

# Aula 08

Forças de correnteza sobre navios  
amarrados: Modelo Heurístico  
(asa-curta)



# Introdução

- **Objetivos:**
  - Apresentar os princípios que nortearam a construção do modelo heurístico de forças de correnteza em navios petroleiros amarrados (Leite, 1997; Simos, 2001)
  - **Escopo:**
    - O estudo de manobras de navios e o conceito de derivadas hidrodinâmicas
    - Discussão sobre o modelo heurístico (apresentação da tese de doutorado – Simos, 2001)

# Referências

- Referências sugeridas para estudo:
  1. Bertram, V., Practical Ship Hydrodynamics, Butterwoth-Heinemann, 2000.
  2. Lewandowsky, E.M., The Dynamics of Marine Craft: Maneuvering and Seakeeping, World Scientific, 2004.
  3. Leite, A.J.P. Forças de corrente em petroleiros e bifurcação do equilíbrio em sistemas tipo turret. São Paulo, 1997. 1v. Dissertação (mestrado) – EPUSP.
  4. Simos, A.N., Modelo hidrodinâmico heurístico para análise de navios petroleiros amarrados sujeitos à ação de correnteza, São Paulo, 2001, 1v. Tese (doutorado) - EPUSP

# Manobrabilidade

## *Introdução*

### ➤ **Manobrabilidade:**

- capacidade de manutenção de curso;
- capacidade de mudança de curso;
- capacidade de mudança de velocidade (parada).

### ➤ **Em inglês: [manoeuvring](#)**

### ➤ **Questões:**

- O navio é capaz de **manter** um determinado **curso** com facilidade?
- Para quais condições de vento e correnteza o curso pode ser mantido?
- Quais as condições limite de vento e correnteza nas quais o navio pode ser **atracado sem assistência de rebocadores**?
- Qual a distância mínima necessária para o navio **desviar de um obstáculo** em caso de emergência?



# Manobrabilidade

## *Introdução*

- **Estudo de Manobrabilidade:**
  - Ausência de modelos preditivos puramente teóricos;
  - **Efeitos viscosos** em situações dinâmicas, com **variação de velocidades e acelerações**.
  - Interação entre **casco, propulsor e leme**.
  - Modelos matemáticos empíricos: dependentes de resultados de manobra em tanques de provas.

# Manobrabilidade

## *Equações do Movimento*

### ➤ Movimento no plano horizontal: Definições

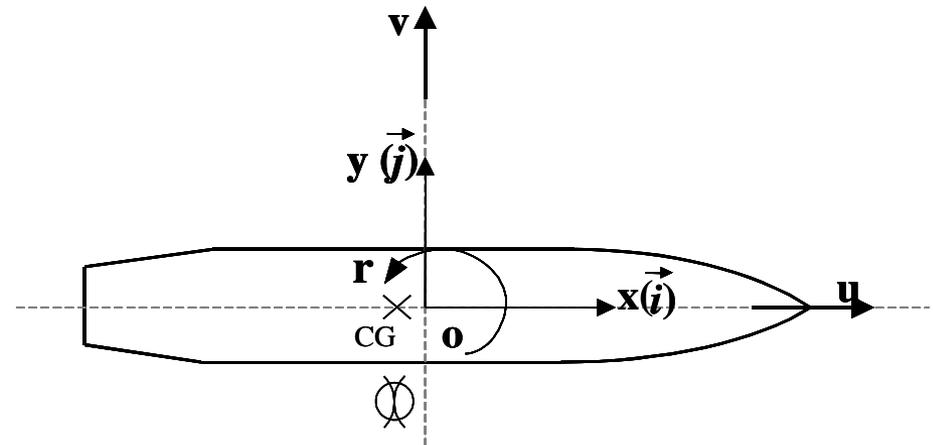
### ➤ Velocidades e Acelerações

$$(u, v, r)$$

$$(\dot{u}, \dot{v}, \dot{r})$$

### ➤ Forças hidrodinâmicas

- X: Força na direção longitudinal (corresponde à resistência para os casos de rumo e velocidade constante);
- Y: Força na direção transversal ao casco;
- N: Momento de yaw (ou de guinada).



# Manobrabilidade

## *Equações do Movimento*

- **Movimento no plano horizontal: Adimensionalização**

- **Velocidades e Acelerações:**

$$v' = \frac{v}{u} \quad r' = \frac{r \cdot L_{pp}}{u} \quad \dot{u}' = \frac{\dot{u} \cdot L_{pp}}{u^2} \quad \dot{v}' = \frac{\dot{v} \cdot L_{pp}}{u^2} \quad \dot{r}' = \frac{\dot{r} \cdot L_{pp}^2}{u^2}$$

- **Forças hidrodinâmicas:**

$$X' = \frac{X}{1/2 \rho u^2 L_{pp}^2} \quad Y' = \frac{Y}{1/2 \rho u^2 L_{pp}^2} \quad N' = \frac{N}{1/2 \rho u^2 L_{pp}^3}$$

# Manobrabilidade

## *Equações do Movimento*

### ➤ **Modelagem das Forças Hidrodinâmicas:**

- **Velocidade de referência:  $u$**
- **Expansão em Série das forças nas velocidades, acelerações e ângulo de leme (ex: Abkowitz, 1964):**

$$Y' = Y'_v \dot{v}' + Y'_r \dot{r}' + Y'_v v' + Y'_{v^3} (v')^3 + Y'_{vr^2} v'(r')^2 + Y'_{v\delta^2} v'(\delta)^2 + Y'_r r' + Y'_{r^3} (r')^3 + \dots$$

- **Coeficientes: Derivadas Hidrodinâmicas**
- **Obtenção das derivadas hidrodinâmicas: Ensaios em tanque de provas**

# Manobrabilidade

## Equações do Movimento

- **Exemplo:**
  - **Wolff (1981)**
  - (extraído de Bertram, V., Practical Ship Hydrodynamics)

Table 5.2 Non-dimensional hydrodynamic coefficient of four ship models (Wolff (1981)); values to be multiplied by  $10^{-6}$

Model of	Tanker	Series 60	Container	Ferry	Model of	Tanker	Series 60	Container	Ferry
Initial $F_n$	0.145	0.200	0.159	0.278					
$m'$	14622	11432	6399	6765	$Y'_{\beta}$	-11420	-12608	-6755	-7396
$x'_{\beta} m'$	365	57	-127	-116	$Y'_{\beta^2}$	-21560	-34899	-10301	0
$I'_{\beta}$	766	573	329	319	$Y'_{\beta^2 u}$	-714	-771	-222	-600
$X'_{\beta}$	-1077	-1064	0	0	$Y'_{\beta^2 r}$	-468	166	-63	0
$X'_{\beta u}$	-5284	0	0	0	$Y'_{\beta^2 r^2}$	-244	26	0	0
$X'_{\beta u^2}$	-2217	-2559	-1320	-4336	$Y'_{\beta^2 r^2 u}$	263	-69	-33	57
$X'_{\beta^2}$	1510	0	1179	-2355	$Y'_{\beta^2 r^2 u^2}$	-15338	-16630	-8470	-12095
$X'_{\beta^2 u}$	0	-2851	0	-2594	$Y'_{\beta^2 r^2 u^2 r}$	-36832	-45034	0	-137302
$X'_{\beta^2 u^2}$	-889	-3908	-1355	-3279	$Y'_{\beta^2 r^2 u^2 r^2}$	-19040	-37169	-31214	-44365
$X'_{\beta^2 u^2 r}$	237	-838	-151	-571	$Y'_{\beta^2 r^2 u^2 r^2 u}$	0	0	-4668	2199
$X'_{\beta^2 u^2 r^2}$	-1598	-1346	-696	-2879	$Y'_{\beta^2 r^2 u^2 r^2 u^2}$	4842	4330	2840	1901
$X'_{\beta^2 u^2 r^2 u}$	0	-1833	-2463	-2559	$Y'_{\beta^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r}$	0	152	85	0
$X'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2}$	2001	2536	0	3425	$Y'_{\beta^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2}$	1989	2423	-1945	-1361
$X'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2}$	0	0	-470	-734	$Y'_{\beta^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u}$	0	-1305	2430	-1297
$X'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2}$	9478	7170	3175	4627	$Y'_{\beta^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2}$	0	0	4769	0
$X'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r}$	1017	942	611	877	$Y'_{\beta^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r}$	22878	10230	-33237	-36490
$X'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2}$	-482	-372	-340	-351	$Y'_{\beta^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u}$	1492	0	0	-2752
$X'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2}$	745	0	0	0	$Y'_{\beta^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2}$	3168	2959	1660	3587
$X'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r}$	0	0	-207	0	$Y'_{\beta^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2}$	0	0	0	98
$X'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2}$	0	-270	0	0	$Y'_{\beta^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r}$	3621	-7494	0	0
$X'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2}$	48	0	0	-19	$Y'_{\beta^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u}$	1552	613	-99	0
$X'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2}$	166	0	0	0	$Y'_{\beta^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2}$	-5526	4344	-1277	-6262
$X'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u}$	0	150	0	0	$Y'_{\beta^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2}$	0	0	13962	0
$X'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2}$	-4717	0	0	0	$Y'_{\beta^2 r^2 u^2 r^2 u}$	1637	0	2438	0
$X'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2}$	-365	0	0	0	$Y'_{\beta^2 r^2 u^2 r}$	-4562	-4096	0	-5096
$X'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2}$	1164	2143	0	0	$Y'_{\beta^2 r^2 u^2 r^2 u^2}$	0	974	0	0
$X'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2}$	-118	0	0	0	$Y'_{\beta^2 r^2 u^2 r^2}$	2640	4001	0	3192
$X'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2}$	-278	0	0	0	$Y'_{\beta^2 r^2 u^2 r^2 u^2}$	-11513	-19989	-47566	0
$X'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2}$	0	621	213	2185	$Y'_{\beta^2 r^2 u^2 r^2 u^2}$	-351	0	1731	0
$X'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2}$	0	0	-3865	0	$Y'_{\beta^2 r^2 u^2 r^2 u^2}$	-889	2029	0	0
$X'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2}$	0	0	-447	0	$Y'_{\beta^2 r^2 u^2 r^2 u^2}$	12398	0	0	0
					$Y'_{\beta^2 r^2 u^2 r^2 u^2}$	0	2070	0	0

### Longitudinal forces X

Model of	Tanker	Series 60	Container	Ferry
$N'_{\beta}$	-523	326	239	426
$N'_{\beta^2}$	2311	1945	5025	10049
$N'_{\beta^2 u}$	-576	-461	-401	-231
$N'_{\beta^2 u^2}$	-130	-250	132	0
$N'_{\beta^2 u^2 r}$	67	9	0	0
$N'_{\beta^2 u^2 r^2}$	-144	37	8	-36
$N'_{\beta^2 u^2 r^2 u}$	-5544	-6570	-3800	-3919
$N'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2}$	-132	0	0	0
$N'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r}$	-2718	-16602	-23865	-33857
$N'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2}$	0	-1146	-2179	-3666
$N'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u}$	3448	4421	-4586	0
$N'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2}$	2317	0	1418	570
$N'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r}$	-3074	-2900	-1960	-2579
$N'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2}$	0	-45	0	0
$N'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u}$	-865	-1919	-729	-2253
$N'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2}$	0	0	-473	0
$N'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r}$	913	0	0	0
$N'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2}$	-16196	-20530	-27858	-60110

### Transverse forces Y

Model of	Tanker	Series 60	Container	Ferry
$N'_{\beta^2}$	-324	0	-404	237
$N'_{\beta^2 u}$	-1402	-1435	-793	-1621
$N'_{\beta^2 u^2}$	0	-138	0	-73
$N'_{\beta^2 u^2 r}$	-1641	3907	0	0
$N'_{\beta^2 u^2 r^2}$	-536	0	0	0
$N'_{\beta^2 u^2 r^2 u}$	2220	-2622	652	2886
$N'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2}$	0	0	-6918	-2950
$N'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r}$	-855	0	-1096	-329
$N'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2}$	2321	1856	0	2259
$N'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u}$	0	-568	0	0
$N'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2}$	316	0	0	0
$N'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r}$	-1538	-1964	0	-1382
$N'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2}$	0	5328	8103	0
$N'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u}$	0	0	-1784	0
$N'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2}$	-394	0	0	0
$N'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r}$	384	-1030	0	0
$N'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2}$	-27133	-13452	0	0
$N'_{\beta^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u^2 r^2 u}$	0	-476	0	-1322

# Manobrabilidade

## *Equações do Movimento*

- **Equações do movimento**
  - Origem no CG;
  - Referencial móvel (O,x,y,z)

$$m'(\dot{u}' - v'r') = X'$$

$$m'(\dot{v}' + r'u') = Y'$$

$$I'_{zz} \dot{r}' = N'$$

Com:

$$m' = \frac{m}{1/2 \rho L_{pp}^3}$$

$$I'_{zz} = \frac{I_{zz}}{1/2 \rho L_{pp}^5}$$



Simuladores de manobras

# Manobrabilidade

## *Estabilidade Direcional*

- **Na hipótese de pequenas perturbações da velocidade de avanço:**

$$v' = \frac{v}{u} \ll 1 \quad r' \ll 1 \quad \dot{v}' \ll 1$$

- **Nessas condições:**  
 $v'^3 \ll v'^2 \ll v'$   
 $r'^3 \ll r'^2 \ll r'$   
etc...
- **Simplificação: “linearização” das forças**

$$Y' \cong Y_{\dot{v}'} \dot{v}' + Y_{\dot{r}'} \dot{r}' + Y_v v' + Y_r r' + Y_{\delta} \delta'$$

# Manobrabilidade

## *Estabilidade Direcional*

- **Equações de Movimento simplificadas (linearizadas):**

$$m'\ddot{u}' = X'_{\dot{u}}\dot{u}' + X'_u\Delta u$$

$$(m' - Y'_{\dot{v}})\dot{v}' = Y'_{\dot{r}}\dot{r}' + Y'_{\dot{v}}v' + (Y'_r - m')r' + Y'_\delta\delta$$

$$(I'_{zz} - N'_{\dot{r}})\dot{r}' = N'_{\dot{v}}\dot{v}' + N'_{\dot{r}}v' + N'_r r' + N'_\delta\delta$$

As derivadas hidrodinâmicas de aceleração correspondem às **massas adicionais** do navio. Se os efeitos de separação sobre o casco forem pequenos, elas podem ser aproximadas pelas massas adicionais potenciais do casco (fluido ideal)

# Manobrabilidade

## *Regressões para as Derivadas*

### ➤ **Regressões Analíticas para as Derivadas Hidrodinâmicas**

- Baseadas nas análises de um grande número de ensaios
- **Ex: Clarke et al. (1983):**

$$Y'_v = -\pi(T/L_{pp})^2 \cdot (1 + 0.16C_B B/T - 5.1(B/L_{pp})^2)$$

$$Y'_r = -\pi(T/L_{pp})^2 \cdot (0.67B/L_{pp} - 0.0033(B/T)^2)$$

$$N'_v = -\pi(T/L_{pp})^2 \cdot (1.1B/L_{pp} - 0.041B/T)$$

$$N'_r = -\pi(T/L_{pp})^2 \cdot (1/12 + 0.017C_B B/T - 0.33B/L_{pp})$$

$$Y'_v = -\pi(T/L_{pp})^2 \cdot (1 + 0.40C_B B/T)$$

$$Y'_r = -\pi(T/L_{pp})^2 \cdot (-0.5 + 2.2B/L_{pp} - 0.08B/T)$$

$$N'_v = -\pi(T/L_{pp})^2 \cdot (0.5 + 2.4T/L_{pp})$$

$$N'_r = -\pi(T/L_{pp})^2 \cdot (0.25 + 0.039B/T - 0.56B/L_{pp})$$

# O problema do navio amarrado

- Nesse caso, deve-se considerar qualquer possível valor de ângulo de incidência
- O modelo heurístico (Leite, 1997; Simos, 2001):

