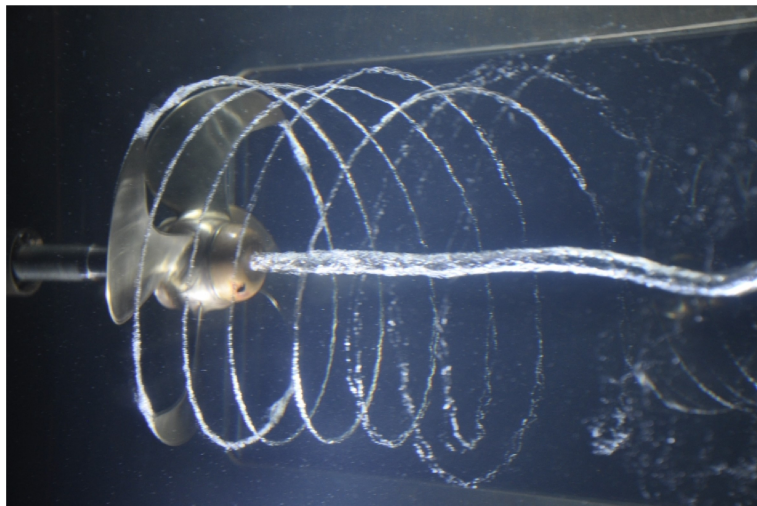


INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS

RELATÓRIO TÉCNICO DE ESTÁGIO

ENSAIO DE LEVANTAMENTO DE CURVAS TENSÃO-EMPUXO PARA DIFERENTES BOSSOS EM TUNEL DE CAVITAÇÃO



Yuri Cabral Cordeiro
Pedro Henrique Monteiro Guedes
Diôgo Cavalcante Rodrigues Lopes
Paulo Eloy Freitas de souza

São Paulo
2019

Sumário

1	Introdução	4
1.1	O túnel de cavitação utilizado	4
1.2	Equipamentos utilizados	5
2	Características do hélice ensaiado	7
3	Metodologia	7
3.1	Ensaio em água aberta	7
3.2	Parâmetros de desempenho	9
4	Grandezas medidas no ensaio	11
5	Resultados	12
6	Conclusão	15
7	Referência Bibliográfica	15

Resumo

O Presente relatório tem a finalidade de apresentar os resultados dos ensaios realizados no período de estágio no mês de julho de 2019 pelos autores/pesquisadores. Tais ensaios foram feitos no Túnel de Cavitação (TC) do Laboratório de Engenharia Naval e Oceânica do Centro de Tecnologia Mecânica, Naval e Elétrica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT.

Apresentaremos a metodologia e os dispositivos utilizados, bem como os parâmetros obtidos e os resultados que foram alcançados. Buscar-se-à ilustrar este documento com as curvas de desempenho e algumas imagens representativas do propulsor e dos equipamentos utilizados.

1 Introdução

1.1 O túnel de cavitação utilizado

O Túnel de Cavitação do IPT, modelo Kempf-Remmers K18, foi inaugurado 1963 em uma parceria desse Instituto com a Marinha do Brasil. Desde de sua criação, teve relevante papel na expansão da indústria naval brasileira, realizando diversas investigações sobre o desempenho hidrodinâmico de propulsores.

No túnel é possível induzir um fluxo de água equivalente ao encontrado na operação de uma embarcação, regulando a velocidade, a pressão hidrostática e rotação do hélice, e medir o empuxo e o torque gerados, além de visualizar a cavitação.

Devido às suas características, o TC é capaz de operar com modelos de até 200mm de diâmetro, tendo em vista o grande efeito do fenômeno de bloqueio para diâmetros maiores. Além disso, possui uma seção de testes de 2 metros de comprimento e uma seção quadrada de 0.25 m^2 . Essas e outras características do TC podem ser visualizadas na Tabela 1.

Área da seção transversal (m^2)	0,25
Pressão na seção de testes (atm)	0.2 - 1.6
Velocidade de rotação do hélice (rpm)	3000
Velocidade do fluxo de água (m/s)	0.0 - 7.0

Tabela 1: Características do túnel de cavitação

As velocidades de rotação do eixo na seção de testes e a velocidade da água em todo o sistema são controladas, respectivamente, por um motor trifásico de 15 kW e uma bomba, acoplada a um motor trifásico de 51,5 kW. Em um circuito fechado, a água recircula guiada por aletas nos joelhos e por uma grelha ortogonal (honeycomb) a montante da seção de testes. Tais estruturas direcionam e uniformizam o escoamento. Além disso, uma estrutura geometricamente parecida com um tubo Venturi de seção quadrada, localizada na entrada da seção de testes, proporciona, também, uma uniformização do escoamento. A Figura 1 ilustra a seção de testes.

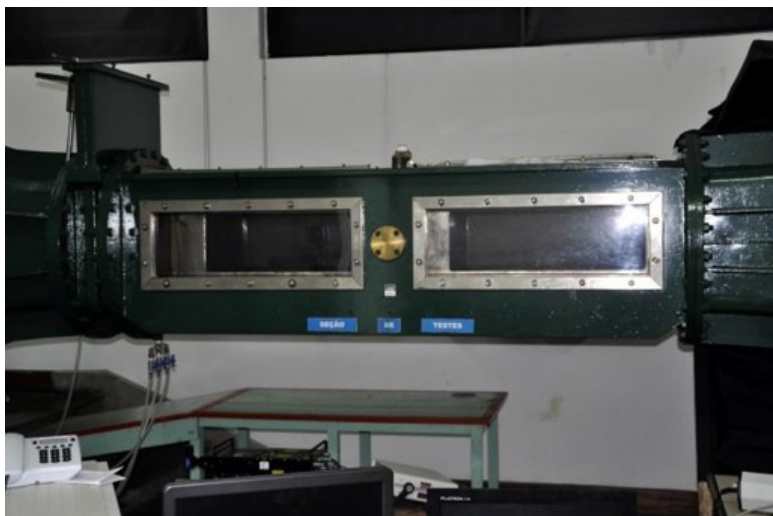


Figura 1: Seção de testes do TC do IPT

1.2 Equipamentos utilizados

O Túnel de cavitação é capaz de operar com diversos tipos de sensores, porém, neste relatório, serão abordados somente aqueles utilizados durante os ensaios usados para medir a velocidade da água na seção de teste e a pressão hidrostática.

- **Transdutores.**

São três transdutores diferenciais, modelo Rosemount 2051 da Emerson Process. O transdutor de maior fundo de escala realiza a medição de pressão na linha do eixo em relação a um nível de água estático fora do TC, cuja altura está pré-ajustada para ficar na mesma posição da linha de centro da seção de testes. Deste modo, obtêm-se um valor de pressão relativa que será transformada em pressão absoluta ao somar-se o valor de pressão atmosférica local. Os outros dois transdutores realizam suas aquisições na entrada e na saída da seção do túnel que se assemelha a um tubo de Venturi, com área transversal aproximadamente quadrada.

- **Sistemas pendulares.**

Dois sistemas pendulares são responsáveis pela medição do torque e do empuxo. O sistema opera com células de cargas que utilizam transdutores de força S2M da HBM com fundo de escala de 20 a 1000N, mantendo um erro de linearidade de 0.05%. Tal alteração foi feita a fim de facilitar a medição dos parâmetros. Logo, ao se realizar esta mudança, o deslocamento que o pêndulo teria é contabilizado através da deformação na célula de carga.



Figura 2: Transdutor de pressão diferencial modelo Rosemount 2051



Figura 3: Vista geral dos sistemas pendulares de medição do torque e empuxo do hélice, com as células de carga instaladas.

2 Características do hélice ensaiado

Os ensaios realizados no TC foram ensaios de água aberta, ou seja, a água incidindo de forma uniforme no propulsor. Como preparativo para os testes, foi realizado a eliminação de bolhas de ar contidas no TC, por meio da circulação em baixa velocidade da água do tanque. Durante a execução do ensaio a análise do comportamento do escoamento através do propulsor foi realizado observando a variação de certas condições impostas todas listadas na Tabela 2.

Bosso	Rotação	Velocidade de avanço efetivo
Cruzeta	1008 rpm	0,6305 - 4,322 (m/s)
Divergente	1008 rpm	0,7151 - 4,312 (m/s)

Tabela 2: Parâmetros utilizados no túnel de cavitação

Vale ressaltar que a velocidade de rotação escolhida foi baseada na velocidade real experimentada por propulsores de submarinos de forma a obter resultados mais fidedignos na comparação entre os dois bossos.

3 Metodologia

3.1 Ensaio em água aberta

Os ensaios foram realizados utilizando um hélice de sete (7) pás em alumínio, projetado para a esteira do submarino DARPA SUBOFF do Laboratório de Hidrodinâmica da Marinha do Brasil em São Paulo (LABHIDRO). O modelo está em escala reduzida ($\Lambda = 1,588$), devido as limitações físicas do TC. A tabela 1 apresenta as principais características do hélice utilizado.

Diâmetro	D_p	0,189	m
Diâmetro do Bosso	D_b	0,0378	m
Rake	RK	0	m
Ângulo de Skew máximo	Θ	20	graus
Razão passo/ diâmetro do propulsor	$\frac{P_{0,7R}}{D_p}$	1,216	-
Corda 0,7R	$C_{0,7R}$	0,03658	m

Tabela 3: Características do hélice

Foram utilizados nos ensaios dois tipo diferentes de bosso:

- Bosso de cruzeta: ilustrado na Figura 1, muito utilizado por submarinos tem como objetivo diminuir a cavitação e conseqüentemente o ruído emitido.



Figura 4: Bosso de cruzeta

- Bosso divergente: ilustrado na Figura 2, nova geometria desenvolvida pelo LABHI-DRO que tem como objetivo uma diminuição da cavitação aumentando o diâmetro do vórtice e diminuindo a queda de pressão no seu centro.

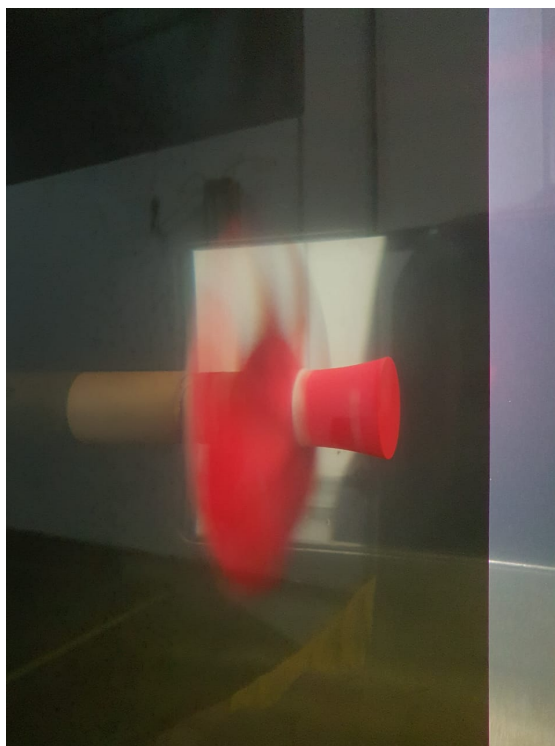


Figura 5: Bosso divergente

Vale ressaltar que a velocidade de rotação escolhida foi baseada na velocidade real

experimentada por propulsores de submarinos de forma a obter resultados mais fidedignos na comparação entre os dois bosses.

3.2 Parâmetros de desempenho

Durante os ensaios foram registrados os esforços de torque e empuxo realizados pelo eixo, por meio das células de carga. Como estamos trabalhando com um modelo em escala, os resultados devem ser apresentados em forma adimensional. O empuxo adimensionalizado é representado pelo coeficiente de empuxo, K_T , que pode ser obtido através da expressão:

$$K_T = \frac{T}{\rho N^2 D_p^4} \quad (1)$$

O torque adimensionalizado é representado pelo coeficiente de torque, K_Q , que pode ser obtido pela seguinte equação:

$$K_Q = \frac{Q}{\rho N^2 D_p^5} \quad (2)$$

Esses adimensionais mencionados serão fornecidos através de um outro adimensional, o coeficiente de avanço, J , de forma que possamos relacioná-los com a velocidade de avanço, V_a , que é medida experimentalmente no TC. O coeficiente de avanço, J , possui a seguinte expressão:


$$J = \frac{V_a}{N D_p} \quad (3)$$

Outro parâmetro importante para o experimento é a densidade da água, que é obtida de maneira indireta através da medição da temperatura, por meio de um termômetro digital, cujo princípio de funcionamento se dá pela leitura de uma diferença de potencial gerada pela diferença de temperatura entre os dois metais contidos na ponta de sua haste, de uma amostra de água colida do TC, como mostra a Figura 3.



Figura 6: Leitura da temperatura da amostra de água do TC

Após medir a temperatura recorremos a tabela mostrada na Figura 4 para obter a densidade da água do TC.

 <small>INTERNATIONAL TOWING TANK CONFERENCE</small>	ITTC – Recommended Procedures		7.5-02 -01-03 Page 36 of 45
	Fresh Water and Seawater Properties		Effective Date 2011
			Revision 02

Temp t (°C)	Density ρ (kg/m ³)	$\partial\rho/\partial t$ (kg/m ³ ·°C)	Viscos μ (Pa·s)	$\partial\mu/\partial t$ (Pa·s/°C)	$\nu = \mu/\rho$ (m ² /s)	$\partial\nu/\partial t$ (m ² /s·°C)	Pressure p_s (MPa)	$\partial p_s/\partial t$ (MPa/°C)
17.3	1025.4916	-0.2405	0.001151	-2.882E-05	1.1220E-06	-2.784E-08	1.9351E-03	1.224E-04
17.4	1025.4675	-0.2415	0.001148	-2.870E-05	1.1192E-06	-2.773E-08	1.9474E-03	1.231E-04
17.5	1025.4433	-0.2425	0.001145	-2.859E-05	1.1164E-06	-2.761E-08	1.9597E-03	1.238E-04
17.6	1025.4190	-0.2430	0.001142	-2.847E-05	1.1137E-06	-2.750E-08	1.9721E-03	1.245E-04
17.7	1025.3947	-0.2440	0.001139	-2.836E-05	1.1109E-06	-2.739E-08	1.9846E-03	1.252E-04
17.8	1025.3702	-0.2450	0.001136	-2.824E-05	1.1082E-06	-2.728E-08	1.9971E-03	1.258E-04
17.9	1025.3457	-0.2460	0.001134	-2.813E-05	1.1055E-06	-2.717E-08	2.0098E-03	1.265E-04
18.0	1025.3210	-0.2470	0.001131	-2.801E-05	1.1028E-06	-2.706E-08	2.0225E-03	1.272E-04
18.1	1025.2963	-0.2475	0.001128	-2.790E-05	1.1001E-06	-2.695E-08	2.0352E-03	1.279E-04
18.2	1025.2715	-0.2485	0.001125	-2.779E-05	1.0974E-06	-2.684E-08	2.0480E-03	1.287E-04
18.3	1025.2466	-0.2495	0.001122	-2.768E-05	1.0947E-06	-2.673E-08	2.0609E-03	1.294E-04
18.4	1025.2216	-0.2500	0.001120	-2.757E-05	1.0920E-06	-2.662E-08	2.0739E-03	1.301E-04
18.5	1025.1966	-0.2510	0.001117	-2.746E-05	1.0894E-06	-2.652E-08	2.0870E-03	1.308E-04
18.6	1025.1714	-0.2520	0.001114	-2.735E-05	1.0867E-06	-2.641E-08	2.1001E-03	1.315E-04
18.7	1025.1462	-0.2525	0.001111	-2.724E-05	1.0841E-06	-2.631E-08	2.1133E-03	1.322E-04
18.8	1025.1209	-0.2535	0.001109	-2.713E-05	1.0815E-06	-2.620E-08	2.1265E-03	1.330E-04
18.9	1025.0955	-0.2545	0.001106	-2.702E-05	1.0789E-06	-2.610E-08	2.1399E-03	1.337E-04
19.0	1025.0700	-0.2555	0.001103	-2.692E-05	1.0763E-06	-2.599E-08	2.1533E-03	1.344E-04
19.1	1025.0444	-0.2565	0.001101	-2.681E-05	1.0737E-06	-2.589E-08	2.1667E-03	1.352E-04
19.2	1025.0187	-0.2575	0.001098	-2.671E-05	1.0711E-06	-2.578E-08	2.1803E-03	1.359E-04
19.3	1024.9929	-0.2580	0.001095	-2.660E-05	1.0685E-06	-2.568E-08	2.1939E-03	1.366E-04
19.4	1024.9671	-0.2585	0.001093	-2.650E-05	1.0659E-06	-2.558E-08	2.2076E-03	1.374E-04
19.5	1024.9412	-0.2595	0.001090	-2.639E-05	1.0634E-06	-2.548E-08	2.2214E-03	1.381E-04
19.6	1024.9152	-0.2605	0.001087	-2.629E-05	1.0608E-06	-2.538E-08	2.2353E-03	1.389E-04
19.7	1024.8891	-0.2615	0.001085	-2.618E-05	1.0583E-06	-2.528E-08	2.2492E-03	1.397E-04
19.8	1024.8629	-0.2625	0.001082	-2.608E-05	1.0558E-06	-2.518E-08	2.2632E-03	1.404E-04
19.9	1024.8366	-0.2630	0.001079	-2.598E-05	1.0533E-06	-2.508E-08	2.2773E-03	1.412E-04
20.0	1024.8103	-0.2640	0.001077	-2.588E-05	1.0508E-06	-2.498E-08	2.2914E-03	1.419E-04
20.1	1024.7838	-0.2650	0.001074	-2.578E-05	1.0483E-06	-2.488E-08	2.3056E-03	1.427E-04
20.2	1024.7573	-0.2655	0.001072	-2.568E-05	1.0458E-06	-2.479E-08	2.3200E-03	1.435E-04
20.3	1024.7307	-0.2665	0.001069	-2.558E-05	1.0433E-06	-2.469E-08	2.3343E-03	1.443E-04
20.4	1024.7040	-0.2675	0.001067	-2.548E-05	1.0409E-06	-2.459E-08	2.3488E-03	1.451E-04
20.5	1024.6772	-0.2680	0.001064	-2.538E-05	1.0384E-06	-2.450E-08	2.3634E-03	1.458E-04
20.6	1024.6504	-0.2690	0.001061	-2.528E-05	1.0360E-06	-2.440E-08	2.3780E-03	1.466E-04
20.7	1024.6234	-0.2700	0.001059	-2.518E-05	1.0335E-06	-2.431E-08	2.3927E-03	1.474E-04

Figura 7: Tabela de densidades da água

4 Grandezas medidas no ensaio

Durante o ensaio no TC, as seguintes medições foram realizadas:

- Pressão diferencial entre a entrada da seção de testes e a seção de testes, a fim de monitorar a velocidade do escoamento - V_a ;
- Rotação do hélice - N ;
- Empuxo gerado pelo hélice - T ;
- Torque resistivo gerado pelo hélice - Q ; e
- Temperatura da água dentro do TC - Θ .

Os sinais elétricos originados dos sensores são convertidos e medidos em sinais digitais através do sistema de aquisição QuantumX 840A da HBM, ilustrado pela figura.

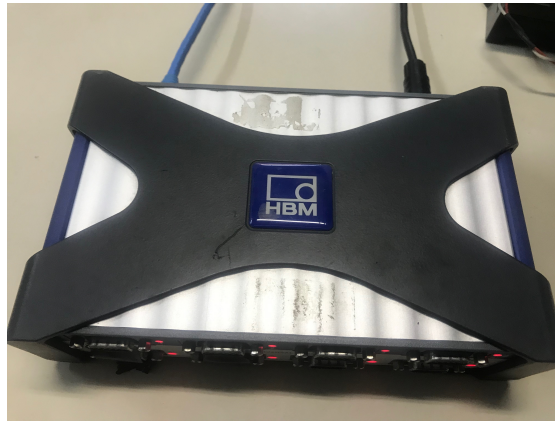


Figura 8: QuantumX 840A

A integração do sistema de aquisição é realizada através do software catmanEasy versão 3.1.11.39 da HBM, o que permite visualizar em tempo real as grandezas do ensaio.

A temperatura da água dentro do TC foi obtida através do termômetro FLUKE 1523.



Figura 9: Termômetro FLUKE 1523

5 Resultados

Nesta seção apresentaremos as curvas K_T e $10K_Q$ em função do coeficiente de avanço (J) das duas diferentes formas de bosso. Para que assim possamos comparar a diferença de comportamento entre ambas numa mesma condição.

Primeiramente tem-se os gráficos para o bosso tipo Cruzeta, com o aumento da

velocidade (ensaio 1) do escoamento e com a redução do mesmo (ensaio 2), respectivamente:

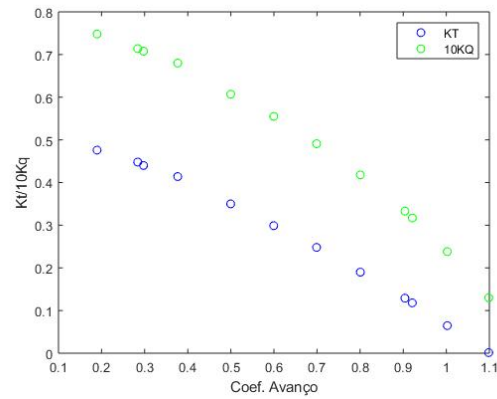


Figura 10: Bosso de cruzeta - Ensaio 1

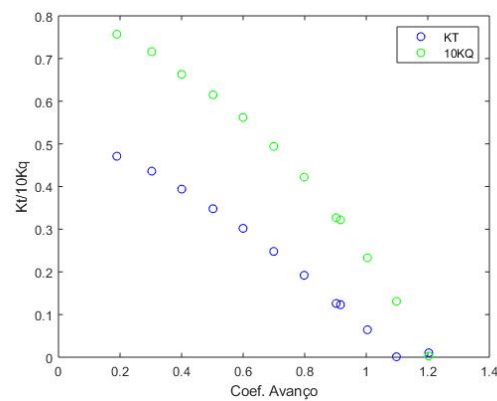


Figura 11: Bosso de cruzeta - Ensaio 2

Nos gráficos abaixo, apresentamos as curvas para o bosso divergente, novamente o primeiro se refere ao aumento da velocidade (ensaio 1) do escoamento e o segundo à redução do mesmo (ensaio 2):

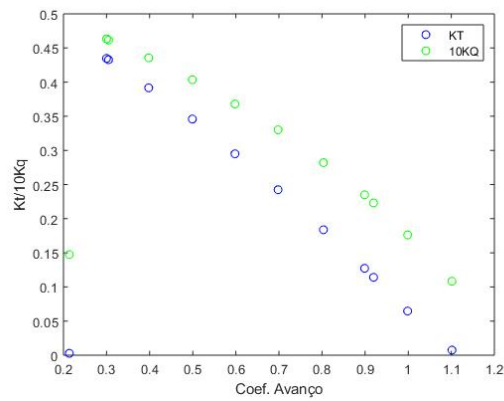


Figura 12: Bosso divergente - Ensaio 1

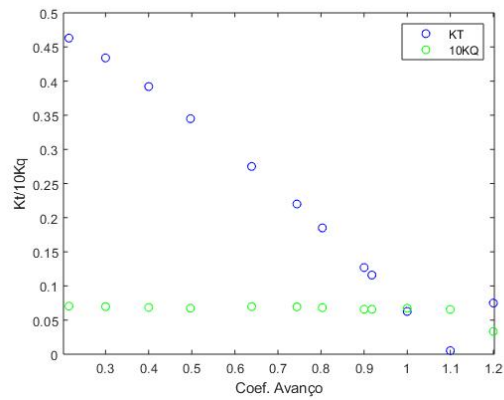


Figura 13: Bosso divergente - Ensaio 2

No ensaio 2 , figura 13, observou-se problema com a célula de carga que media o torque no propulsor após o ensaio e por isso ele foi desconsiderado.

Visando realizar uma comparação entre os desempenhos dos dois bossos, apresenta-se dois gráficos onde podemos observar os coeficientes de empuxo e o coeficiente de torque de cada elemento:

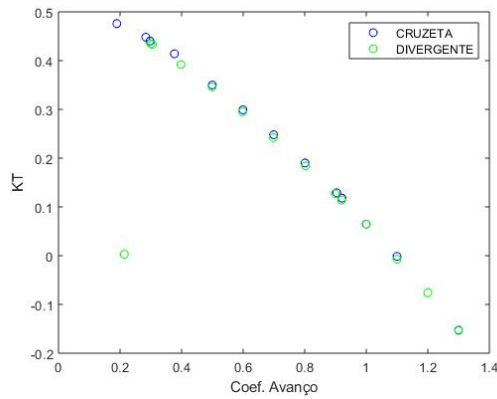


Figura 14: K_T - Cruzeta e divergente

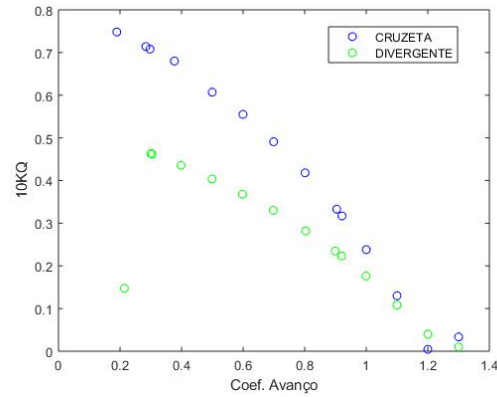


Figura 15: $10K_Q$ - Cruzeta e divergente

6 Conclusão

Dos resultados acima, conclui-se que, para um mesmo propulsor, o casco divergente necessita de menor torque e por consequência menor potência para desenvolver o mesmo empuxo até $J \approx 1.1$.

Isto é constatado, pois os pontos das curvas K_t da figura 14 estão praticamente coincidindo e os pontos do casco de cruzeta nas curvas K_q da figura 15 estão acima dos pontos do casco divergente até $J \approx 1.1$.

7 Referência Bibliográfica

ITTC, 2011, Fresh Water and Seawater Properties, ITTC Procedure 7.5-02-01-03.