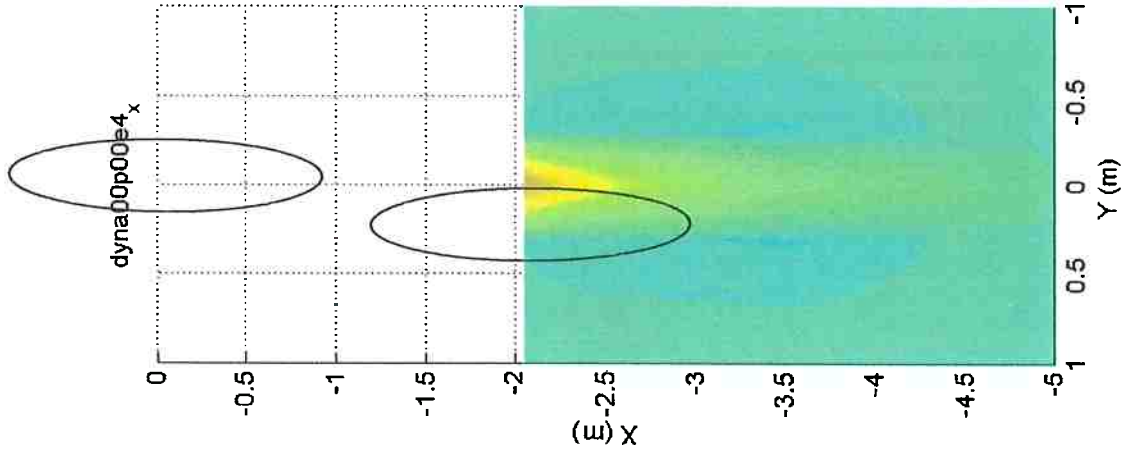
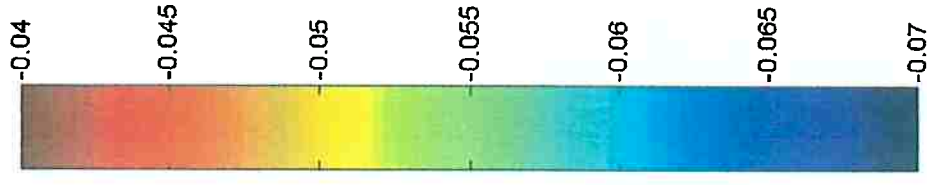


Fig.A-25b – Mapa numérico; Força X; vel. 0.149m/s

FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; 180°)



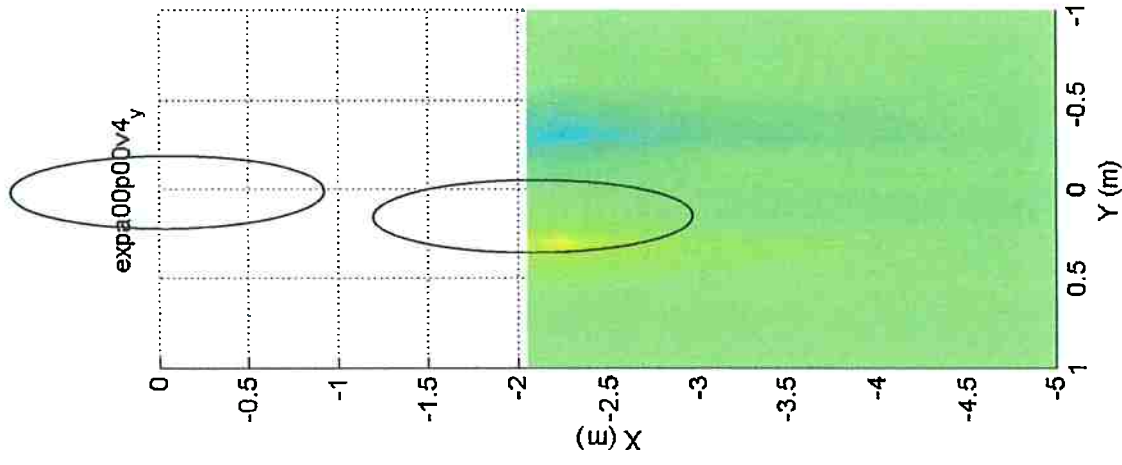


Fig.A-26a – Mapa experimental; Força Y; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; 180°)

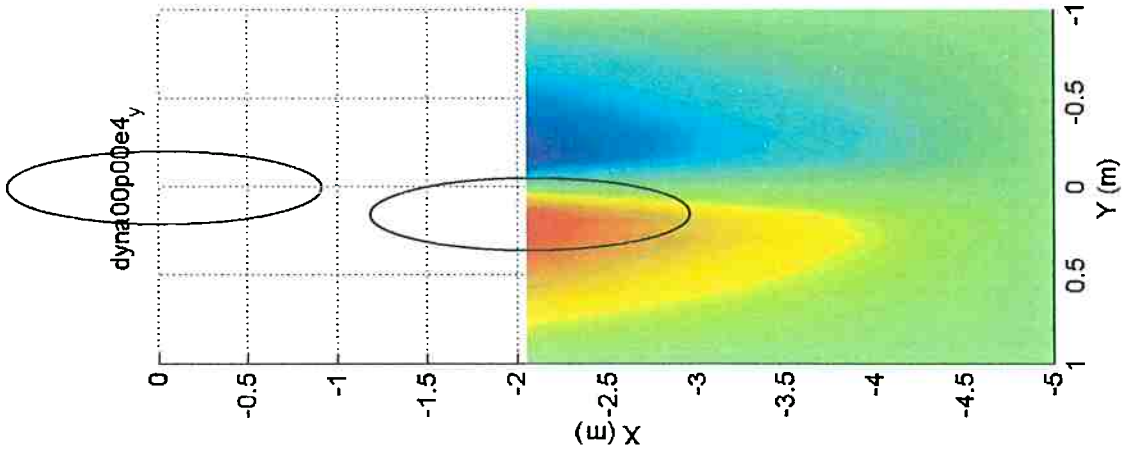
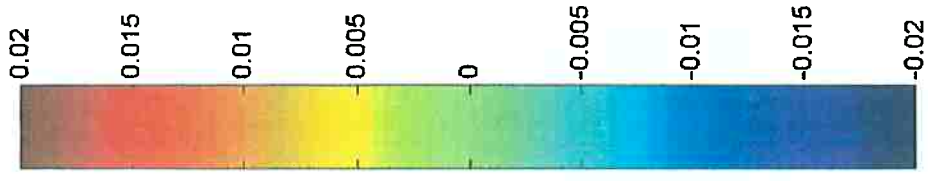


Fig.A-26b – Mapa numérico; Força Y; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; 180°)



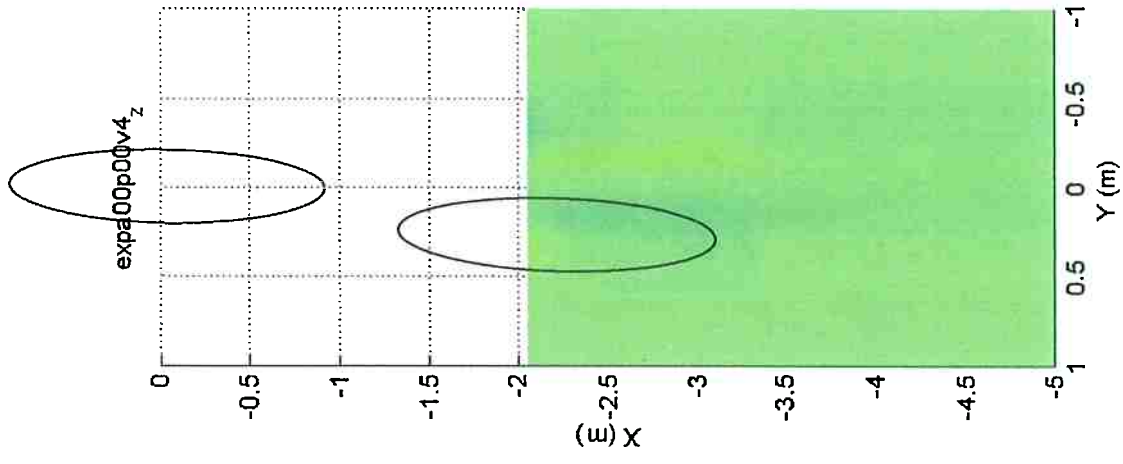


Fig.A-27a – Mapa experimental; Momento Z; vel. 0.149m/s  
 FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; 180°)

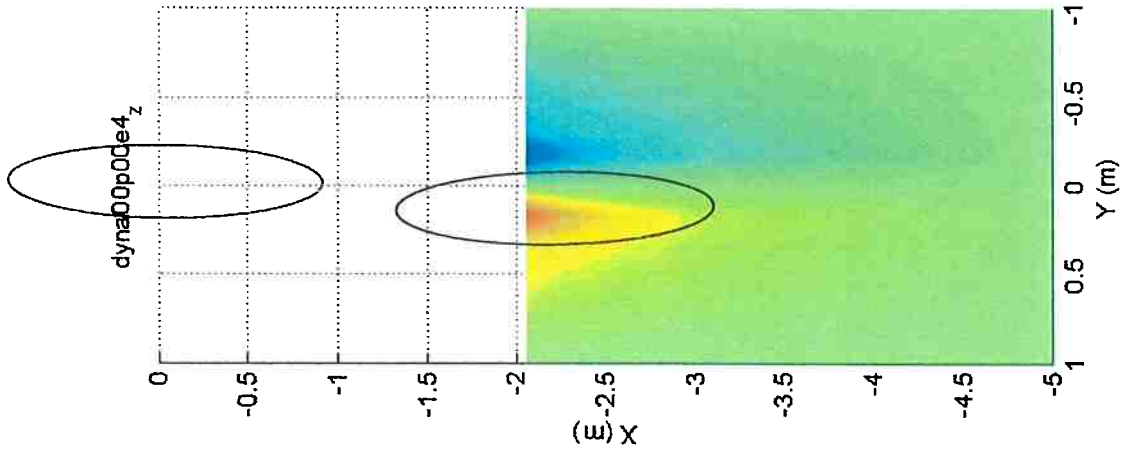
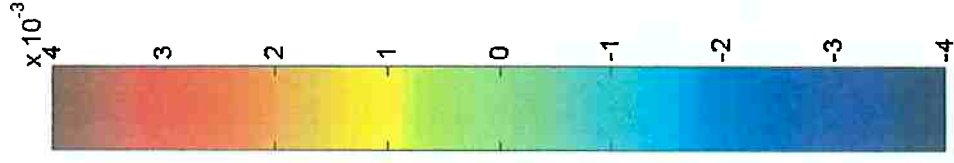


Fig.A-27b – Mapa numérico; Momento Z; vel. 0.149m/s  
 FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; 180°)



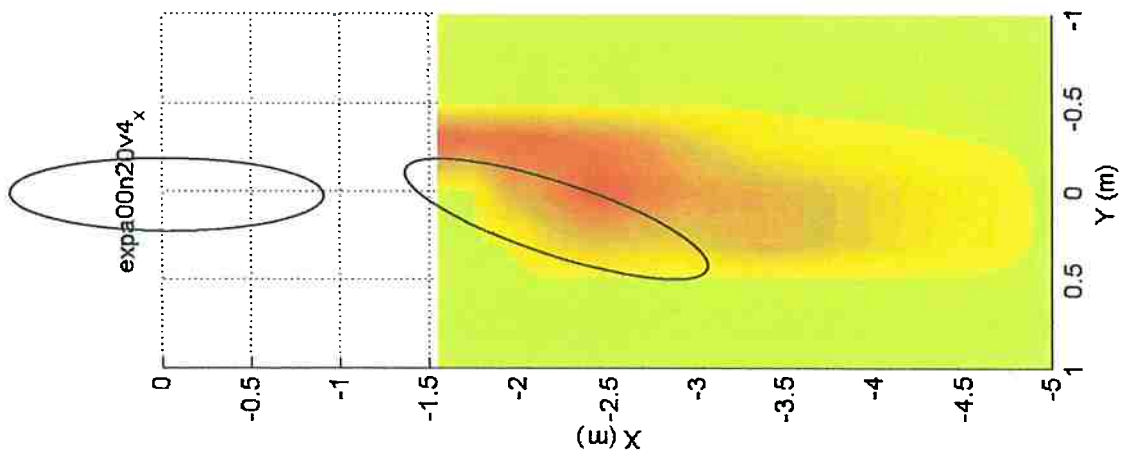


Fig.A-28a – Mapa experimental; Força X; vel. 0.149m/s

FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; -160°)

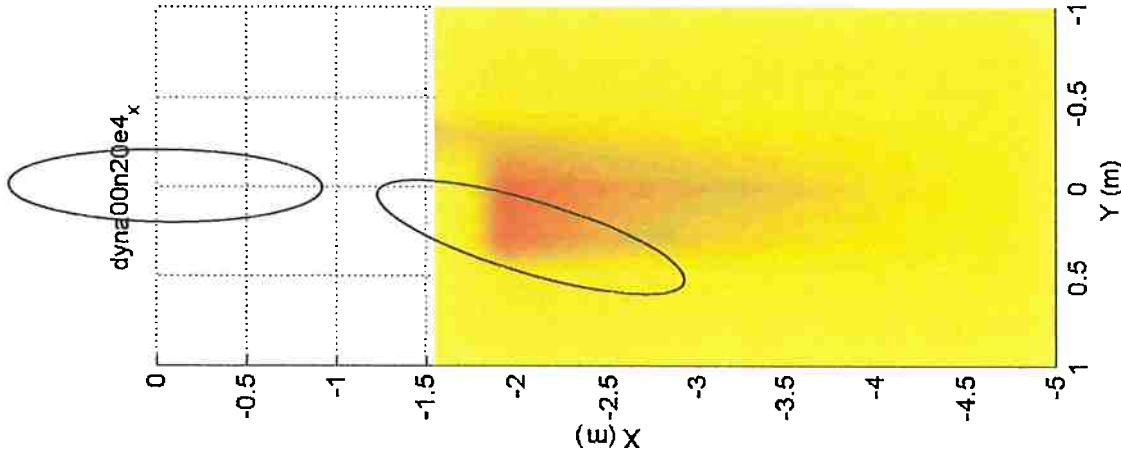


Fig.A-28b – Mapa numérico; Força X; vel. 0.149m/s

FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; -160°)

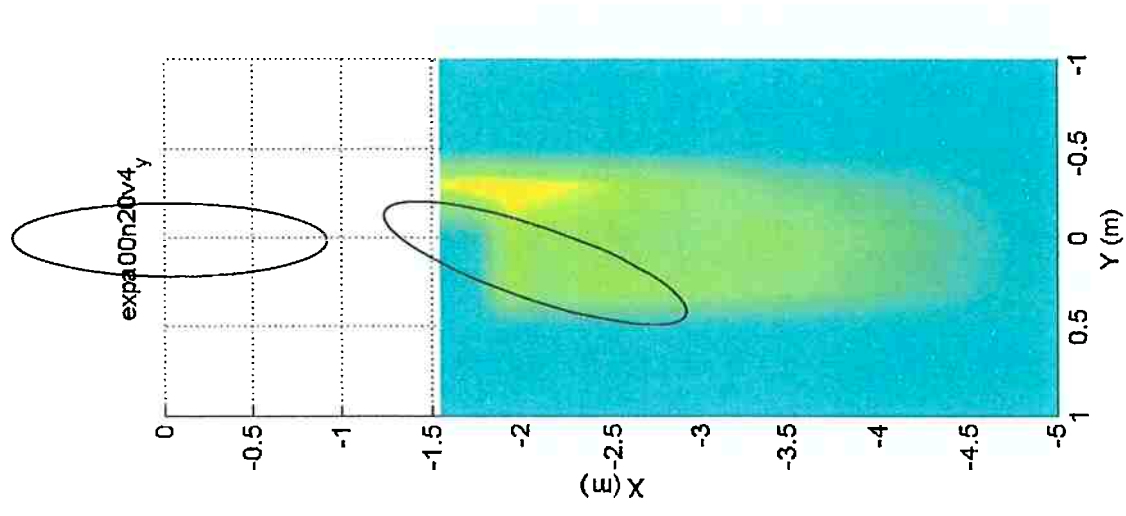


Fig.A-29a – Mapa experimental; Força Y; vel. 0.149m/s

FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; -160°)

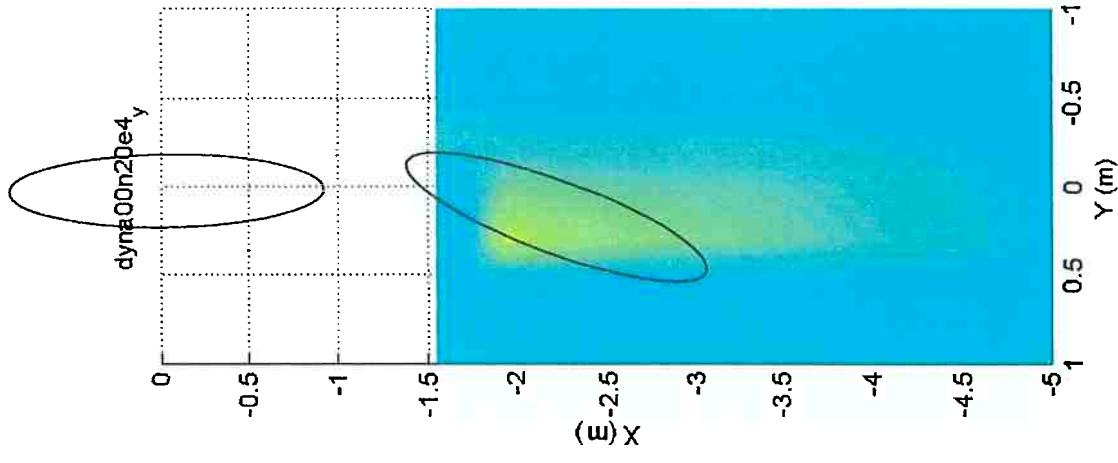
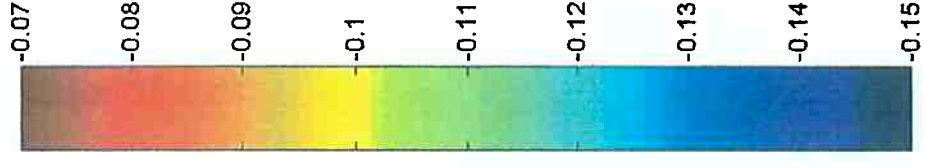


Fig.A-29b – Mapa numérico; Força Y; vel. 0.149m/s

FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; -160°)



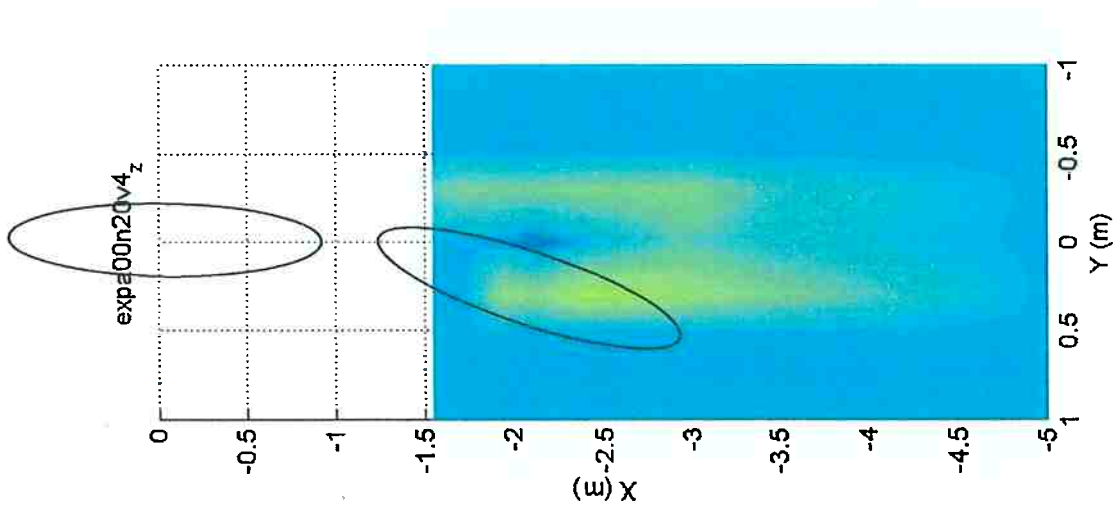


Fig.A-30a – Mapa experimental; Momento Z; vel. 0.149m/s  
 FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; -160°)

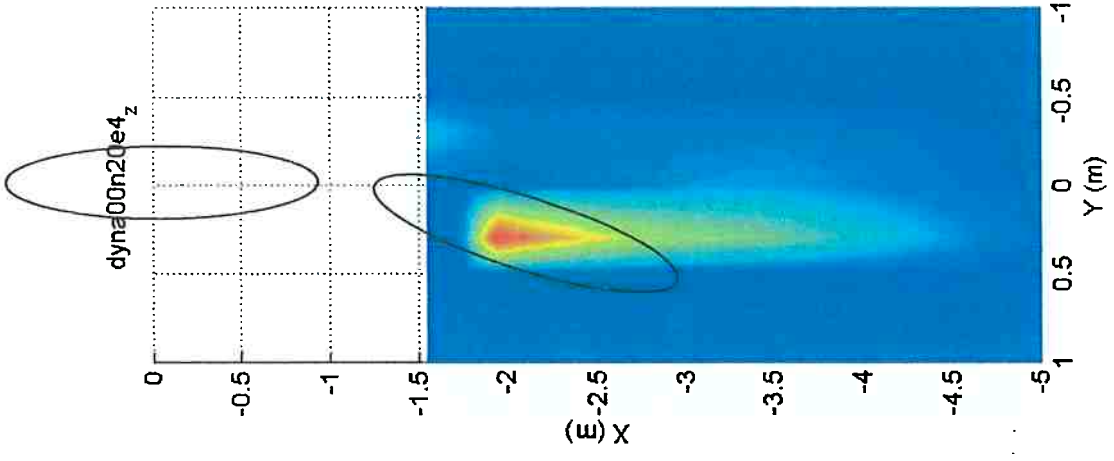


Fig.A-30b – Mapa numérico; Momento Z; vel. 0.149m/s  
 FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; -160°)



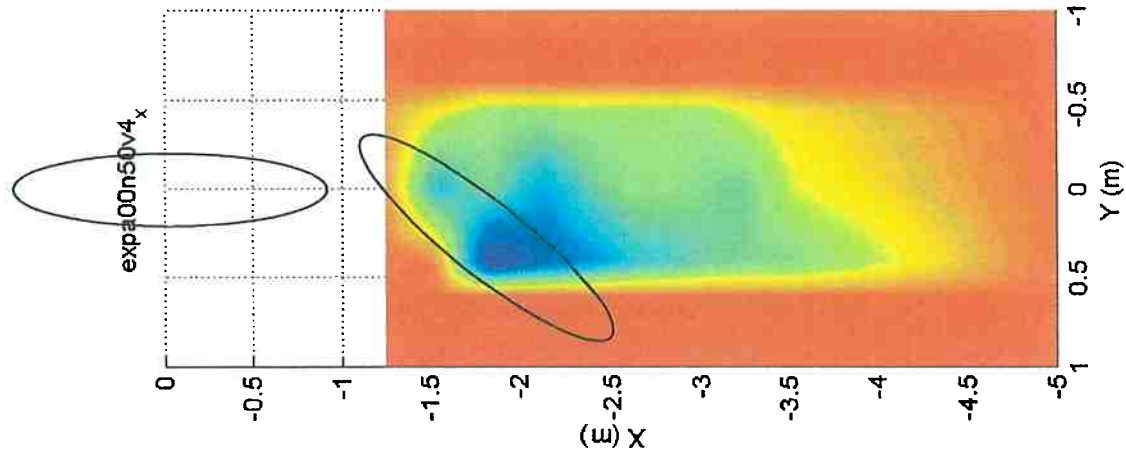


Fig.A-31a – Mapa experimental, Força X, vel. 0.149m/s

FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; -130°)

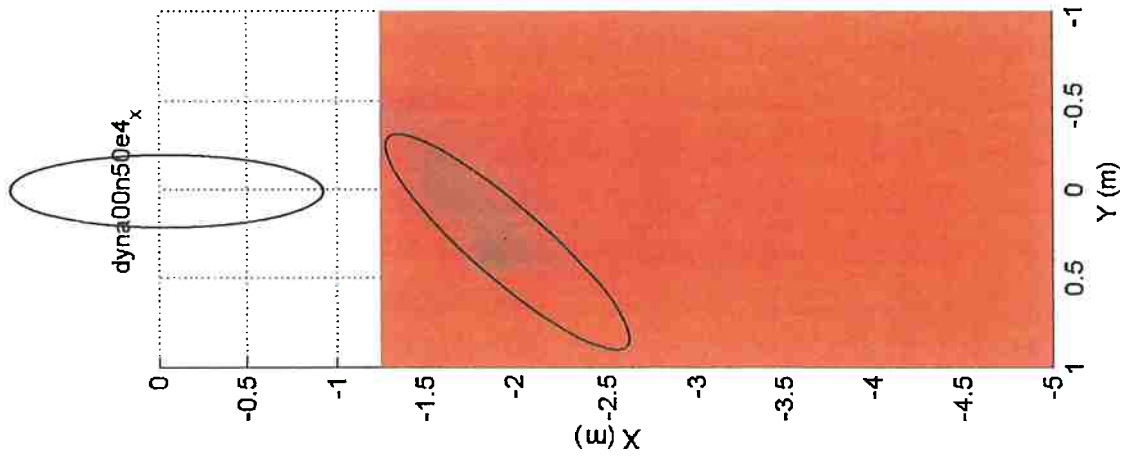


Fig.A-31b – Mapa numérico, Força X, vel. 0.149m/s

FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; -130°)

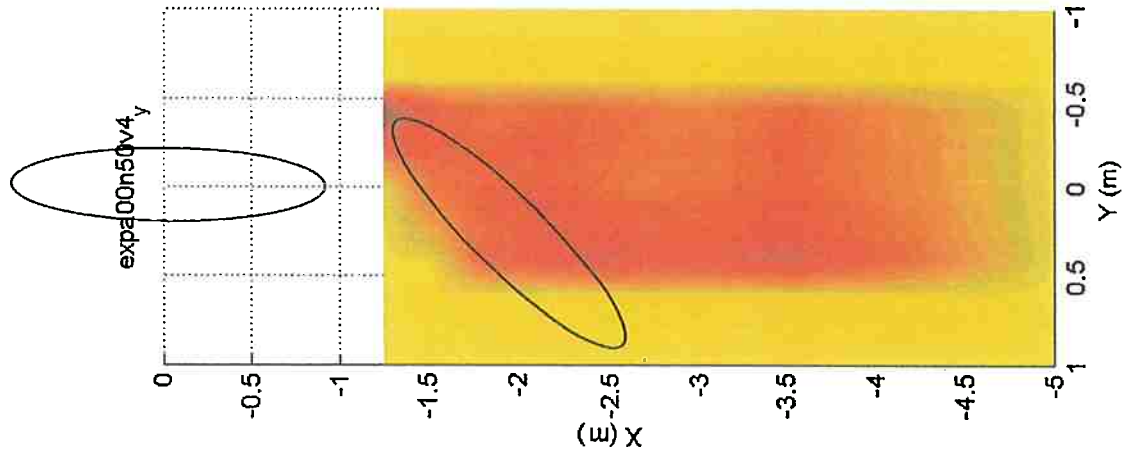


Fig.A-32a – Mapa experimental; Força Y; vel. 0.149m/s

FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; -130°)

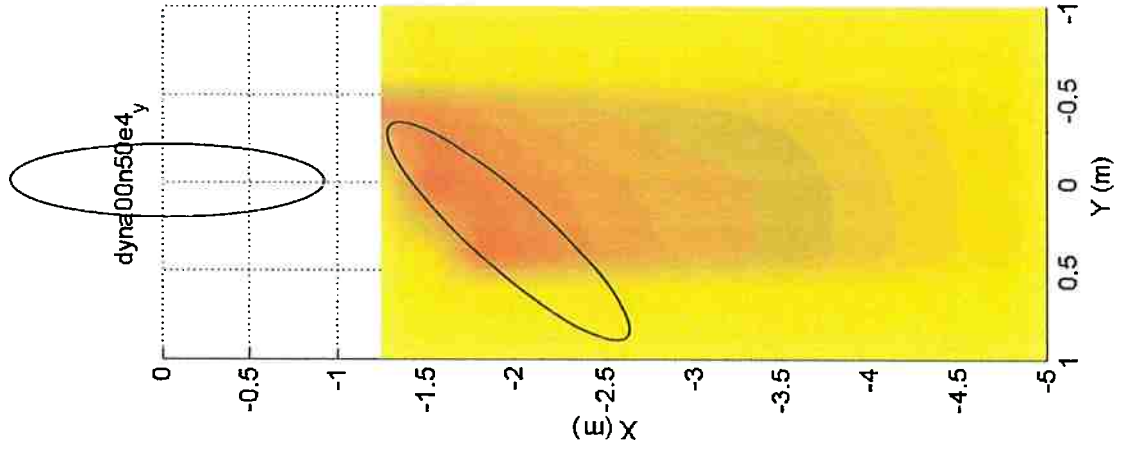
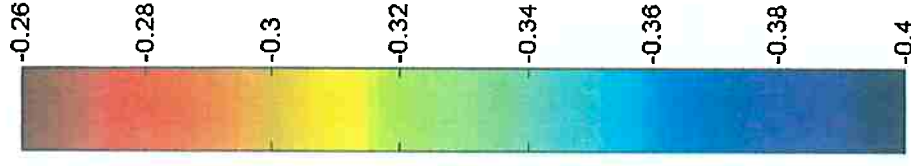


Fig.A-32b – Mapa numérico; Força Y; vel. 0.149m/s

FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; -130°)



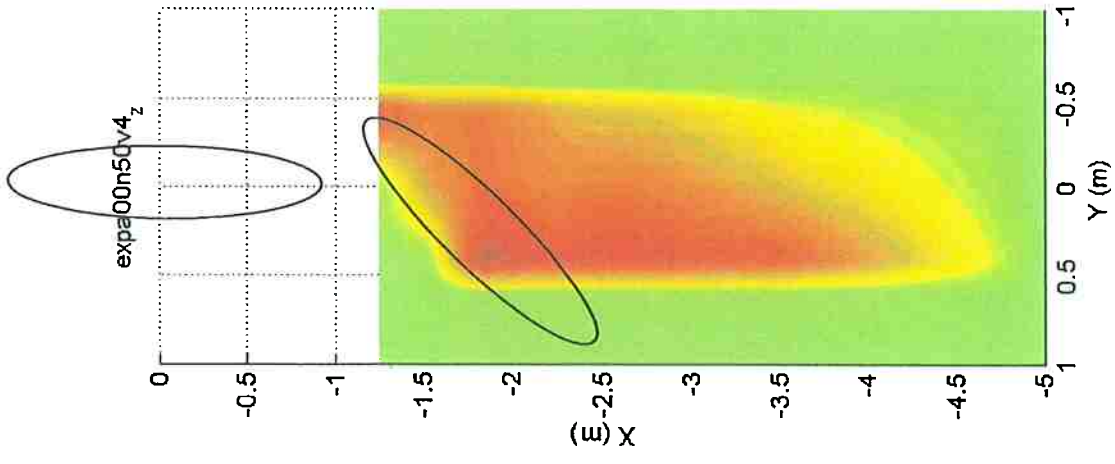


Fig.A-33a – Mapa experimental; Momento Z; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; -130°)

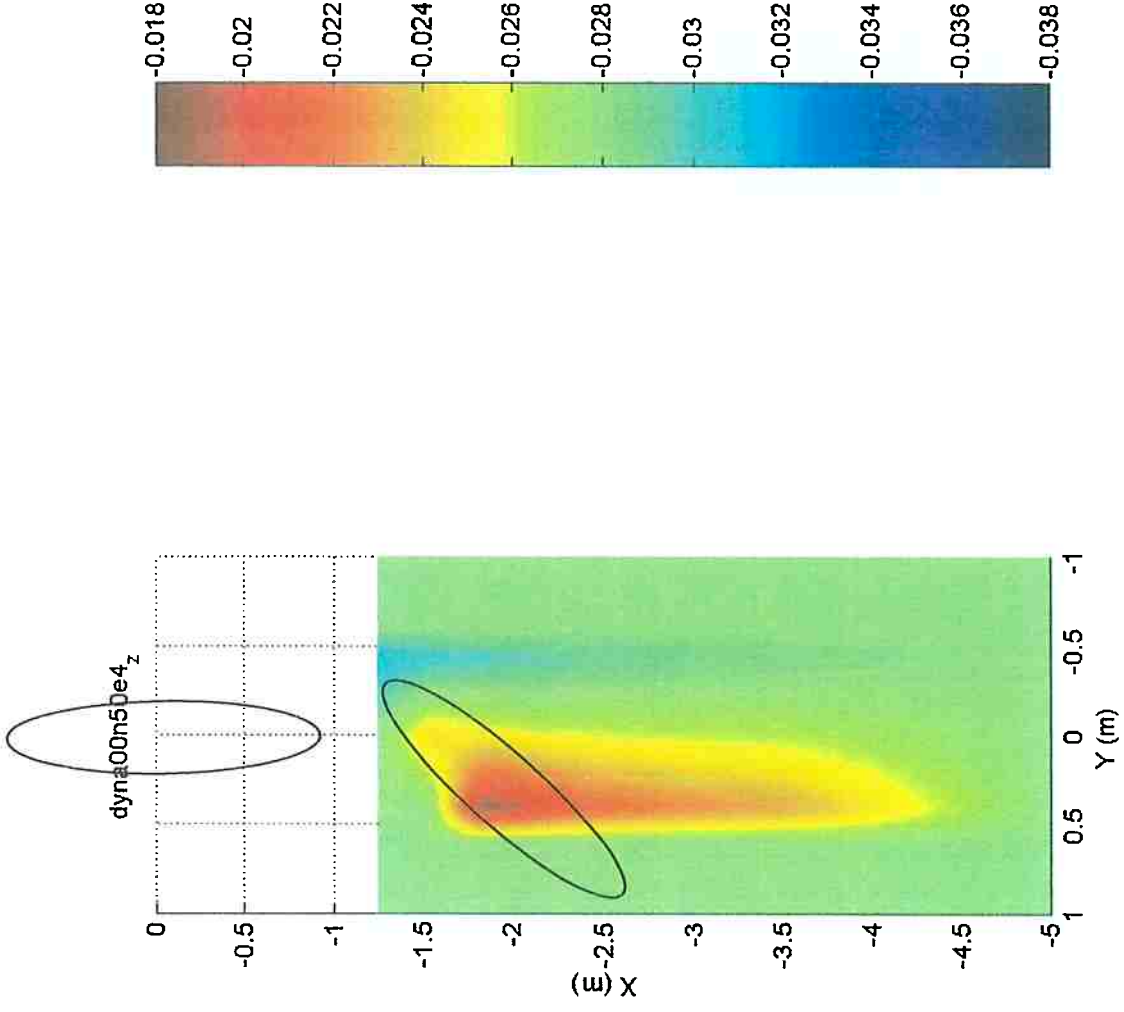


Fig.A-33b – Mapa numérico; Momento Z; vel. 0.149m/s  
FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; -130°)

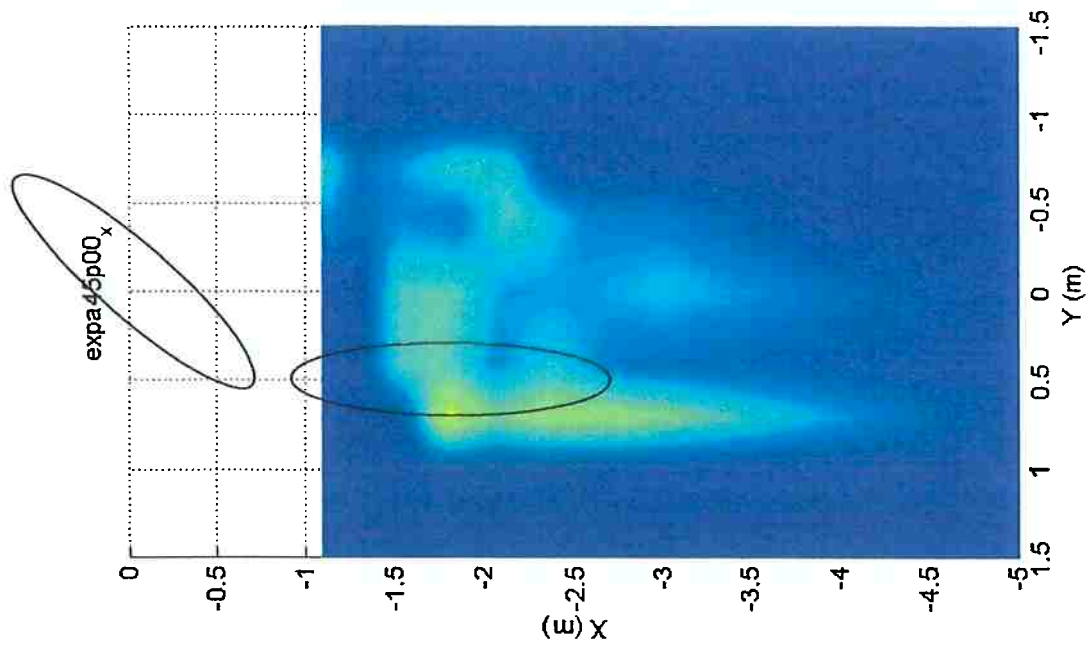


Fig.A-34a – Mapa experimental; Força X; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; 180°)

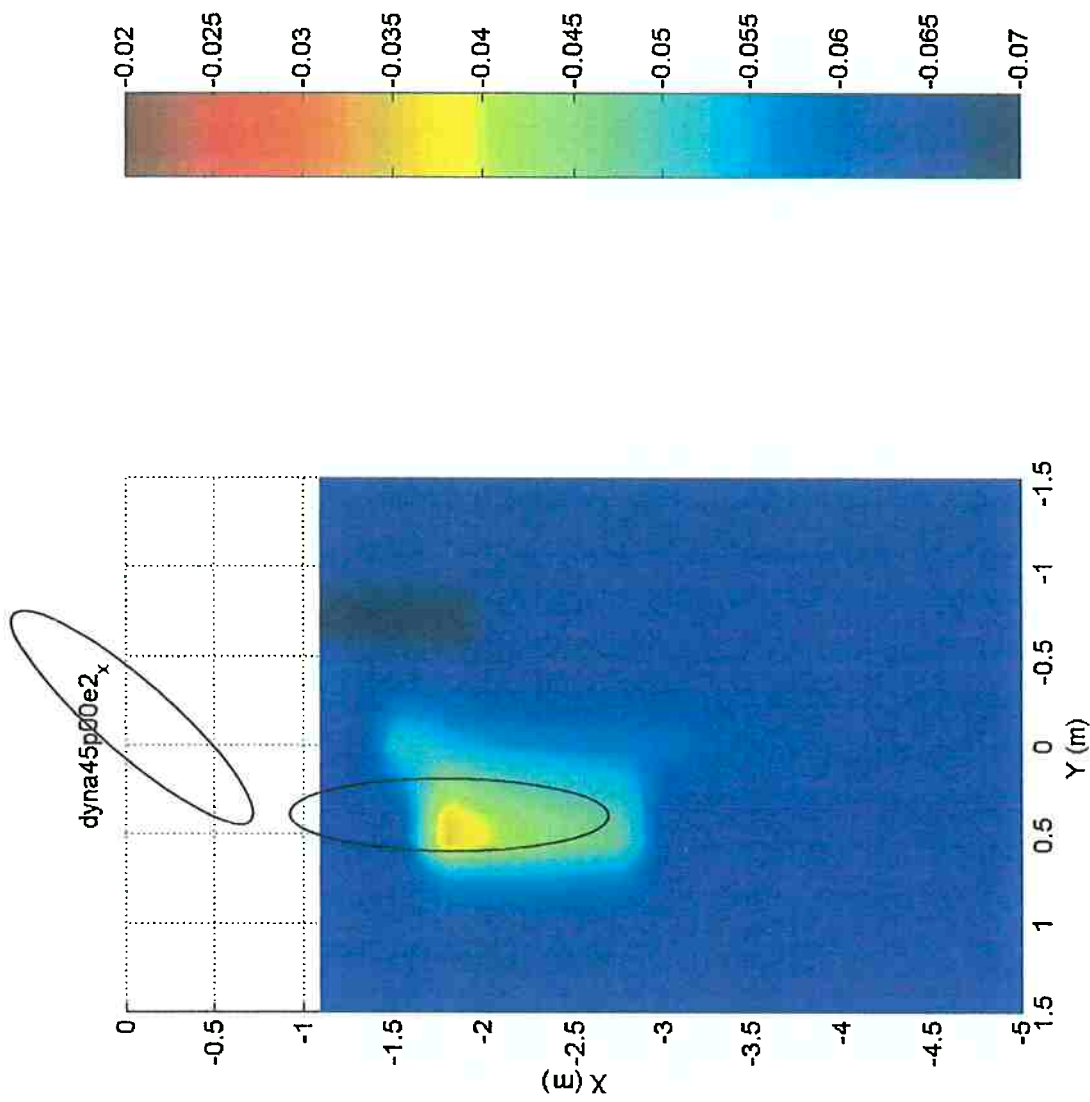


Fig.A-34b – Mapa numérico; Força X; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; 180°)

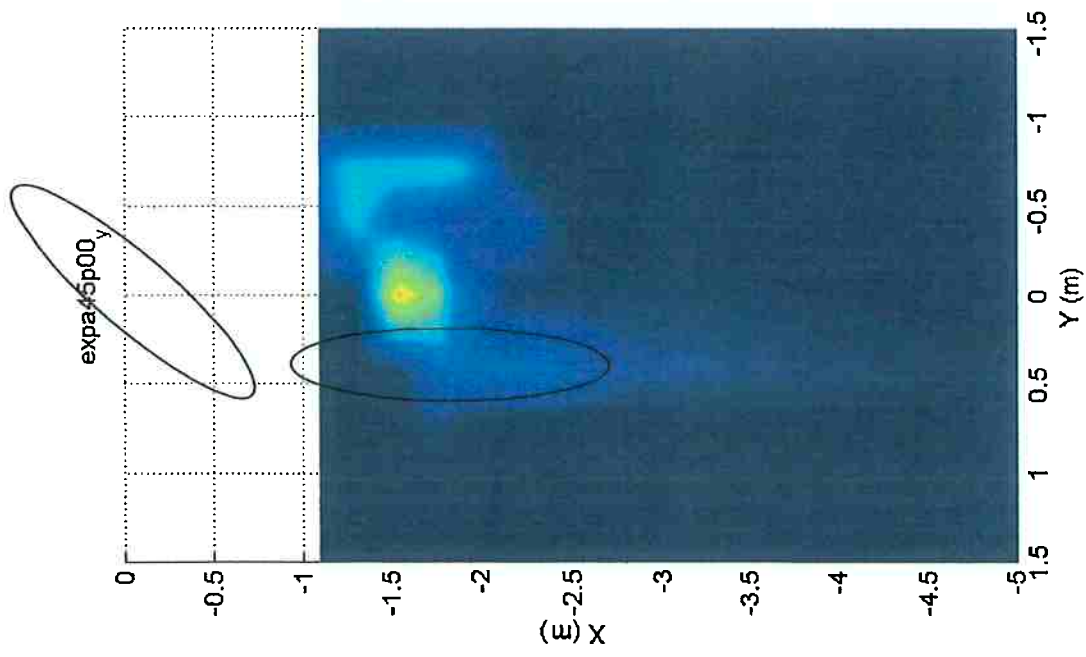


Fig.A-35a – Mapa experimental; Força Y; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -135°); shuttle (40% calado; 180°)

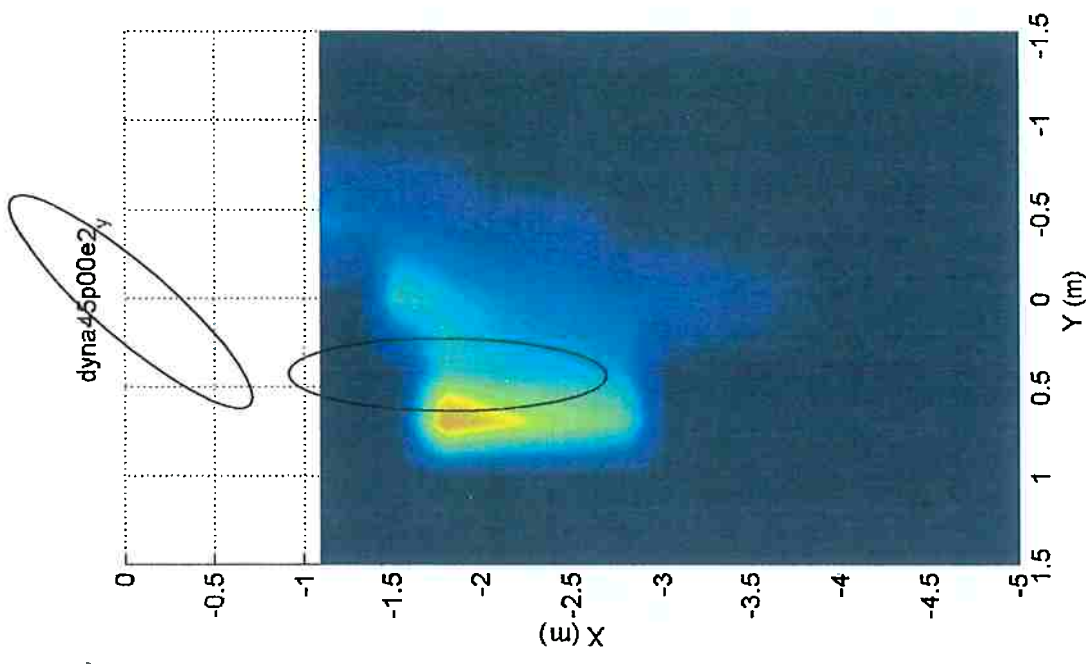


Fig.A-35b – Mapa numérico; Força Y; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -135°); shuttle (40% calado; 180°)

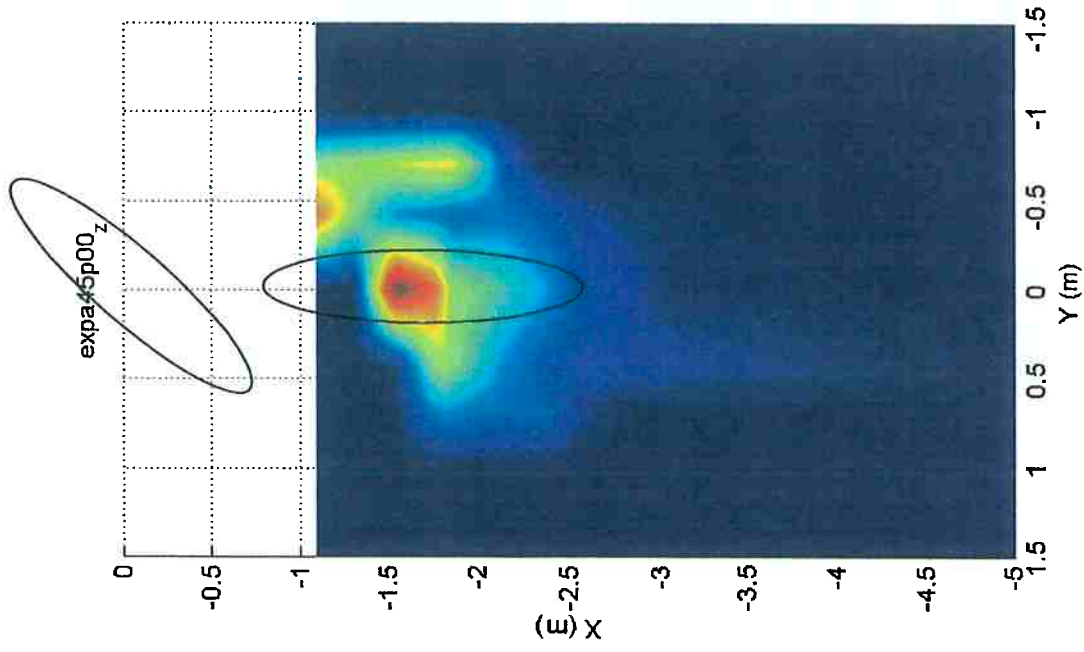


Fig.A-36a – Mapa experimental; Momento Z; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; 180°)

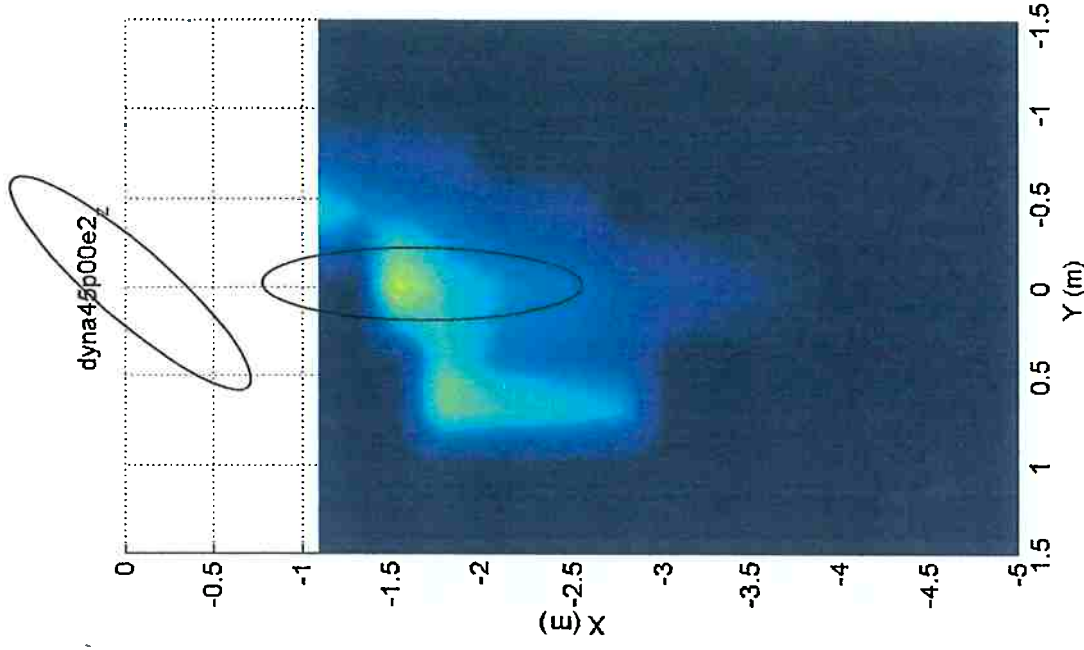


Fig.A-36b – Mapa numérico; Momento Z; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; 180°)

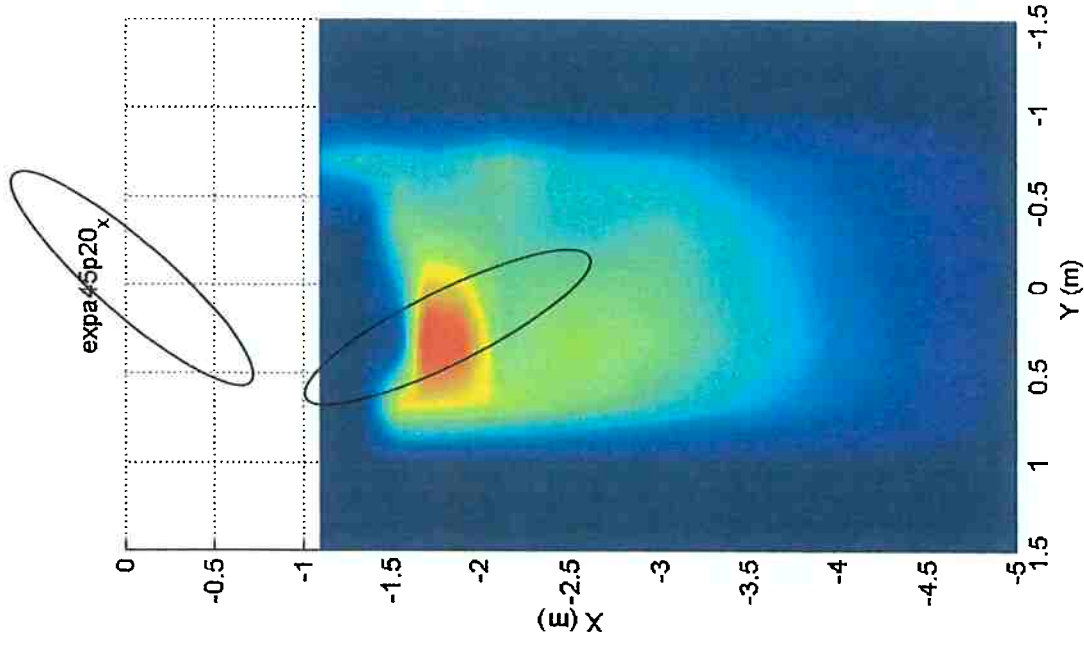


Fig.A-37a – Mapa experimental; Força X; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; 160°)

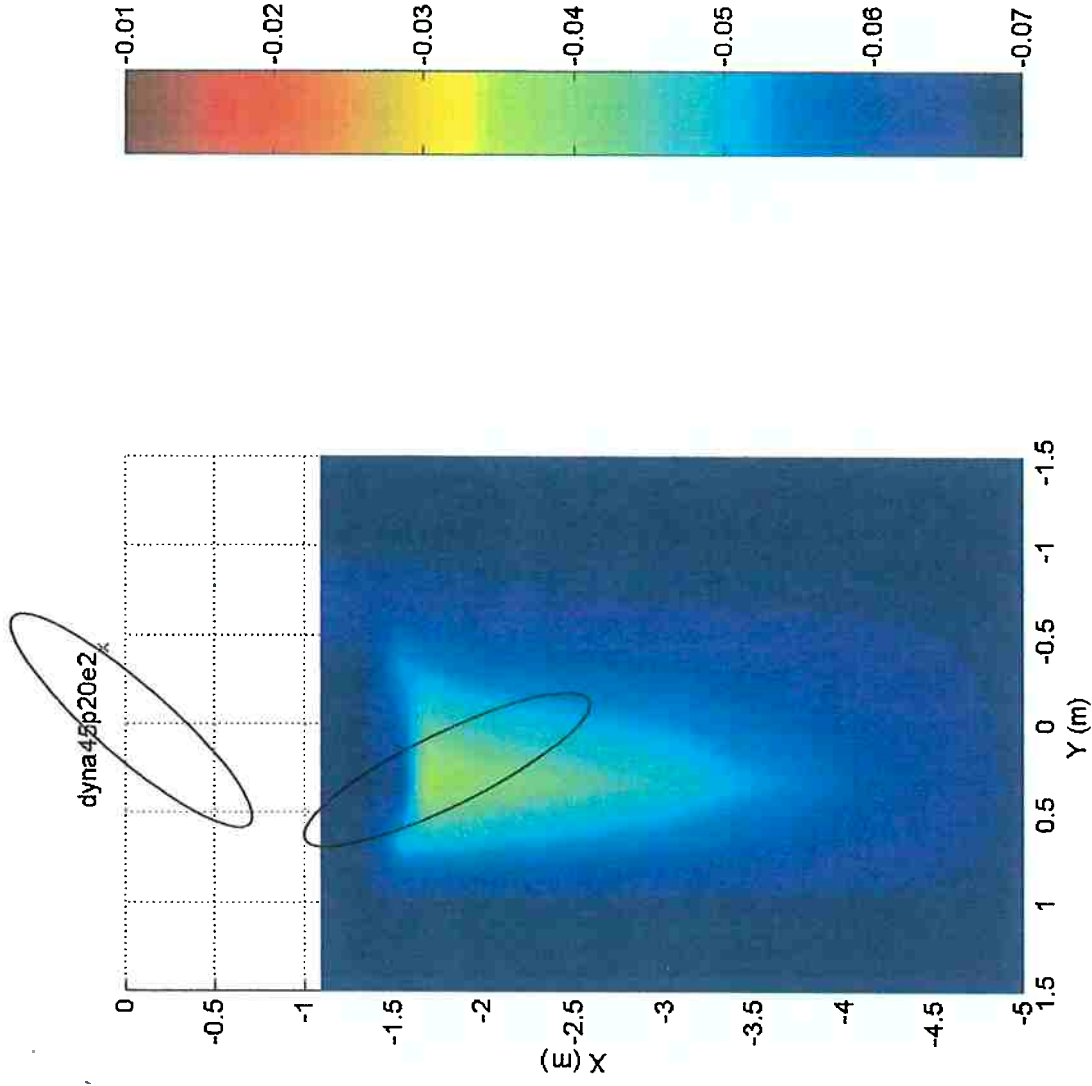


Fig.A-37b – Mapa numérico; Força X; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; 160°)

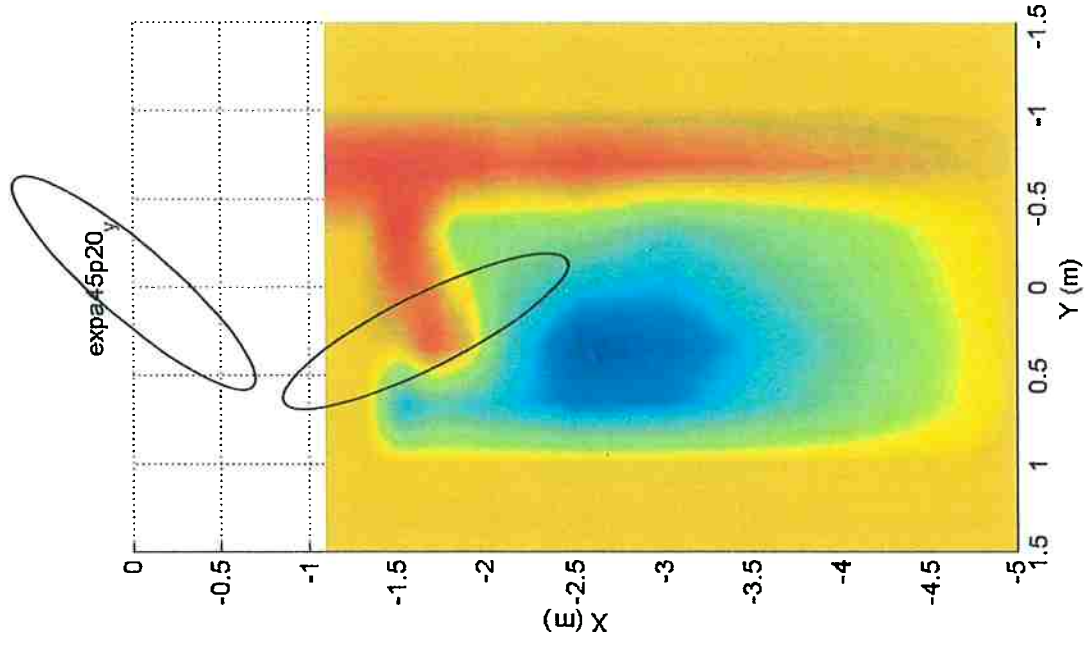


Fig.A-38a – Mapa experimental; Força Y; vel. 0.075m/s

FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; 160°)

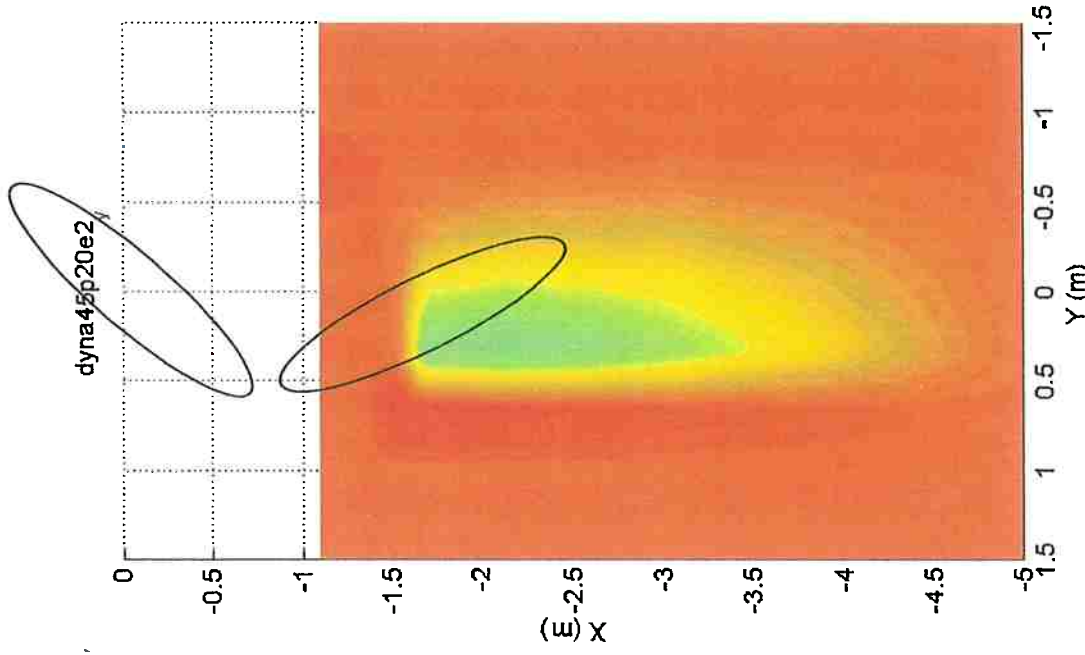
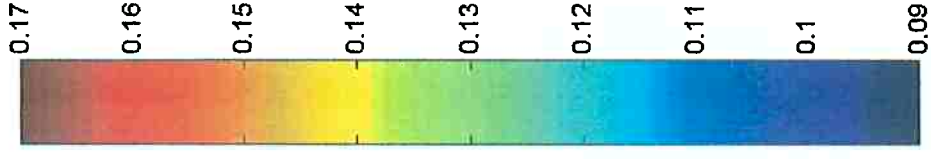


Fig.A-38b – Mapa numérico; Força Y; vel. 0.075m/s

FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; 160°)





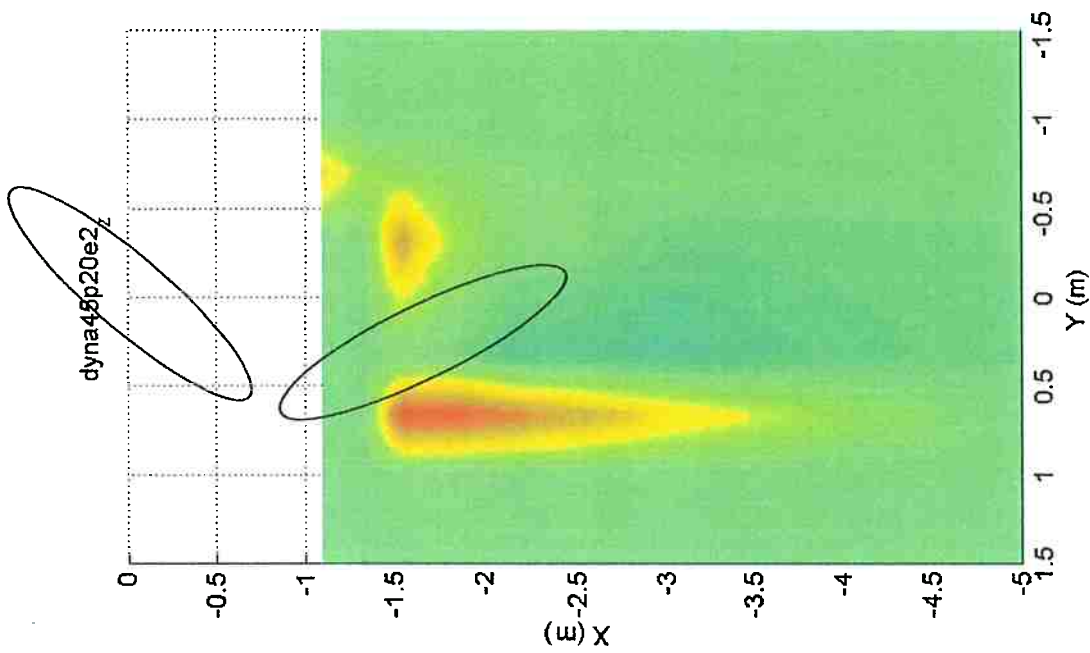
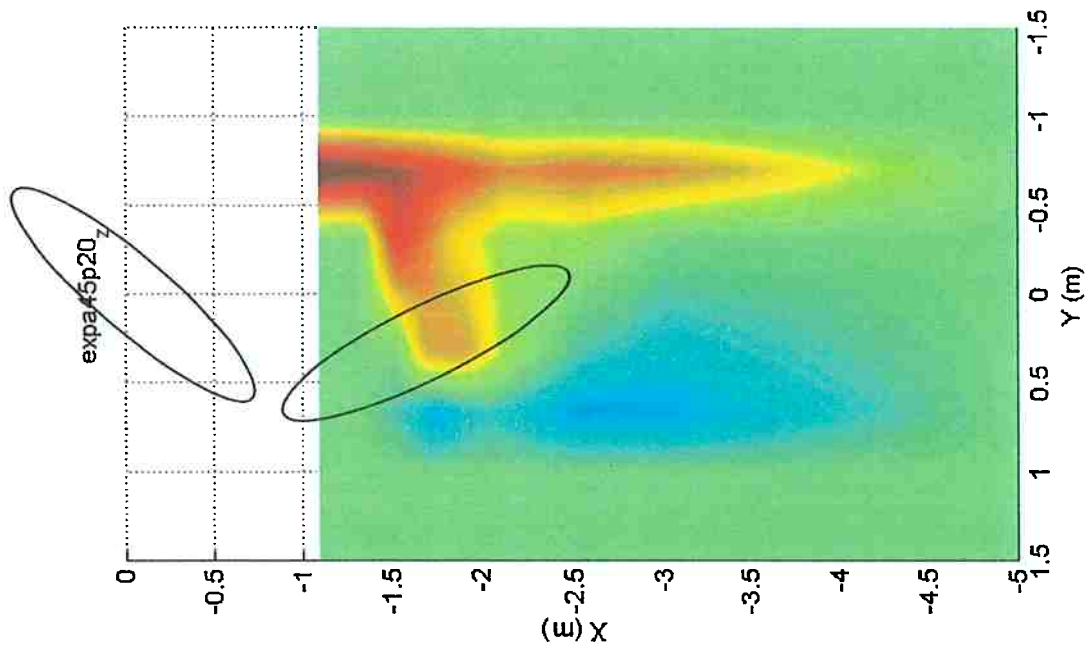


Fig.A-39a – Mapa experimental; Momento Z; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado;  $-135^\circ$ ); *shuttle* (40% calado;  $160^\circ$ )

Fig.A-39b – Mapa numérico; Momento Z; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado;  $-135^\circ$ ); *shuttle* (40% calado;  $160^\circ$ )

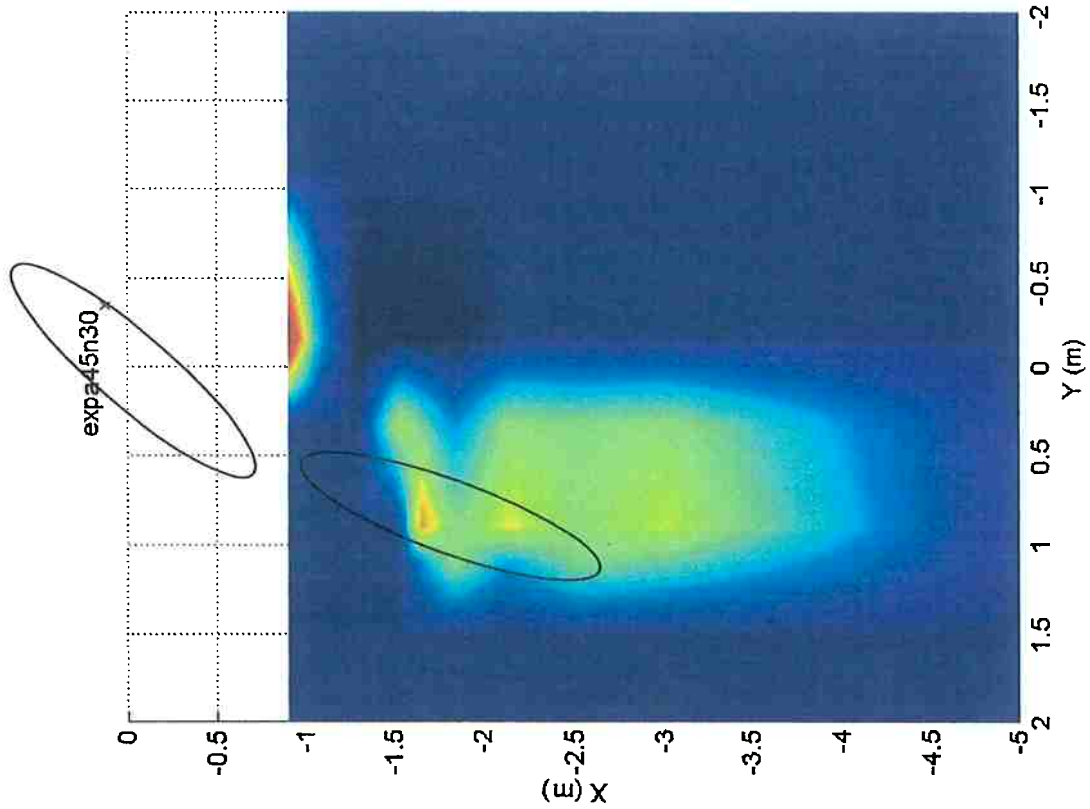


Fig.A-40a – Mapa experimental; Força X; vel. 0.075m/s  
 FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; -160°)

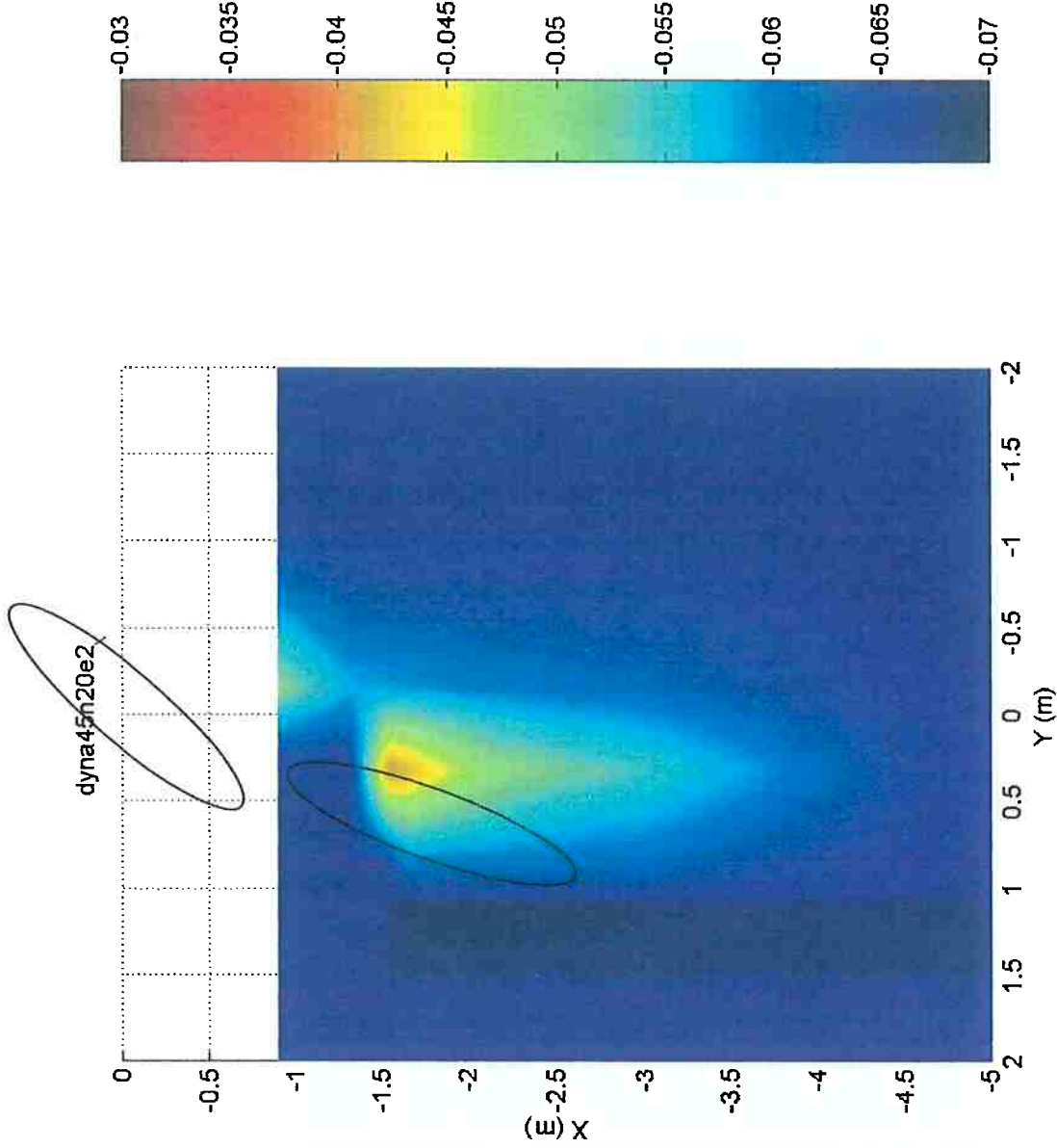


Fig.A-40b – Mapa numérico; Força X; vel. 0.075m/s  
 FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; -160°)

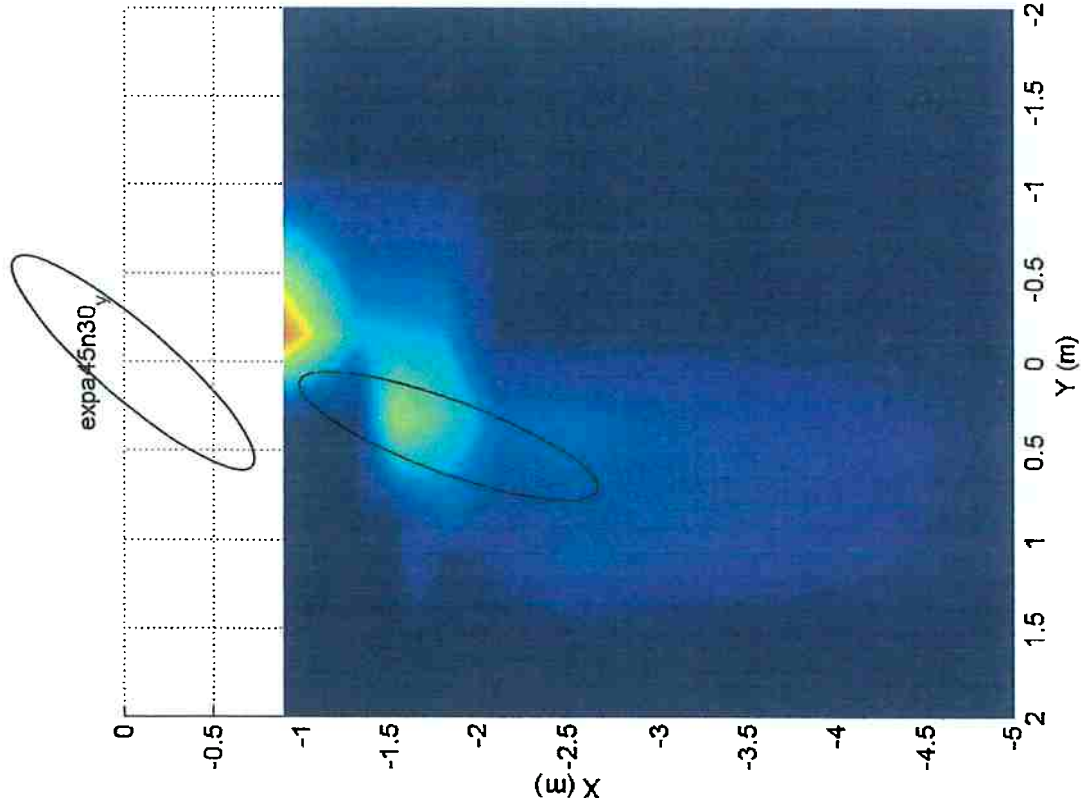


Fig.A-41a – Mapa experimental; Força Y; vel. 0.075m/s

FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; -160°)

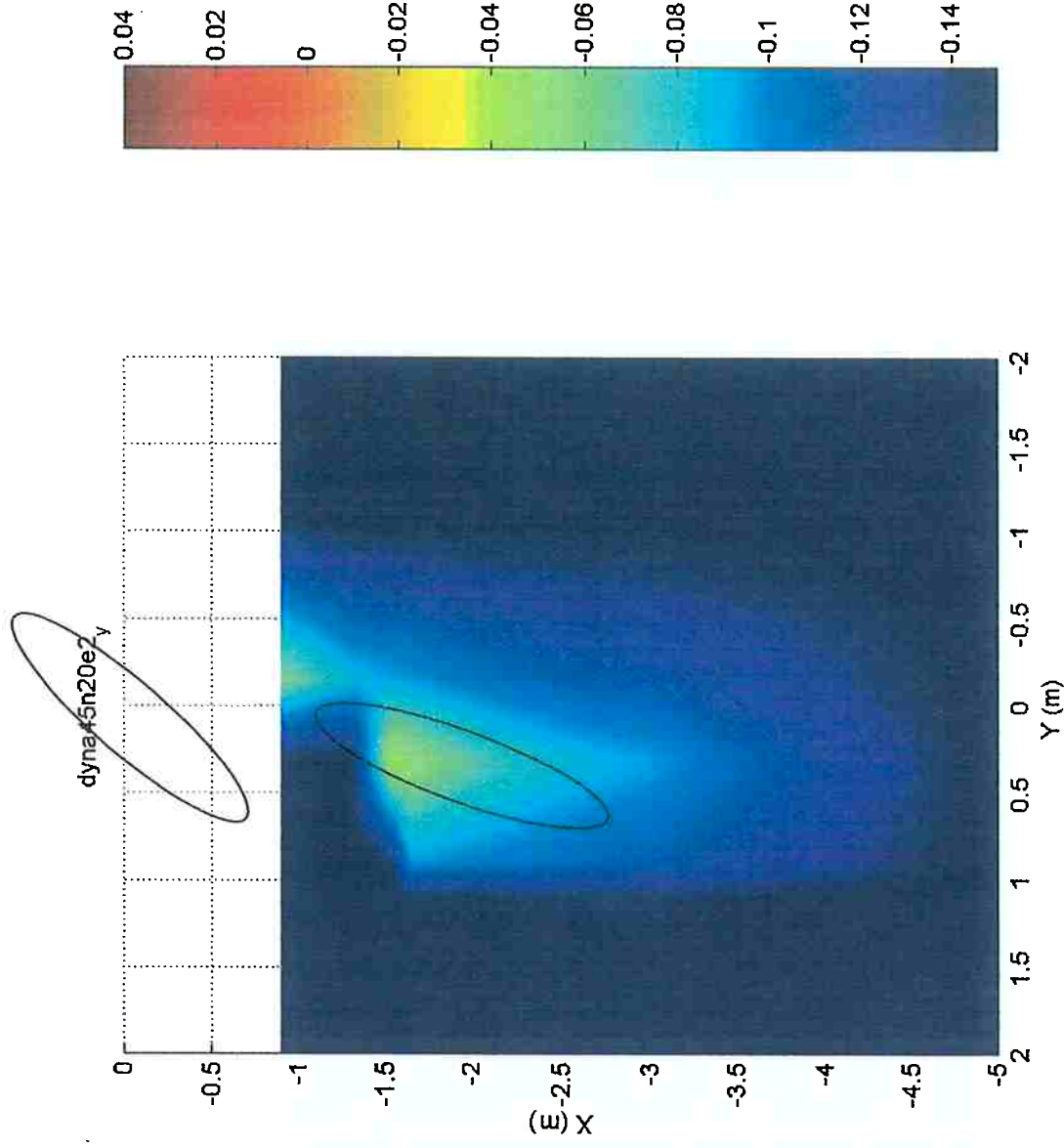


Fig.A-41b – Mapa numérico; Força Y; vel. 0.075m/s

FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; -160°)

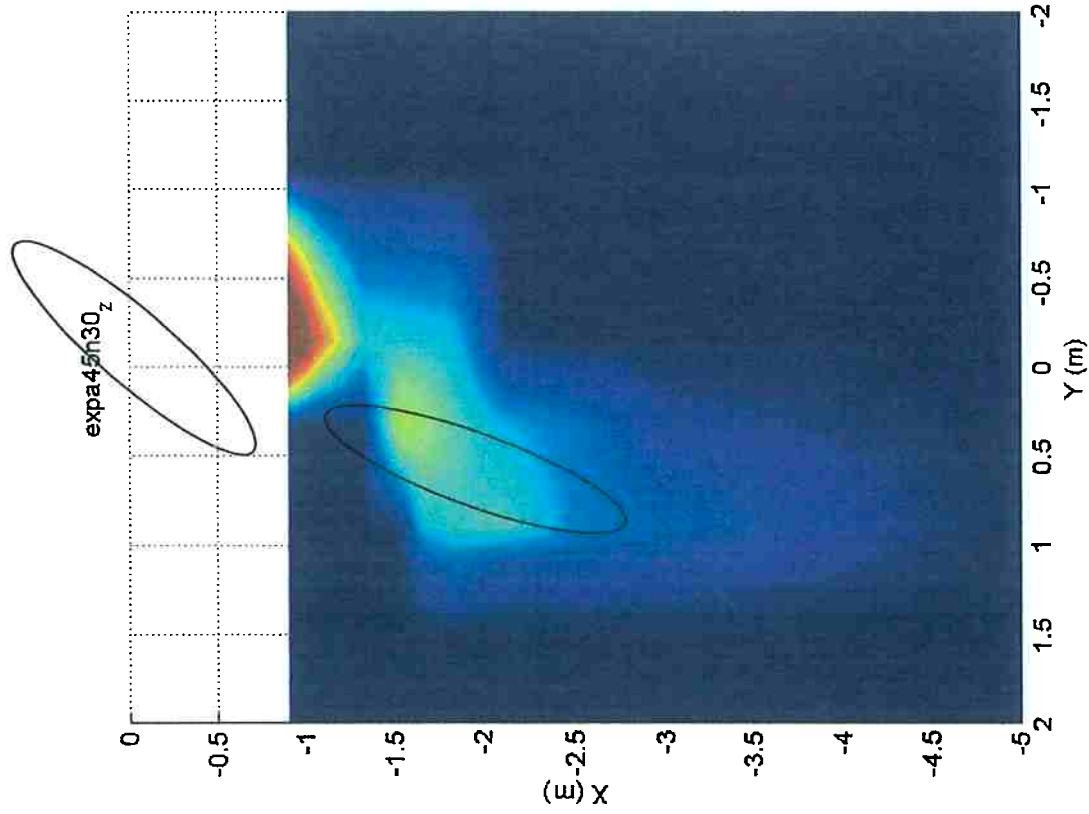


Fig.A-42a – Mapa experimental; Momento Z; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -135°); shuttle (40% calado; -160°)

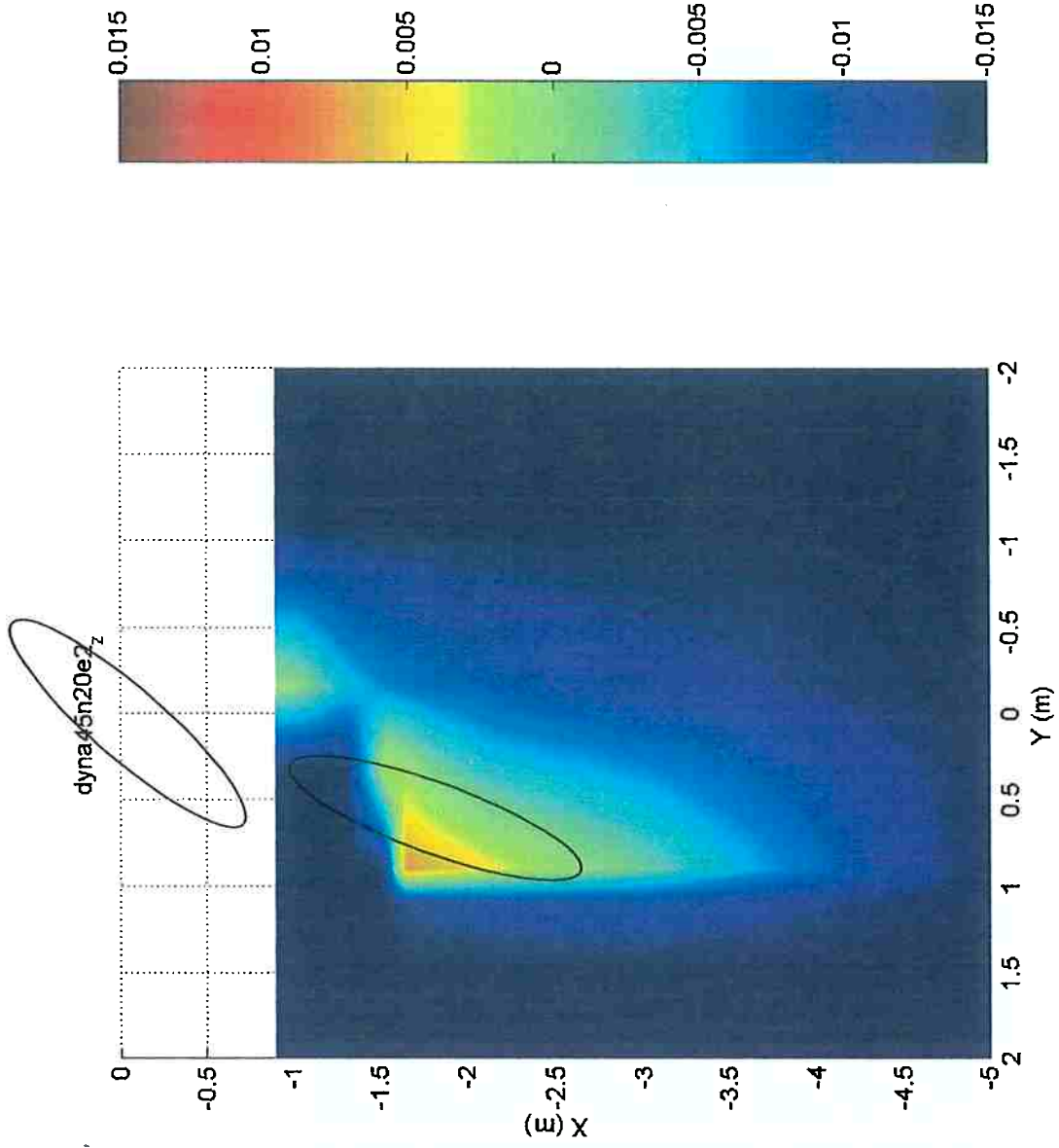


Fig.A-42b – Mapa numérico; Momento Z; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -135°); shuttle (40% calado; -160°)

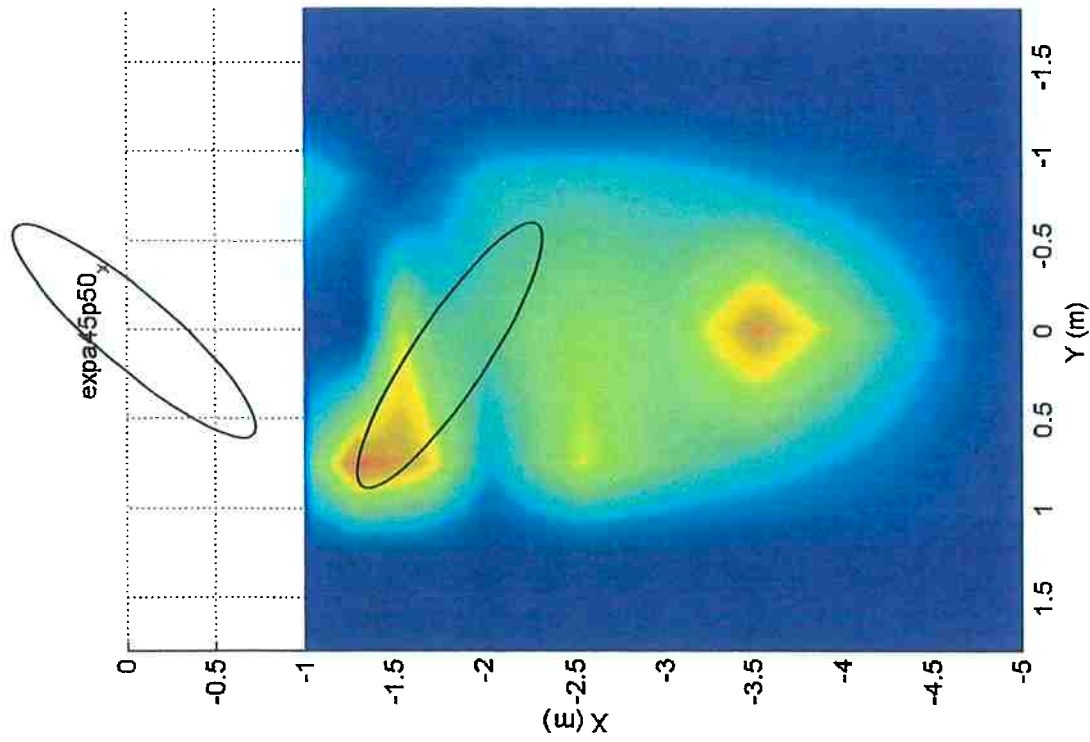


Fig.A-43a – Mapa experimental; Força X; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; 130°)

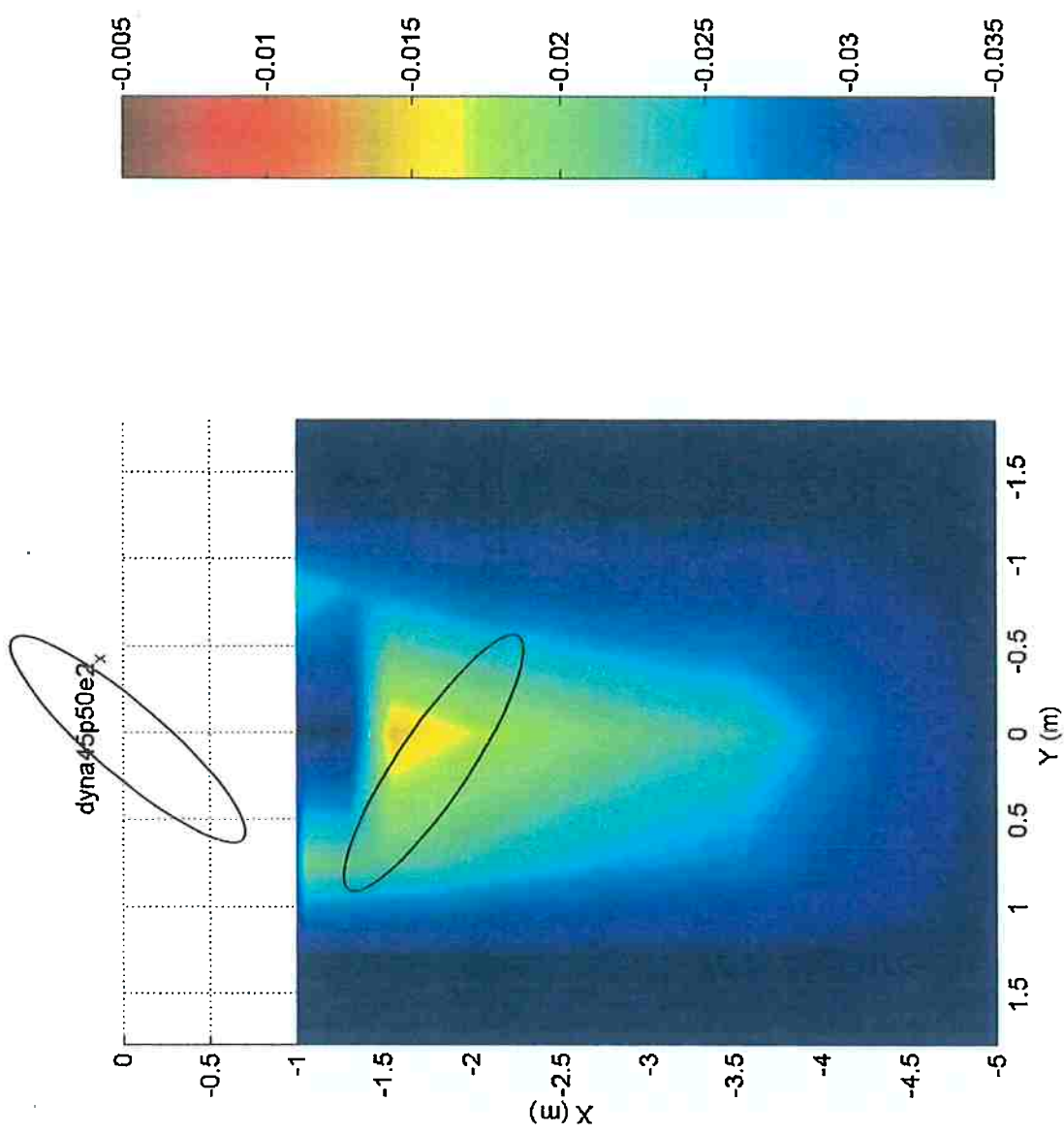


Fig.A-43b – Mapa numérico; Força X; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; 130°)

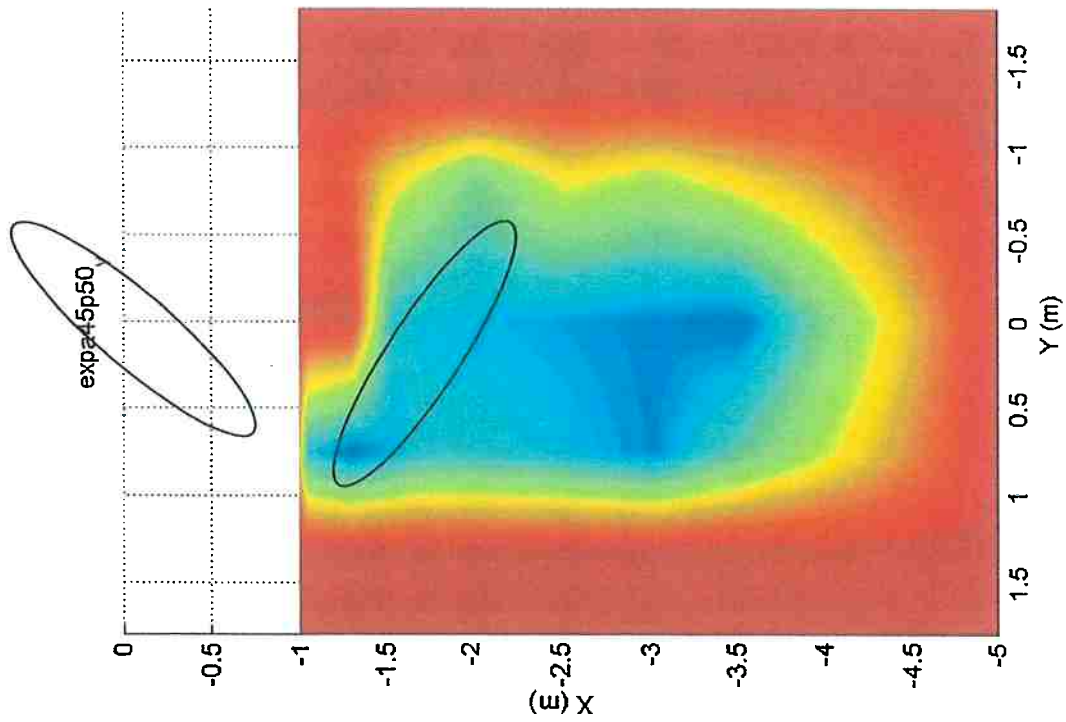


Fig.A-44a – Mapa experimental; Força Y; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; 130°)

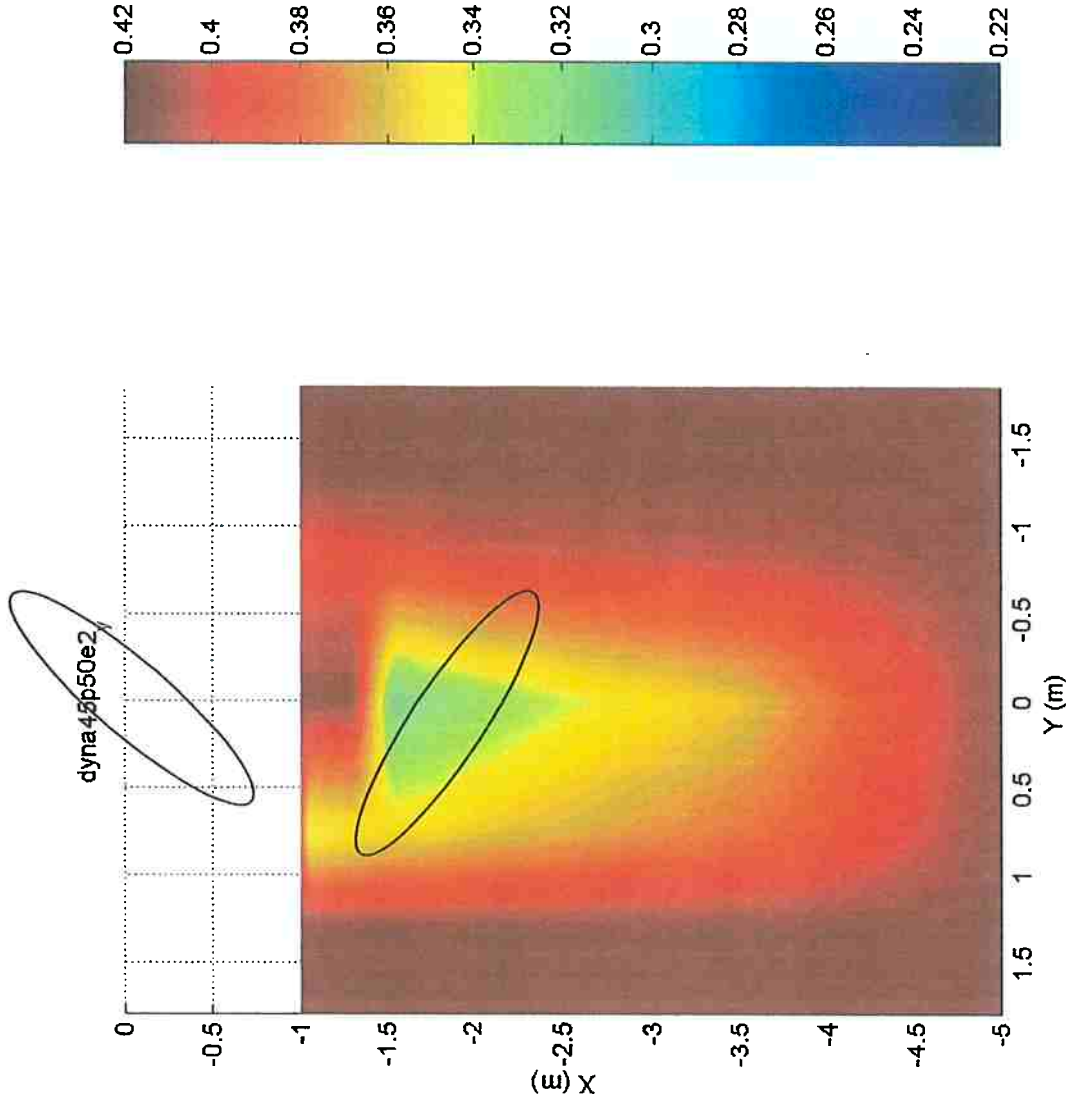


Fig.A-44b – Mapa numérico; Força Y; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; 130°)

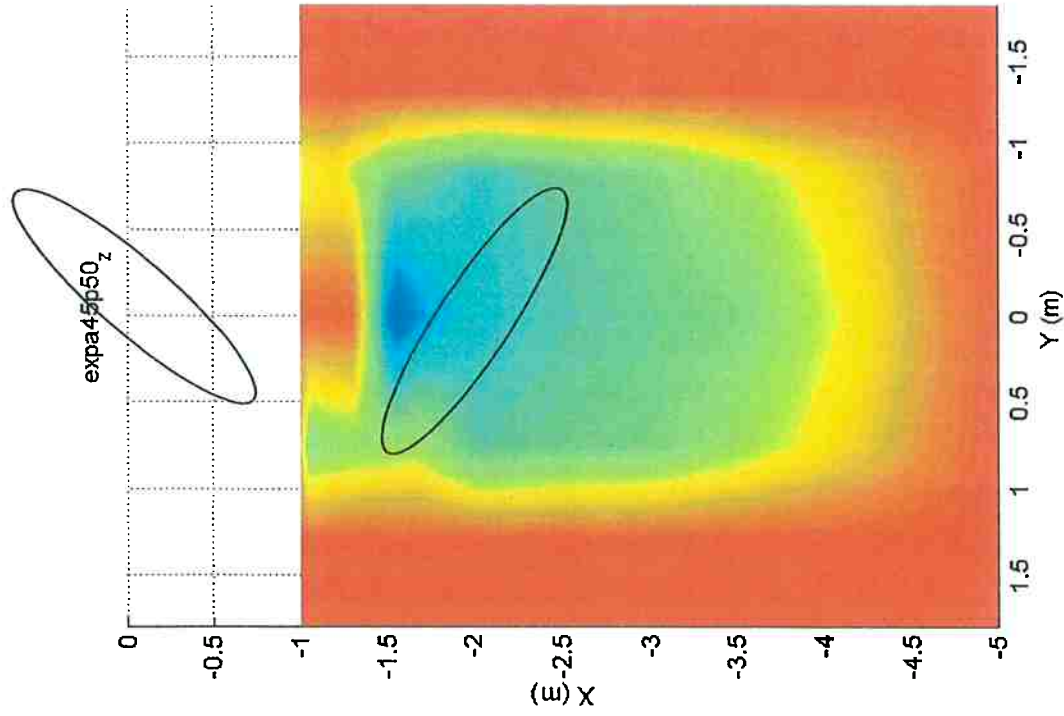


Fig.A-45a – Mapa experimental; Momento Z; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -135°); shuttle (40% calado; 130°)

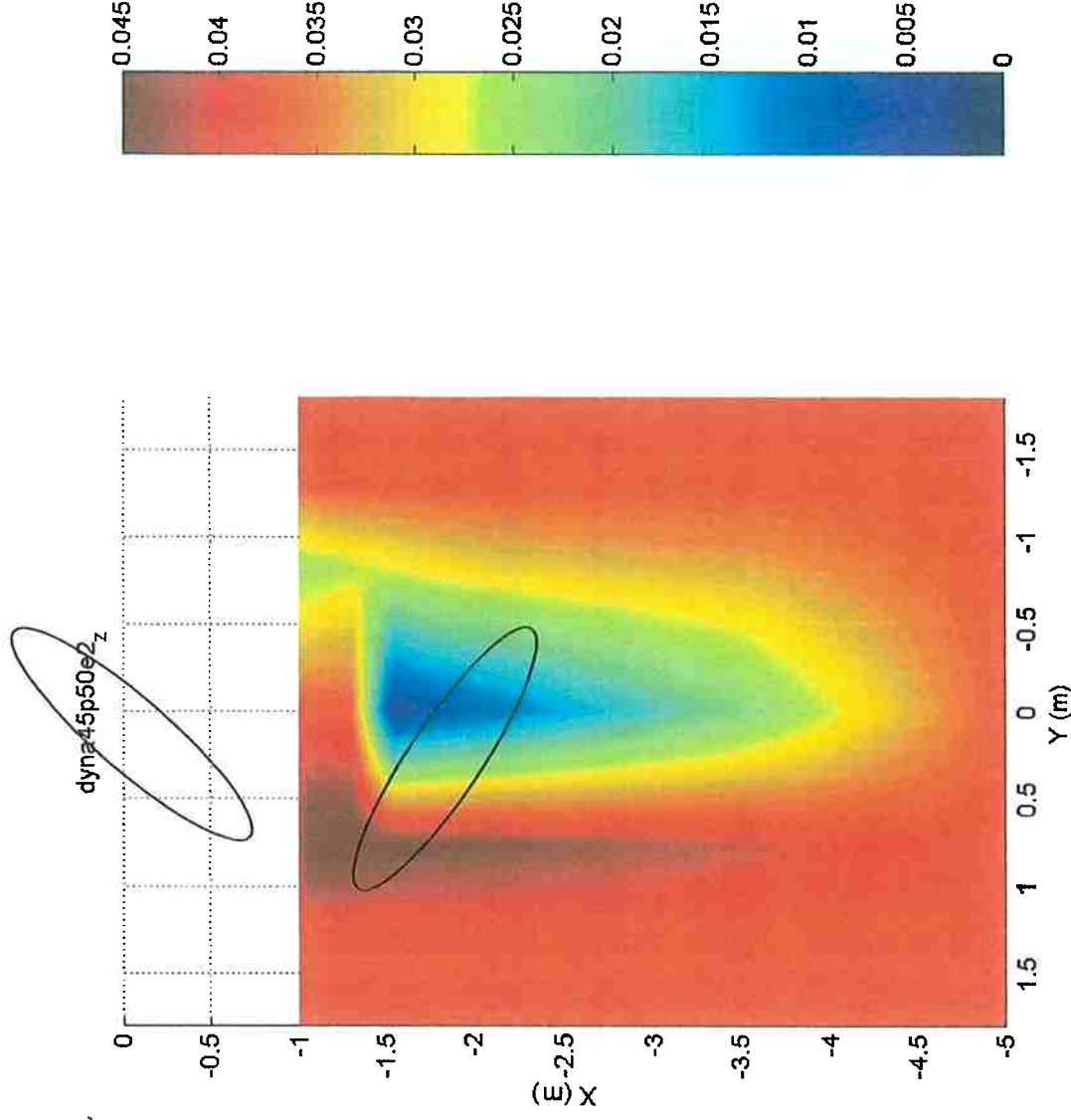


Fig.A-45b – Mapa numérico; Momento Z; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -135°); shuttle (40% calado; 130°)

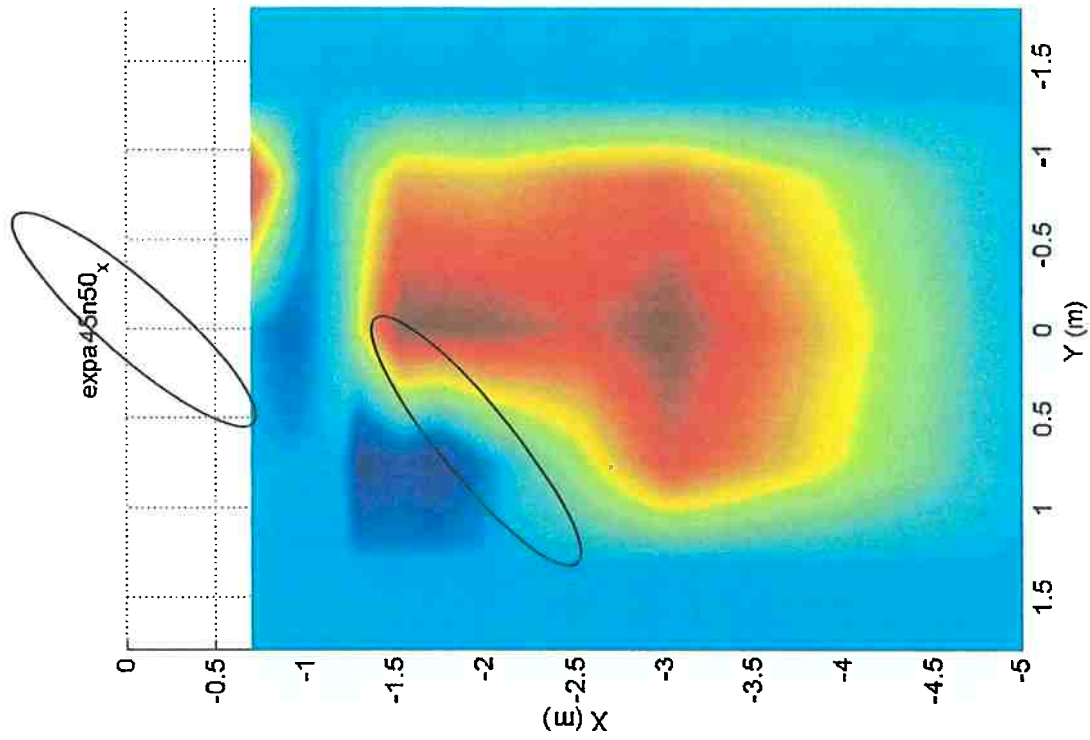


Fig.A-46a – Mapa experimental; Força X; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; -130°)

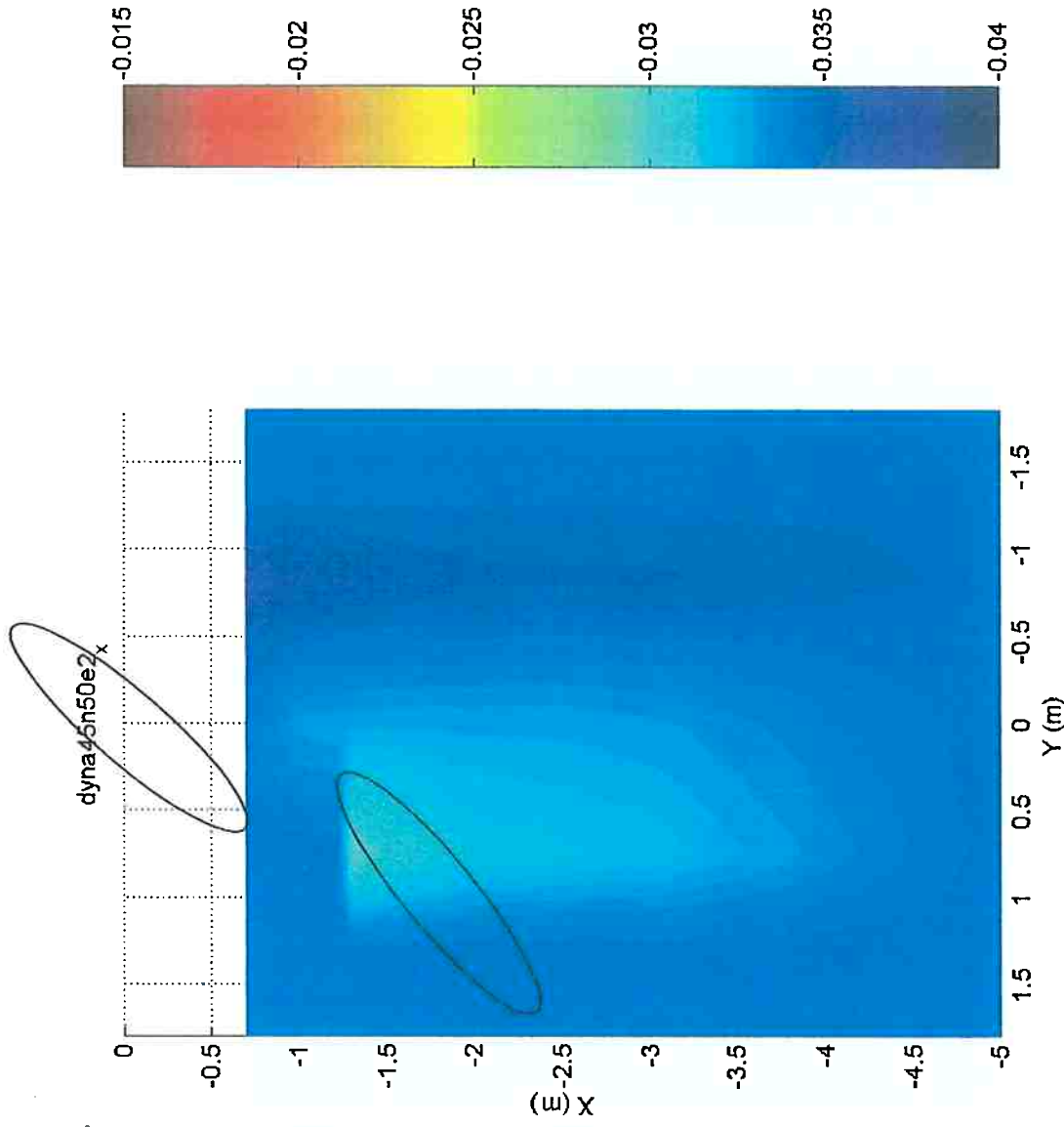


Fig.A-46b – Mapa numérico; Força X; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; -130°)



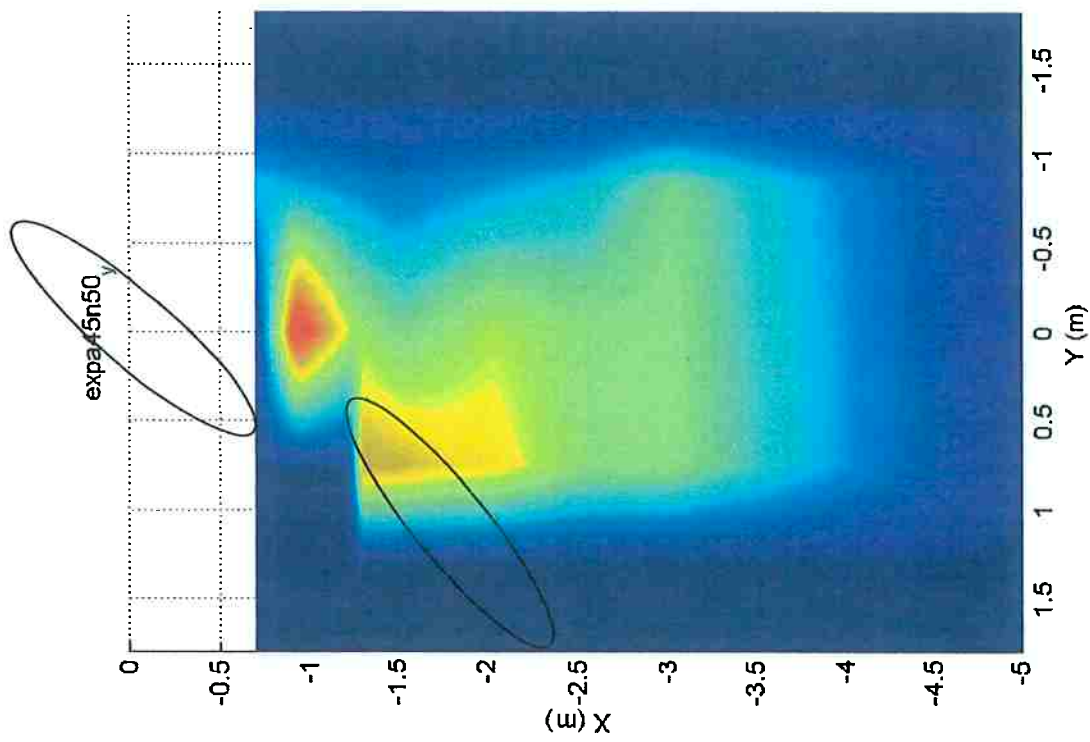


Fig.A-47a – Mapa experimental; Força Y; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; -130°)

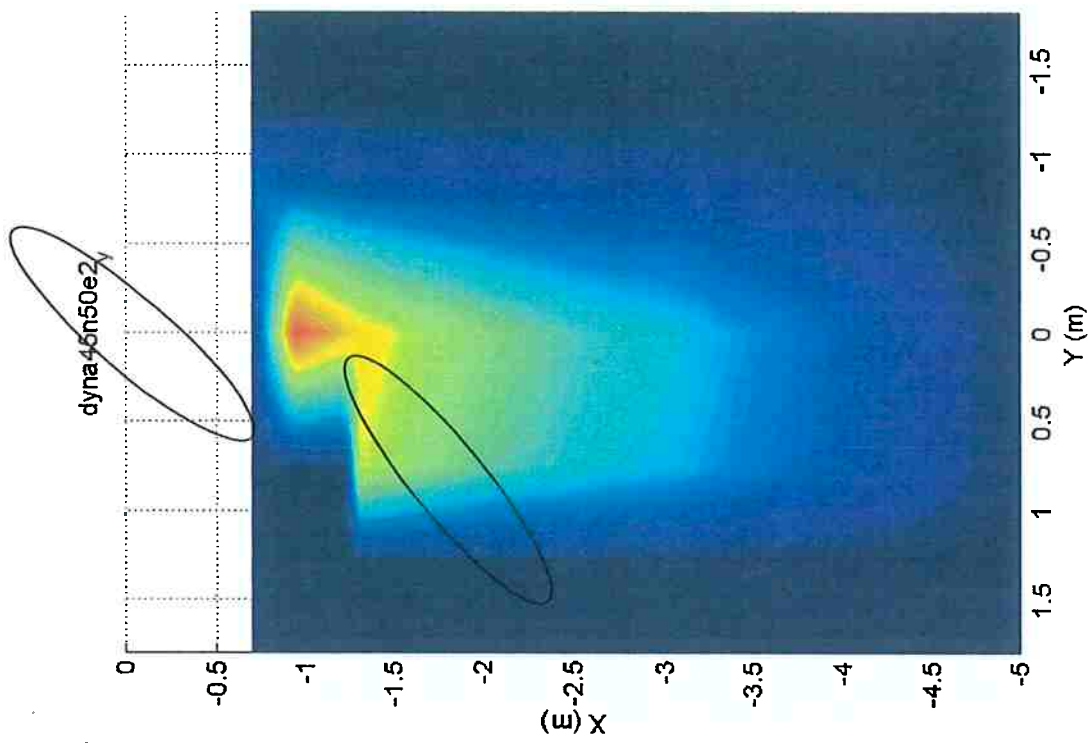


Fig.A-47b – Mapa numérico; Força Y; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; -130°)

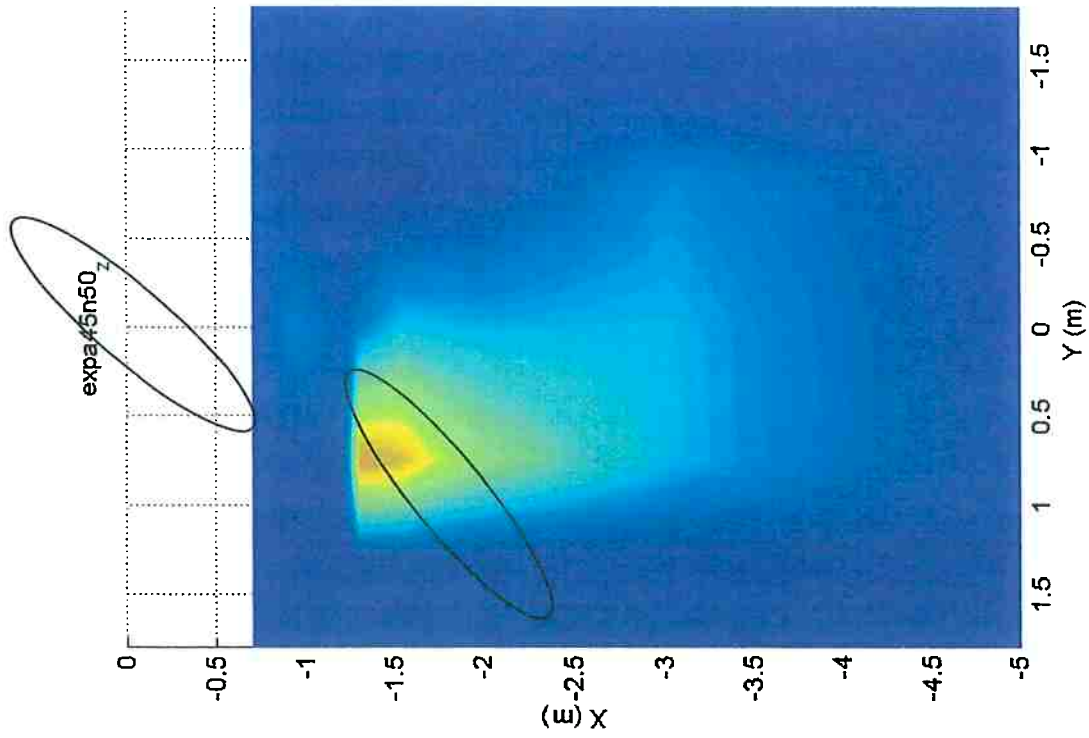


Fig.A-48a – Mapa experimental; Momento Z; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; -130°)

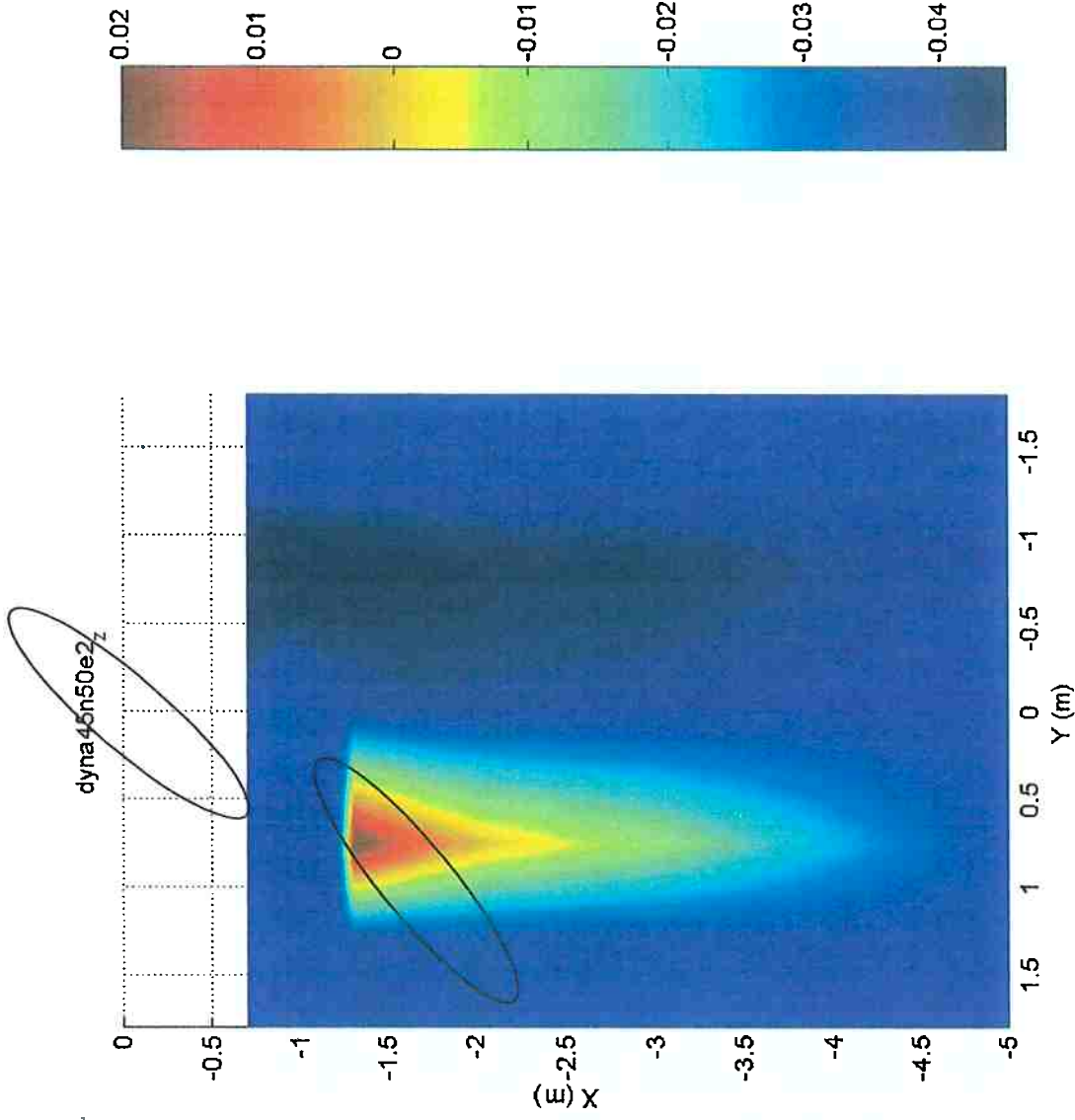


Fig.A-48b – Mapa numérico; Momento Z; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -135°); *shuttle* (40% calado; -130°)

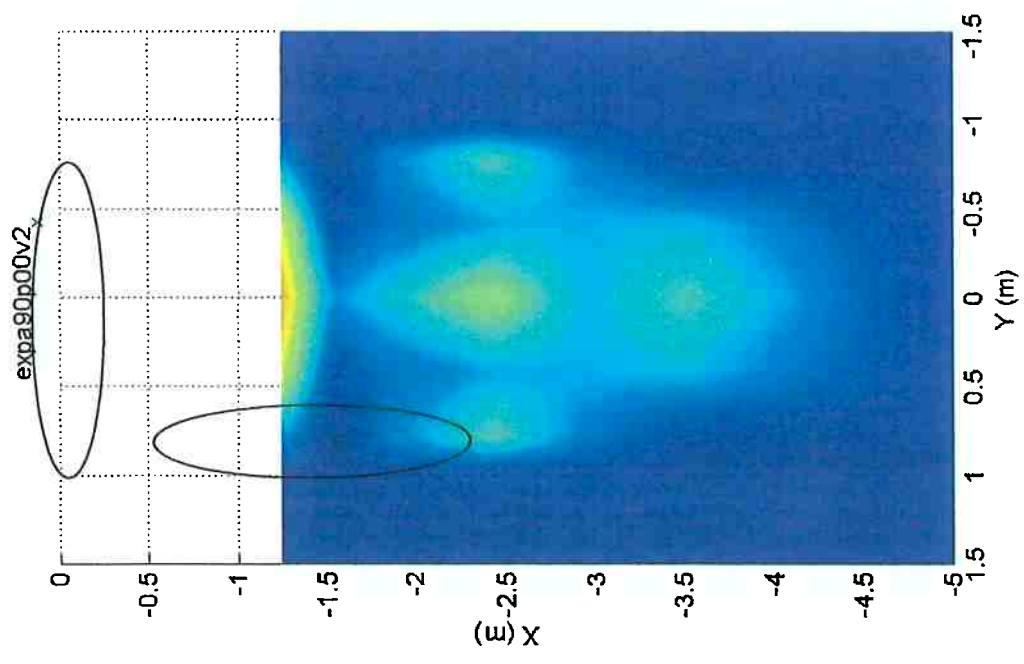


Fig.A-49a – Mapa experimental; Força X; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; 180°)

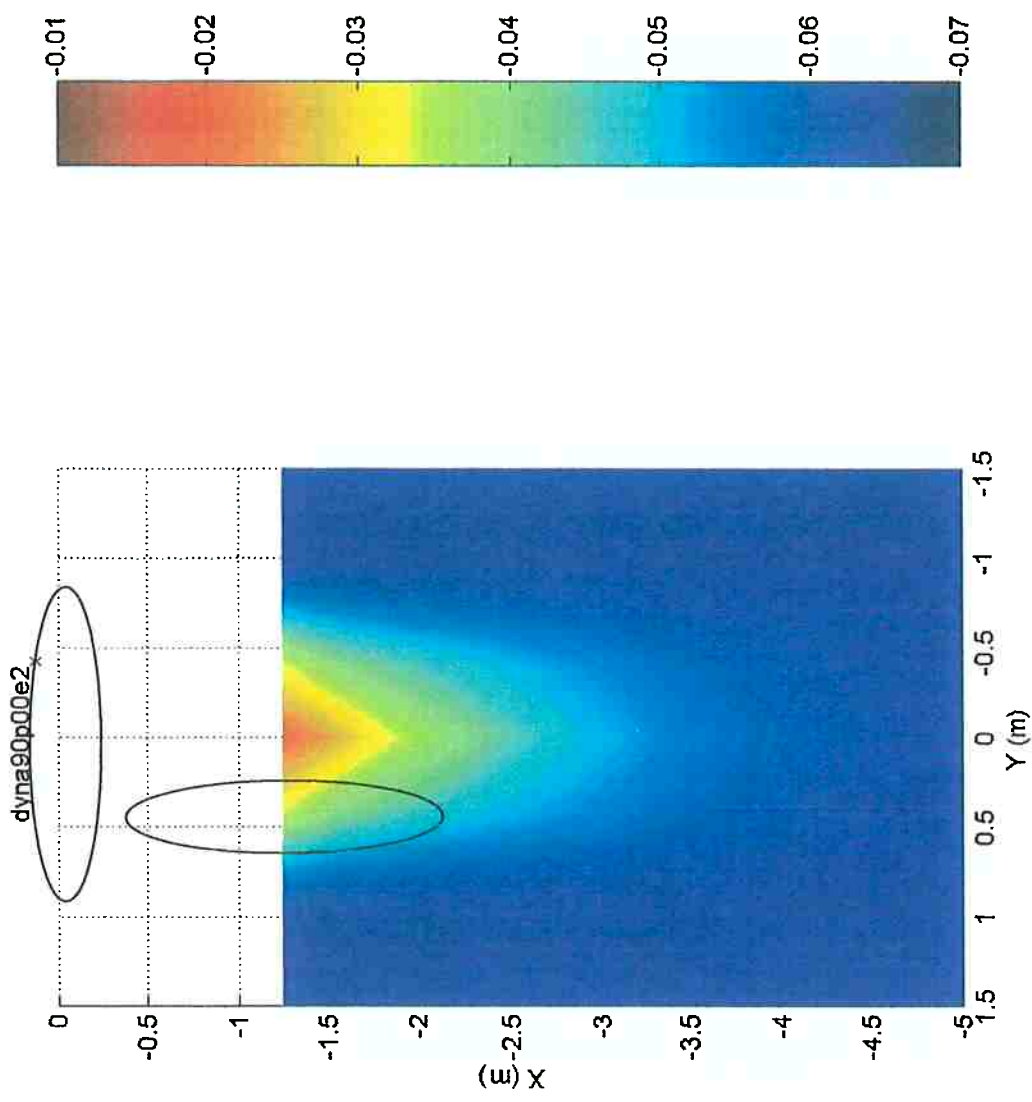


Fig.A-49b – Mapa numérico; Força X; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; 180°)

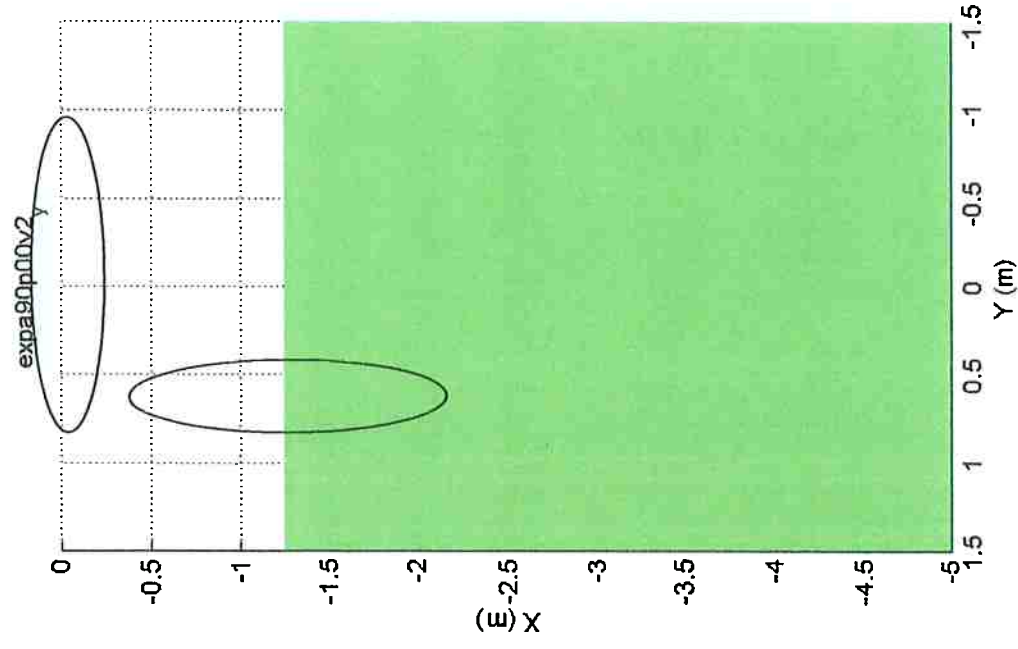


Fig.A-50a – Mapa experimental; Força Y; vel. 0.075m/s

FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; 180°)

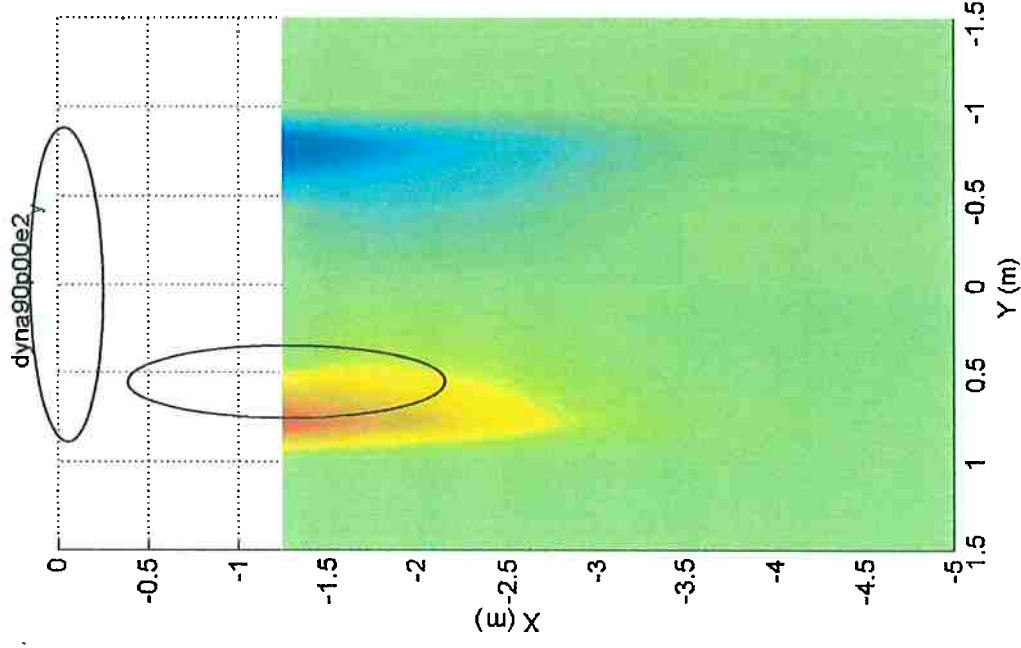
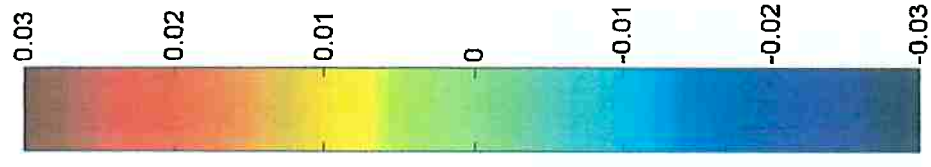


Fig.A-50b – Mapa numérico; Força Y; vel. 0.075m/s

FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; 180°)



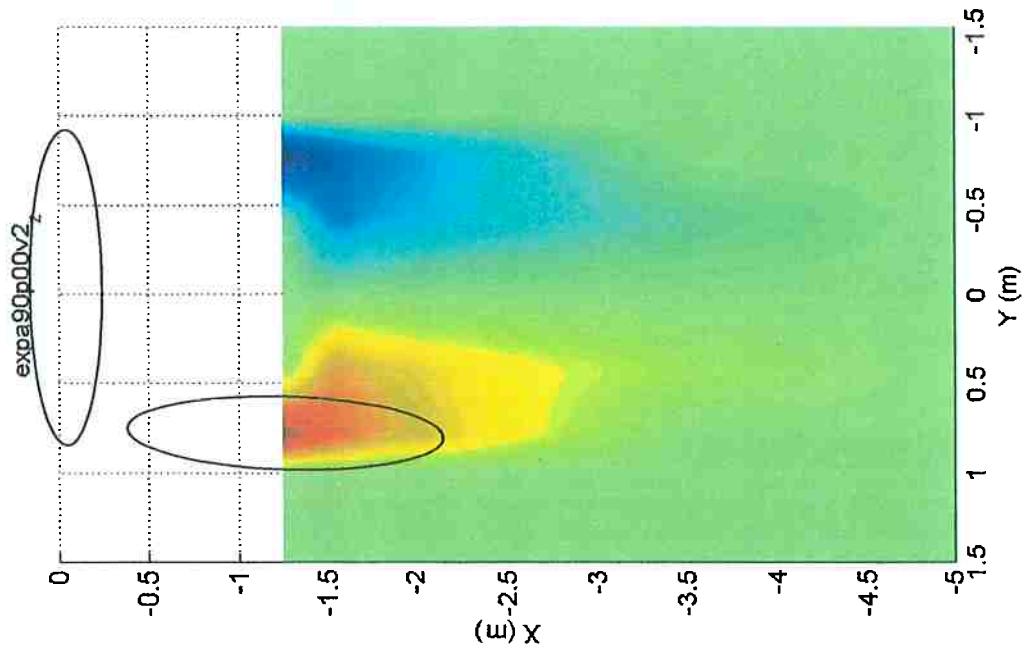


Fig.A-51a – Mapa experimental; Momento Z; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; 180°)

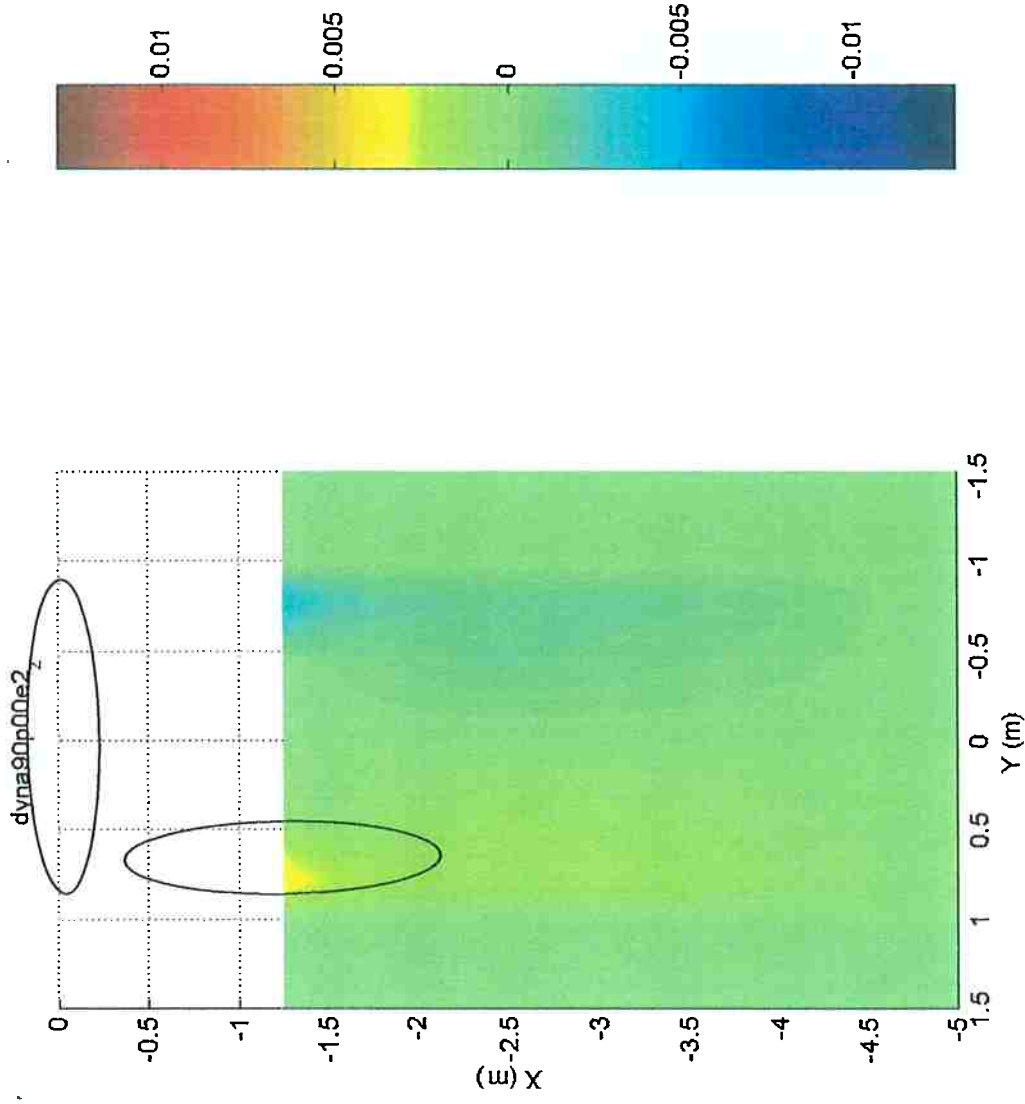


Fig.A-51b – Mapa numérico; Momento Z; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; 180°)

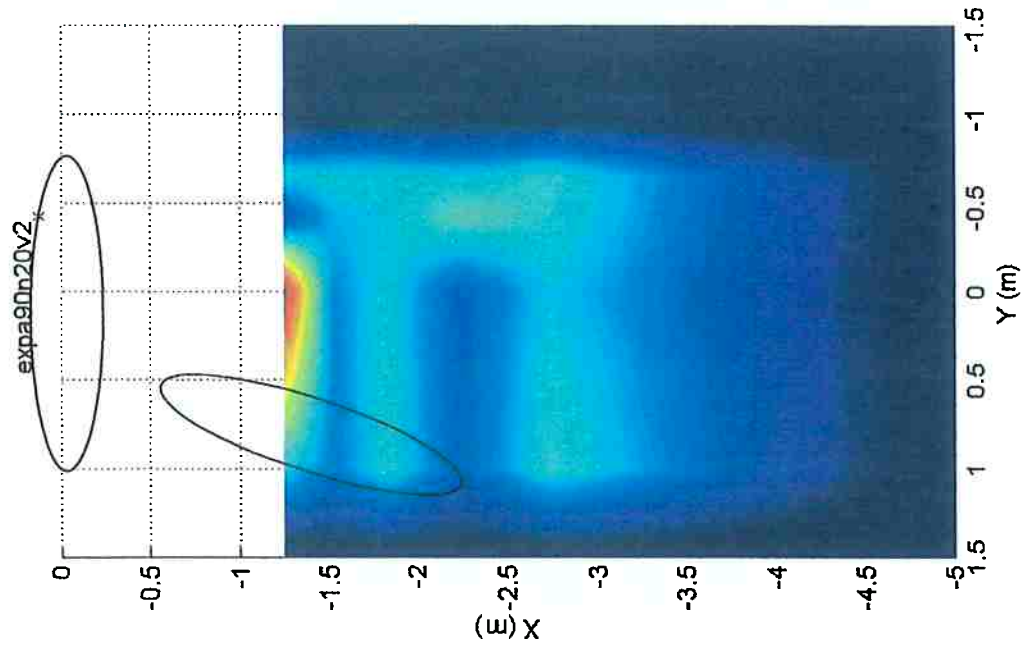


Fig.A-52a – Mapa experimental; Força X; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; -160°)

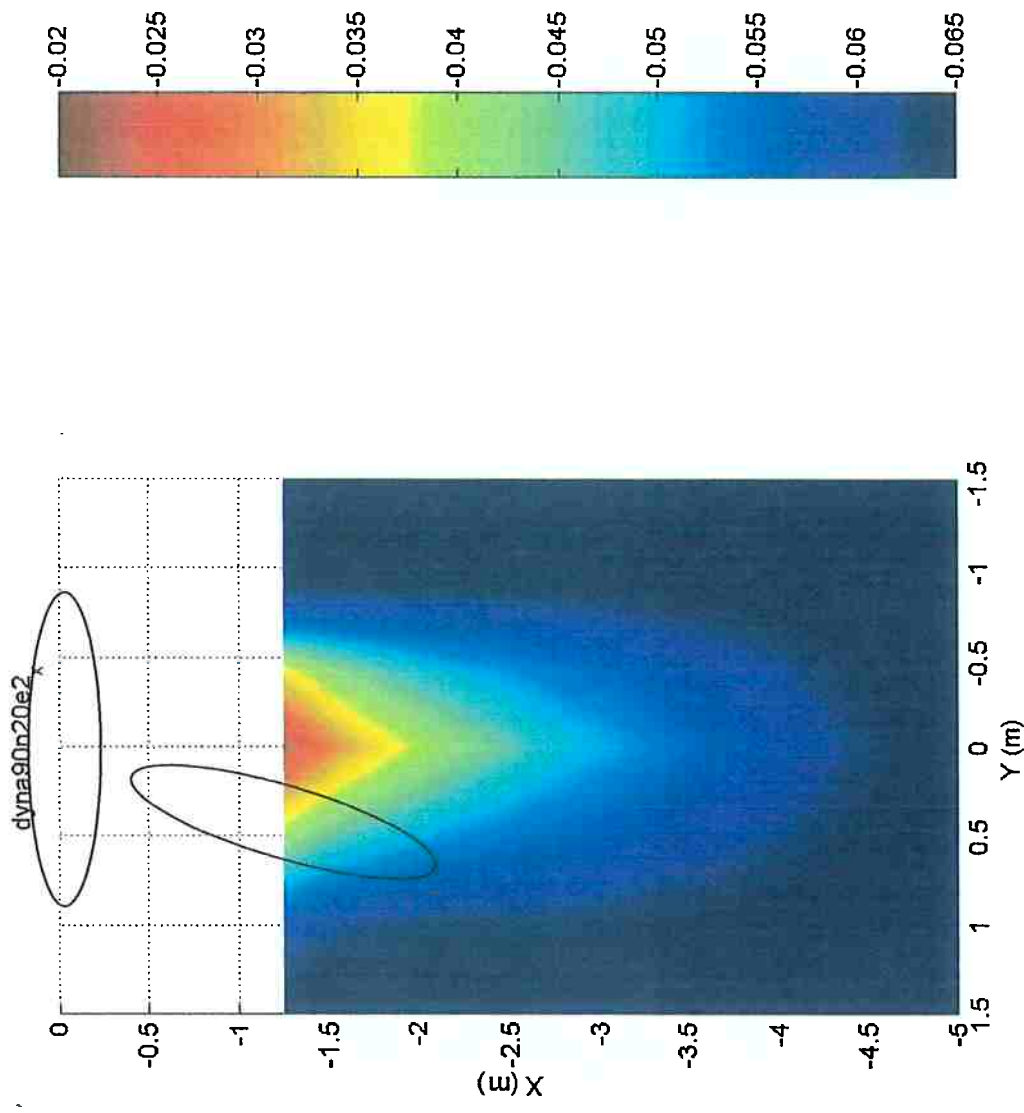


Fig.A-52b – Mapa numérico; Força X; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; -160°)

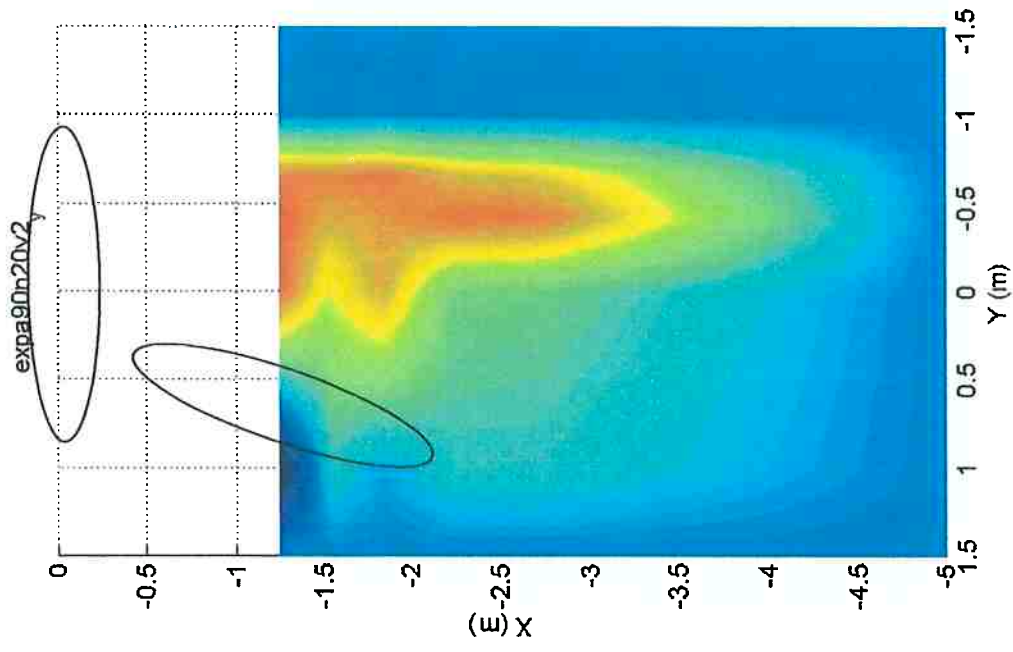


Fig.A-53a – Mapa experimental; Força Y; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; -160°)

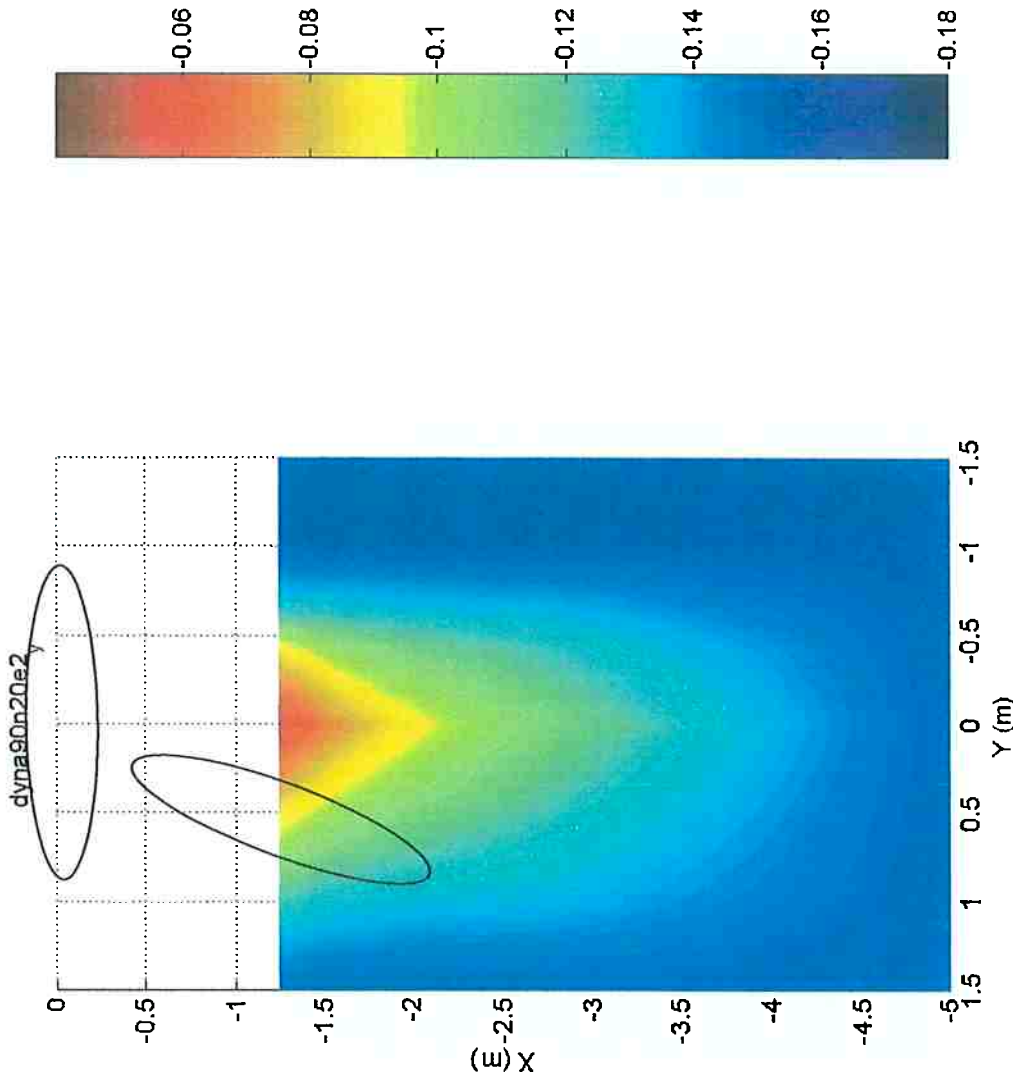


Fig.A-53b – Mapa numérico; Força Y; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; -160°)

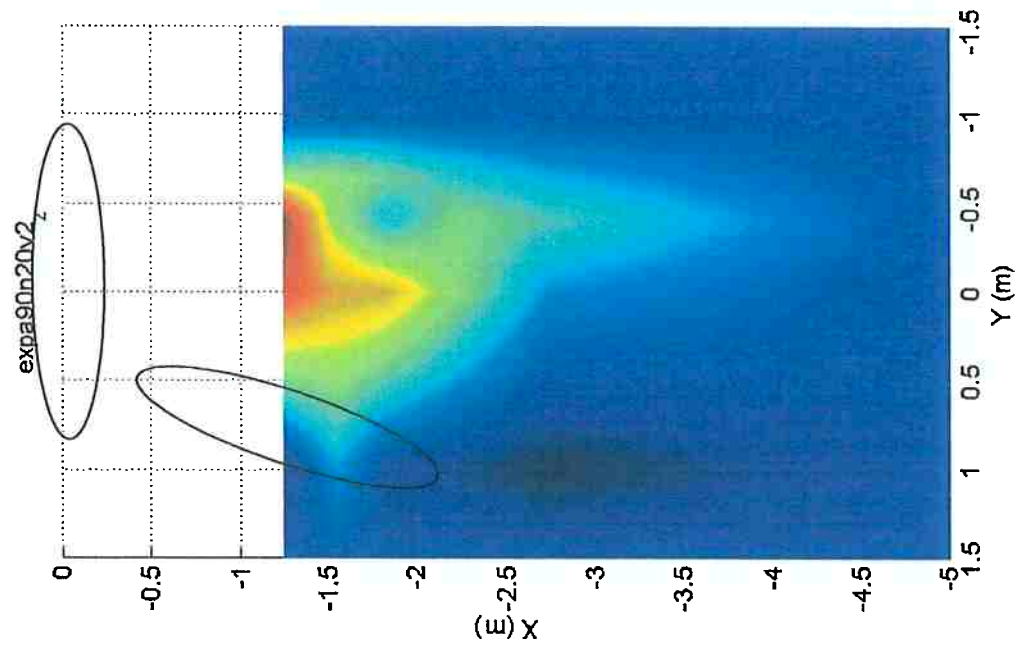


Fig.A-54a – Mapa experimental; Momento Z; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; -160°)

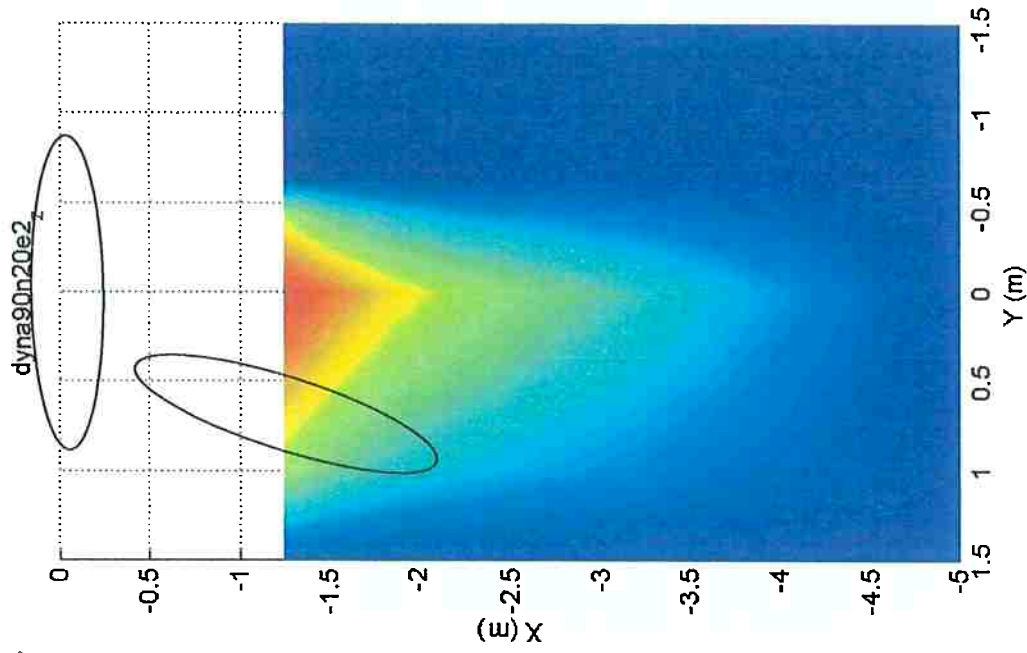
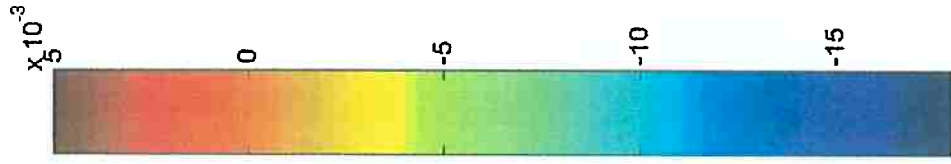


Fig.A-54b – Mapa numérico; Momento Z; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; -160°)





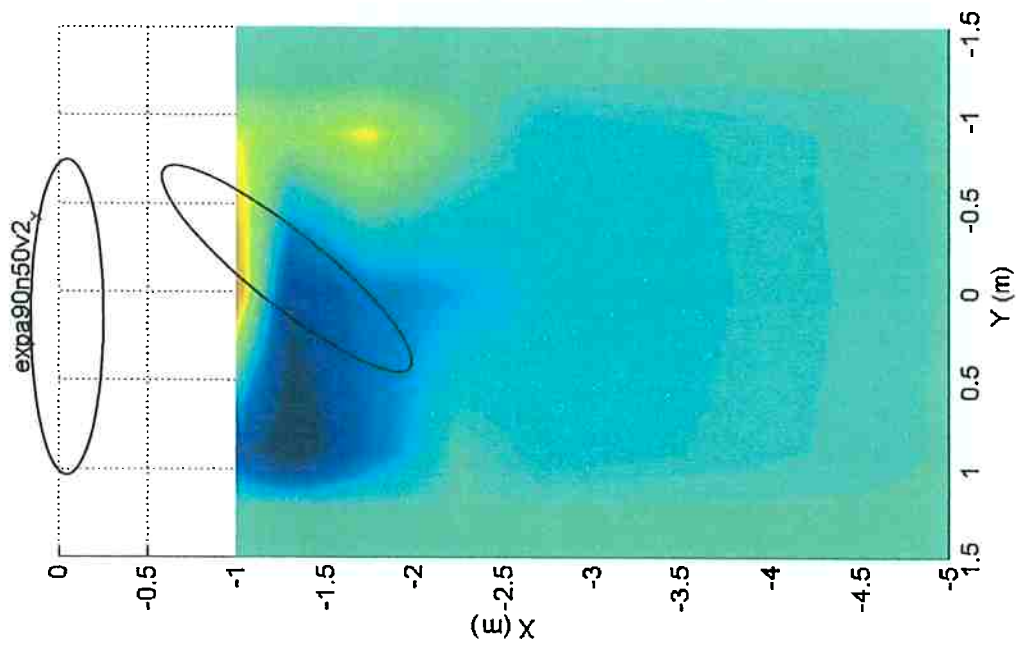


Fig.A-55a – Mapa experimental; Força X; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; -130°)

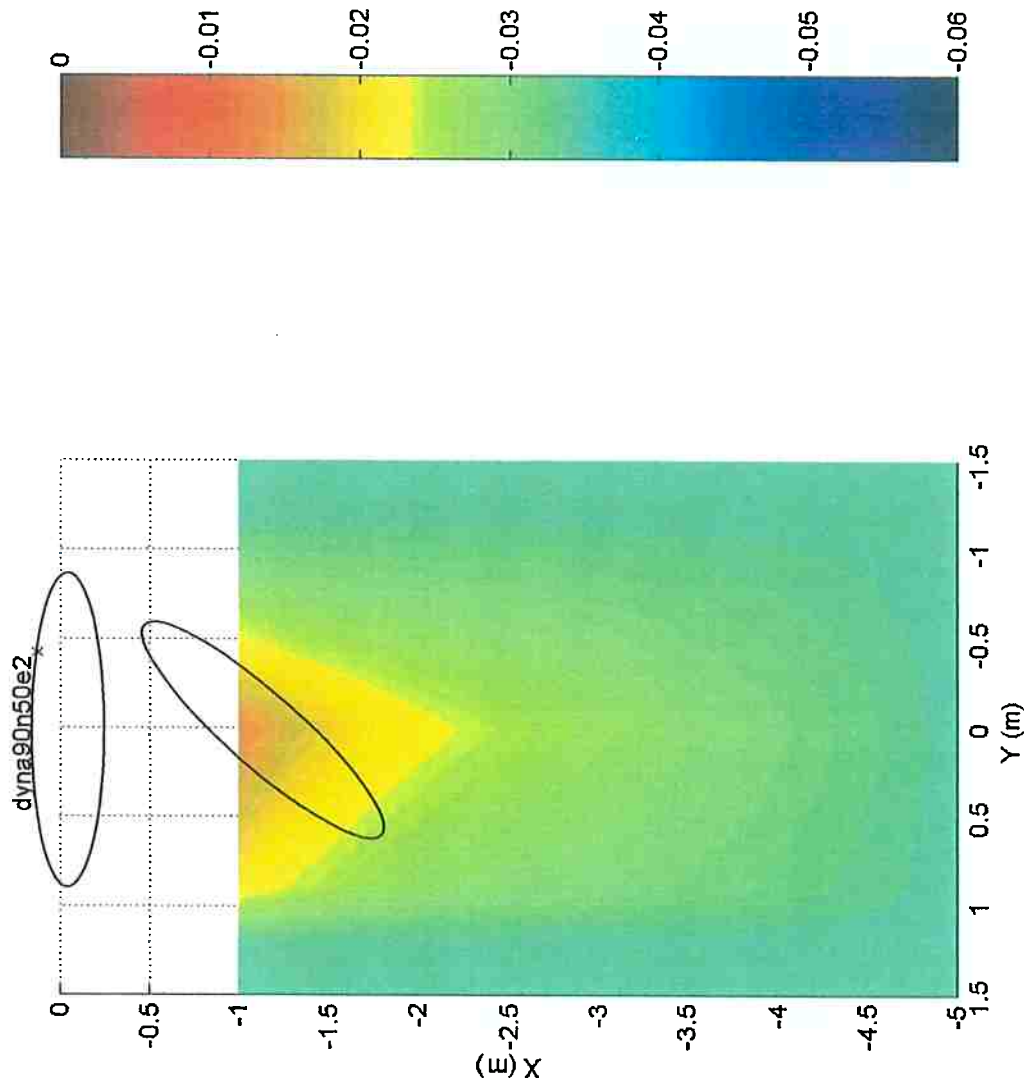


Fig.A-55b – Mapa numérico; Força X; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; -130°)

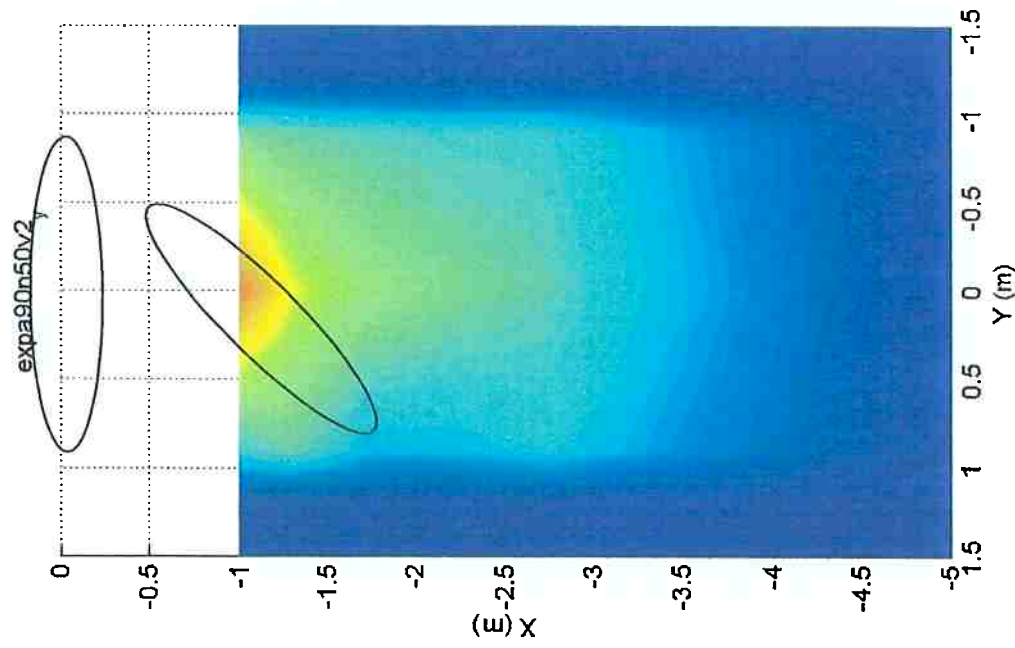


Fig.A-56a – Mapa experimental; Força Y; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; -130°)

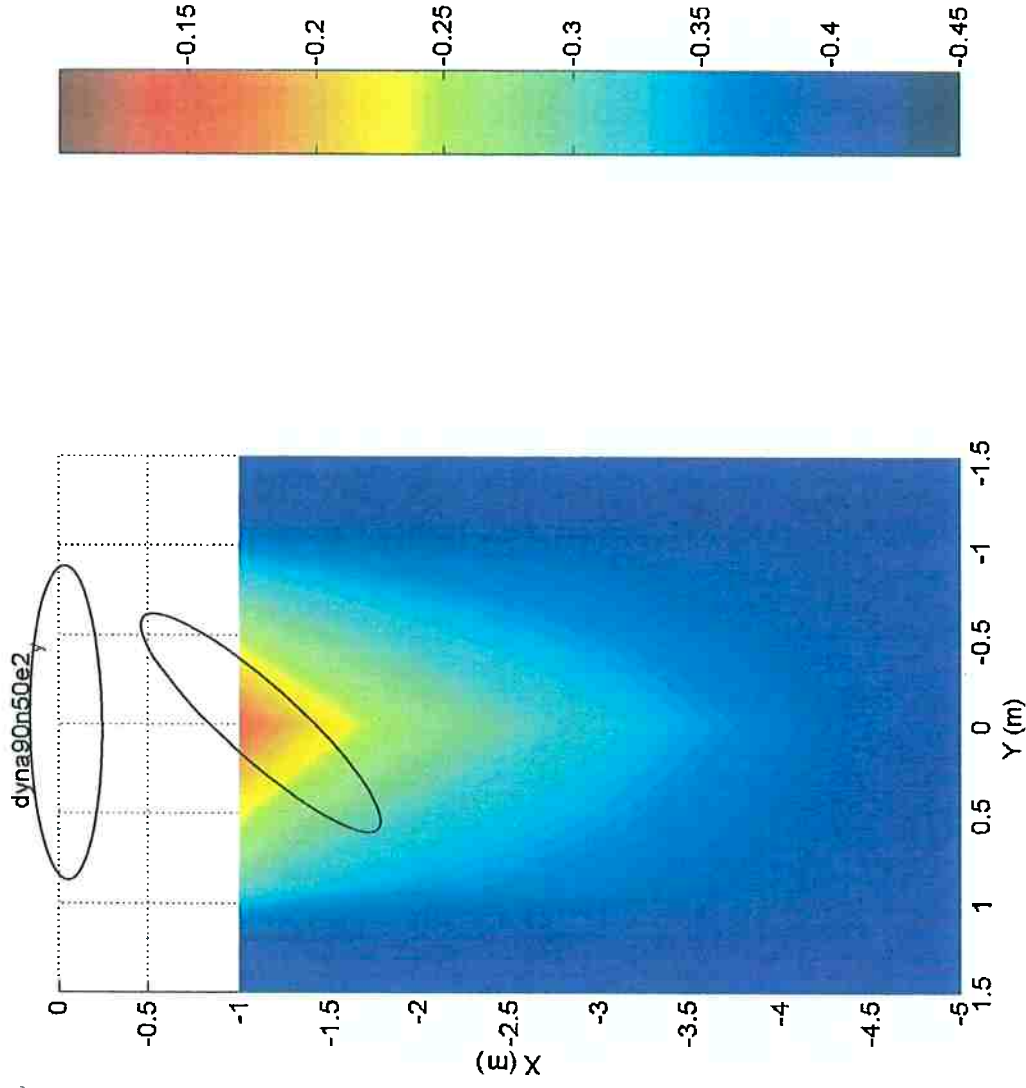


Fig.A-56b – Mapa numérico; Força Y; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; -130°)

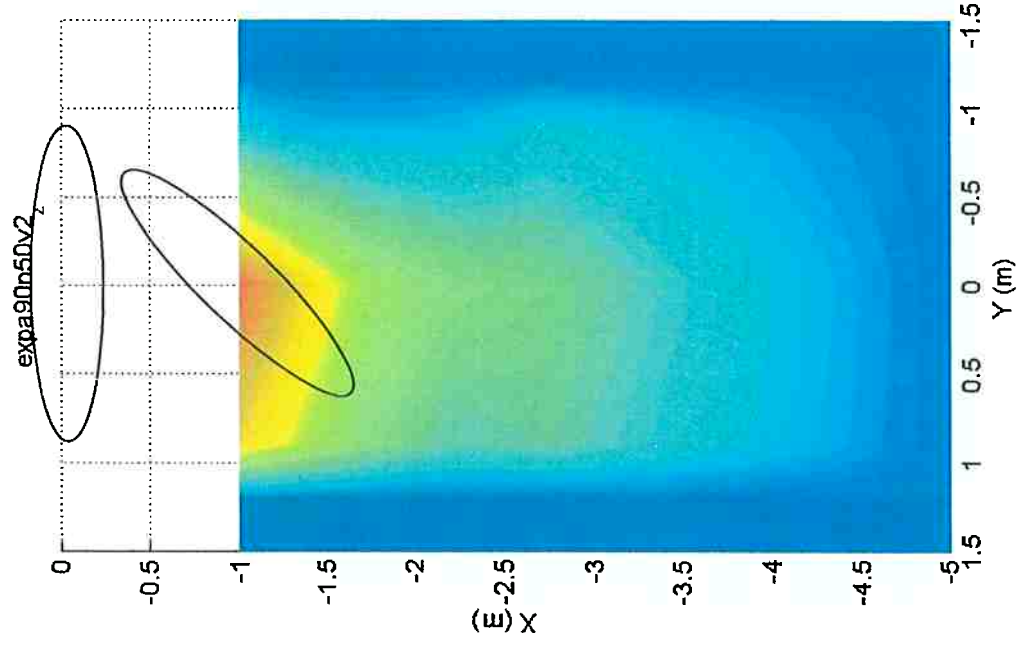


Fig.A-57a – Mapa experimental; Momento Z; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; -130°)

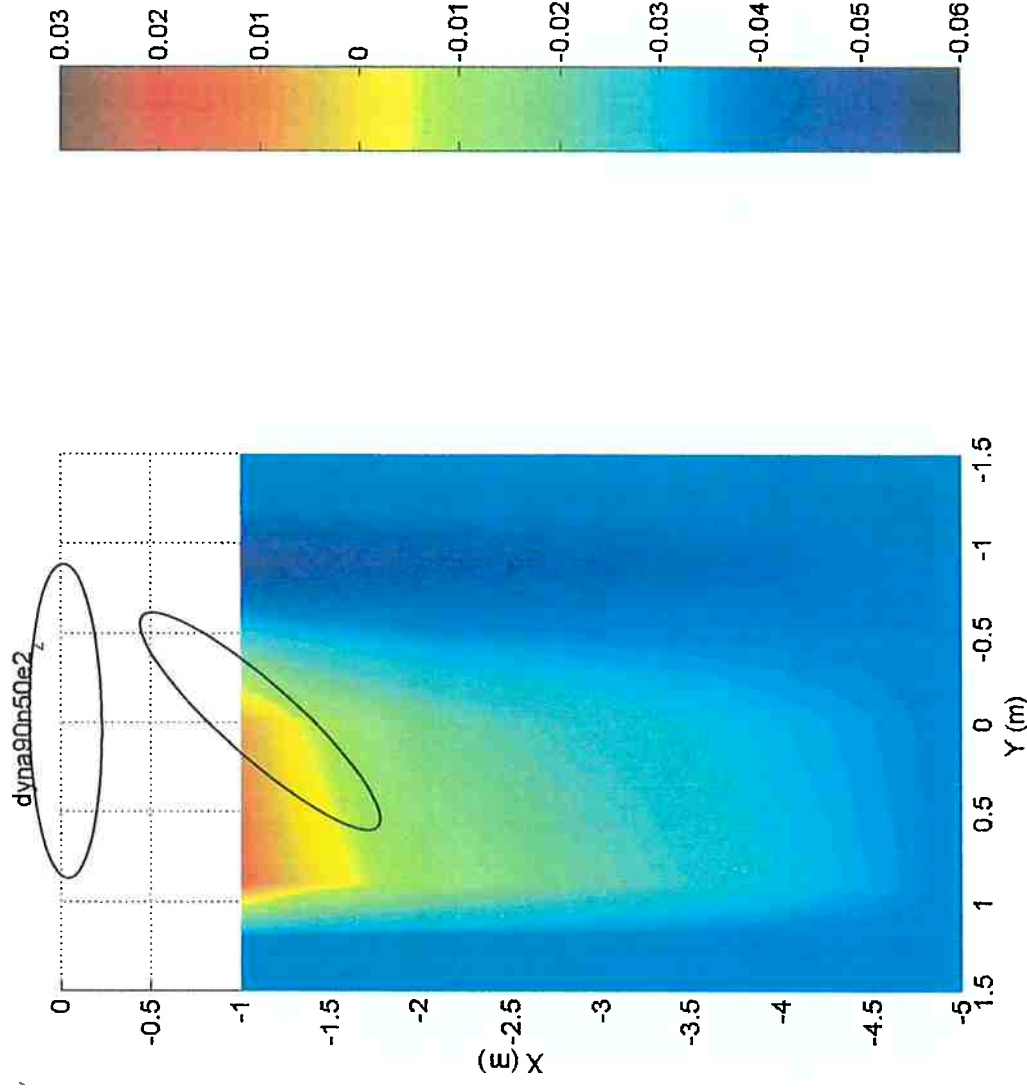


Fig.A-57b – Mapa numérico; Momento Z; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -90°); *shuttle* (40% calado; -130°)

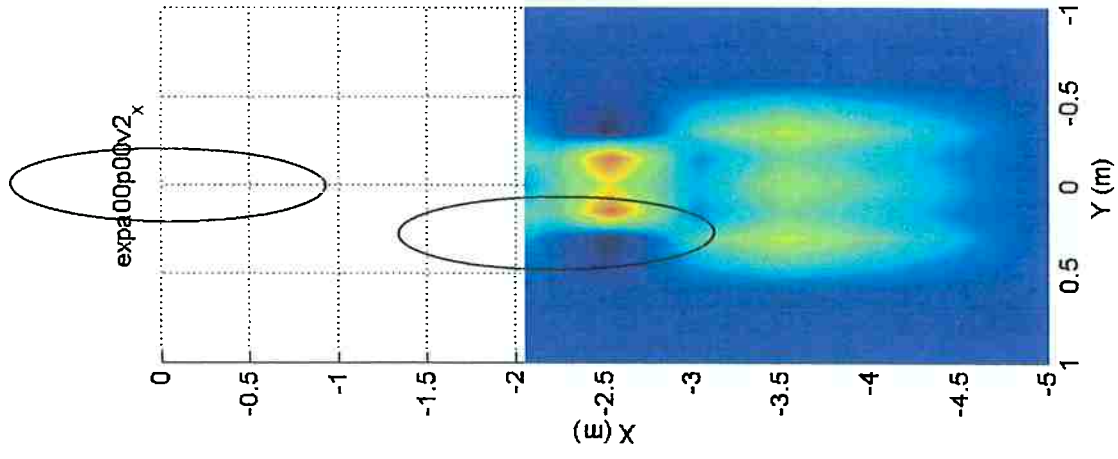


Fig.A-58a – Mapa experimental; Força X; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; 180°)

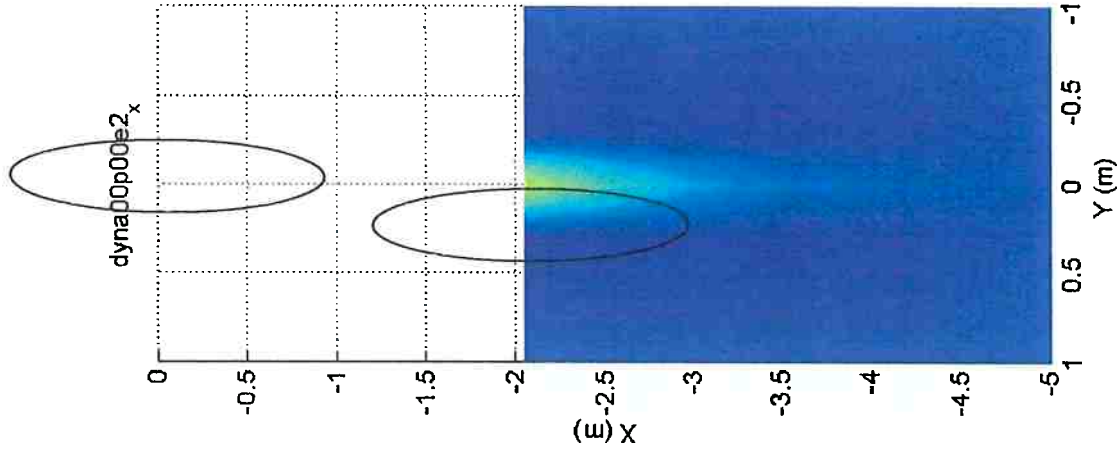
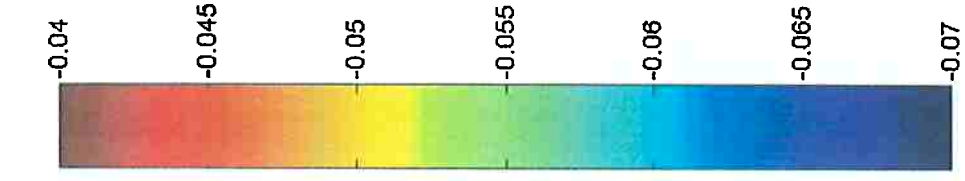


Fig.A-58b – Mapa numérico; Força X; vel. 0.075m/s



FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; 180°)

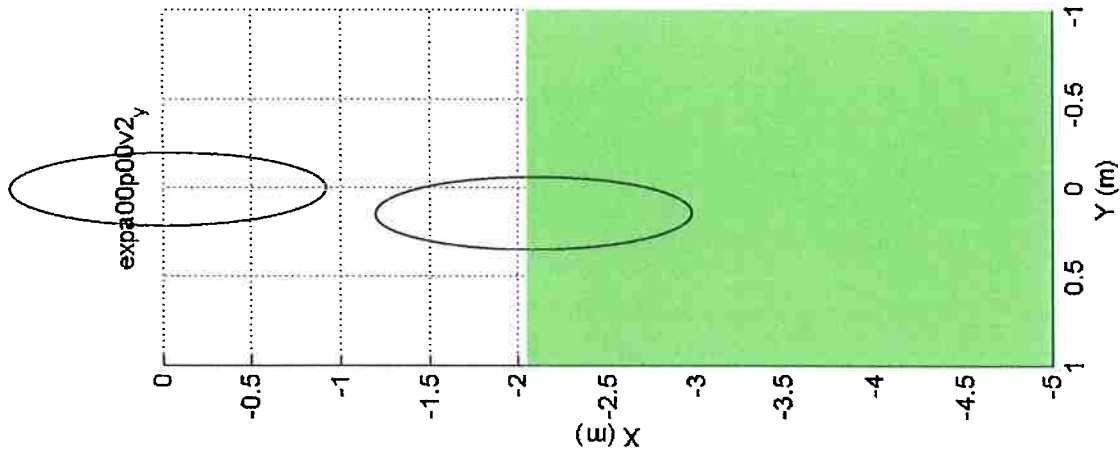


Fig.A-59a – Mapa experimental; Força Y; vel. 0.075m/s

FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; 180°)

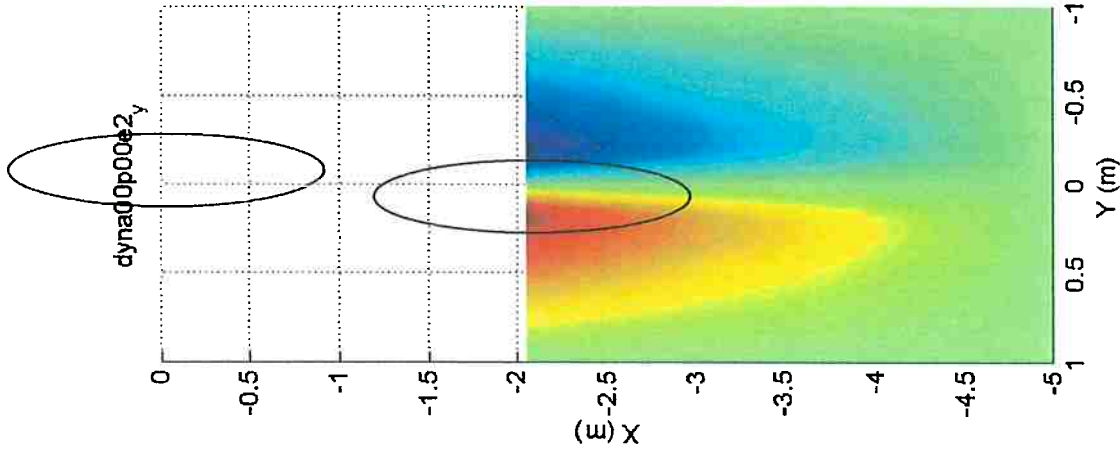
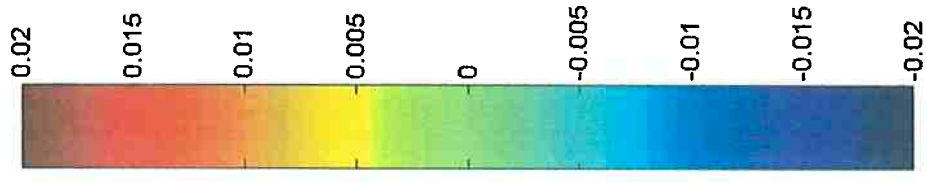


Fig.A-59b – Mapa numérico; Força Y; vel. 0.075m/s

FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; 180°)



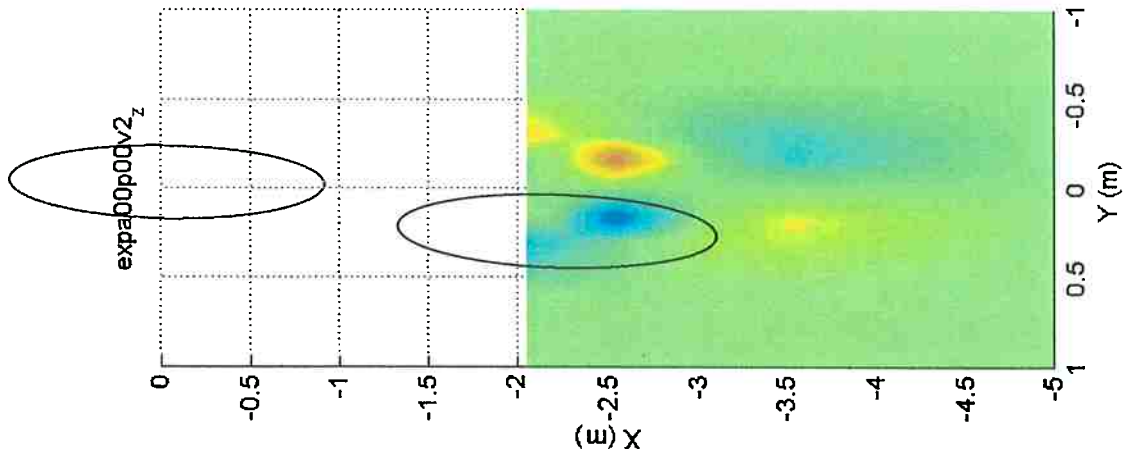


Fig.A-60a – Mapa experimental; Momento Z; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -180°); shuttle (40% calado; 180°)

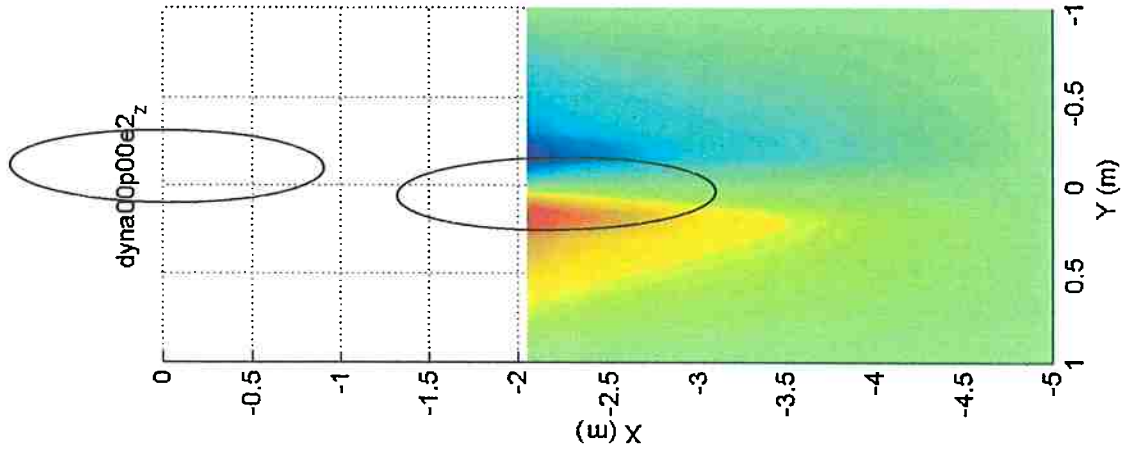
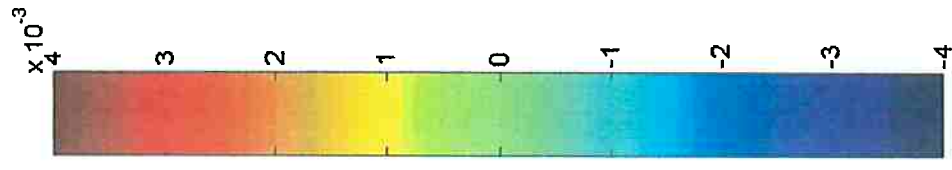


Fig.A-60b – Mapa numérico; Momento Z; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -180°); shuttle (40% calado; 180°)



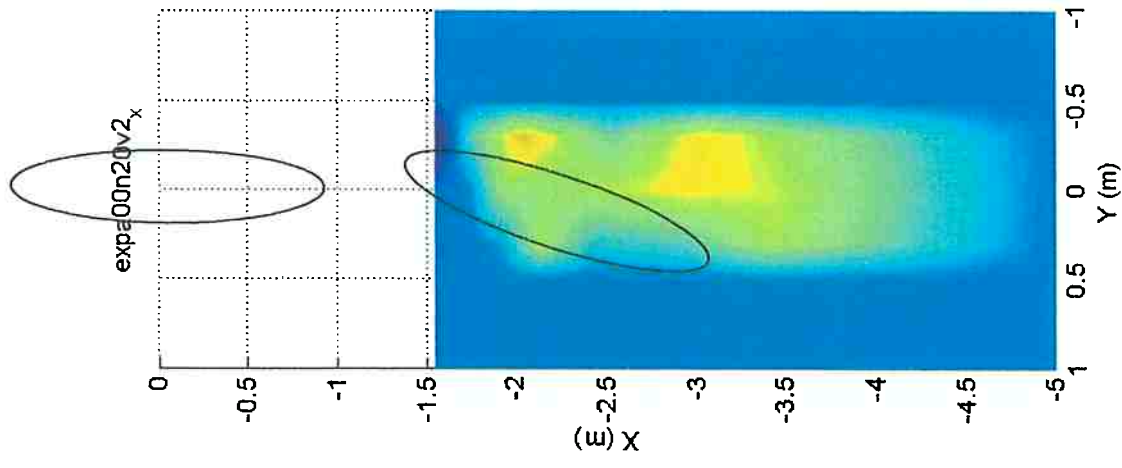


Fig.A-61a – Mapa experimental, Força X, vel. 0.075m/s

FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; -160°)

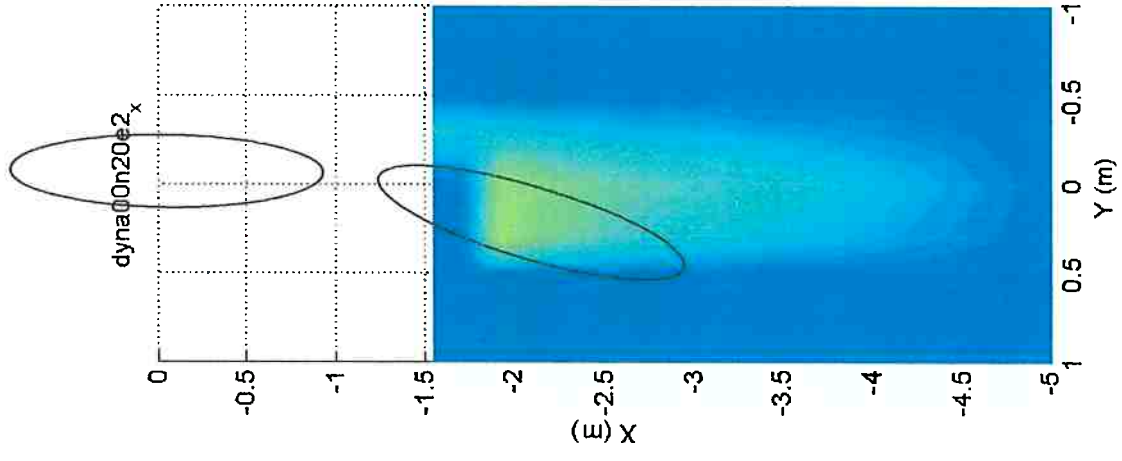


Fig.A-61b – Mapa numérico, Força X, vel. 0.075m/s

FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; -160°)

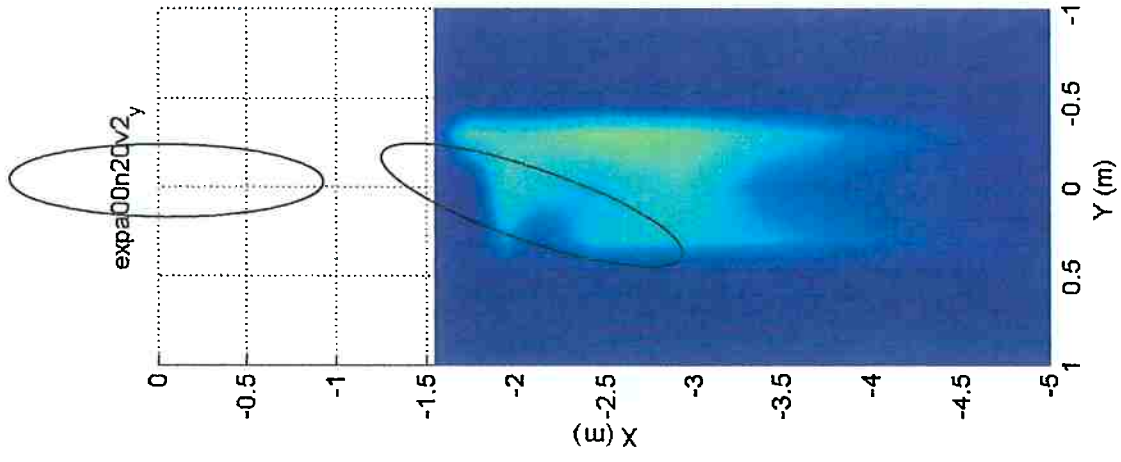


Fig.A-62a – Mapa experimental; Força Y; vel. 0.075m/s

FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; -160°)

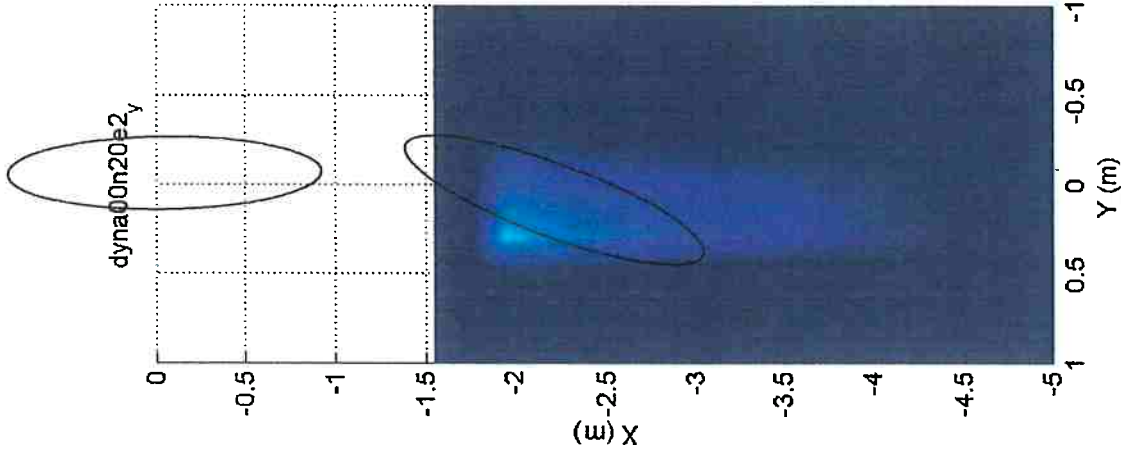


Fig.A-62b – Mapa numérico; Força Y; vel. 0.075m/s

FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; -160°)



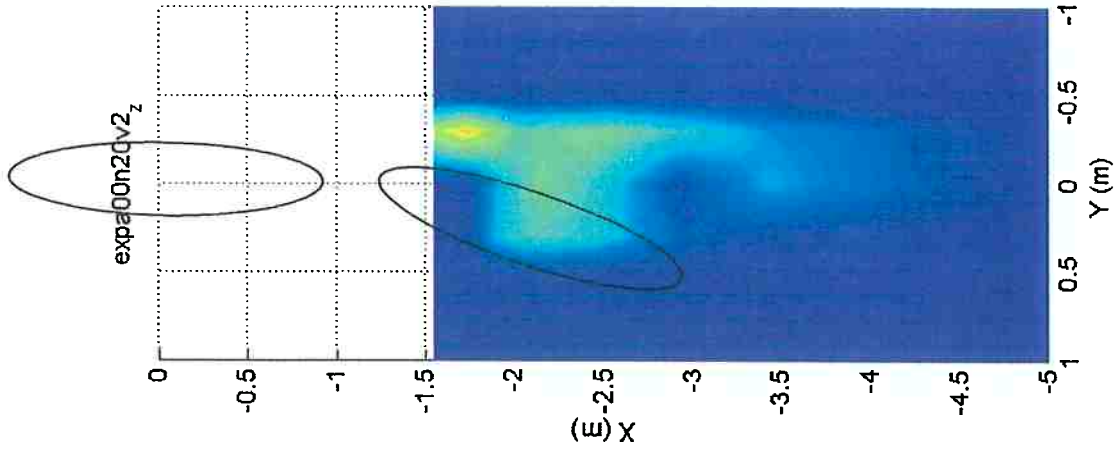


Fig.A-63a – Mapa experimental; Momento Z; vel. 0.075m/s  
 FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; -160°)

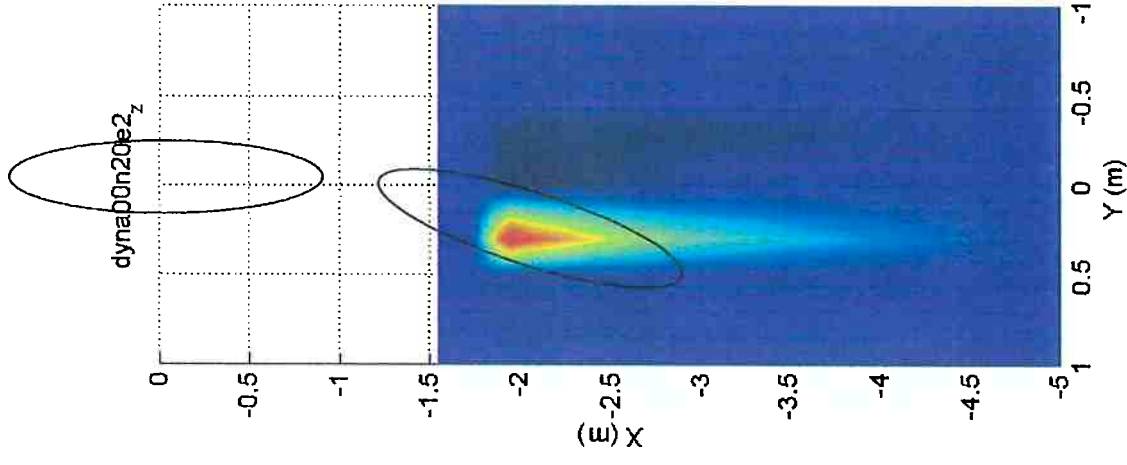


Fig.A-63b – Mapa numérico; Momento Z; vel. 0.075m/s  
 FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; -160°)

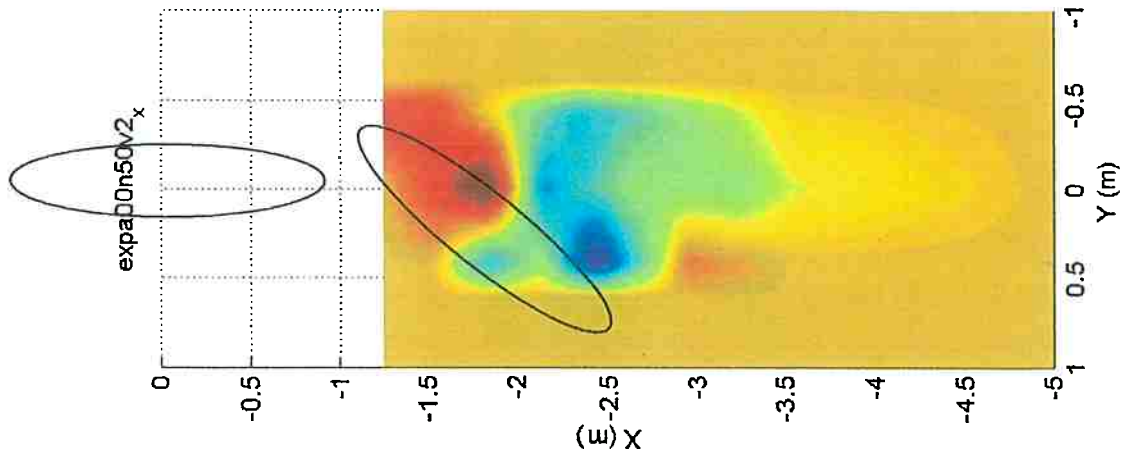


Fig.A-64a – Mapa experimental; Força X; vel. 0.075m/s

FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; -130°)

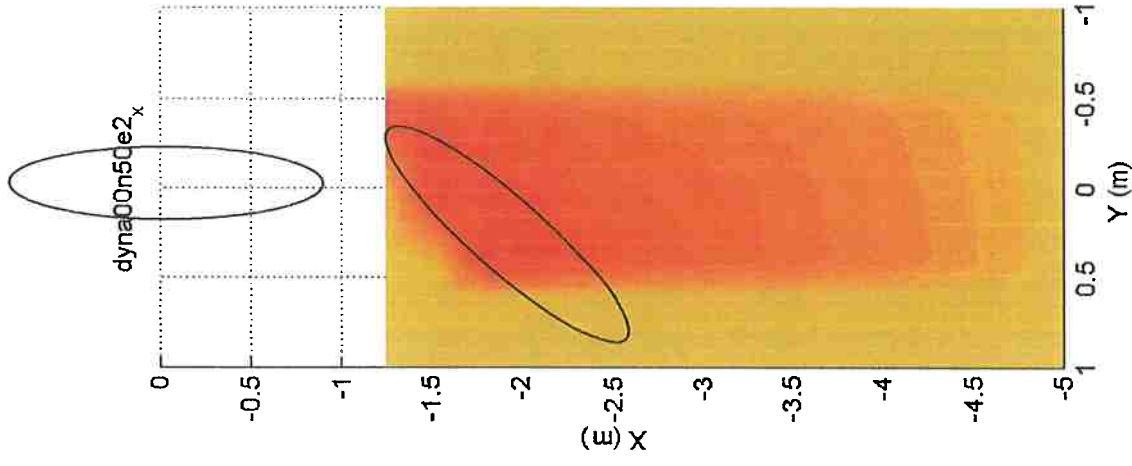


Fig.A-64b – Mapa numérico; Força X; vel. 0.075m/s

FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; -130°)

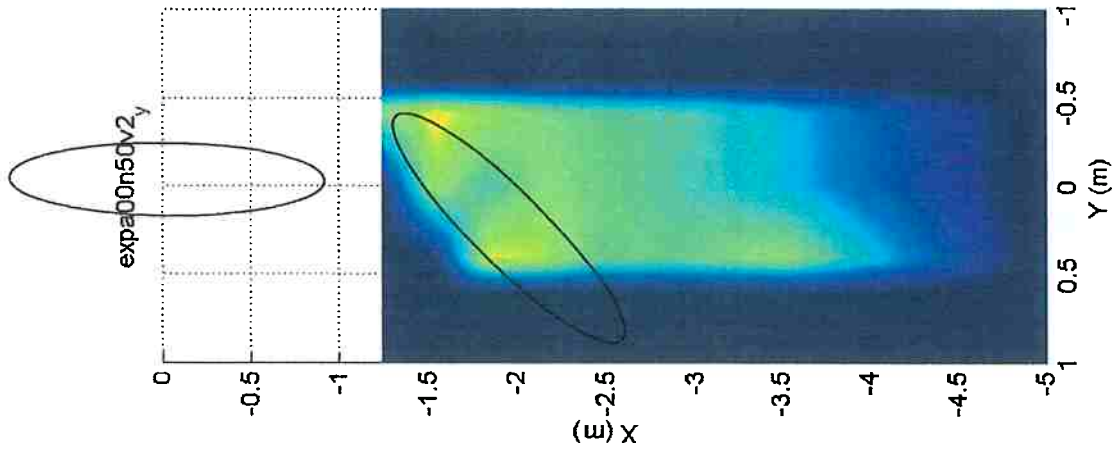


Fig.A-65a – Mapa experimental; Força Y; vel. 0.075m/s

FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; -130°)

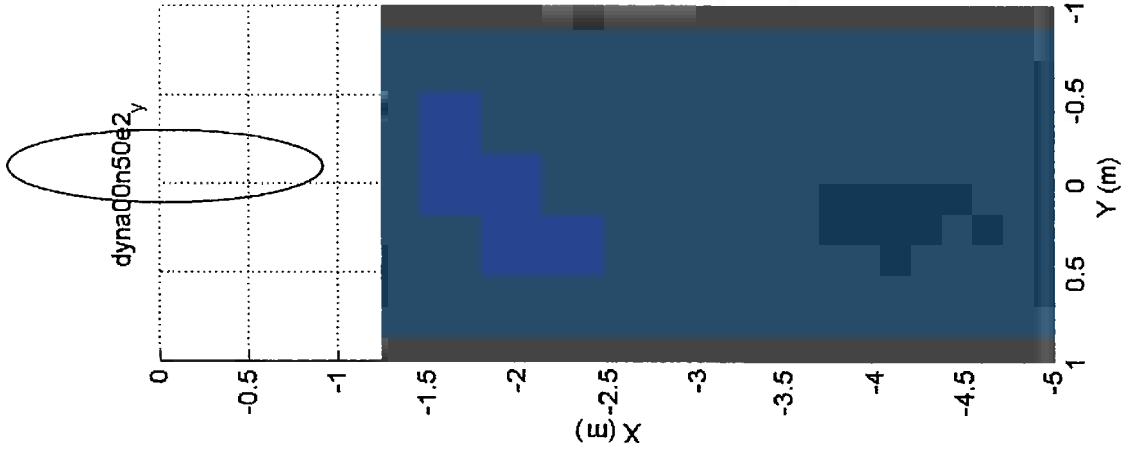
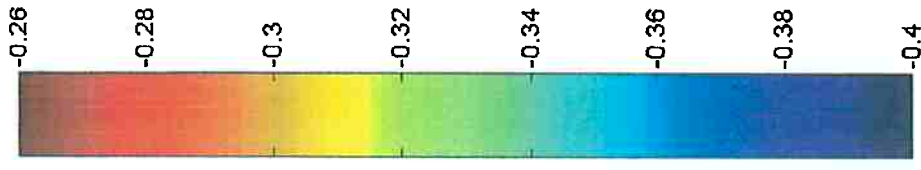


Fig.A-65b – Mapa numérico; Força Y; vel. 0.075m/s

FPSO (100% calado; -180°); *shuttle* (40% calado; -130°)



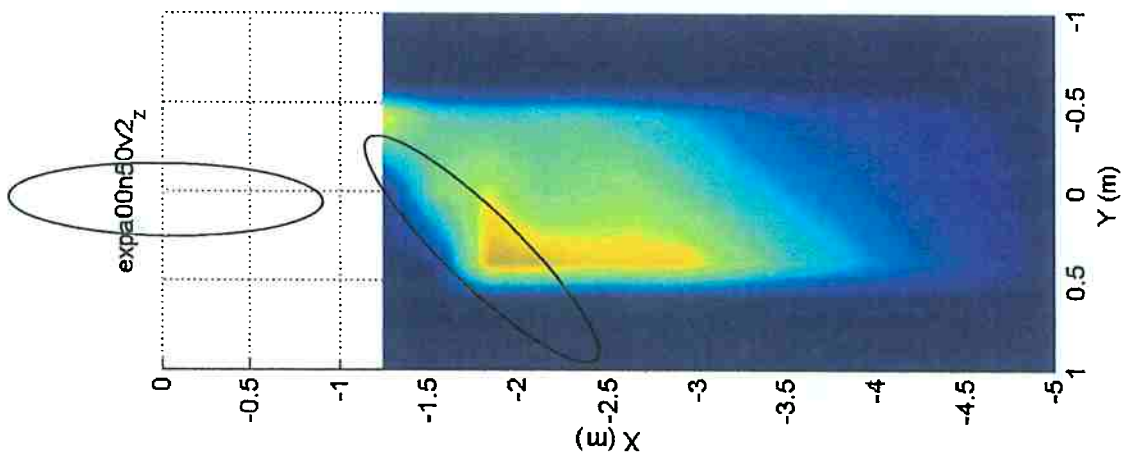


Fig.A-66a – Mapa experimental; Momento Z; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -180°); shuttle (40% calado; -130°)

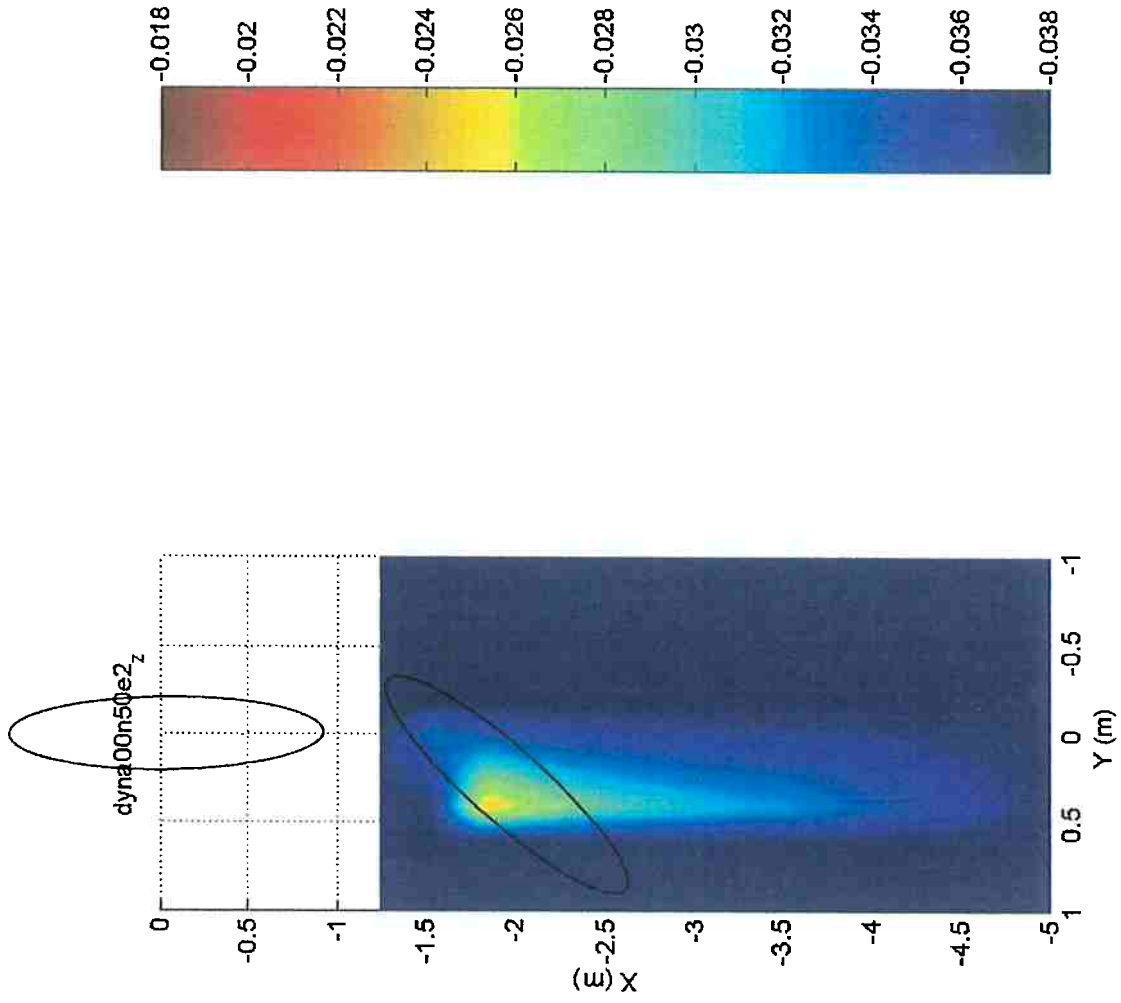


Fig.A-66b – Mapa numérico; Momento Z; vel. 0.075m/s  
FPSO (100% calado; -180°); shuttle (40% calado; -130°)

## **ANEXO – B**

*Comparações Numérico-Experimentais das Séries Temporais dos  
Ensaaios de Free Running*

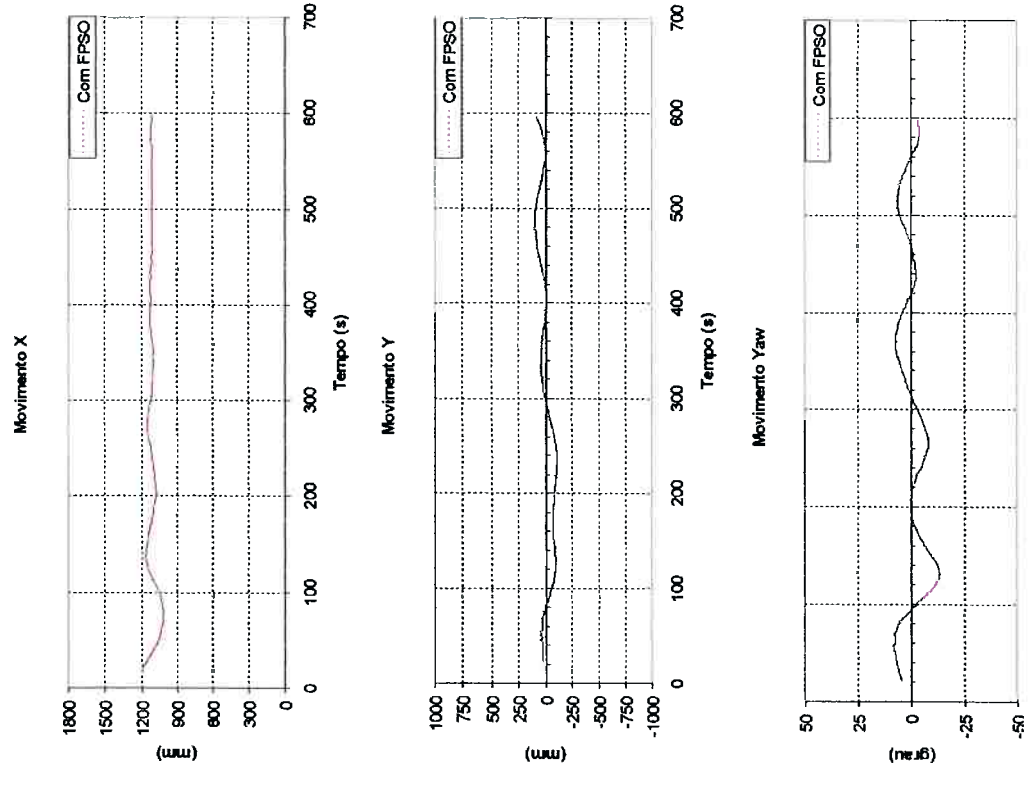
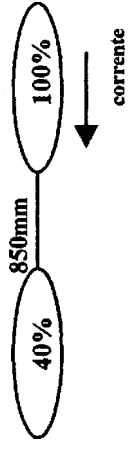


Fig.B-1a - Experimental

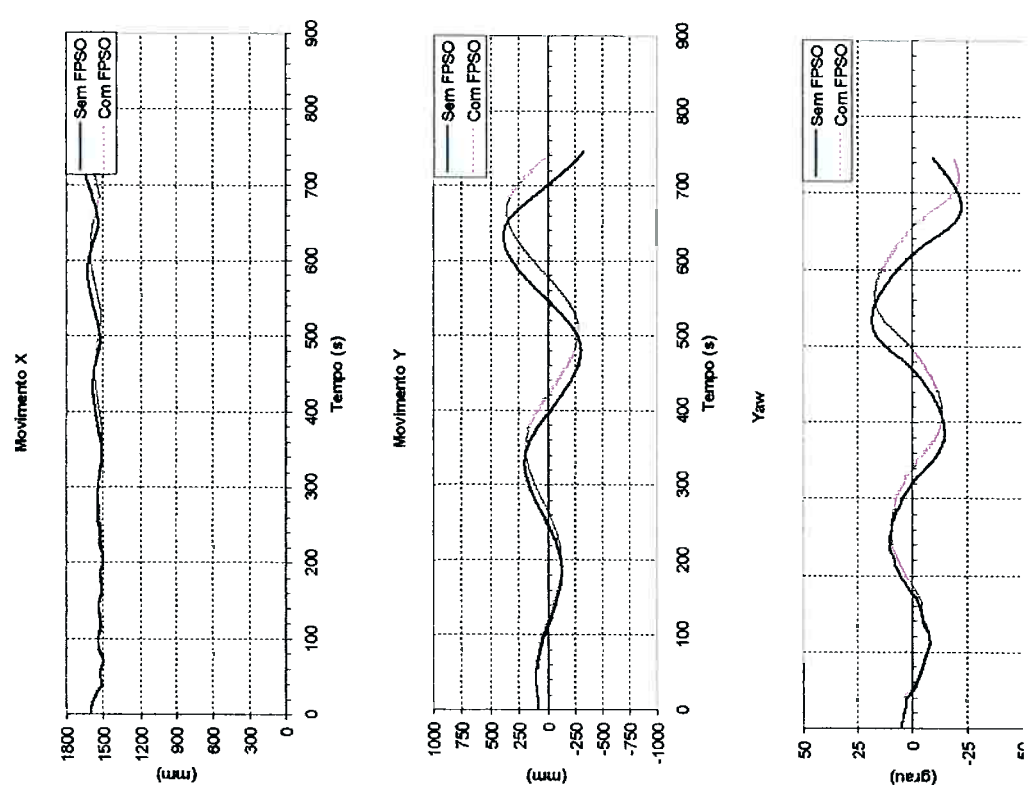


Fig.B-1b - Numérico

FPSO (100%; -180°); shuttle (40%); hawser 850mm; vel. 0.037m/s

FPSO (100%; -180°); shuttle (40%); hawser 850mm; vel. 0.037m/s

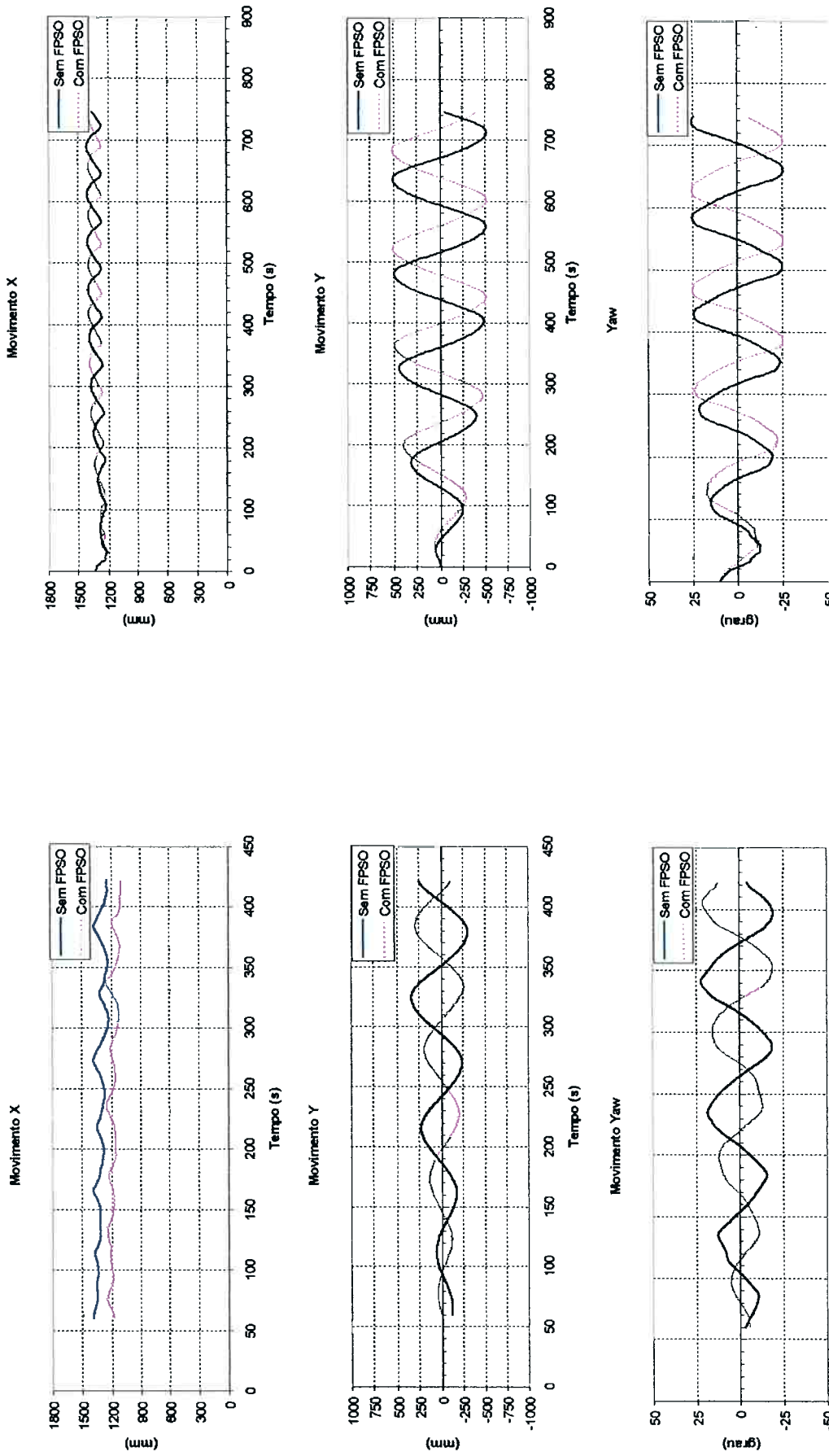
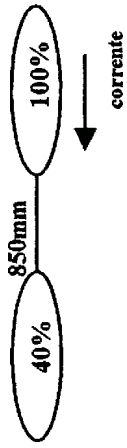


Fig.B-2a – Experimental

Fig.B-2b – Numérico

FPSO (100%; -180°); shuttle (40%); hawser 850mm; vel. 0.075m/s

FPSO (100%; -180°); shuttle (40%); hawser 850mm; vel. 0.075m/s

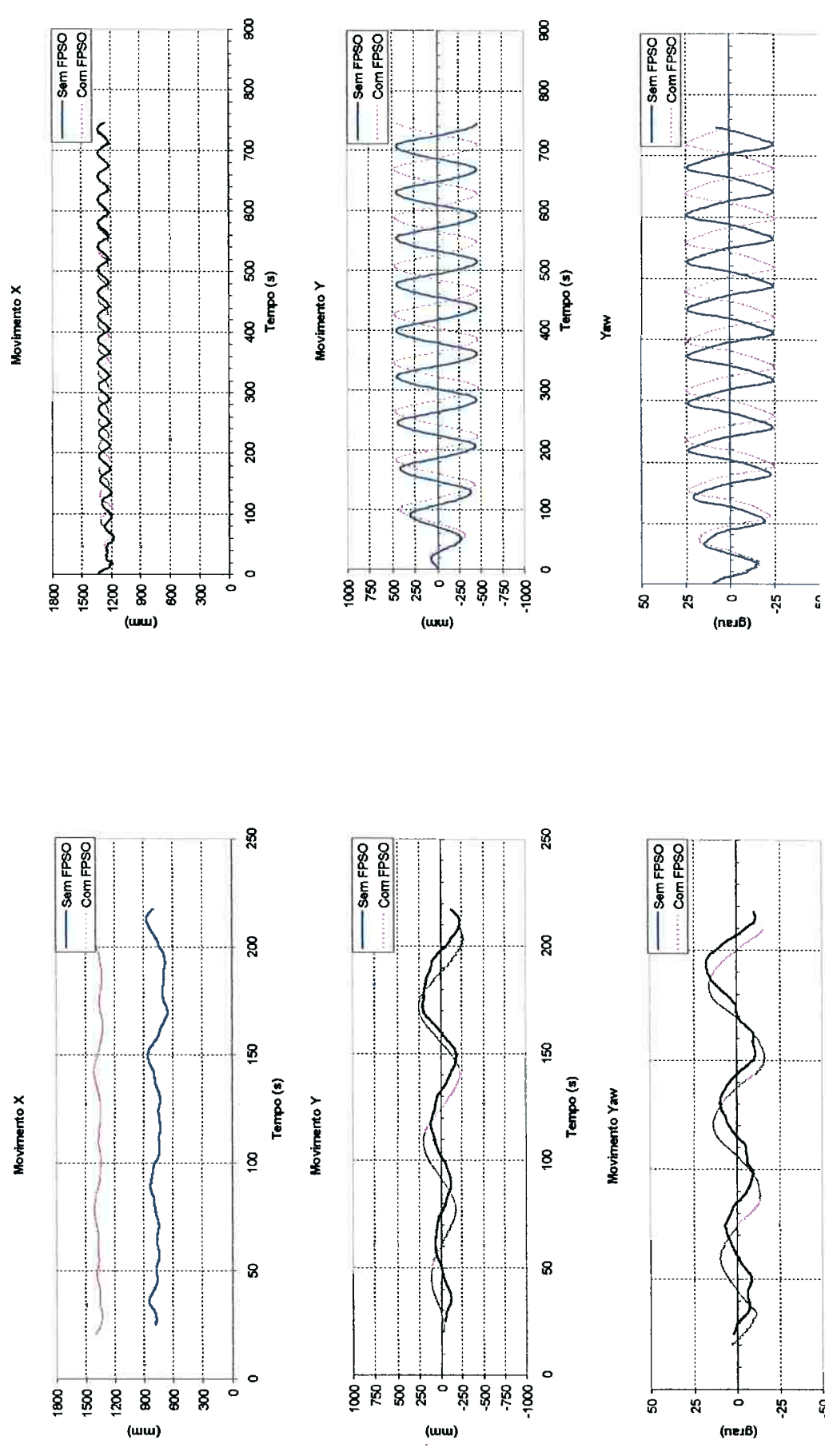
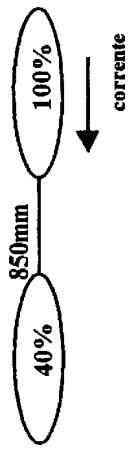


Fig.B-3a – Experimental

Fig.B-3b – Numérico

FPSO (100%; -180°), shuttle (40%), hawser 850mm; vel. 0.149m/s

FPSO (100%; -180°), shuttle (40%), hawser 850mm; vel. 0.149m/s



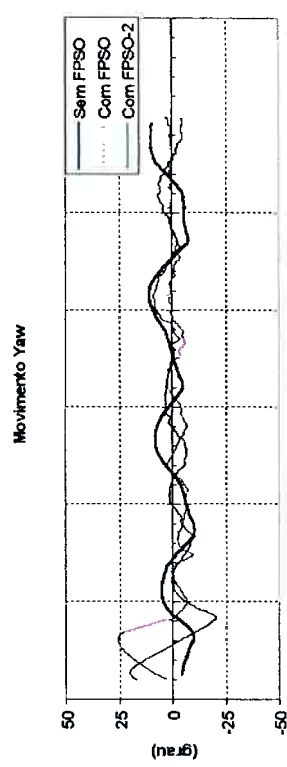
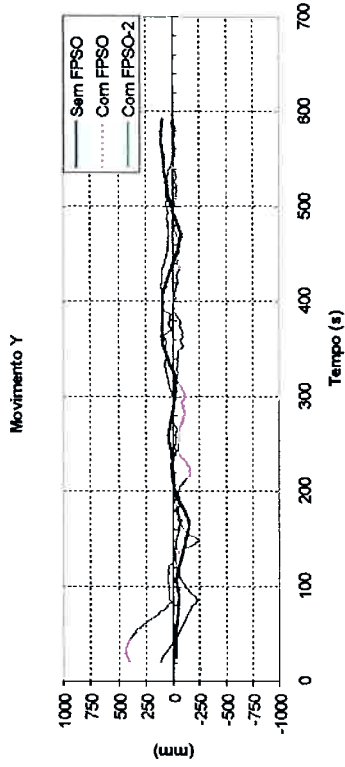
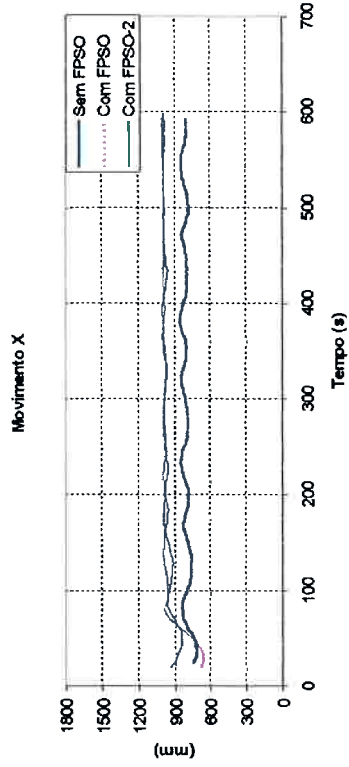
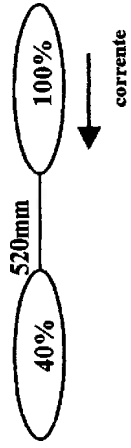


Fig.B-4a – Experimental

FPSO (100%; -180°); *shuttle* (40%); *hawser* 520mm; vel. 0.037m/s

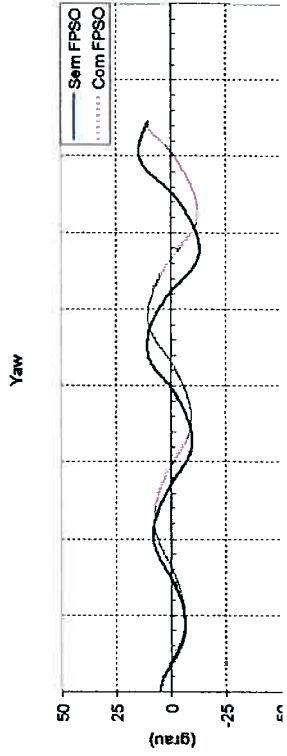
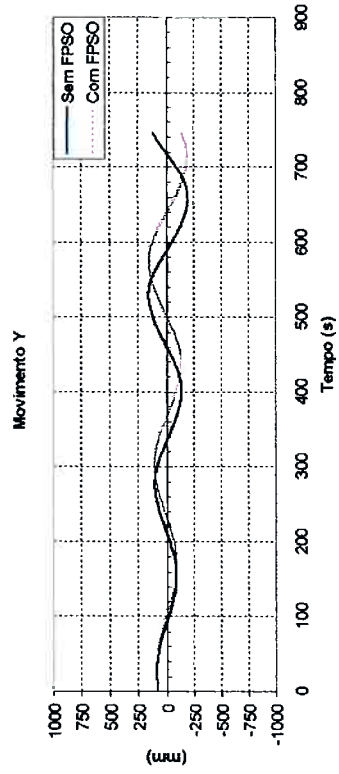
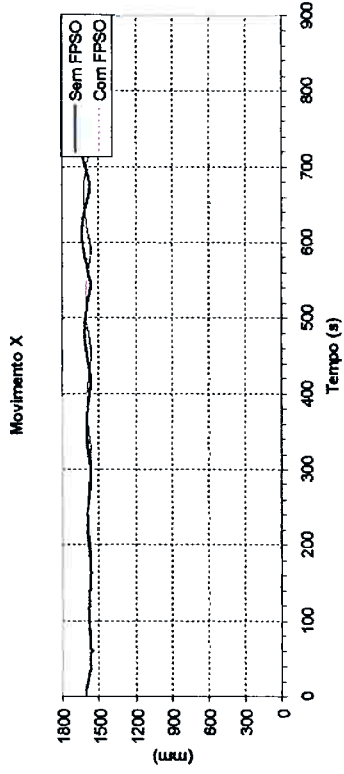


Fig.B-4b – Numérico

FPSO (100%; -180°); *shuttle* (40%); *hawser* 520mm; vel. 0.037m/s

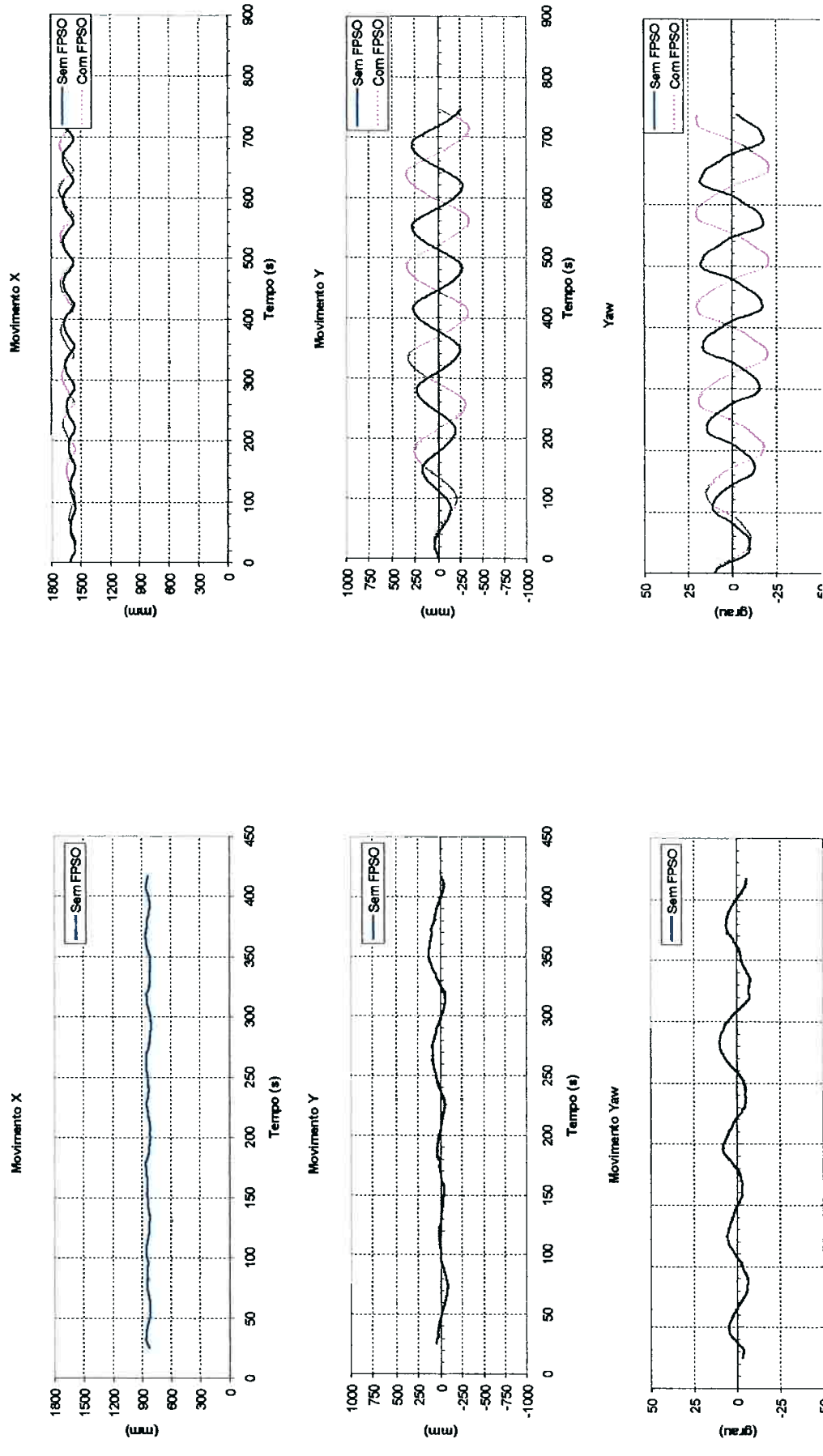
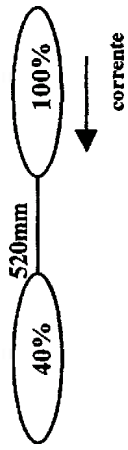


Fig.B-5a – Experimental

Fig.B-5b – Numérico

FPSO (100%; -180°), shuttle (40%); hawser 520mm; vel. 0.075m/s

FPSO (100%; -180°), shuttle (40%); hawser 520mm; vel. 0.075m/s

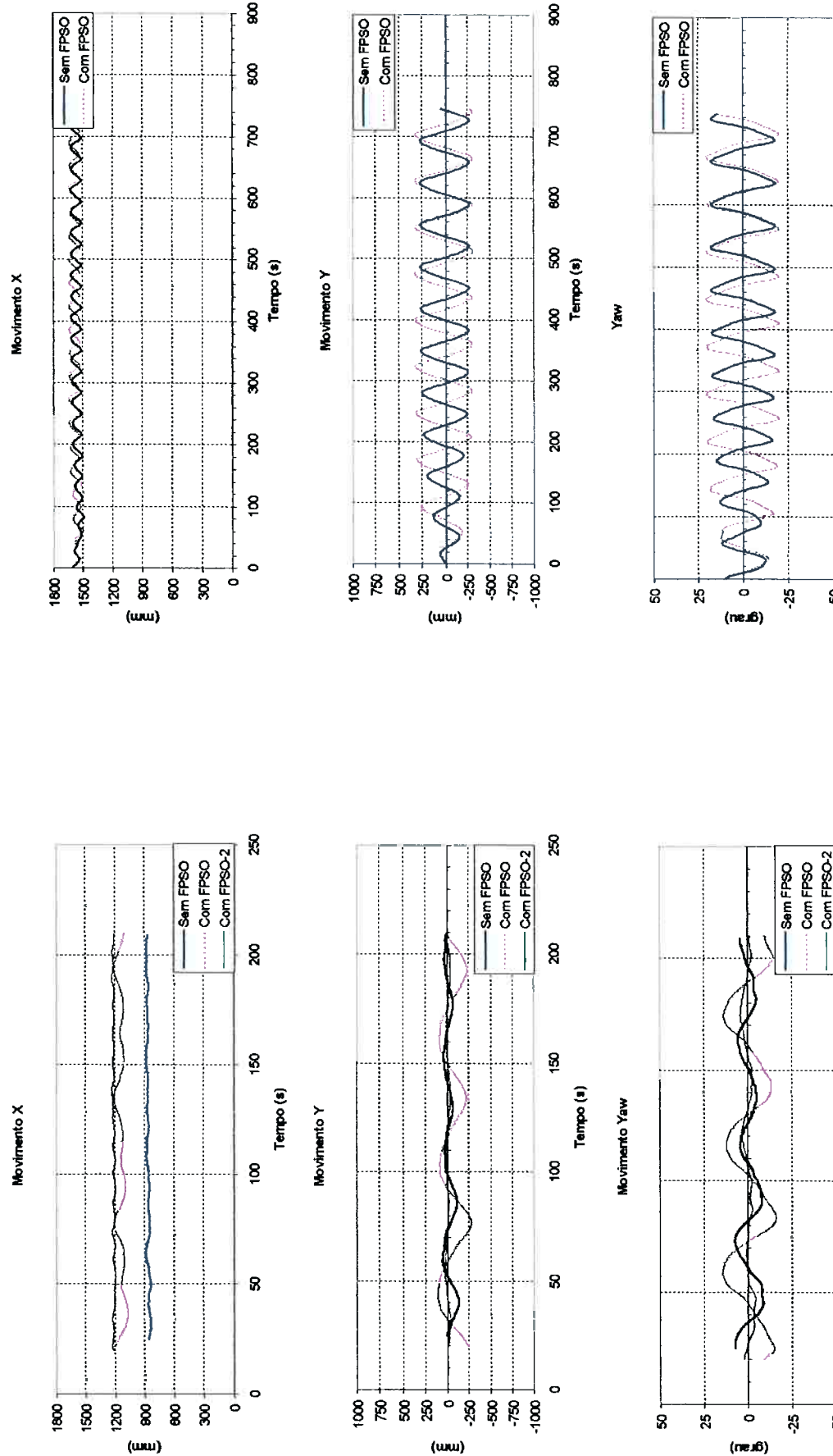
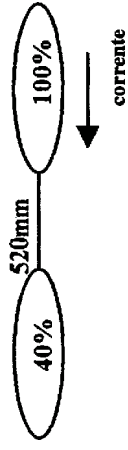


Fig.B-6a – Experimental

Fig.B-6b – Numérico

FPSO (100%; -180°); shuttle (40%); hawser 520mm; vel. 0.149m/s

FPSO (100%; -180°); shuttle (40%); hawser 520mm; vel. 0.149m/s

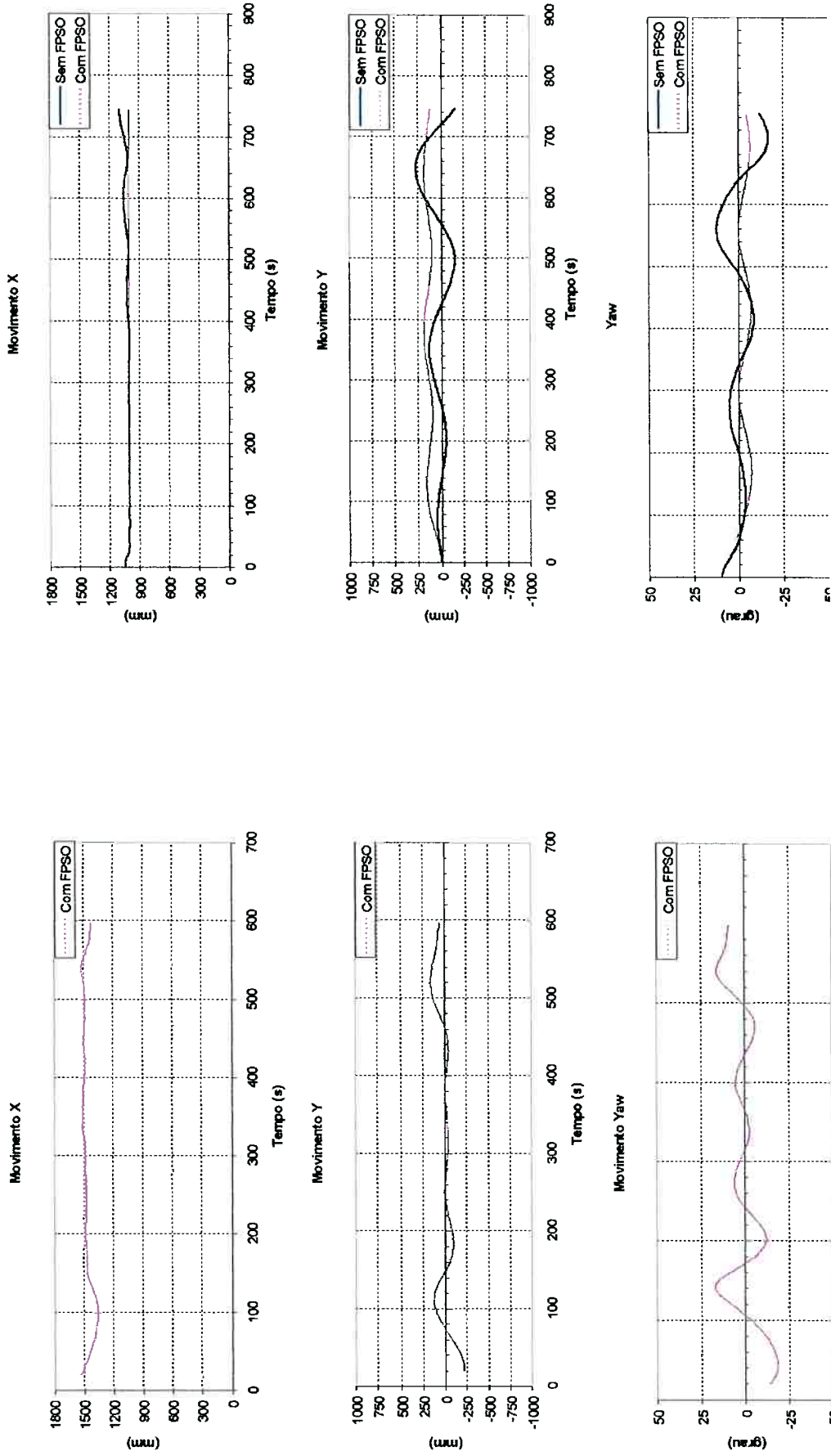
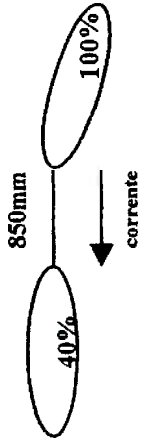


Fig.B-7a – Experimental  
FPSO (100%; -160°); shuttle (40%); hawser 850mm; vel. 0.037m/s

Fig.B-7b – Numérico  
FPSO (100%; -160°); shuttle (40%); hawser 850mm; vel. 0.037m/s

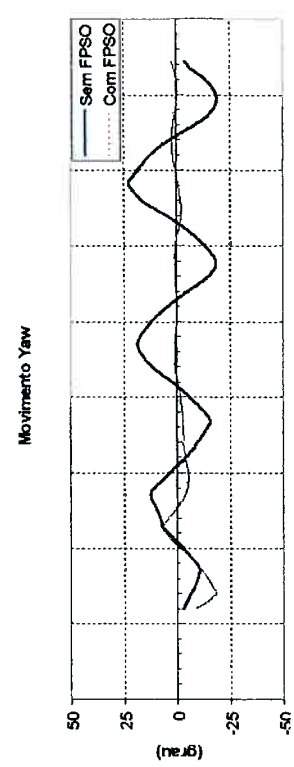
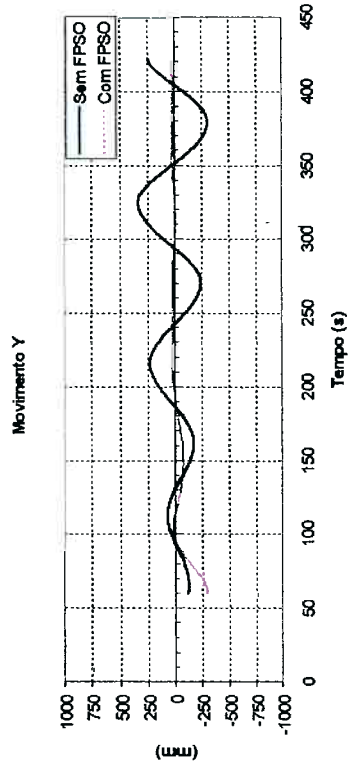
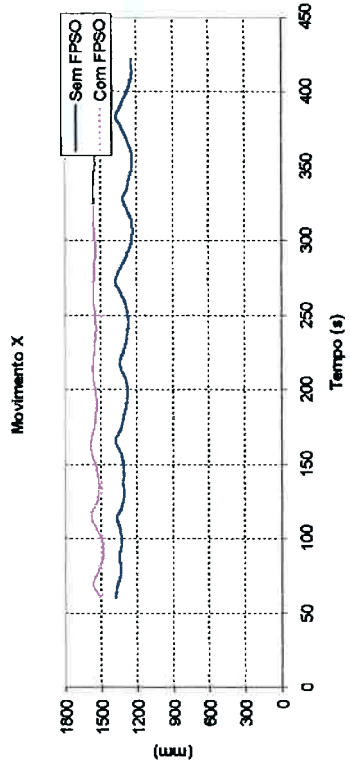
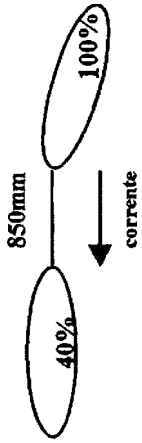


Fig.B-8a – Experimental  
FPSO (100%; -160°); shuttle (40%); hawser 850mm; vel. 0.075m/s

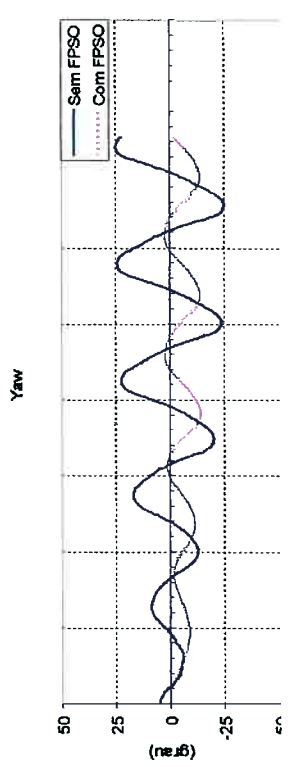
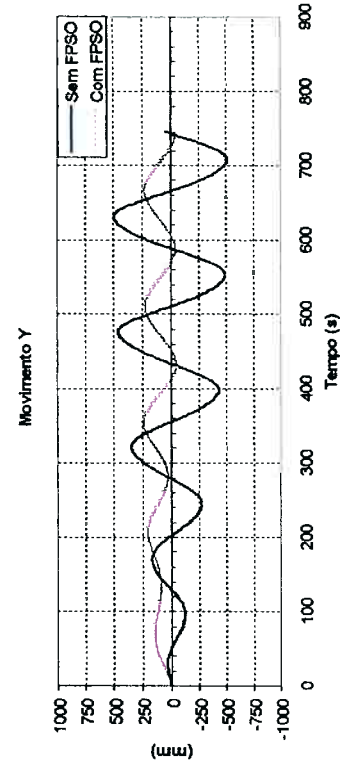
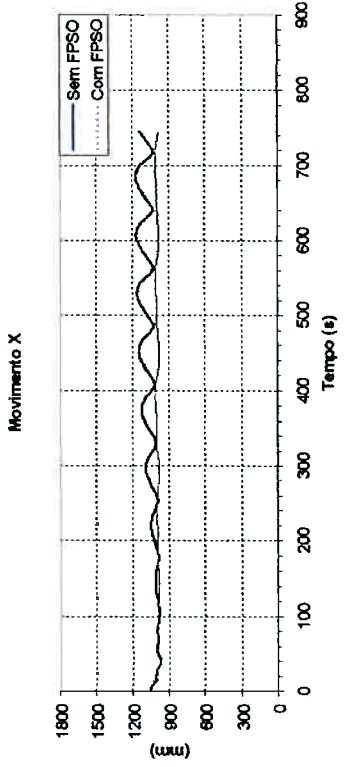


Fig.B-8b – Numérico  
FPSO (100%; -160°); shuttle (40%); hawser 850mm; vel. 0.075m/s

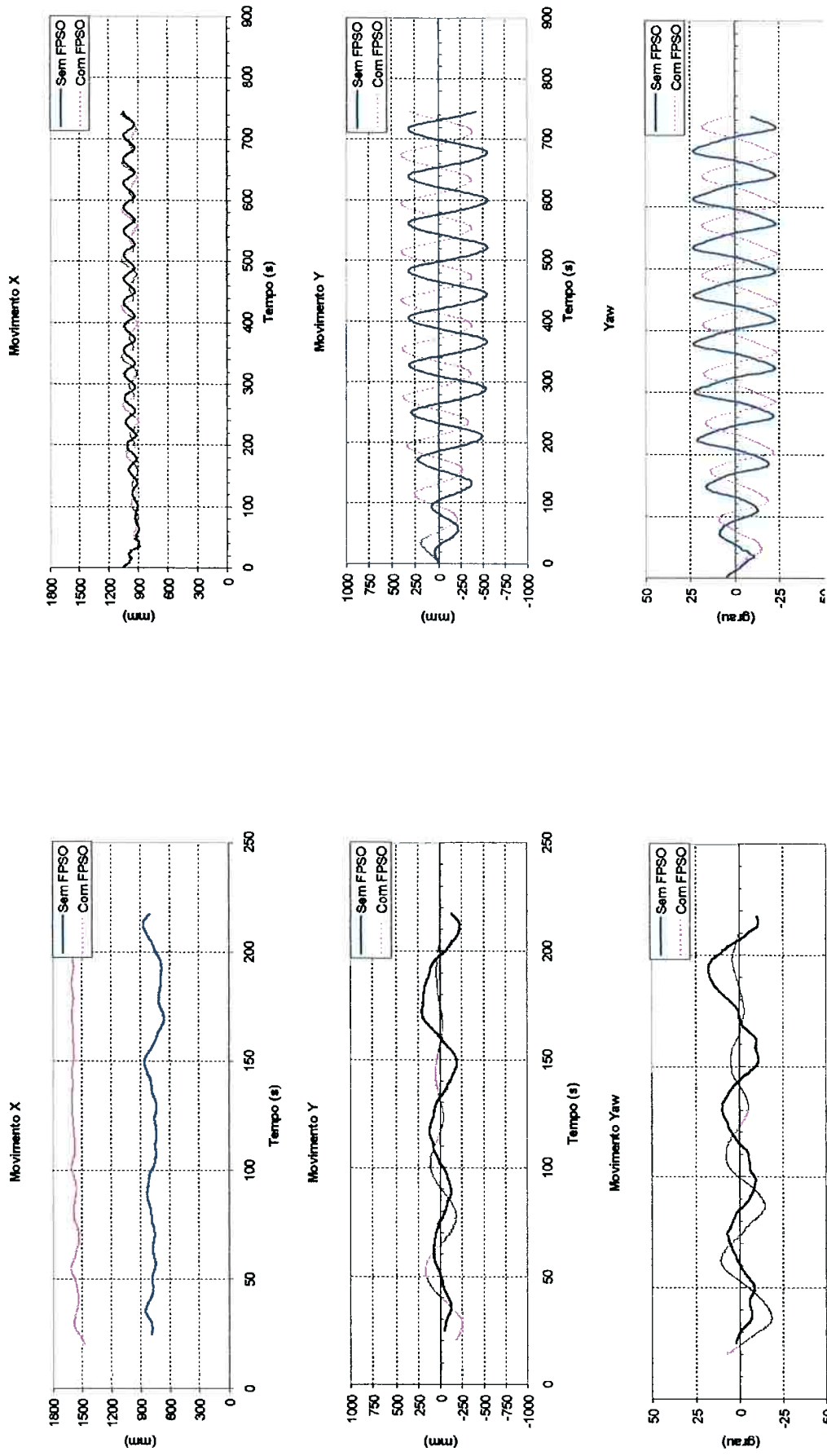
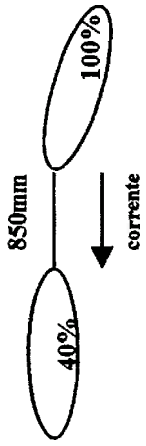


Fig.B-9a – Experimental

FPSO (100%; -160°); *shuttle* (40%); hawser 850mm; vel. 0.149m/s

Fig.B-9b – Numérico

FPSO (100%; -160°); *shuttle* (40%); hawser 850mm; vel. 0.149m/s

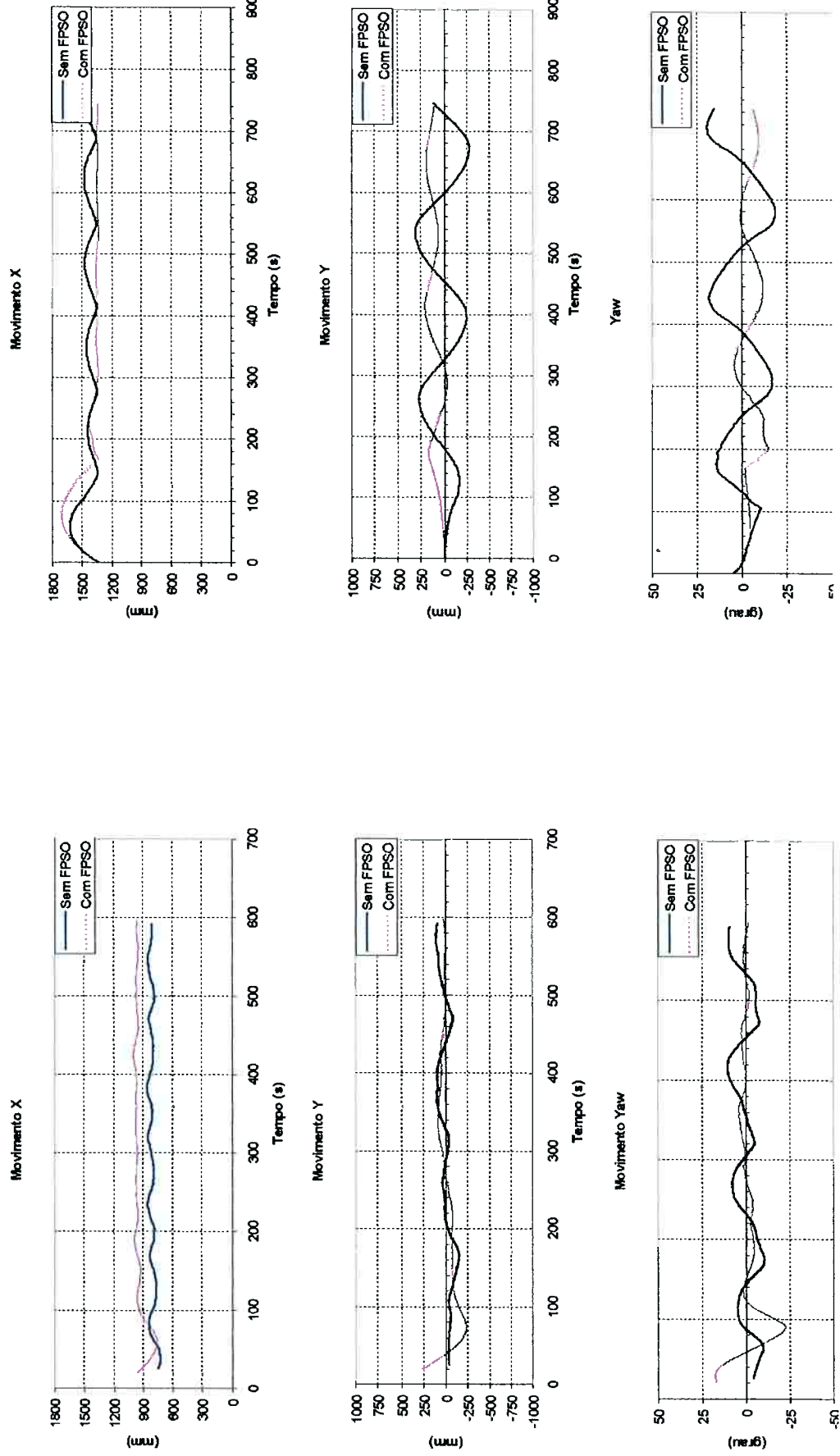
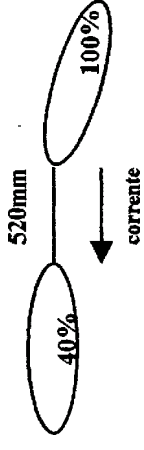


Fig.B-10a – Experimental  
 FPSO (100%; -160°); shuttle (40%); hawser 520mm; vel. 0.037m/s

Fig.B-10b – Numérico  
 FPSO (100%; -160°); shuttle (40%); hawser 520mm; vel. 0.037m/s

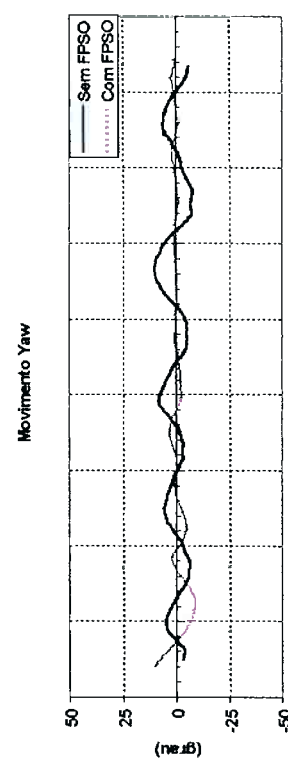
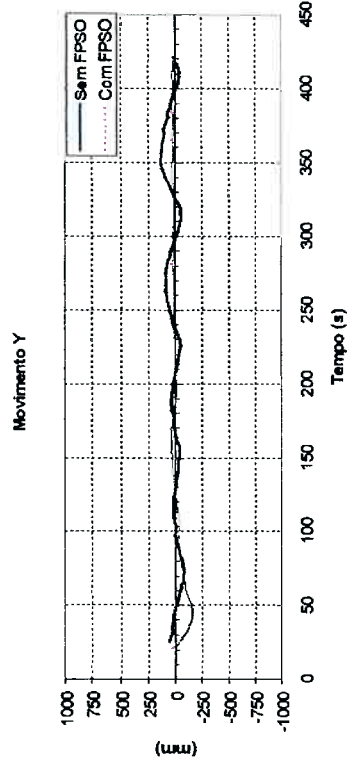
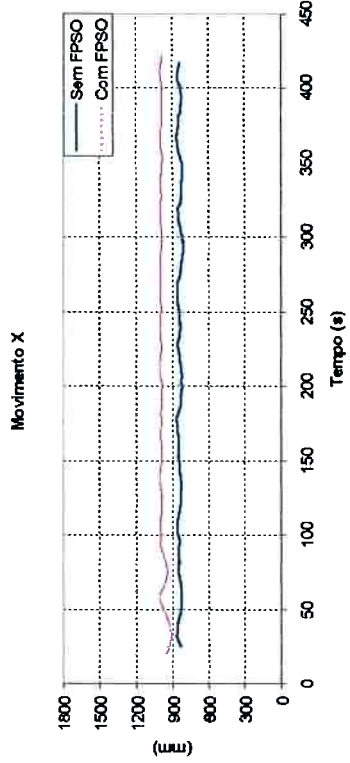
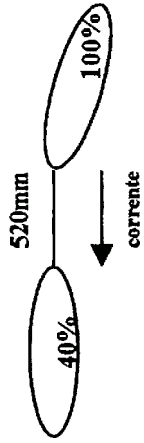


Fig.B-11a – Experimental

FPFO (100%; -160°); shuttle (40%); hawser 520mm; vel. 0.075m/s

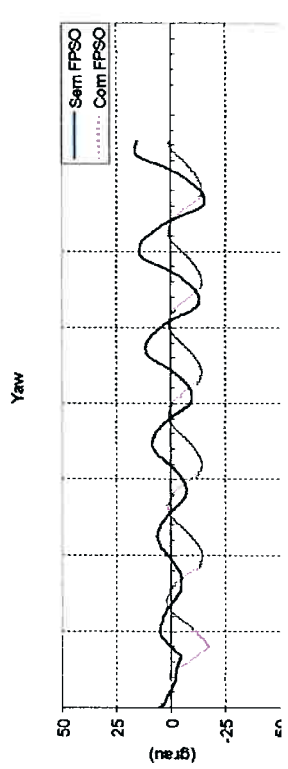
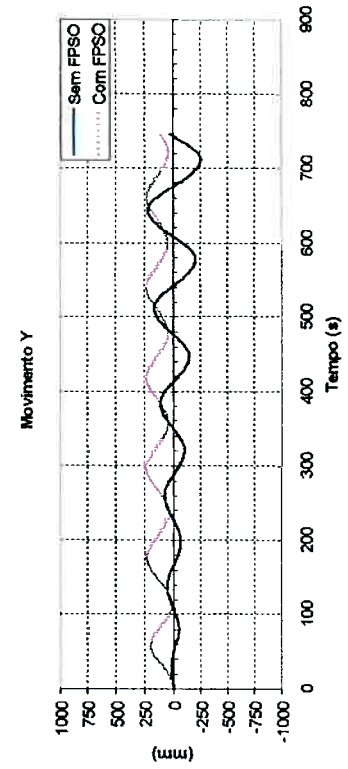
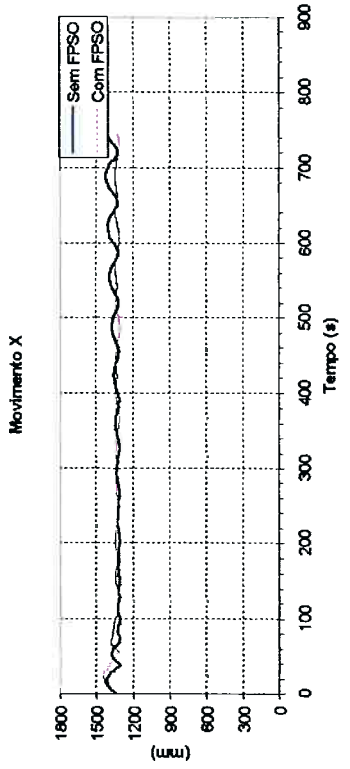


Fig.B-11b – Numérico

FPFO (100%; -160°); shuttle (40%); hawser 520mm; vel. 0.075m/s



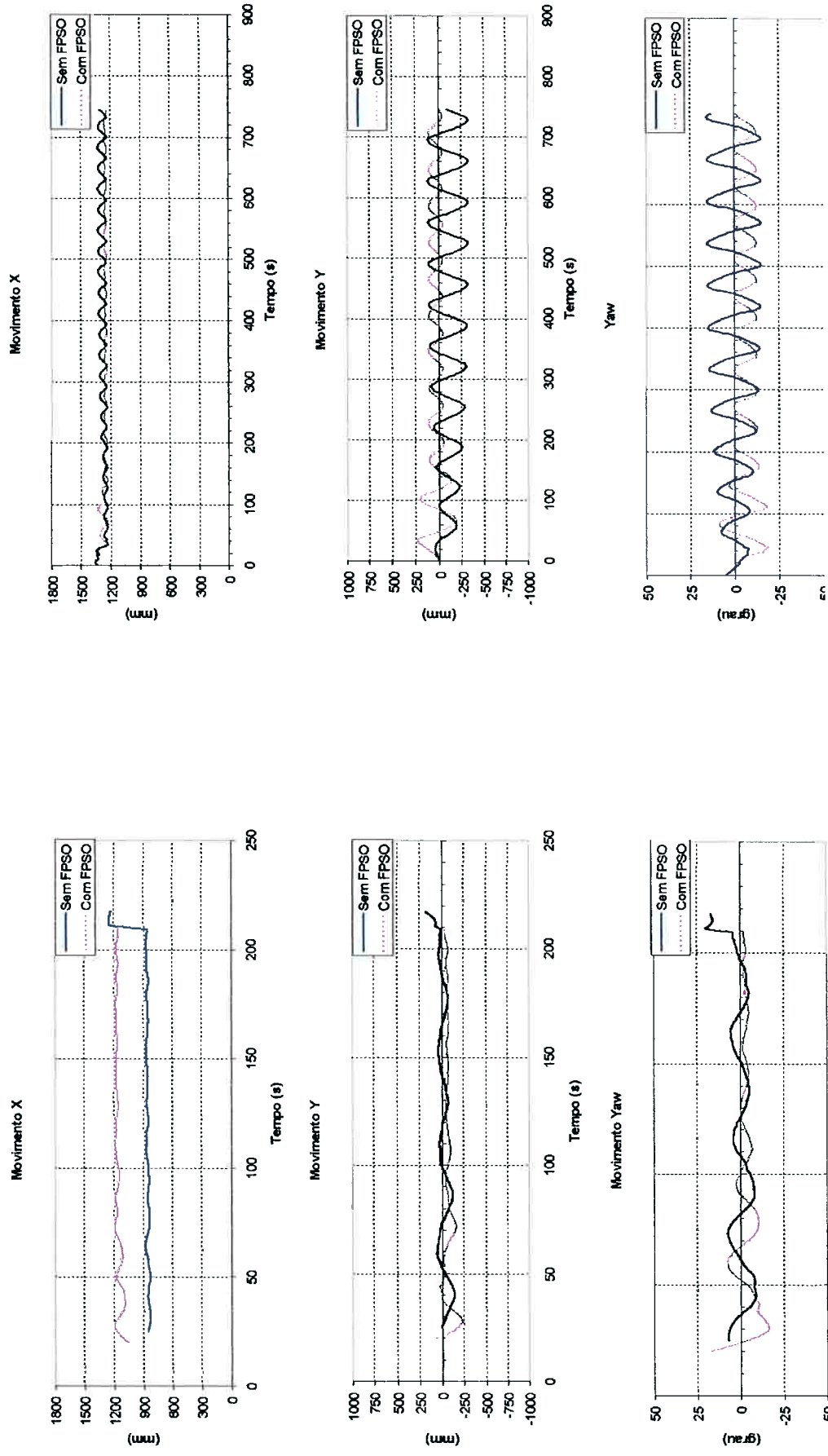
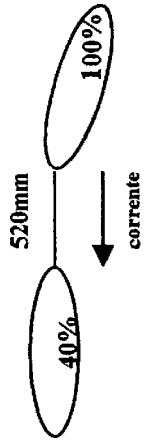


Fig.B-12a – Experimental

FPSO (100%, -160°); shuttle (40%); hawser 520mm; vel. 0.149m/s

Fig.B-12b – Numérico

FPSO (100%, -160°); shuttle (40%); hawser 520mm; vel. 0.149m/s

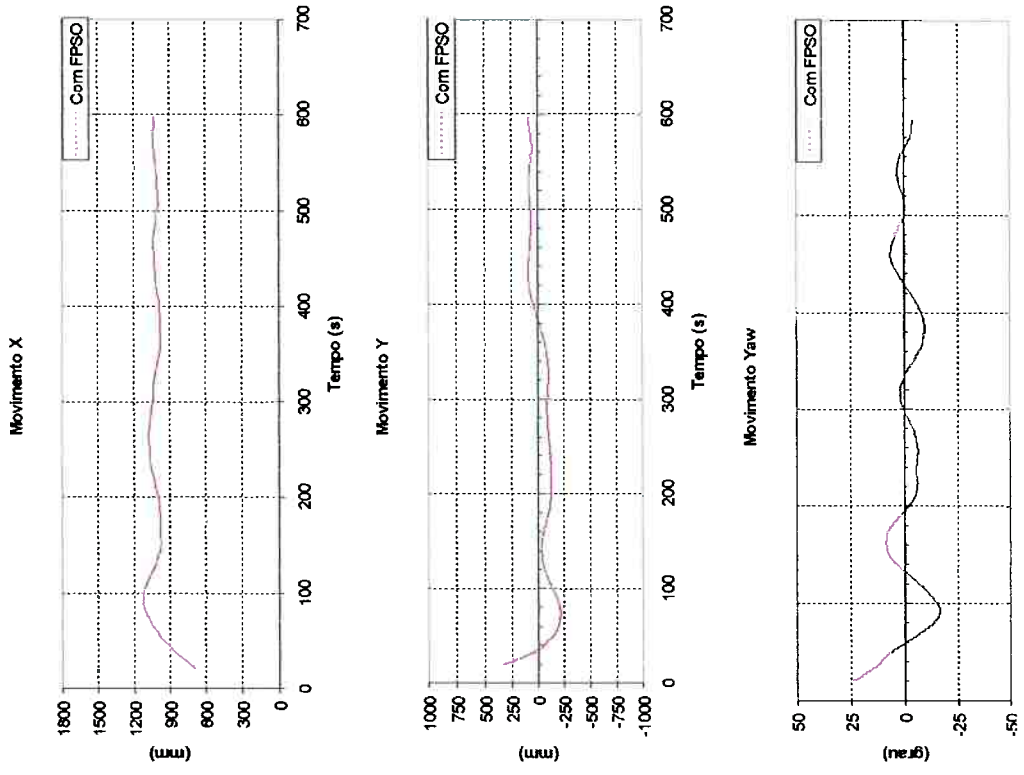
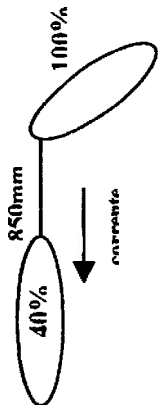


Fig.B-13a – Experimental  
FPSO (100%, -135°); shuttle (40%); hawser 850mm; vel. 0.037m/s

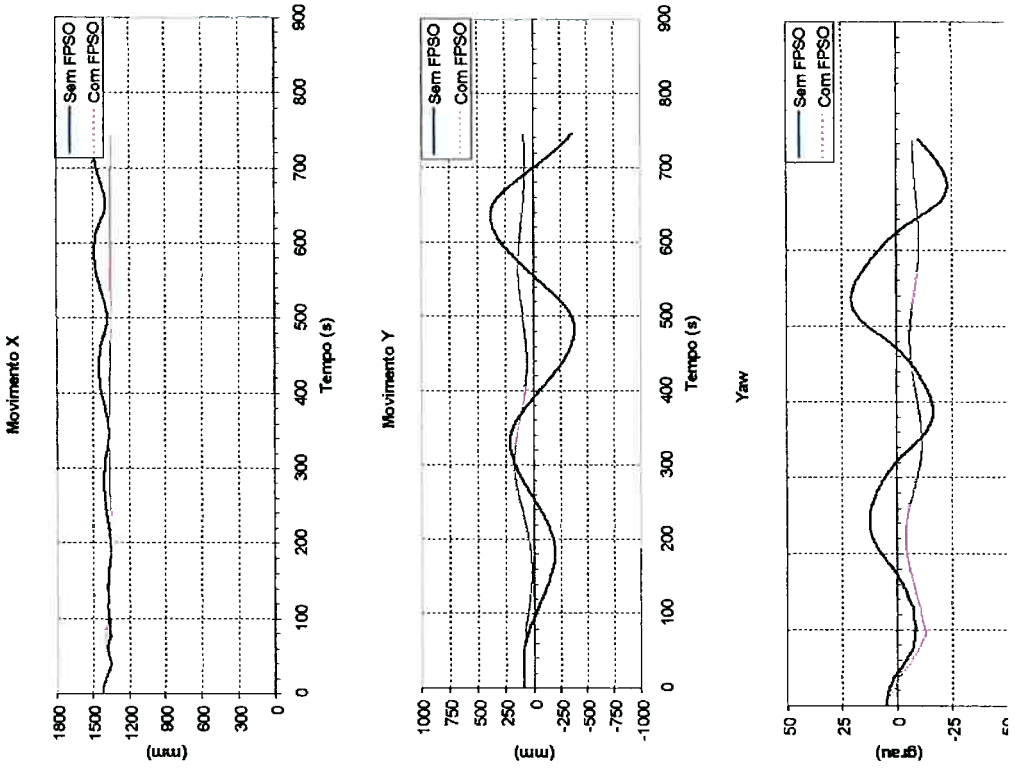


Fig.B-13b – Numérico  
FPSO (100%, -135°); shuttle (40%); hawser 850mm; vel. 0.037m/s

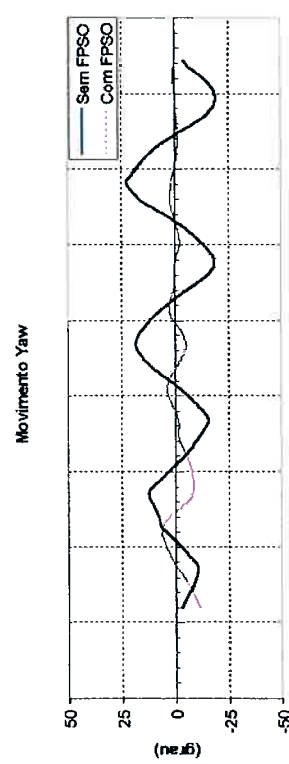
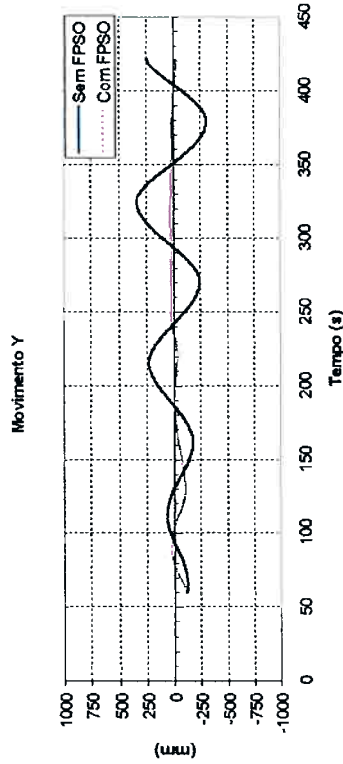
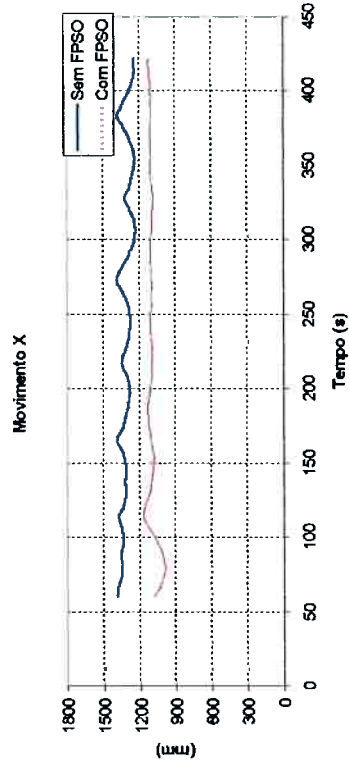
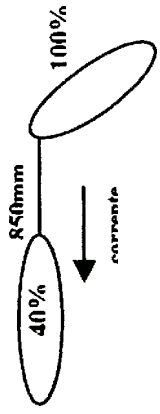


Fig.B-14a – Experimental  
FPSO (100%, -135°); shuttle (40%); hawser 850mm; vel. 0.075m/s

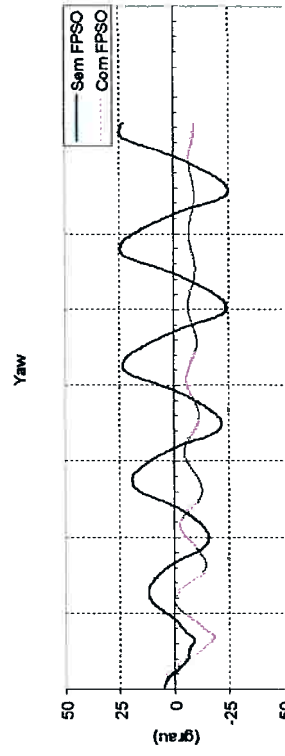
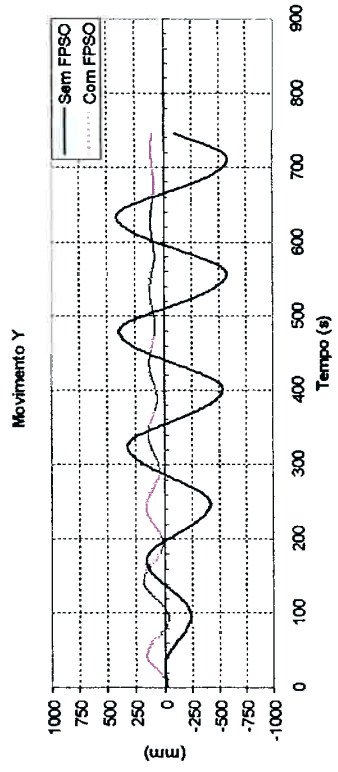
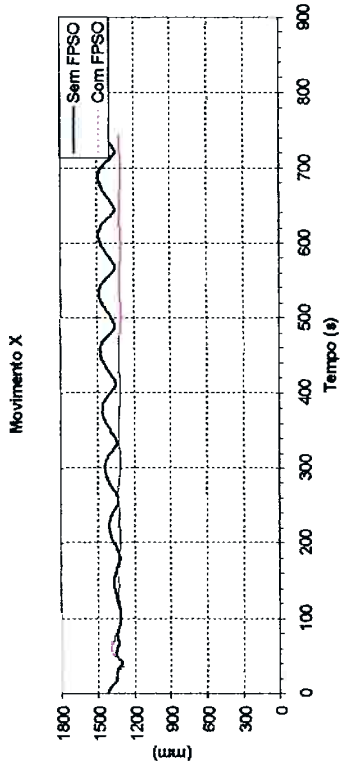


Fig.B-14b – Numérico  
FPSO (100%, -135°); shuttle (40%); hawser 850mm; vel. 0.075m/s

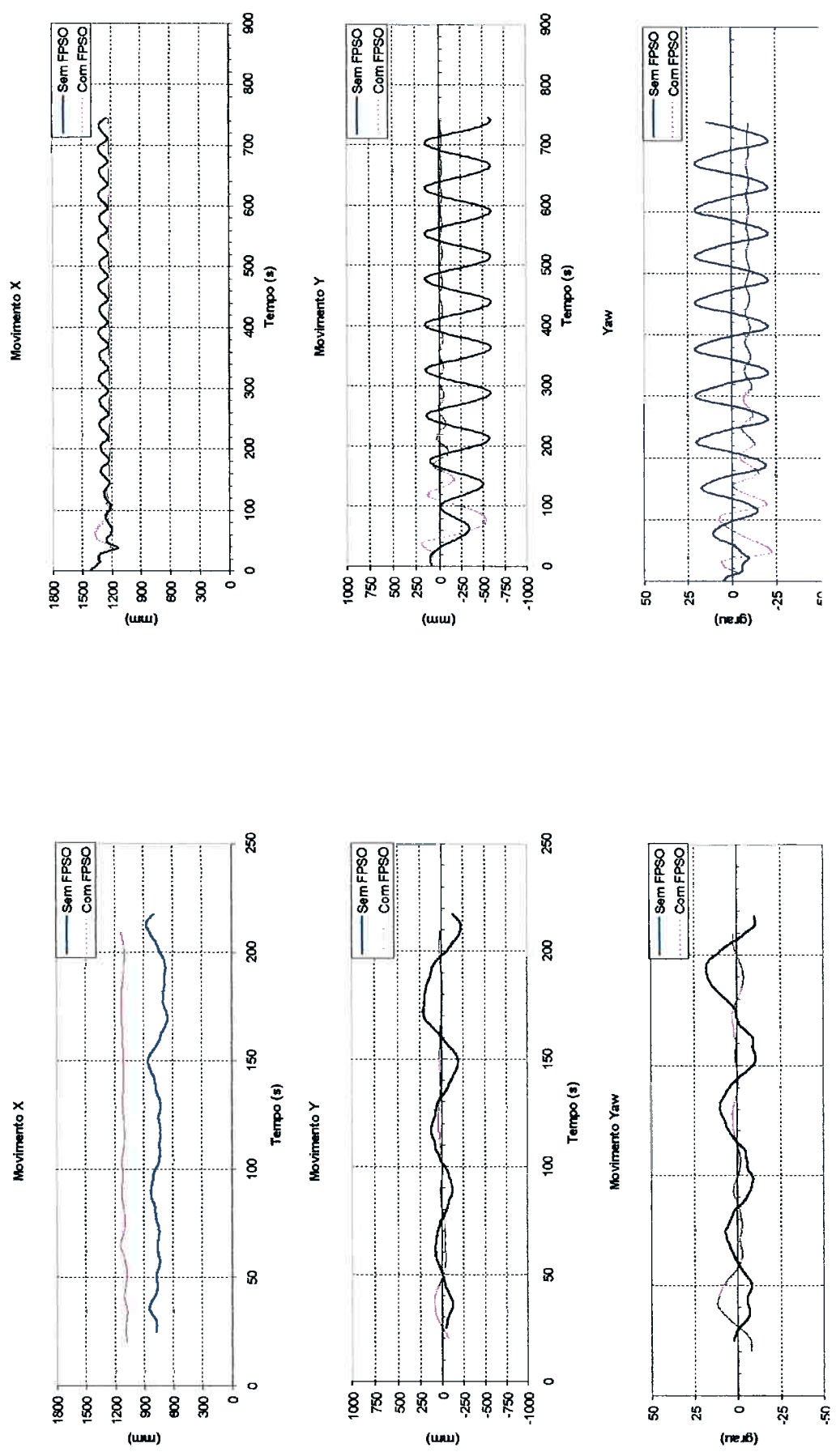
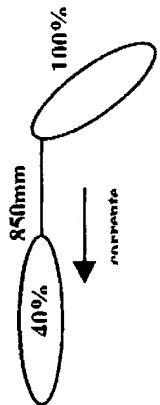


Fig.B-15a – Experimental

FPSO (100%, -135°); shuttle (40%); hawser 850mm; vel. 0.149m/s

Fig.B-15b – Numérico

FPSO (100%, -135°); shuttle (40%); hawser 850mm; vel. 0.149m/s

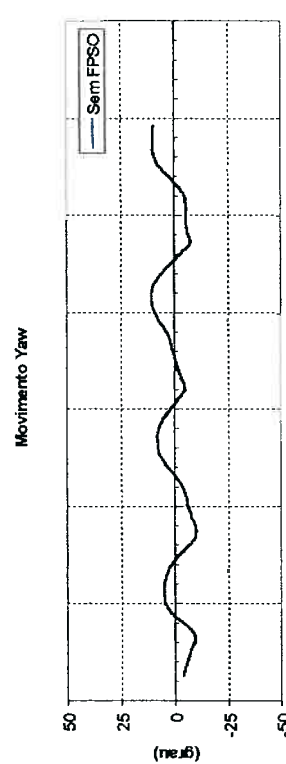
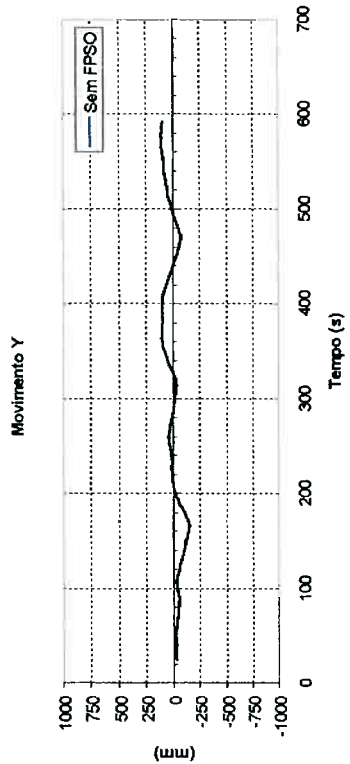
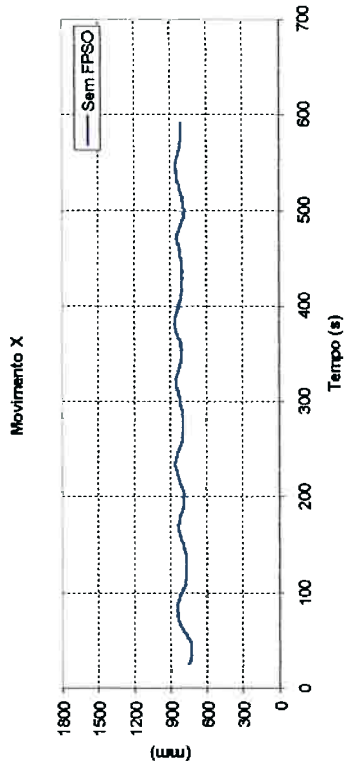
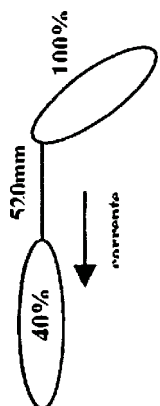


Fig.B-16a – Experimental  
FPSO (100%; -135°); shuttle (40%); hawser 520mm; vel. 0.037m/s

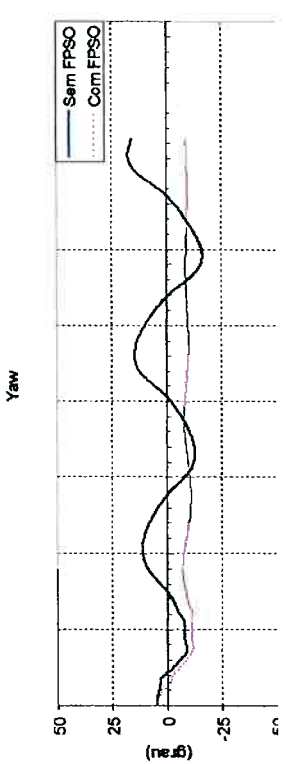
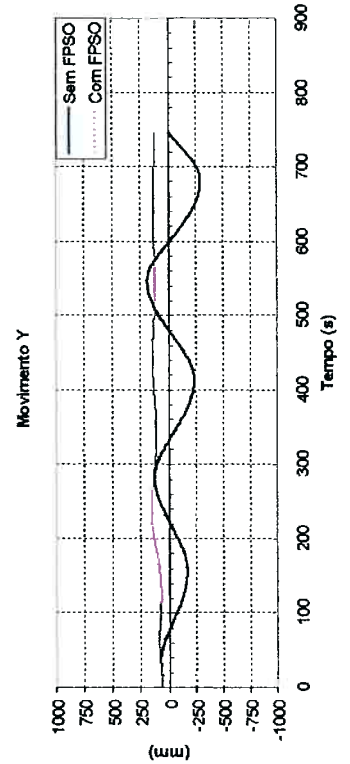
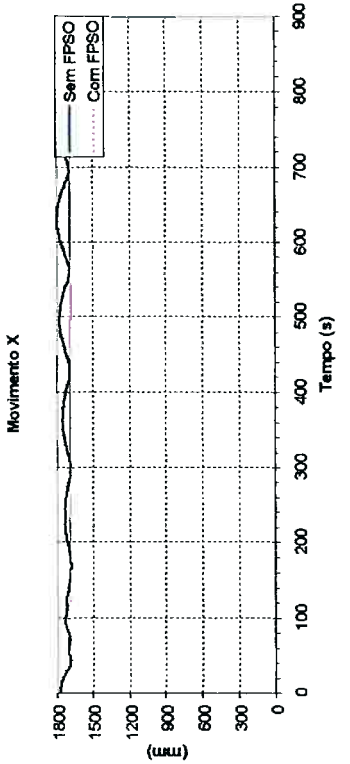


Fig.B-16b – Numérico  
FPSO (100%; -135°); shuttle (40%); hawser 520mm; vel. 0.037m/s

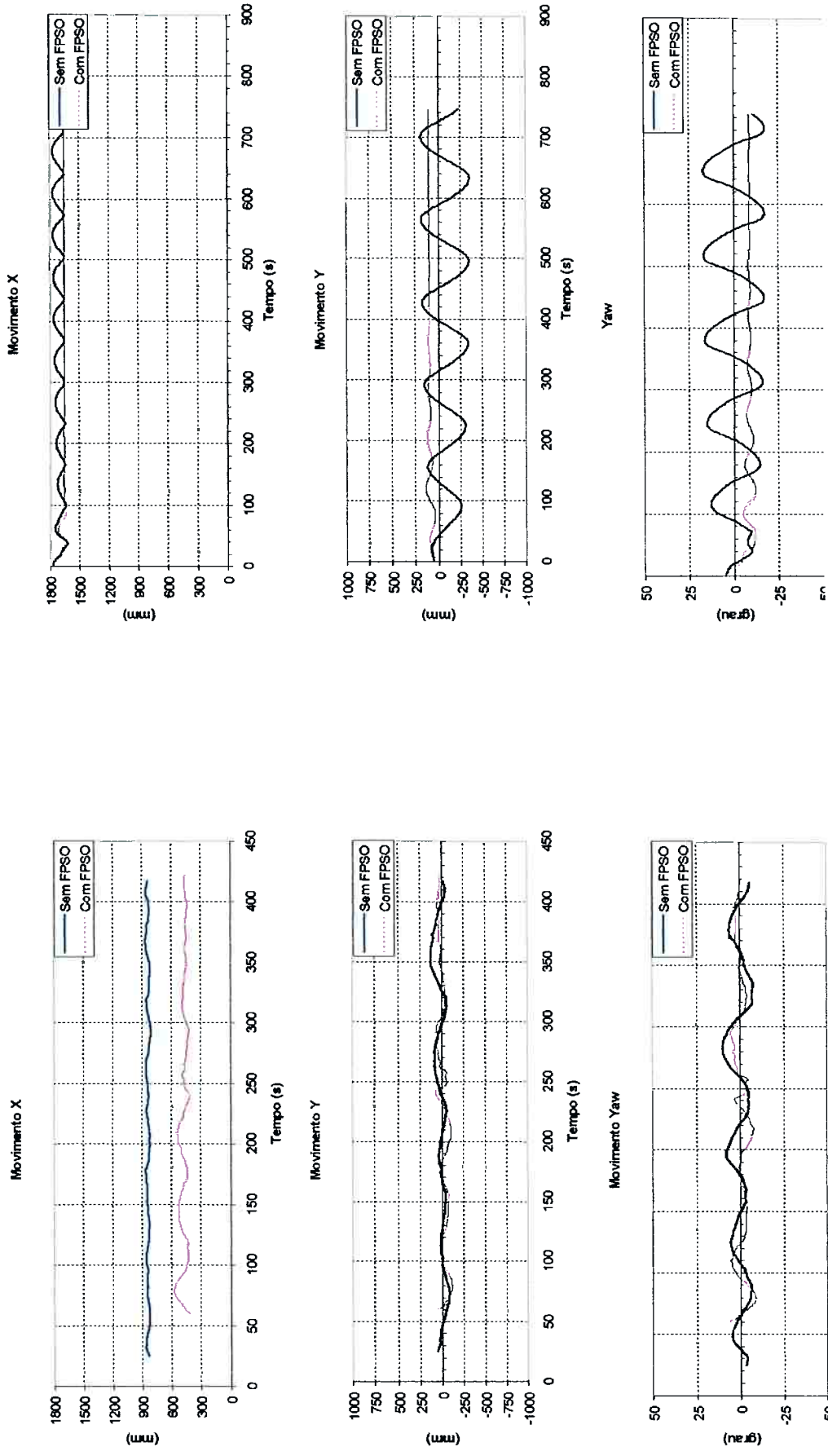
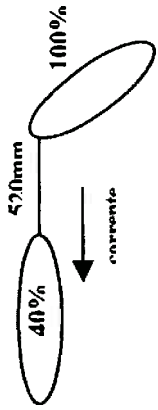


Fig.B-17a – Experimental FFSO (100%; -135°); shuttle (40%); hawser 520mm; vel. 0.075m/s

Fig.B-17b – Numérico FFSO (100%; -135°); shuttle (40%); hawser 520mm; vel. 0.075m/s

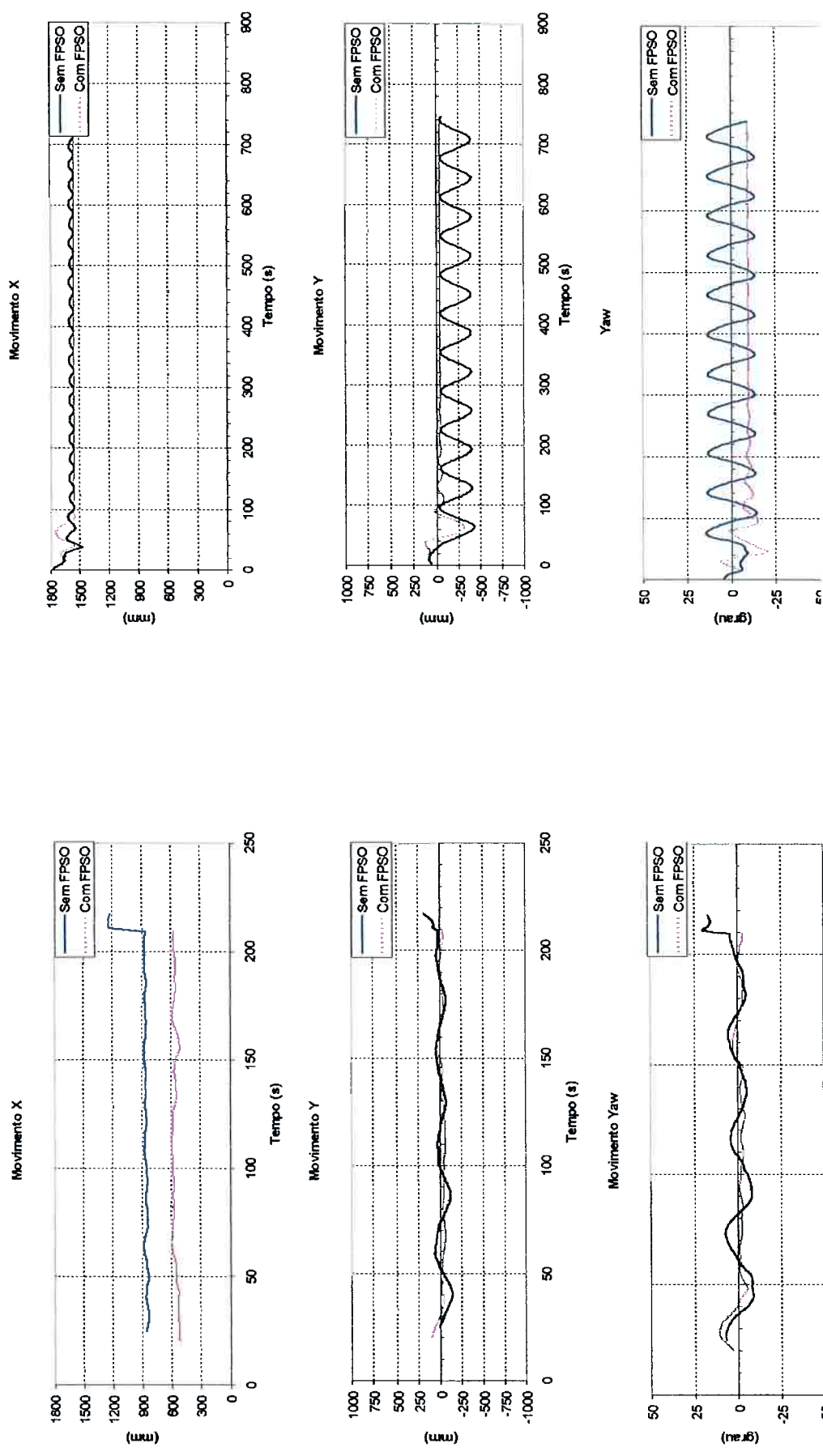
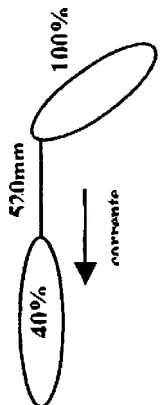


Fig.B-18a – Experimental FPSO (100%, -135°); shuttle (40%); hawser 520mm; vel. 0.149m/s

Fig.B-18b – Numérico FPSO (100%, -135°); shuttle (40%); hawser 520mm; vel. 0.149m/s

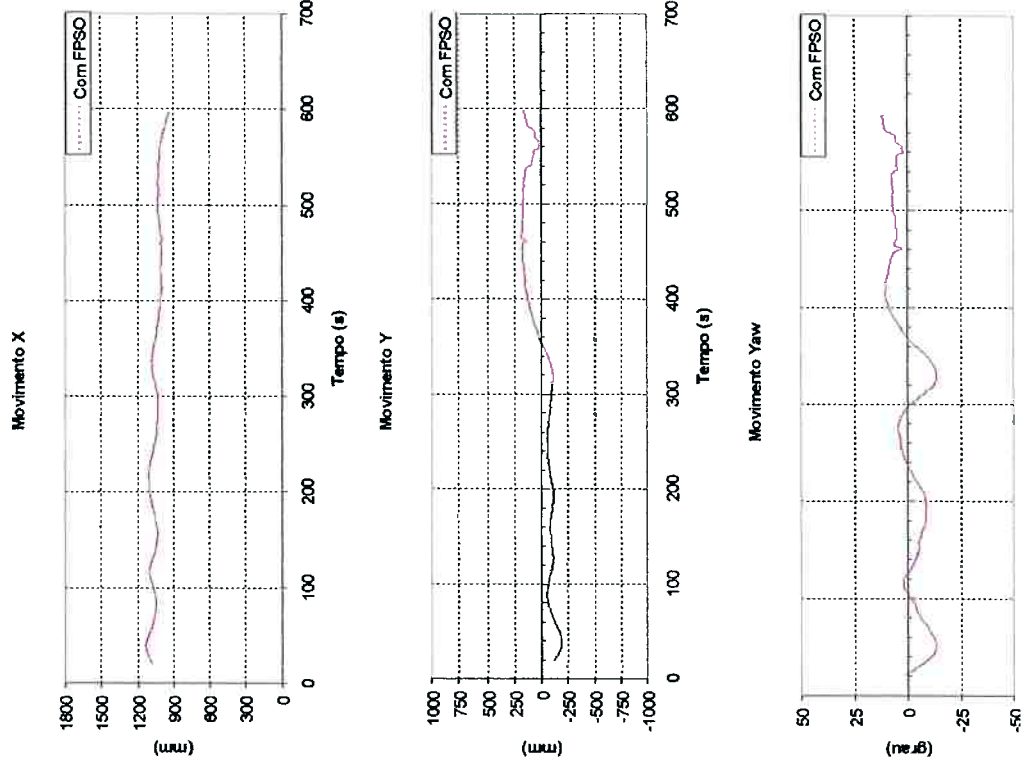
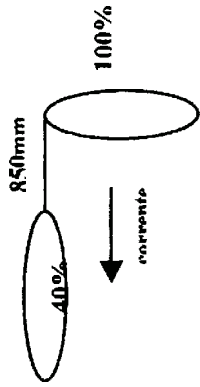


Fig.B-19a – Experimental

FPFO (100%; -90°); shuttle (40%); hawser 850mm; vel. 0.037m/s

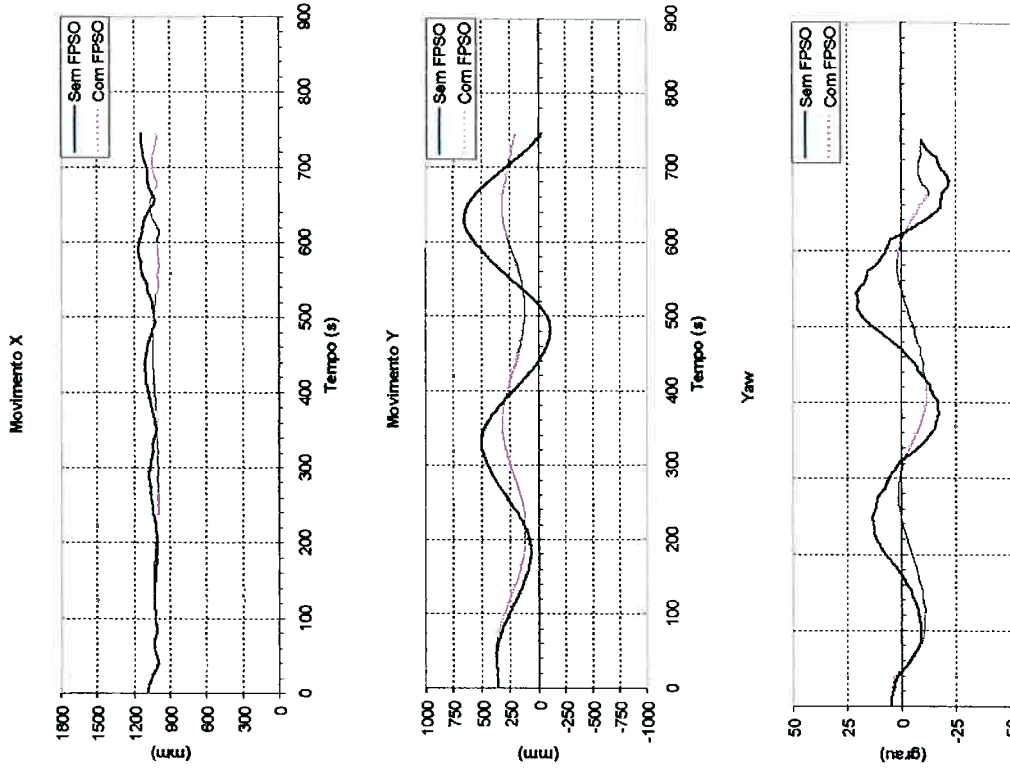


Fig.B-19b – Numérico

FPFO (100%; -90°); shuttle (40%); hawser 850mm; vel. 0.037m/s



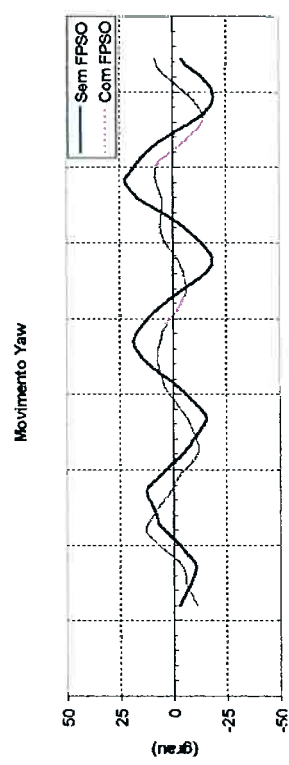
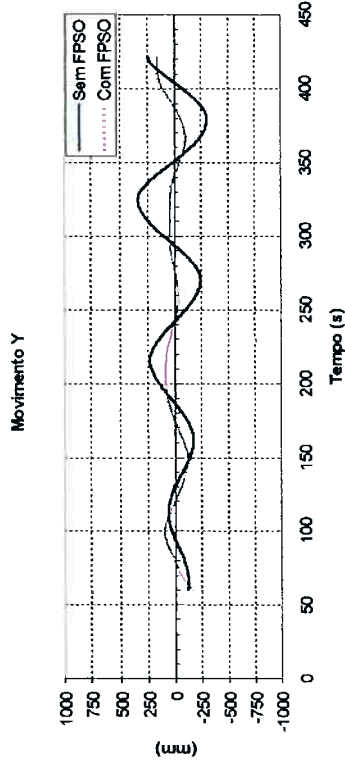
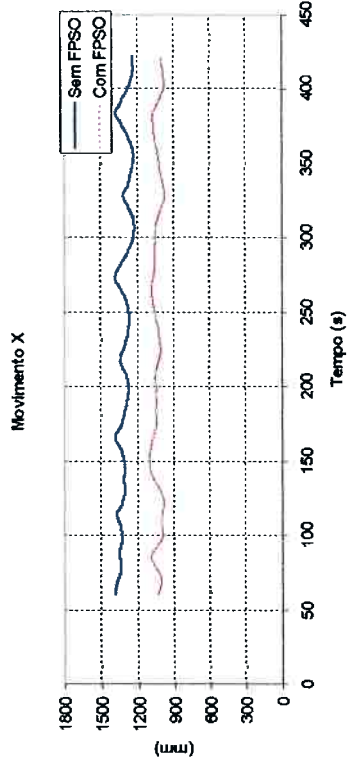
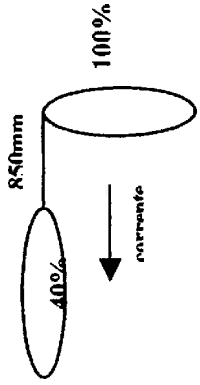


Fig.B-20a – Experimental

FPSO (100%, -90°); shuttle (40%); hawser 850mm; vel. 0.075m/s

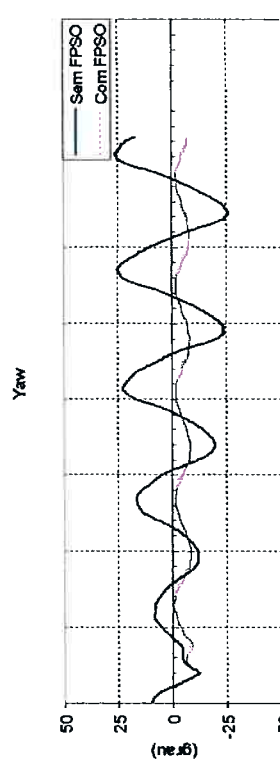
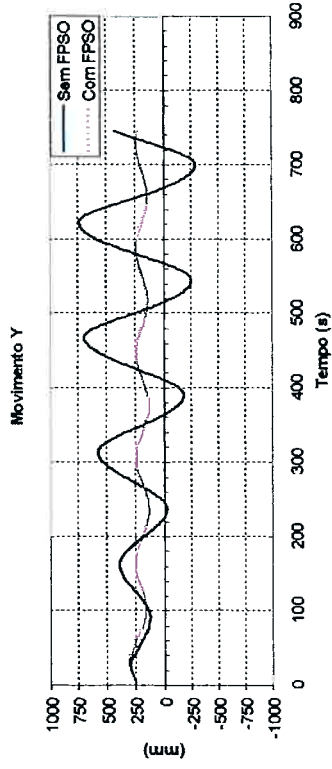
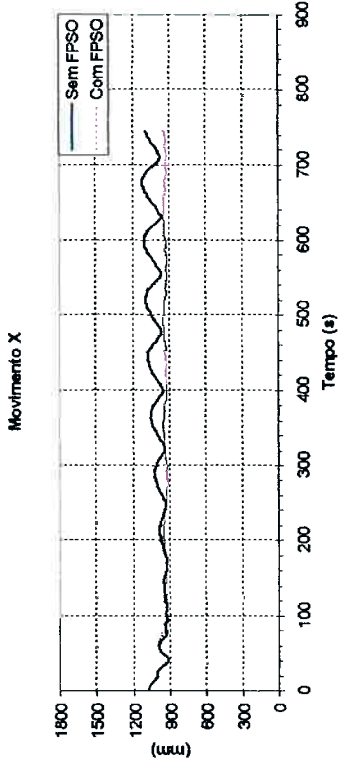


Fig.B-20b – Numérico

FPSO (100%, -90°); shuttle (40%); hawser 850mm; vel. 0.075m/s

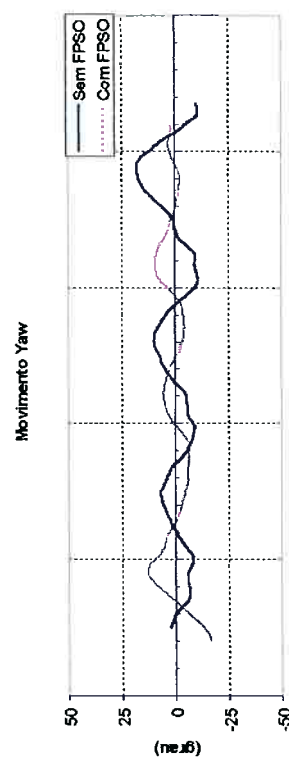
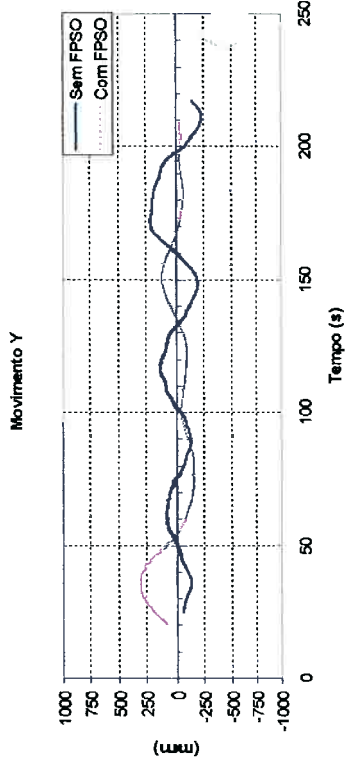
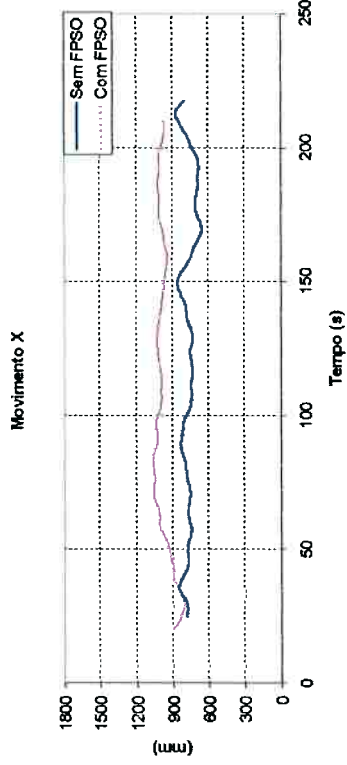
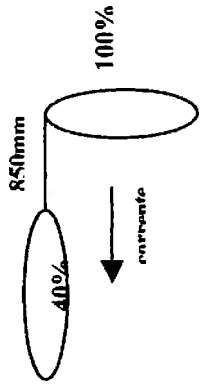


Fig.B-21a – Experimental

FPSO (100%, -90°); shuttle (40%); hawser 850mm; vel. 0.149m/s

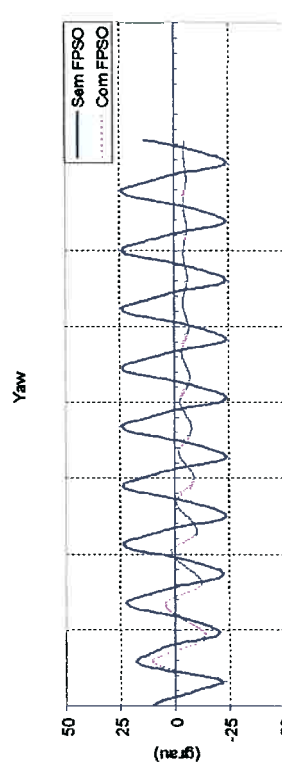
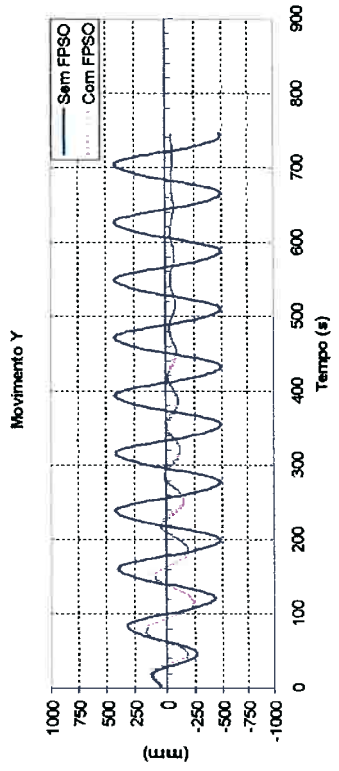
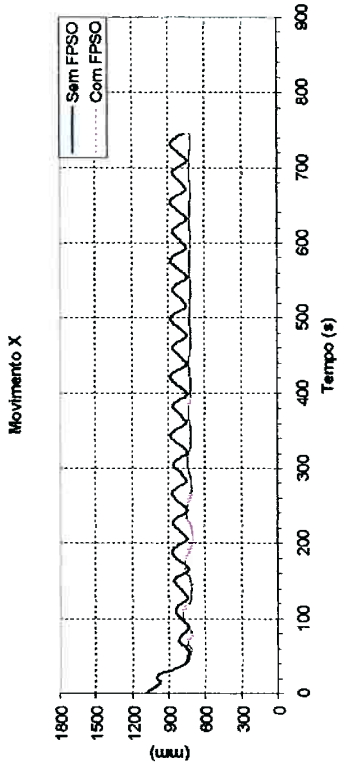


Fig.B-21b – Numérico

FPSO (100%, -90°); shuttle (40%); hawser 850mm; vel. 0.149m/s

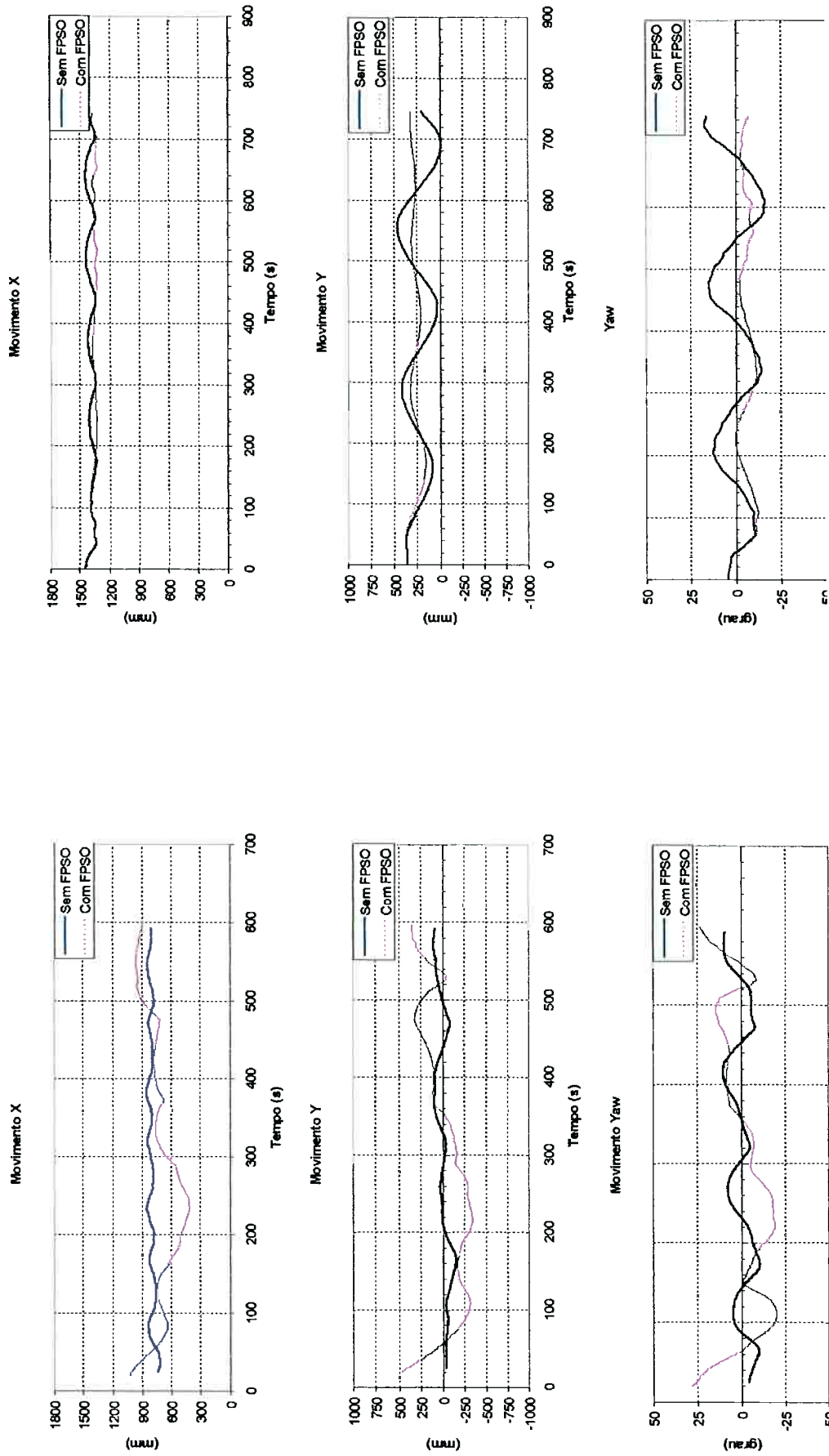
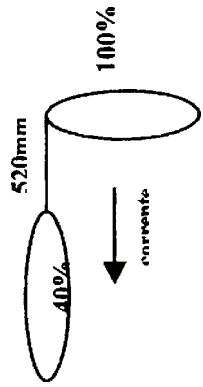


Fig.B-22a – Experimental

FPSO (100%; -90°); shuttle (40%); hawser 520mm; vel. 0.037m/s

Fig.B-22b – Numérico

FPSO (100%; -90°); shuttle (40%); hawser 520mm; vel. 0.037m/s

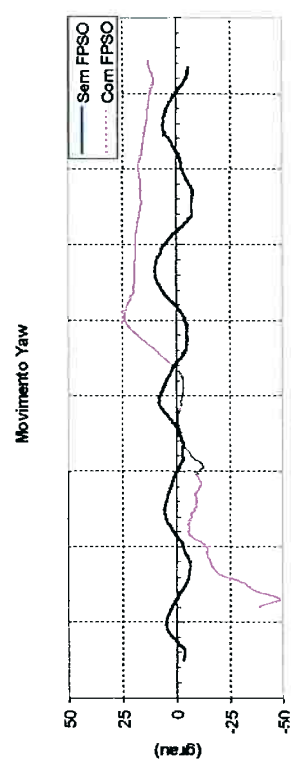
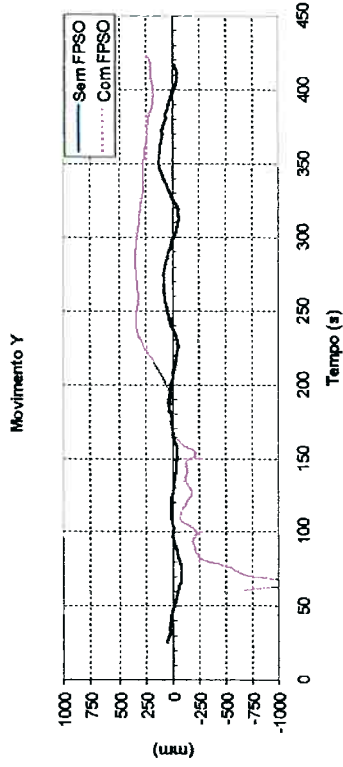
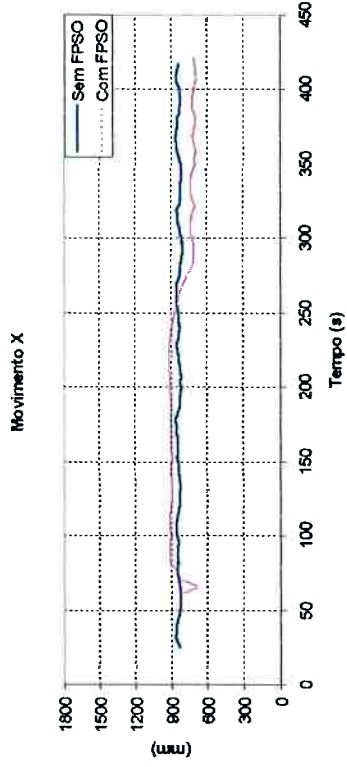
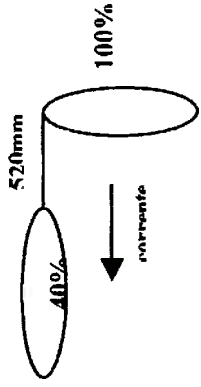


Fig.B-23a – Experimental

FPSO (100%; -90°); shuttle (40%); hawser 520mm; vel. 0.075m/s

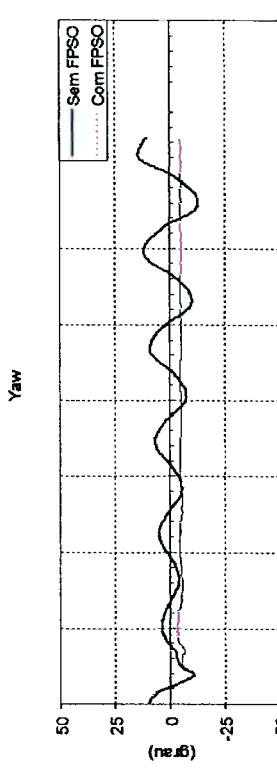
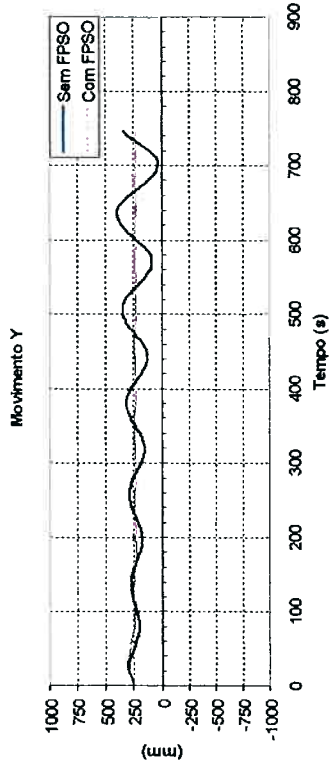
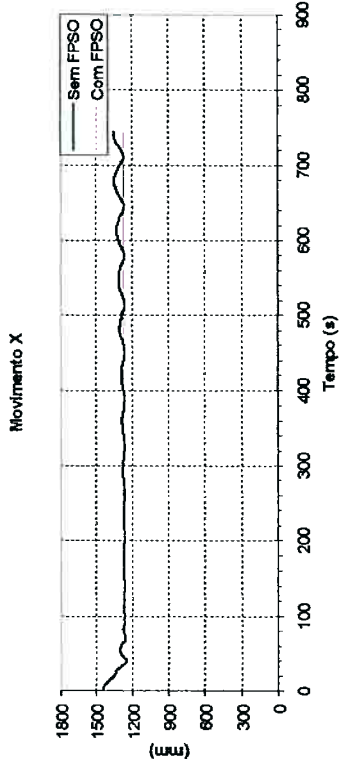


Fig.B-23b – Numérico

FPSO (100%; -90°); shuttle (40%); hawser 520mm; vel. 0.075m/s

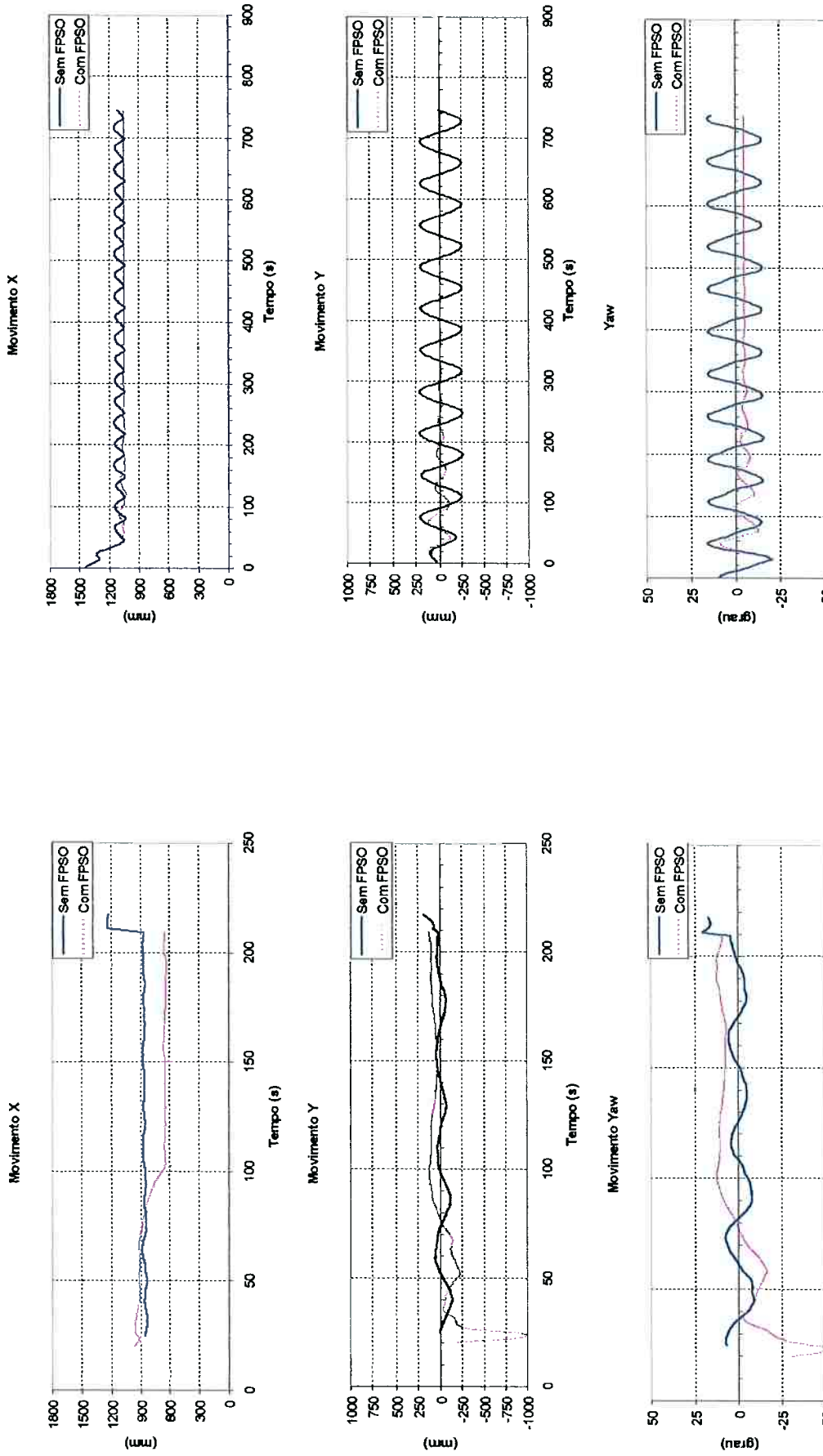
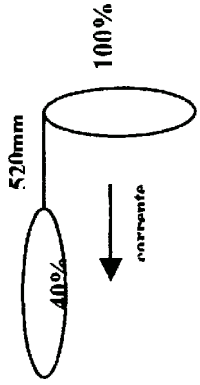


Fig.B-24a – Experimental

FPSO (100%; -90°); shuttle (40%); hawser 520mm; vel. 0.149m/s

Fig.B-24b – Numérico

FPSO (100%; -90°); shuttle (40%); hawser 520mm; vel. 0.149m/s

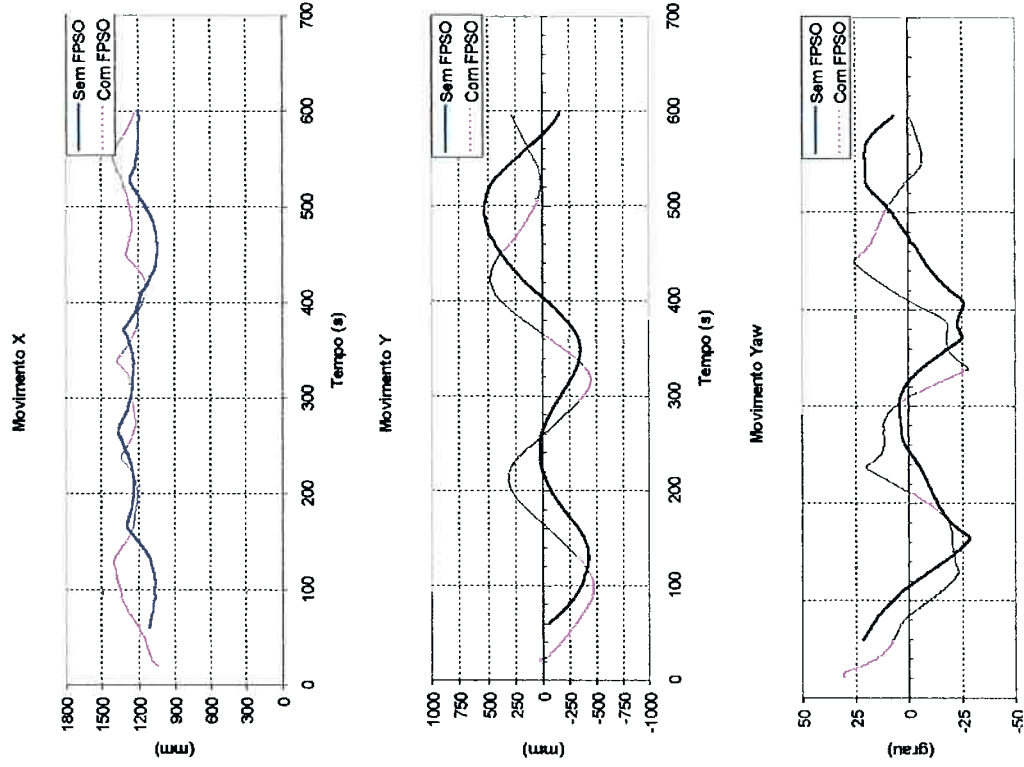
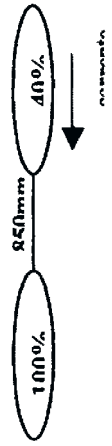


Fig.B-25a – Experimental FPSO (40%; -180°); shuttle (100%); hawser 850mm; vel. 0.037m/s

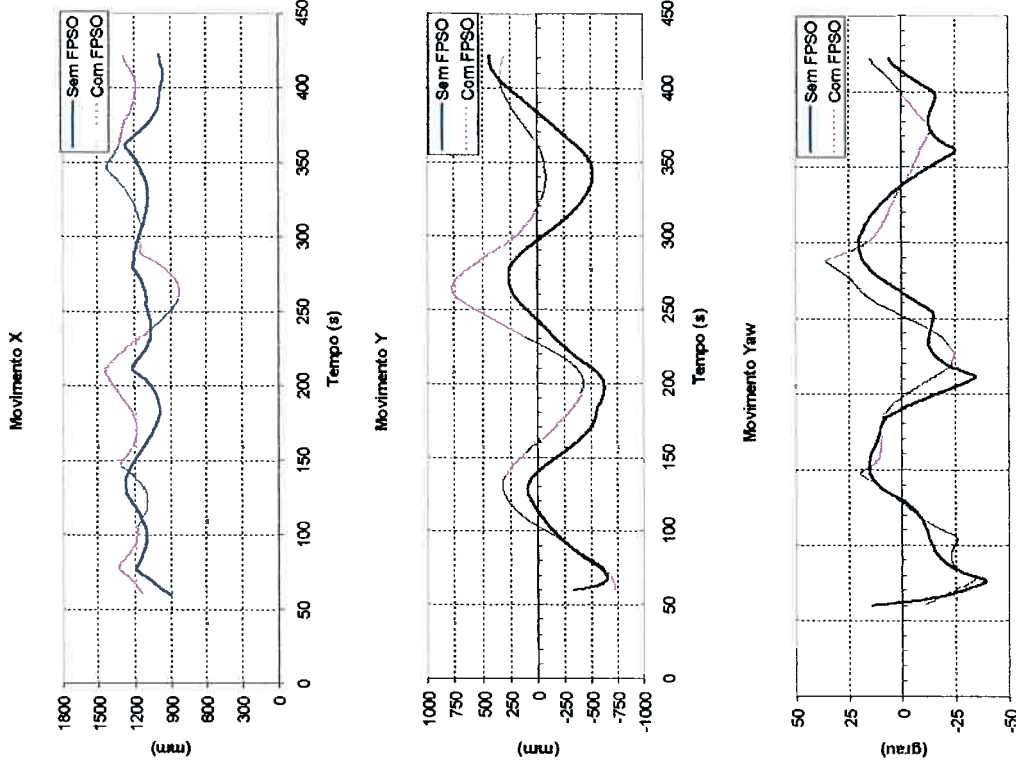
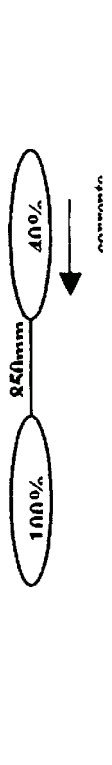


Fig.B-26a – Experimental FPSO (40%; -180°); shuttle (100%); hawser 850mm; vel. 0.075m/s

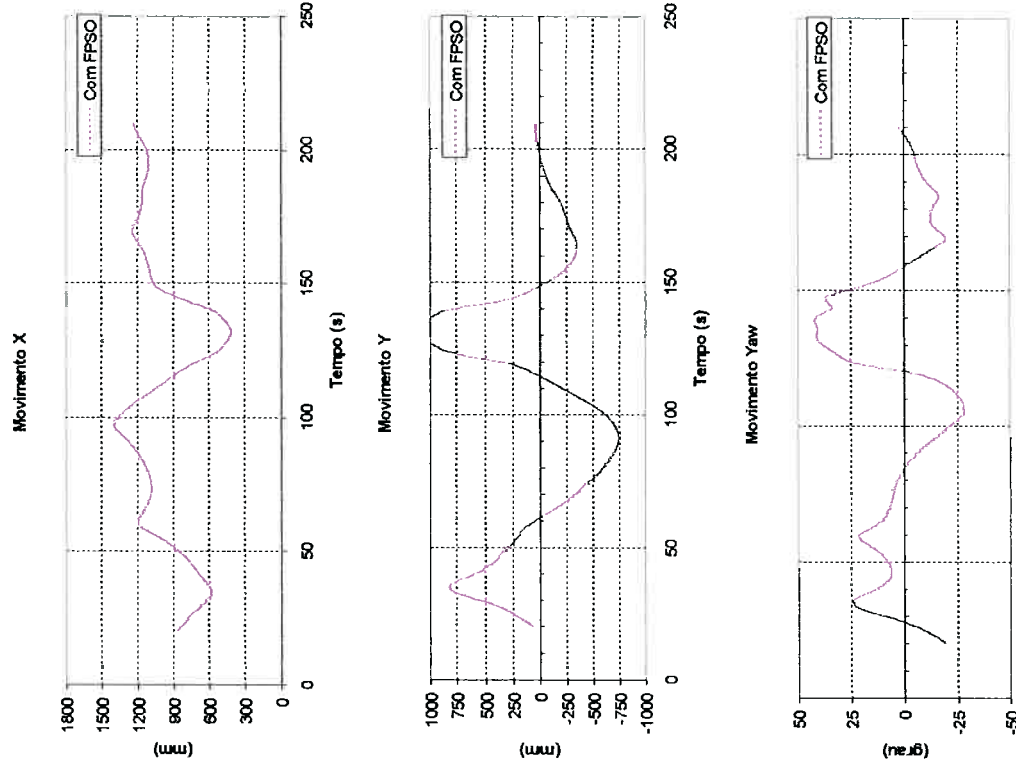
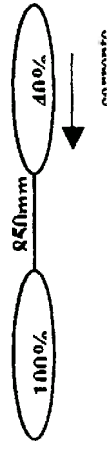


Fig.B-27a – Experimental  
FPSO (40%; -180°); shuttle (100%); hawser 850mm; vel. 0.149m/s

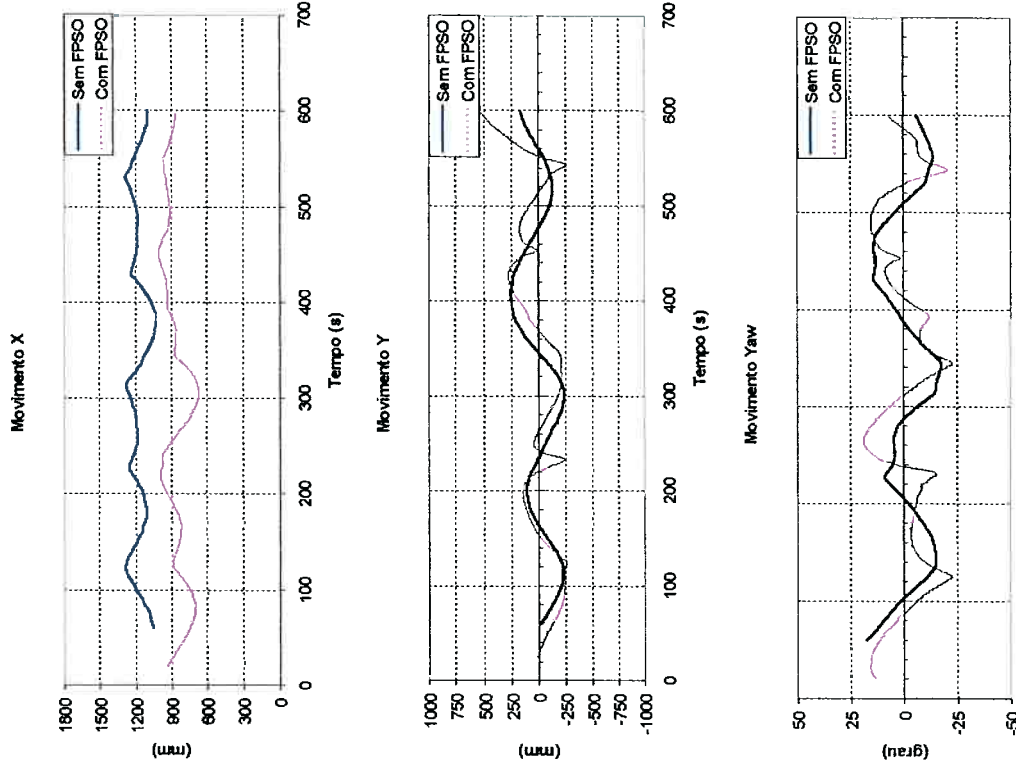
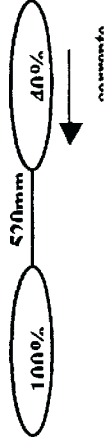


Fig.B-28a – Experimental  
FPSO (40%; -180°); shuttle (100%); hawser 520mm; vel. 0.037m/s

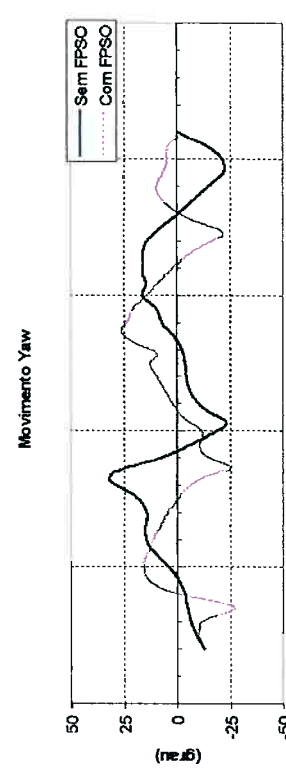
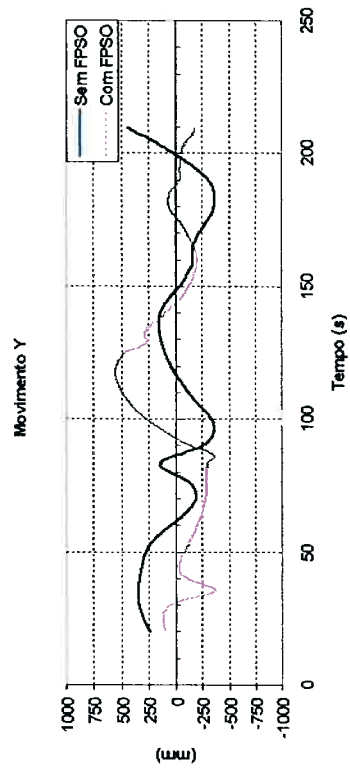
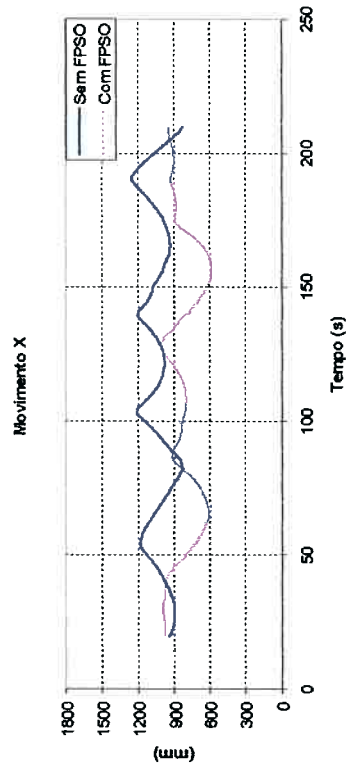
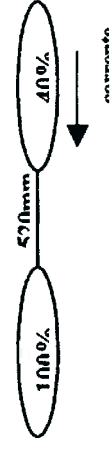


Fig.B-30a - Experimental FPSO (40%; -180°); shuttle (100%); hawser 520mm; vel. 0.149m/s

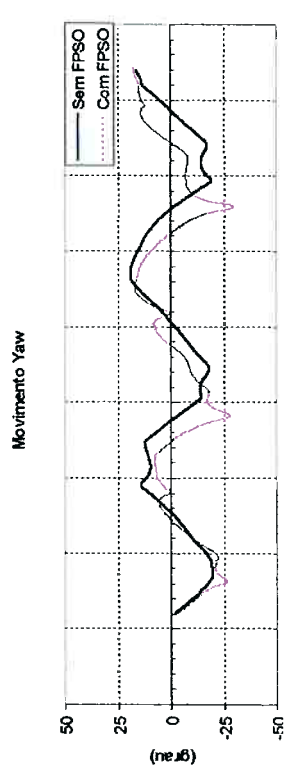
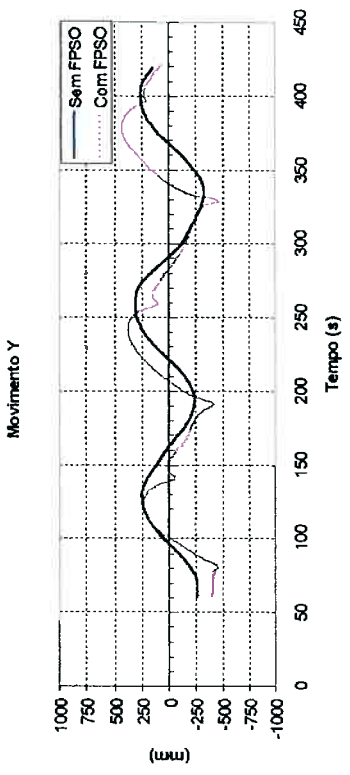
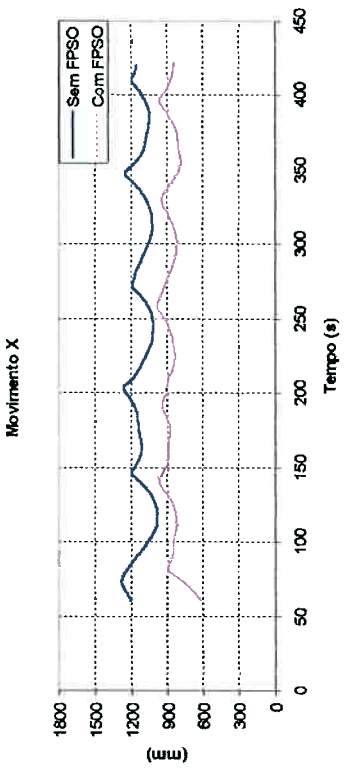
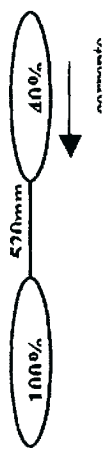


Fig.B-29a - Experimental FPSO (40%; -180°); shuttle (100%); hawser 520mm; vel. 0.075m/s



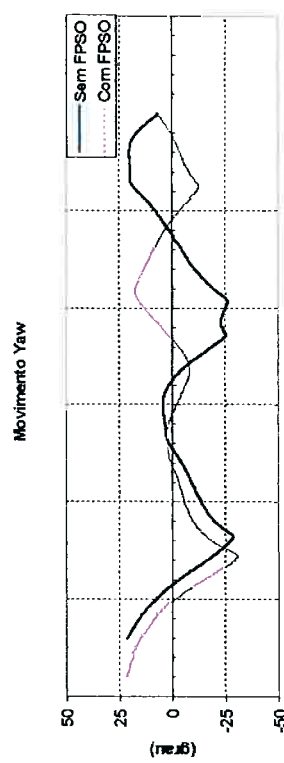
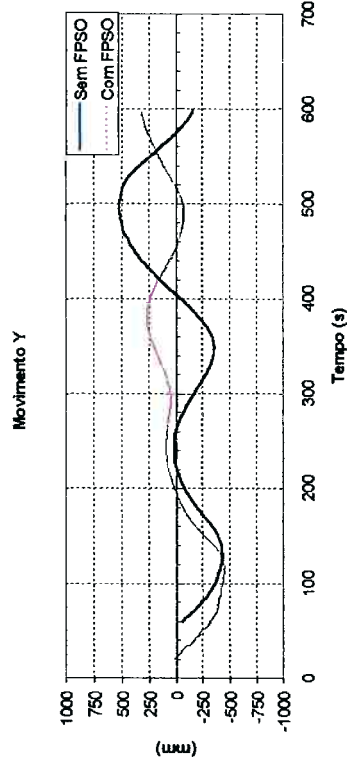
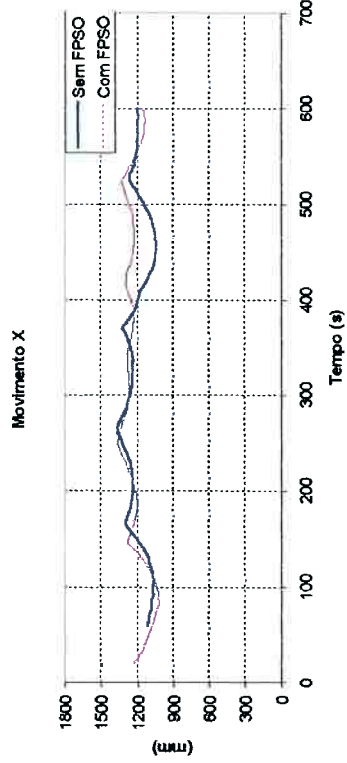
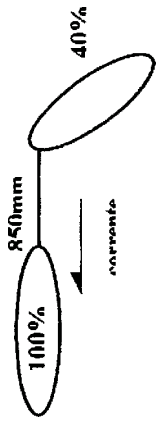


Fig.B-31a – Experimental  
 FFSO (40%; -135°); shuttle (100%); hawser 850mm; vel. 0.037m/s

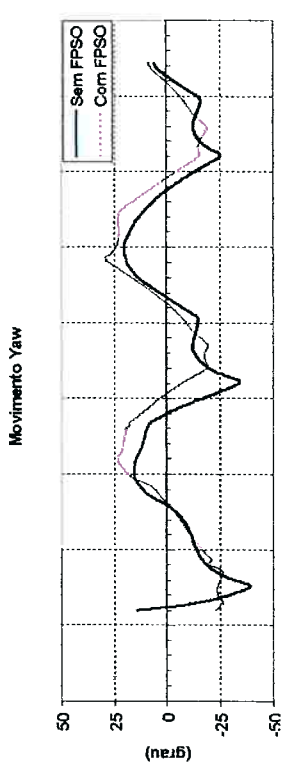
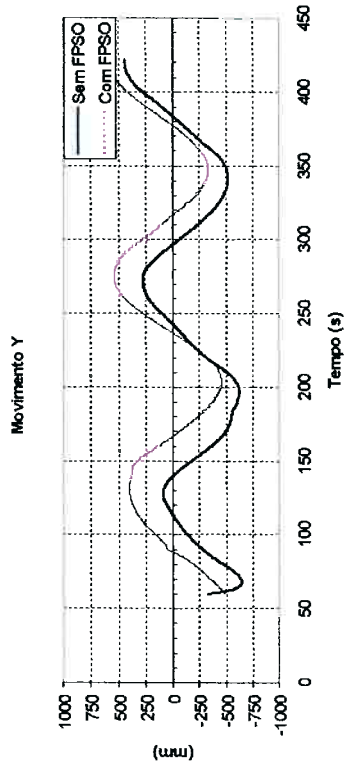
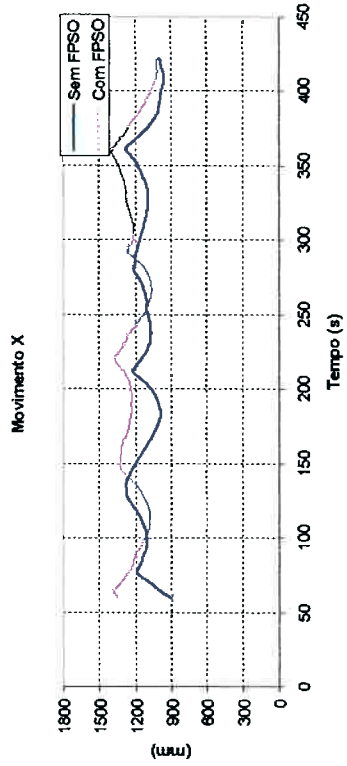
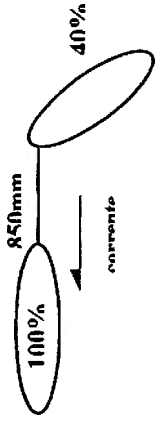


Fig.B-32a – Experimental  
 FFSO (40%; -135°); shuttle (100%); hawser 850mm; vel. 0.075m/s

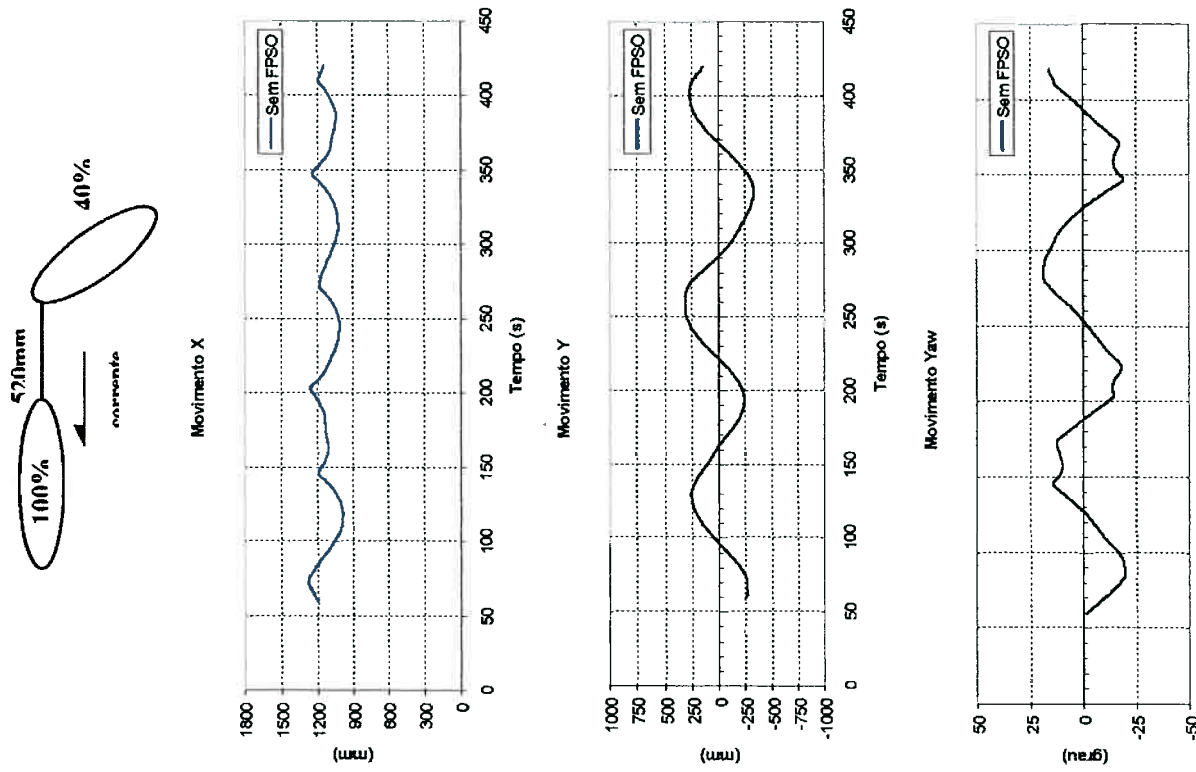


Fig.B-34a – Experimental FPSO (40%; -135°); shuttle (100%); hawser 520mm; vel. 0.075m/s

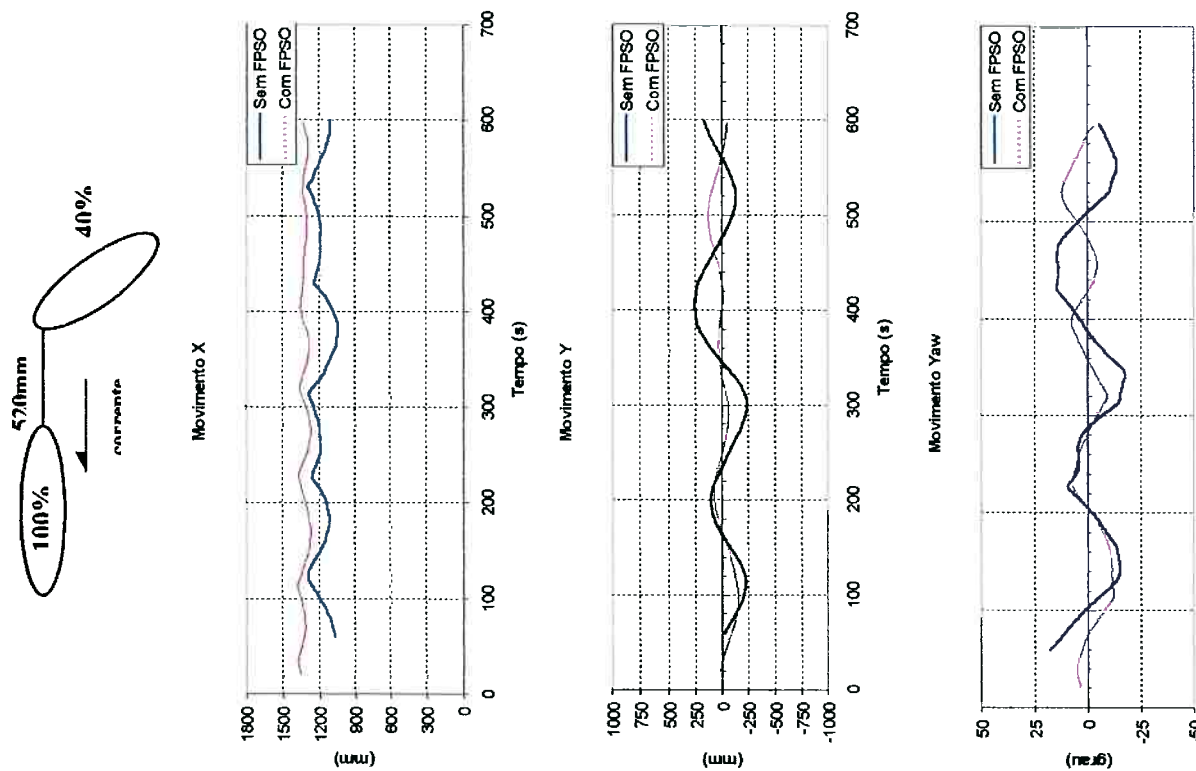


Fig.B-33a – Experimental FPSO (40%; -135°); shuttle (100%); hawser 520mm; vel. 0.037m/s

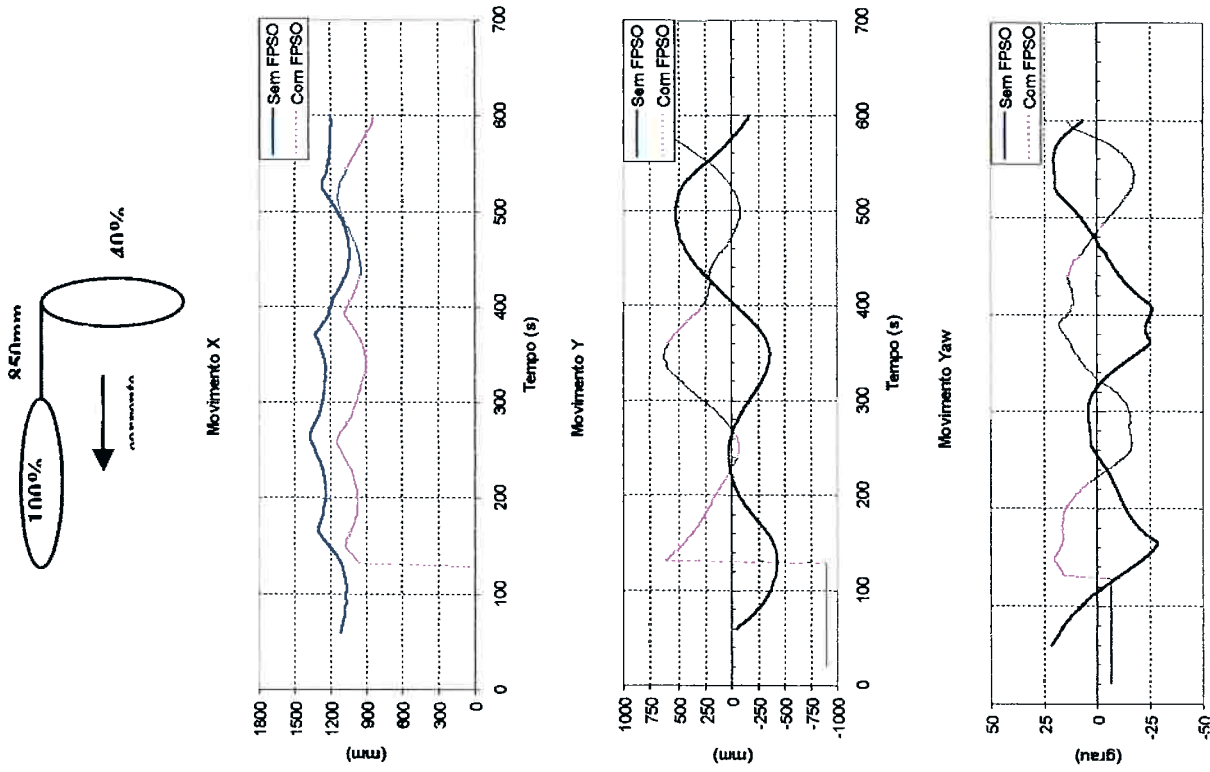


Fig.B-36a – Experimental FPSO (40%, -90°); shuttle (100%); hawser 850mm; vel. 0.037m/s

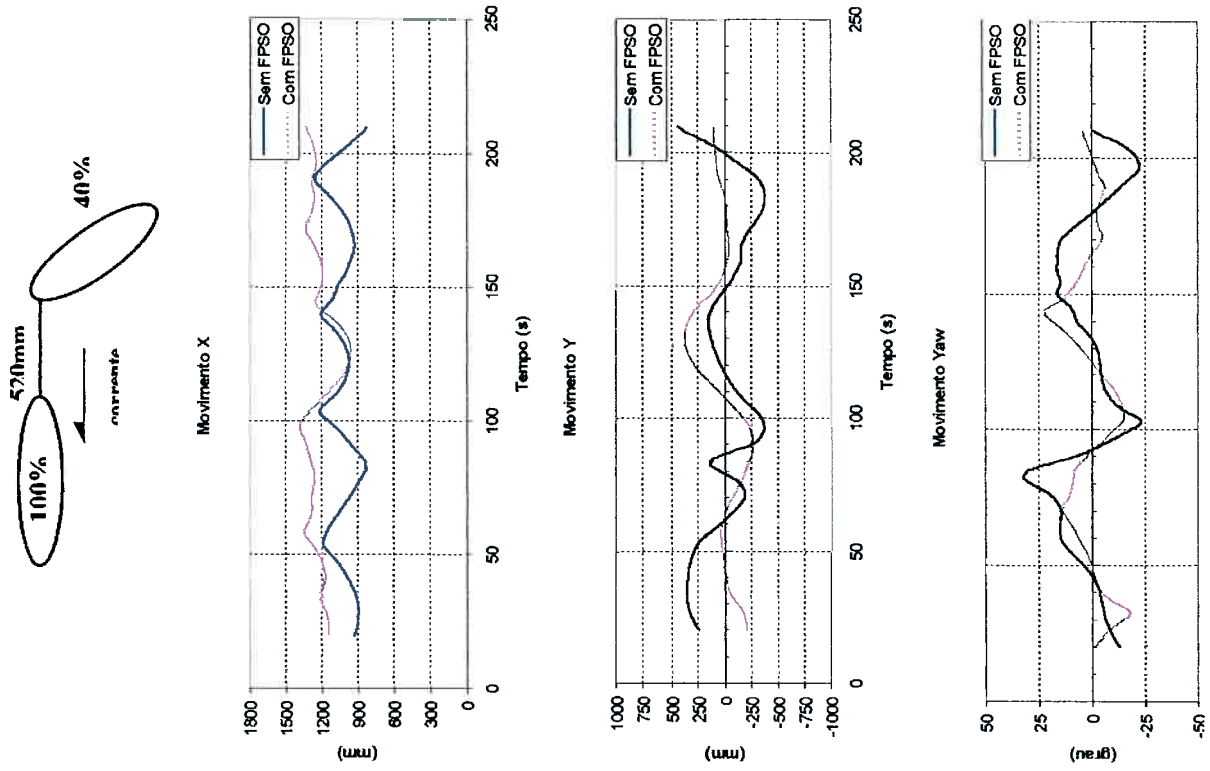


Fig.B-35a – Experimental FPSO (40%; -135°); shuttle (100%); hawser 520mm; vel. 0.149m/s

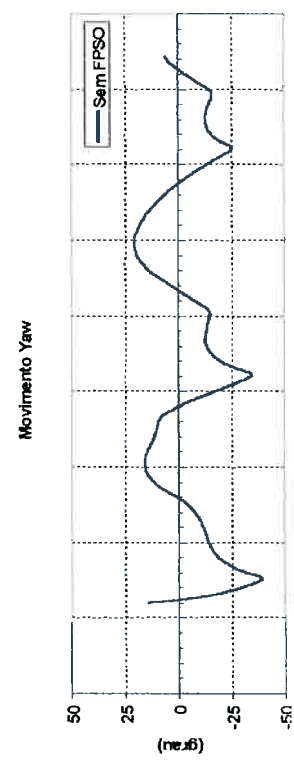
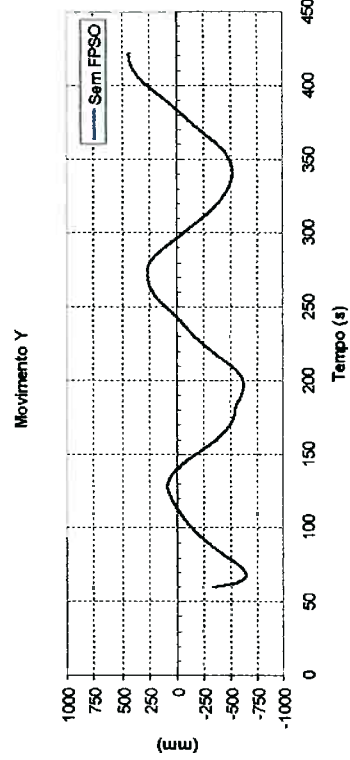
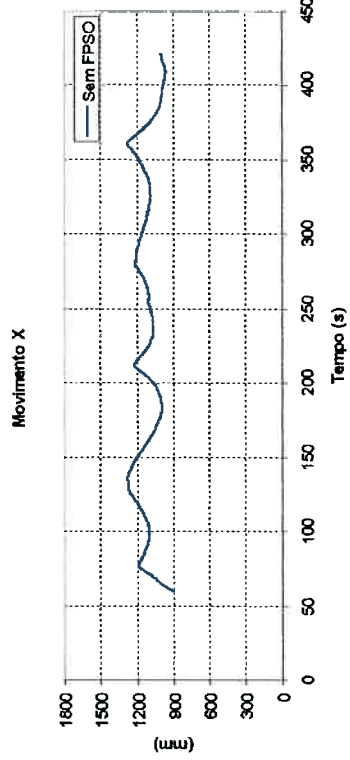
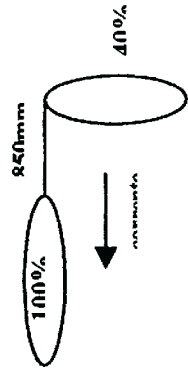


Fig.B-37a – Experimental FPSO (40%; -90°); shuttle (100%); hawser 850mm; vel. 0.075m/s

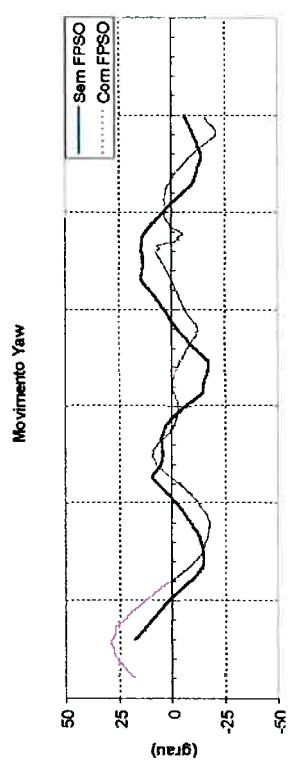
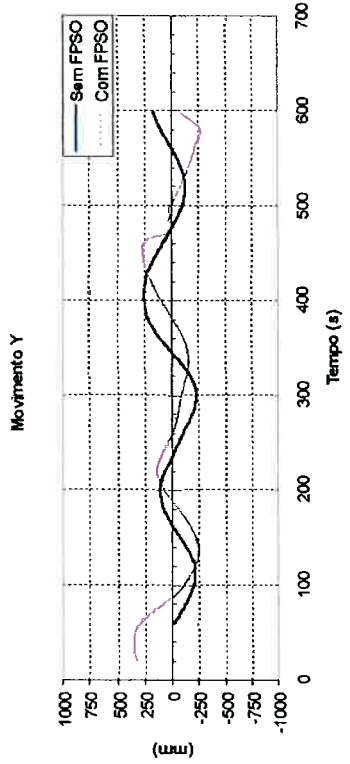
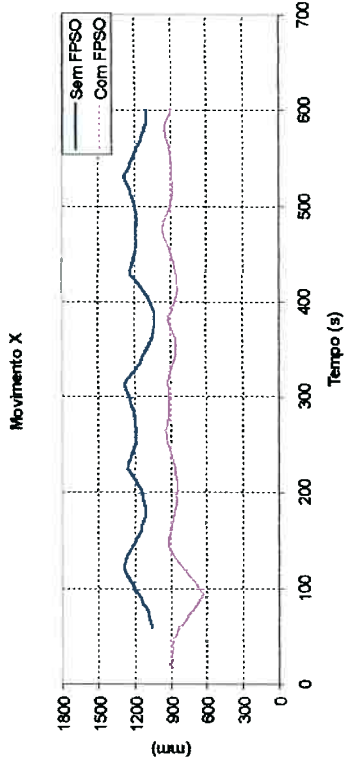
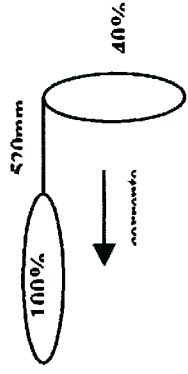


Fig.B-38a – Experimental FPSO (40%; -90°); shuttle (100%); hawser 520mm; vel. 0.037m/s

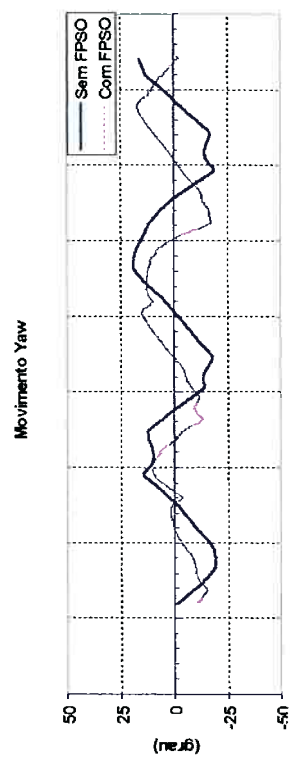
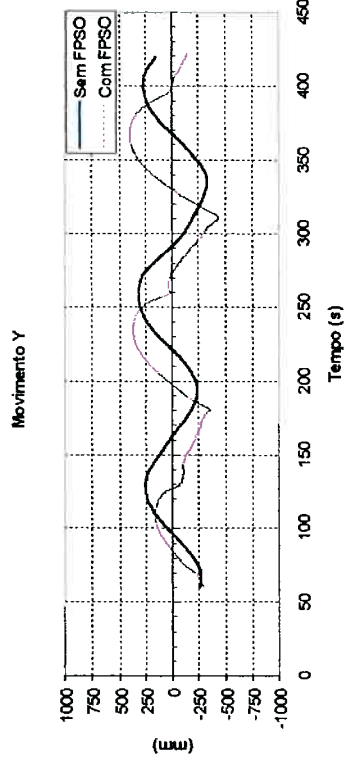
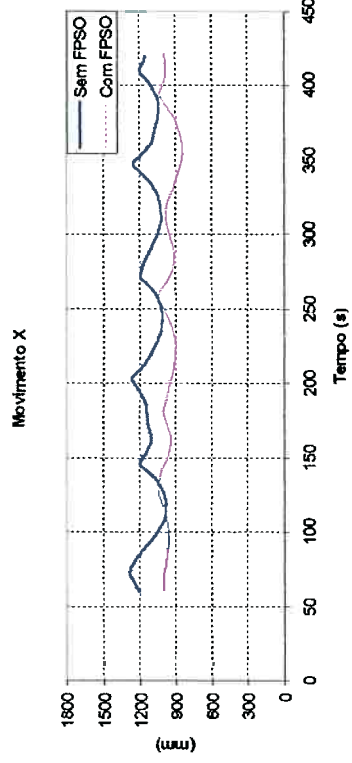
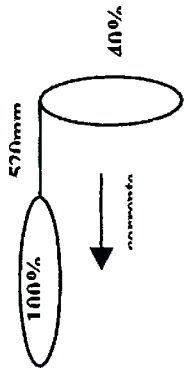


Fig.B-39a – Experimental FPSO (40%, -90°); shuttle (100%); hawser 520mm; vel. 0.075m/s

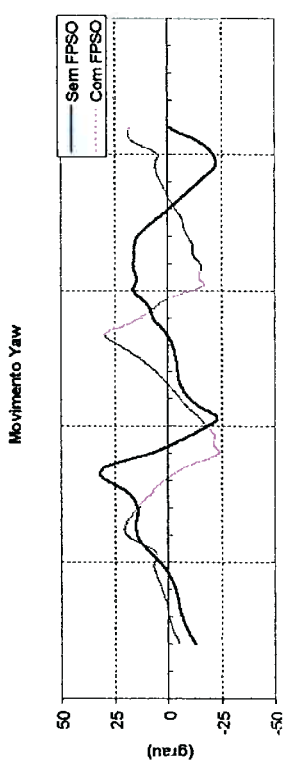
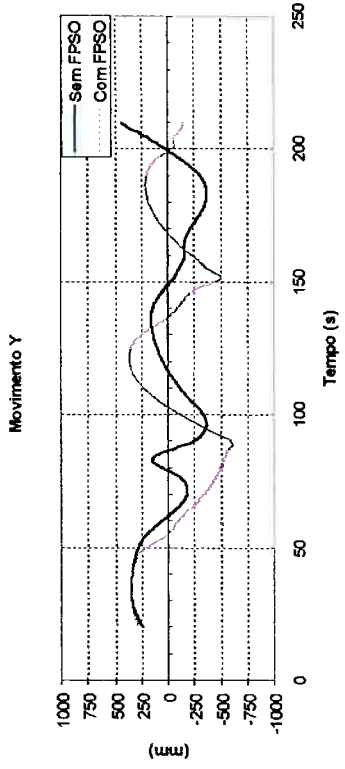
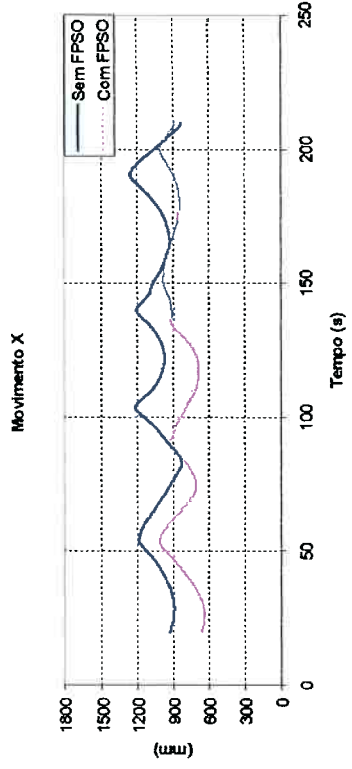
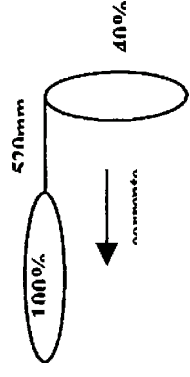


Fig.B-40a – Experimental FPSO (40%, -90°); shuttle (100%); hawser 520mm; vel. 0.149m/s