

26º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore - SOBENA 2016

Rio de Janeiro, 8 a 10 de Novembro de 2016

Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para a determinação do equilíbrio dinâmico e resistência ao avanço, para um sistema computacional de projeto

Richard David Schachter Universidade Federal do Rio de Janeiro

Resumo:

Este trabalho apresenta o desenvolvimento um *software* a ser integrado a um sistema computacional, que também funciona autonomamente, para determinar o Equilíbrio Dinâmico e Resistência ao Avanço de lanchas planadoras com métodos analítico-empíricos (Savitsky e *Virtual Prismatic Hulls*) e de cascos de deslocamento convencional e de alta velocidade com método estatístico (Holtrop). É parte de um módulo que, além do equilíbrio dinâmico dos cascos mencionados, fará o equilíbrio dinâmico das demais embarcações de alto desempenho baseadas em sustentação hidrodinâmica, aerodinâmica e aerostática, integrando diversas rotinas já programadas. O módulo integrará um Sistema Computacional em fase final de desenvolvimento, o *Solution Focused Design System* (SFDS), permitindo testar configurações e desenvolver projetos de embarcações.

Esta parte do módulo de Equilíbrio Dinâmico é um desenvolvimento inédito, por tratar da sustentação dinâmica, buscar o ponto de equilíbrio (centro de pressão, com o peso e CG) e depois determinar o arraste ou apenas calculando a resistência, dependendo da concepção. É feito para diversas velocidades (com gráficos), além de abordar cálculos de estabilidade dinâmica longitudinal (*porpoising*).

O software e sua interface foram desenvolvidos com uma ergonomia de menus, resultados numéricos, diversos gráficos de todos os parâmetros calculados, animação da variação do *trim* com a velocidade, avisos de inconsistência de parâmetros, que permite avaliar alternativas de projeto, agilizar os cálculos e provê a versatilidade de passar de um método a outro, importando dados, permitindo o *input* (em qualquer ordem ou unidade) dos dados de entrada, faixas desejadas e propriedades (há *defaults*) em dois sistemas de unidades, convertendo-os e apresentando ambos, assim como os dados de entrada e de saída, organizados em colunas lado a lado. Os resultados podem ser exportados para planilhas Excel, além das telas poderem ser impressas.

Um exemplo da aplicação é apresentado.

1. Introdução

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um *software* (Castelli, 2015) para calcular o equilíbrio dinâmico de lanchas planadoras utilizando os métodos de Savitsky (1964) e o *Virtual Prismatic Hulls* (VPH), Schachter et al (2015) e Ribeiro (2002), para formas de lancha não prismáticas e a resistência ao avanço de cascos de deslocamento convencional e de alta velocidade (antigo termo 'semi-planeio', Savitsky 2014) com o método de Holtrop (1984) e Holtrop e Mennen (1982). Também foi desenvolvido no programa uma rotina de seleção de propulsores supercavitantes, não apresentado neste trabalho. Este programa, é parte de outro, o DynEq de um sistema computacional em desenvolvimento, o *Solution-Focused Design System* (SFDS). O programa DinEq trata do equilíbrio dinâmico de lanchas, aerobarcos, *hovercraft* e asas em efeito de solo, além de computar a resistência ao avanço dos cascos de deslocamento mencionados e também de catamarans e SWATHs.

O SFDS é baseado em uma filosofia de projeto, de Schachter et al, 2006, que evoluiu

Nomenclatura	
Métodos de Savitsky e VPH	Métodos de Hotrop e Holtrop e Mennen
a: distância vertical entre o arrasto e o VCG	A _{bt} : área transversal do bulbo
b: boca na seção dominante ou do prisma (breadth)	A _e /A ₀ : razão de área do propulsor
$b(X), [\overline{b}(X)]$: boca [a]dimensional, seção X do casco	A _{transom} : área do espelho de popa
B: boca da superfície de sustentação	C _{BTO} : coeficiente de resistência do <i>bow thruster</i>
B _{max} at chine: boca máxima na quina	Cm: coeficiente de seção mestra
B _{aft} at chine: boca no extremo de ré na quina	Cwp: coeficiente de área de linha d'água
Baseline fwd end: início de elevação da quilha	C _{stern} : coeficiente de forma da popa
C _f : coeficiente friccional de Schoenherr	D: diâmetro do propulsor
ΔC_{f} : incremento no coeficiente friccional devido à	D _{tunnel} : diâmetro do túnel do <i>bow thruster</i>
rugosidade de casco	Hb: centro vertical da área transversal do bulbo
Chine fwd end: encontro de quina e quilha, na proa	ie: meio ângulo de entrada de linha d'água
$C_{L\beta}$, $CL\beta_D$: coef. de sustentação, casco prismático	L _{wi} : comprimento molhado da condição
C _{L0} : coeficiente de sustentação de placa plana	P/D: razão passo-diâmetro do propulsor
C _{LSP} : função de distribuição de sustentação	PT: potência fornecida pela propulsão
C _p , C _{pD} : centro de pressão adimensional	R _t : resistência total
C_V : coeficiente de velocidade, V/ \sqrt{gb}	R _f : resistência friccional
Cwp-fwd: coef. de área de linha d'água a vante	R _v : resistência viscosa, de forma ou de pressão
d, h: afundamento do casco a ré	viscosa
Depth: pontal	R _w : resistência de onda
D _f : arrasto de origem friccional	R _a : resistência de correlação modelo-protótipo
D _p : arrasto de pressão	R _{tr} : resistência de pressão devido ao espelho
D _t : arrasto total	R _b : resistência de pressao devido ao bulbo
D _{spray} , R _{spray} , S _{spray} . arrasto e area molhada do <i>spray</i>	R _{app} : resistencia dos apendices
f, Long. Thrust: posição vertical da força propulsiva	S: area moinada no caiado considerado
LCB: centro longitudinal de carena	S _{app} : area total de apendices
LCG: centro longitudinal de gravidade	(1.141): esoficiente de forme
L _{cp} : centro longitudinal de pressao	(1+K1). Coefficiente de forma
L _C : comprimento moinado na quina	(1+kz). Tator de resistencia dos apendices
$L_{\rm K}$. comprimento molhado na quina	T _{aft} . Calado ha perpendicular de vante
L_m . comprimento monado medio, $(L_K+L_C)/2$	T : empluyo requerido
$L_{\rm III}$. Susteinação total atuando no casco	Va: velocidade axial média incidente no hélice
N : forca de sustentação	n: eficiência do casco
Transom Rake: inclinação do espelho de popa	$n_{\rm null}$ eficiência relativa rotativa
VCG: centro vertical de gravidade	<i>t</i> coeficiente de redução da forca propulsiva
$V_{\rm m}$ V _c velocidade média no fundo do casco	ω : coeficiente de esteira
$V_{\rm m}$, $V_{\rm l}$. Volcendado media no fando do casoo $V_{\rm l}$	Parâmetros comuns aos métodos
β : angulo do nó-do-coverno (deodrico)	EHP ou PE: potência efetiva do casco
β.: ângulo de pé-de-caverna a ré do casco	Fn: número de Froude – V/√qL
β_{aff} : angulo de pé de caverna a meia nau	Q: número de Taylor – V(kt)/ $\sqrt{L(ft)}$
β_{ms} : angulo de pé de caverna a mela nad	Re: número de Reynolds – VL/v
A:deslocamento da embarcação (displacement)	V, U: velocidade (<i>speed</i>)
$\Delta \lambda$: incremento de λ devido ao sprav	
E: inclinação do eixo propulsor	
l' razão comprimento molhado médio - boca L /b	
π . razao comprimento monado medio - boca, L_m/D	
t: trim dinamico	

de Schachter, 1990 e Keane et al, 1991. O sistema é integrado, com foco na solução e utiliza telas e interfaces multidisciplinares (forma, arranjo geral, compartimentação, peso-CG e equilíbrio, e também estrutura, compartimentação e peso estrutural-CG, p.e.), permitindo o processamento fora da ordem

tradicional, para testar opções е configurações, estimulando um possível processo criativo (seakeeping e/ou equilíbrio dinâmico moldando a forma, p.e.), com atualizações de consistência de parâmetros em arquivos multifuncionais do sistema.

Este módulo, aqui chamado de EqDin, que também funciona autonomamente, aplica os métodos e a série mencionados. Seu ineditismo em relação a outros *softwares* está em ser o único para planadores não prismáticos, um dos únicos a fazer e apresentar detalhes do equilíbrio dinâmico e estudar a estabilidade dinâmica longitudinal (*porpoising*), com a máxima precisão possível, sem precisar ainda da forma detalhada.

2 – Métodos Aplicados

2.1 - Método de Savitsky

O método de Savitsky (1964) é, desde então, a principal referência para estimativas de sustentação dinâmica e resistência ao avanço de embarcações de planeio.

O método é baseado em resultados de tanque de provas e trata o casco como um prisma, com *deadrise* (β) constante ao longo de todo o comprimento. A consideração geométrica permite obter as relações geométricas do método, Figura 1 (ver Nomenclatura). O ponto '0' é tomado como igual ao da linha d'água estática e os pontos onde o *spray* inverte a direção do fluxo estão no *spray root line*.



Figura 1 – Esquema básico do método de Savitsky

Para a sustentação foram desenvolvidos expressões e gráficos para placas planas (C_{L_0}) , Equação 1, e suas correções para o *deadrise* constante adotado (C_{L_0}) , Equação 2.

$$\begin{split} C_{L_0} &= \tau^{1.1} \left[0.0120 \lambda^{\frac{1}{2}} + \frac{0.0055 \lambda^{\frac{5}{2}}}{C_v^2} \right] \eqno(1) \\ C_{L_\beta} &= C_{L_0} - 0.0065 \beta C_{L_0}^{0.60} \eqno(2) \end{split}$$

No cálculo de equilíbrio dinâmico o ponto de aplicação da força de sustentação N_p (Equação 3) é no centro de pressão L_{cp} (Equação 4).

$$N_{p} = \frac{1}{2} \rho V^{2} b^{2} C_{L_{B}}$$
(3)

$$C_{p} = \frac{L_{cp}}{\lambda b} = 0.75 - \frac{1}{\frac{5.21 \frac{C_{p}}{\lambda^{2}} + 2.39}{2}}$$
(4)

O método de Savitsky considera, para águas tranquilas, os arrastos de pressão e viscoso. O arrasto de pressão (D_p) é uma decomposição da força normal, a primeira componente da Equação 5, sendo o restante a componente viscosa (D_f). A resistência friccional é corrigida pelos termos V₁/V, razão velocidade média no fundo do casco/ velocidade, e por $\Delta\lambda$, incremento de λ devido ao *spray*, tirados de gráficos experimentais.

$$D_{t} = \Delta \tan(\tau) + \frac{\rho C_{f} V_{1}^{2}(\lambda b^{2})}{2 \cos(\beta) \cos(\tau)}$$
(5)

As forças N_p , D_t , peso e empuxo do propulsor, em seus pontos de aplicação, L_{cp} , b/4 tan β (da geometria), LCG e posição do propulsor, respectivamente, são compostas em um diagrama de forças, e seu equilíbrio resulta no *trim* dinâmico, τ .

2.1.1 – Resistência de Spray - Hadler

Esta é uma resistência adicional, de *spray* no costado (não na área molhada do casco), não incluída no método original de Savitsky.

Hadler, (Hadler, 1966), propõem uma formulação que inclui esse efeito, para uma área molhada pelo *spray*, S_{spray}, com seu ângulo θ de formação, nas Equações 6 e 7.

$$D_{\text{spray}} = \frac{\rho}{2} V^2 S_{\text{spray}} \cos\theta (C_f + \Delta C_f)$$
 (6)

$$S_{\text{spray}}\cos\theta = \frac{(\Delta\lambda)b^2}{\cos\theta}$$
(7)

2.1.2 - Resistência Whisker Spray

Com o *Whisker Spray* (*spray* em forma de bigode de gato), Savitsky et al (2007), completaram o método original. Esta resistência adicional está em consonância com o método, ver Equações 8 e 9.

$$R_{\rm spray} = \frac{1}{2} \rho V^2 \Delta \lambda b^2 C_{\rm f} \tag{8}$$

$$\Delta \lambda = \frac{\cos \theta}{4 \sin(2\alpha) \cos \beta} \tag{9}$$

2.2 – Método VPH

O método VPH, *Virtual Prismatic Hulls,* foi criado por Ribeiro (2002) e publicado por Schachter et al (2015), a partir do método de Savitsky. Observou-se que para cascos prismáticos as estimativas são bastante razoáveis para os termos dinâmicos, mas muito aquém quando se trata dos termos estáticos. O VPH é proposto para considerar uma geometria completamente arbitraria (*deadrise*, boca e quilha variáveis) e aumentar a precisão de ambos os termos.

O método consiste em reconhecer a influência de cada seção longitudinal na sustentação do casco. Para cada seção é associado um casco prismático virtual, cuja distribuição de pressão é conhecida, e podese obter a sustentação da seção. A sustentação, tanto dinâmica quanto estática, e seu centro de aplicação podem ser obtidos então por integração numérica.

O método propõe uma função polinomial formada por radicais, Equação 10. Seus coeficientes podem ser obtidos em função de quatro condições de contorno (Figura 2):



Figura 2 – VPH: Corpo submerso adimensionalizado

1. O coeficiente de sustentação seccional, $C_{LSP}(x)$, em sua forma adimensional possui valor unitário no ponto de estagnação, Equação 11;

2. A pressão no bordo de fuga, considerando a condição de espelho seco, deve assumir o valor da pressão atmosférica, Equação 12;

3. A integral de $C_{LSP}(x)$ ao longo de x deve resultar na sustentação dinâmica do casco prismático, que pode ser obtido do primeiro termo da Equação 13;

4. A integral de momento longitudinal de $C_{LSP}(x)$ deve resultar no momento longitudinal da sustentação, Equação 14.

$$C_{LSP}(x) = a_0 + a_{12}x^{\frac{1}{2}} + a_{13}x^{\frac{1}{3}} + a_1x \quad (10)$$

$$C_{LSP}(0) = 1 \tag{11}$$

$$C_{LSP}(1) = -\frac{2g\left(h - \frac{B}{4}tan\beta\right)}{U^2}$$
(12)

$$\int_0^1 C_{LSP}(x)\bar{b}(x)dx = \frac{B}{L_k}CL\beta_D$$
(13)

$$\int_{0}^{1} C_{LSP}(x) \overline{b}(x) x dx = \frac{B}{L_{k}} CL \beta_{D} \left(\frac{C_{PD}}{L_{k}} \right)$$
(14)

Utilizando o sistema de Equações de 10 a 14, pode-se reconhecer a distribuição de pressão ao longo de um casco prismático virtual e associar o coeficiente de sustentação seccional da seção virtual correspondente a real. Após realizar o cálculo para todo o casco é possível realizar a integração e obter a sustentação dinâmica e seu centro de aplicação. Então é possível avaliar o equilíbrio da posição e buscar aquela que fornece equilíbrio de forças e momentos a embarcação.

2.3 – Método de Holtrop

Método amplamente conhecido e usado, baseado em análise estatística e correlações adimensionais para estimar resistência ao avanço e características propulsivas. Os resultados de Holtrop e Mennen (1982), conjunto misto de modelos e protótipos (de 5 trabalhos anteriores), embora satisfatórios, foram completados por Holtrop (1984), principalmente para embarcações de deslocamento de alta velocidade (Fn>0,5), além da consideração de cavitação e a inclusão de formulação para estimativas de submersão parcial de propulsores.

3 – Descrição e Utilização do Programa

Conforme já mencionado, o programa foi desenvolvido para permitir calcular o equilíbrio dinâmico de lanchas planadoras; sua força de sustentação (lift) e centro de pressão, seu arraste (drag) e o equilíbrio resultante da composição com o peso e sua distribuição de massa, resultando em um trim dinâmico de equilíbrio. Para lanchas planadoras estão programados dois métodos: o de Savitsky (1964) e o Método dos Cascos Prismáticos Virtuais. Schachter et al (2015) e Ribeiro (2002). Além destes módulos existem um módulo para os cálculos da resistência ao avanço de Holtrop (1984) e Holtrop e Mennen (1982), para cascos de deslocamento e de deslocamento de alta velocidade (antigo termo "semi-planeio" – Savitsky (2014)), cujas equações foram aproveitadas para as lanchas operando nestes dois regimes, complementando seus gráficos.

O programa EqDin segue a filosofia de codificação e ergonomia que vem sendo desenvolvida no sistema baseado no método Solution-Focused Design, SFD (Schachter et al 2006), de ter arquivos que representam todo projeto, telas e comandos autoum explicativos, com uma sequência natural de entrada de dados de acordo com cada método, mas que podem ser inseridos fora de ordem ou ao longo do processo (testagem de valores) e em gualquer um de dois sistemas de unidades, na mesma sessão; e saída de dados, gráficos e visualizações lado a lado com as entradas, com uma ergonomia criada para o facilitar o processo de projeto, com tentativas e erros, o fluxo de informações e trabalhar com dados de e para outros programas do sistema.

3.1- Comandos Gerais

De acordo com a filosofia do sistema, no programa EqDin o número de cada método telas é minimizado (em outros programas são até multidisciplinares). Há abas que abrem telas para Planadores. Cascos de Deslocamento Convencional e de Alta Velocidade e para a Propulsão (esta última não apresentada neste trabalho). A de Planadores é subdividida nos Métodos de Savitsky e VPH e em todas há um mínimo de sub-telas, dominantemente para variações nos gráficos.

Comum a todas as telas, há os comandos 'File', 'Options' e 'Help'. Para 'File' (Figura 3),



Figura 3 – Barra de Ferramentas File e Report Generator

- New: apaga todos os dados do programa;

- Save: salva o estado atual do programa, arquivando todos os dados e parâmetros;

- Open: abre um arquivo salvo pelo programa;

- Report: gera um arquivo de texto configurado para ser carregado em qualquer aplicativo de planilha eletrônica. As opções desta funcionalidade podem ser buscadas de outras seleções e cálculos. É possível incluir dados dos parâmetros ambientais utilizados, e dados de entrada e saída de cada método executado. O sistema de unidades dos dados de saída pode ser selecionado entre o métrico e o imperial.

- Exit. fecha o programa.

Para o comando 'Options' (Figura 4), são oferecidas as opções mostradas a seguir:

- Unit System: permite selecionar o sistema Métrico (*default*) ou Imperial (inglês) para os dados de Saída;

- Speed Settings: define como os métodos de estimativa de equilíbrio dinâmico e resistência irão ser executados para diversas velocidades. As duas opções disponíveis são: mínimo, máximo e passo, e, indicação direta pelo projetista através de uma planilha. Por padrão se utiliza a primeira opção, a segunda foi criada para permitir comparações diretas com dados experimentais, conforme se mostrou necessário na validação do método de VPH (Seção 4.4). Se uma velocidade de projeto for dada e houver conflito com a faixa, há um ajuste automático para uma nova faixa entre zero nós e 120% da velocidade máxima, com passo de 1 nó;

🥥 Eq	Din	
File	Options Help	
LS	Unit System	+
Ē	Speed Settings	
NING	Fluid Properties	
PLAI	Gravity Acceleration	
S.	Atmospheric Pressure	
HULL	Input Exchange	+

Figura 4 – Barra de Ferramentas 'Options'

- *Fluid Properties*: Nesta opção o projetista pode indicar a densidade e as viscosidades do fluido considerado, bem como a pressão de saturação do mesmo. Para facilitar a aplicação, os três primeiros parâmetros foram parametrizados com a temperatura, tanto para água salgada como doce. Para utilizar esse recurso o projetista indica a temperatura de projeto, e seleciona água doce ou salgada. O programa então calcula os parâmetros e preenche a interface. Por padrão é utilizado água salgada a 20°C, informação que pode ser recuperada a qualquer momento;

- *Gravity Acceleration*: opção para fornecer o valor da gravidade a ser considerado no programa. Nesta janela é possível fornecer um novo valor ou retornar ao padrão: 9,81 m/s² | 32,19 ft/s²;

- Atmospheric Pressure: opção para fornecer o valor da pressão atmosférica. É possível fornecer um novo valor ou retornar ao padrão: 101,32 kPa | 14,70 Psi;

- Input Exchange: é uma ferramenta implementada para integrar as análises de equilíbrio dinâmico e resistência (Figura 5). Ela permite adaptar os dados de entrada de um método para outro. Por padrão, o programa oferece a troca de dados, sempre que o usuário alterna entre as janelas, com a opção de poder ser desativada (*Ask on Change*). Além disto, é possível executar essa troca a qualquer momento. As opções vão sendo ativadas conforme cada um dos métodos é executado com sucesso. Para a propulsão (parte inferior da Figura) basta que os dados migrem para a propulsão e não ao contrário, mas neste caso é preciso prescrever a velocidade desejada (de projeto ou qualquer outra) para o cálculo. Para isto, surge uma tela para esta prescrição.

3.2 – Ergonomia das Interfaces

A seguir serão mostrados os ambientes dos métodos utilizados e para o cálculo de propulsores. Para todos os casos programados as interfaces seguem a filosofia de conter o máximo possível de informação em um mínimo de telas.



Figura 5 – Ferramenta 'Input Exchange'

As interfaces mostradas nas próximas Figuras contém os dados de Entrada (1) lado a lado com os de Saída (2), sendo que os

dados de Entrada podem ser fornecidos em qualquer ordem em qualquer um dos dois sistemas de unidades (também lado a lado), diferentes na mesma sessão de projeto. Para tanto, basta colocar o parâmetro na coluna certa, que o do lado se converte (um exemplo comum seria: dados no sistema métrico, sendo o comprimento em pés e a velocidade em nós).

Para mostrar os resultados, há o espaço dos Gráficos (3), pertinentes a cada método/cálculo, com as variações necessárias de valores.

Nas interfaces dos métodos de Savitsky e VPH, onde há variação do *trim* com a velocidade, há uma tela de animação – *Animate* - (4), que mostra a variação de *trim* da primeira à última velocidade da faixa considerada.

3.3 – Ambiente do Método de Savitsky

A interface do Método de Savitsky pode ser vista na Figura 6. O parâmetros de entrada são fornecidos no Quadro 1, exatamente os dos exemplos do Método de Savitsky. As opções *Spray*, embaixo, são excludentes, marcando uma opção, a outra é desmarcada, além de ser possível fazer o cálculo sem considerar o *spray*. A opção Spray-Hadler utiliza o efeito de resistência devido ao *spray* através das estimativas de Hadler. A opção Whisker Spray aplica as estimativas propostas por Savitsky et al (2007).



Figura 6 – Interface do Método de Savitsky

Após preencher os dados de entrada, acionando o botão 'COMPUTE', o programa calculará interativamente (com o método da bisseção) a Sustentação (Lift), com base nos coeficientes C_{L0} e $C_{L\beta}$, o centro de pressão Lcp, o arraste total Dt e buscará o equilíbrio das forças, resultando no Trim Dinâmico da embarcação. Isto será feito para a velocidade de projeto e uma faixa de velocidades. Os resultados são apresentados no Quadro 2 (outputs) e em gráficos (Quadro 3), além de um desenho do perfil, com guina, Quadro 4, que permite a animação da variação do trim dinâmico e da submersão da popa (d), ao longo da faixa de velocidades (mostradas), o comando 'Animate'.

O critério de 'PORPOISING' de Savitsky (1964), $\beta = f(\tau, C_L)$ é incorporado ao programa, onde se criou uma nova representação gráfica em função também da velocidade para permitir uma análise de em qual delas o fenômeno se manifesta para aquele casco.

No Quadro 3, gráficos gerados, diversos são produzidos. Em todos aparecem barras verticais mostrando em laranja a velocidade selecionada nos dados de saída e em vermelho o início do planeio, equivalente ao número de Froude de 0,4 (número de Taylor de 1,34). Para as velocidades inferiores a esta, os resultados são obtidos pelo Método de Holtrop (integrado), com as características submersas constantes e iguais às obtidas para número de Froude de 0,4.

Para o eixo dos Y há as seguintes opções:

Resistance Components: as duas componentes de resistência e sua soma, a total vs X (Figura 6);

Power: EHP (potência efetiva) vs X;

Relevant Parameters: *trim*, L_K , L_C , L_m e d vs X, ver Figura 15;

Porpoising: *trim* limite para estabilidade dinâmica em função do ângulo de *deadrise* vs X, ver Figuras 17 e 18.

Para o eixo dos X há as seguintes opções:

V (knots): velocidade em nós;

Re: número de Reynolds;

Fn: número de Froude;

Q: número de Taylor;

 $\sqrt{C_L/2}$: raiz da metade do coeficiente de sustentação. Opção válida apenas para Porpoising (que utiliza apenas este e V (knots)).

também 0 programa contorna um problema que pode ocorrer com o método de Savitsky: como o método é feito para formas prismáticas, um trim muito baixo a dada velocidade pode acarretar no aparecimento de um comprimento L_{K} excessivamente grande, até tendendo ao infinito, provocando um erro de cálculo aquela para velocidade considerada. Além disto, para que se possa produzir um desenho do perfil, um pontal deve ser fornecido (e o programa verifica se a submersão (d) não o ultrapassa). Desta forma, o programa permite ao usuário informar no Quadro 3 o comprimento total LOA (e o pontal) e considera que o L_K máximo seja 85% (valor típico) deste valor.

3.4 – Ambiente do Método Virtual Prismatic Hull (VPH)

A interface do Método VPH pode ser vista na Figura 7. Esta interface possui a mesma estruturação e funções do método de Savitsky, Seção 3.3 (inclusive utilizando Holtrop no préplaneio), sendo que seus parâmetros de entrada e saída são diferentes, adequados ao método. No Método VPH o casco é inteiramente definido, diferentemente do de Savitsky. A partir das dimensões (bocas, quinas), de três ângulos de deadrise na popa, meia nau e proa, de um rake de popa, etc., a forma é definida no programa com cúbicas. Depois a forma é fatiada em balizas, às quais o método é aplicado. Na tela 'Animate' é possível ver o perfil desta forma, como definida.

Deve-se notar nos gráficos que as opções dos eixos dos Y e X são as mesmas, excetuando-se a análise de *porpoising*, que não existe neste método.

3.5 – Ambiente do Método de Holtrop

Assim como nos métodos anteriores, a interface do método de Holtrop exibe simultaneamente os dados de entrada e saída, bem como um gráfico, sem desenho de forma, pois não há variação de *trim* a animar (Figura 8). Além desta diferença, os dados de entrada possuem duas abas: *'Main Particulars'*, a principal (Figura 8), e *'Appendages, Stern and Thruster'*, auxiliar à primeira (Figura 9).



Figura 7 – Interface do Método VPH

A área total dos apêndices e seu coeficiente de forma, (S_{app}) e '1+k2' podem ser fornecidos diretamente na aba principal, ou pela Tabela de Apêndices (Holtrop e Mennen, 1982), com seus coeficientes de forma, discriminados na aba auxiliar. O mesmo ocorre para o coeficiente da seção da popa, *Stern Section*, 'Cstern', que pode ser prescrita

na aba principal, caso já o conheça, ou na auxiliar, de acordo com o tipo de forma da popa. O meio ângulo de entrada da linha d'água, 'ie' e a área molhada 'S', da aba principal, podem ser fornecidos diretamente ou estimadas pelo método na linha 'Estimate'. Na aba auxiliar, *Roughness* é a rugosidade média (editável) da superfície molhada do casco.

🥥 Eq	Din		. * .	4.5				-			And in case		-									x
File	Options H	elp																				
s,						1		•														
Ē	Main Particul	ars Appe	ndages,	Stern and	Thruster	/~		· , Z .														
19	Volum	e 900	[m³]	31783.5	((f+3)	_		¥		Rt (kN)	= Rf (k)	0 +	Rv (kN)	+ R	.w (kN)	+ Ra	(kN) +	Rtr (kN))_+_	Rb (kN)	+ Rapp (kN)	
ANI	volum		10.1	/-		V 31	1,0 •	[knots]		800,20	120,7	9	35,87	5	63,69	48	,88	0,00		0,00	30,98	
러	Lv	5 0	[m]	164,05	[ft]																	
IULLS	Breadt	h 12,00	[m]	39,37	[ft]	Re	7,6 e8	[]			Re	sista	nce C	Comp	onen	its X	Spee	d				
ED D. F	Tfowar	d 3,1	[m]	10,17	[ft]	Fn	0,72	[]		1.050												
SH-SPE	Tai	ft 3,3	[m]	10,83	[ft]	(1+k1)	1,30	[]		950											Total Friccional Kiscous Bressure	
VIH ON	Spee	d Table	[m/s]	Table	[knots]	ω	0,00	[]		900					3				-		Wave Correlation	
MENT /	At	ot 0,00	[m²]	0,00	[ft²]	t	0,00	[]		800						•				_	米 Transom 米 Bulb	
SPLACE	н	b 0	[m]	0,00	[ft]	ηR	1,00			750		-									- Current Speed	
ä	LCB:AP, fwd	+ 22,75	[m]	74,64	[ft]		1.00			650						-				0		
IL SION	Сп	0,78	[]	0,78	0	Inon	1,00		z	600 550				0	_	•		0				
PROPL	Cwp	0,8	[]	0,8	0	Va	15,95	[m/s]	×	500		0										
_	Cster	n 0	[]	0	0	Treq	800,20	[kK]		400												
	Atransor	n 10	[m²]	107,64	[ft²]	PE	12760,3	8; [kW]		350 300												
	Sap	p 50	[m²]	538,20	[ft²]	РТ	12760,3	8; [kW]		250						-						
	1+k	2 3	[]	3	0	Y Axis: Powe	er			150								4				
		e 25	[9]	25	[9]	Resis	tance an	d Thrust		100		-						-	_	-		
		5 584,91	[m²]	6295,93	[ft²]	X Axis	Mance CO	mponents		0				.*		*		*		*		
	Estimat	e S	J	ie		V (kn	iots)			2	5 26	27	28	29	30 Knots	31	32	33	34	35		
		C	OMPUT	E		© Fn																
						L																
•																						



1.00	1.2.1	1.44	1				-
otions Help							
lain Particulars	Appendag	es,Ster	rn and Th	nruster			
Туре		1+k2	S [m²]	S [ft2]	v	10 -	[knots]
Rudder behind S	keg	2,0	0,0	0,0			[initial]
Rudder behind S	tern	1,5	0,0	0,0	Re	6,7 e8	n
Twin-screw bal. P	Rudder	2,8	0,0	0,0			
Shaft Brackets		3,0	0,0	0,0	Fn	0,72	0
Skeg		2,0	0,0	0,0	(1+k1)	1,30	0
Strut Bossings		3,0	0,0	0,0			1
Hull Bossings		2,0	0,0	0,0	ω	0,04	LI .
Shafts		4,0	0,0	0,0	t	0,05	0
Stabilizer Fins		2,8	0,0	0,0	-0	1.10	
Dome		2,7	0,0	0,0	ηĸ	1,12	JU -
Bilge Keels		1,4	0,0	0,0	ηhull	1,02	0
Stern Section	ndola: -25		Oper	n Stern	Va	15,34	[m/s]
 V-Shaped Sec Normal Section 	tions: -10 n Shape:	0			Treq	815,74	[kK]
U-Shaped Ser	tions with	Hogne	r Stern:	+10	PE	12305,0	[kW]
Propellers D	3,231	[m]	10,60) [ft]	РТ	12514,64	[kW]
Ae/A0			0,763	3 []	Y Axis:		
P/D			1,136	5 []	Pow	er	
Screw Quant	ity		2	0	Resi Resi	stance and	Thrust
Bow Thruster					V Auto	stance con	ponenta
Dtunnel	0	[m]	0	[ft]	AXIS V (kr	nots)	
CBto [0.003^	0.012]		0	[]	© Re		
Roughnore	150	5.ml	402.1	E E 63	🔘 Fn		

Figura 9 – Método de Holtrop – aba Appendages, Stern and Thruster (auxiliar)

Os dados de saída são apresentados de modo similar aos dos métodos anteriores, exceto na apresentação da Resistência, que é mostrada na forma da expressão utilizada nos artigos Holtrop e Mannen (1982) e Holtrop (1984), logo acima do gráfico (Figura 8). Para as componentes e os outros parâmetros, ver nomenclatura. Assim como nos outros métodos, a velocidade selecionada é marcada por uma barra vertical nos gráficos.

Nos gráficos, o eixo dos Y apresenta as opções

Power: potências efetiva e propulsiva vs X;

Resistance and Thrust: resistência e empuxo do propulsor vs X;

Resistance Components: resistência total e cada uma de suas componentes vs X;

Para o eixo dos X há as seguintes opções: V (knots): velocidade em nós;

Re: número de Reynolds;

Fn: número de Froude.

4 – Aferição das Rotinas do Programa

4.1 – Método de Savitsky e Sprays

A Tabela 2 mostra as diferenças obtidas em relação ao exemplo apresentado em Savitsky (1964). Os dados de entrada e saída são os da Figura 6.

Tabela 2	2 – Diferenç	as para Sa	vitsky (1964)
Variável	Artigo	Programa	Diferença
Trim $ au$	2.3°	2.22 °	0.08° 3.5%
Arrasto	9095 lb	9064 lb	61 lb 0.7%
EHP	1115 hp	1113 hp	2 hp 0.2%
λ	3.29	3.44	0.15 4.5%
L_k	55.9 ft	58.31 ft	2.41 ft 4.3%
L _c	36.1 ft	38 ft	1.9 ft 5.2%

Variável	Artigo	Programa	Diferença
d	2.24 ft	2.25 ft	0.01 ft 0.4%

A implementação do spray de Hadler (1969) não pode ser verificada diretamente já que o artigo acima é anterior e não considera spray e não há outro exemplo posterior. Para a sua aferição utilizou-se uma comparação deste spray calculado com o Whisker Spray de Savitsky et al (2007). Foi usado como exemplo o mesmo do artigo.

V	τ	τ	τ	Rt Ib	Rt Ib	Var	Rt Ib	Var
kt	art	WS	had	art	WS	1	had	2
30	4,8	4,8	4,8	14510	14816	2%	14926	3%
32	4,8	4,8	4,8	14890	15248	2%	15371	3%
34	4,7	4,7	4,7	15210	15616	3%	15745	4%
36	4,5	4,6	4,6	15510	15953	3%	16080	4%
38	4,4	4,4	4,4	15790	16286	3%	16403	4%
40	4,2	4,3	4,3	16110	16638	3%	16735	4%

art.: artigo; WS: whisker spray (programado); had.: Hadler (programado); Var1: variação da Rt entre o artigo e o WS; Var2: variação da Rt entre o artigo e Hadler.

Atribui-se a diferença de resistência Rt devido ao *spray*, entre o Whisker Spray do artigo e o calculado de Hadler a diferentes viscosidades e números de Reynolds em sua determinação.

4.2 – Método VPH

Para aferir o método dos Cascos Prismáticos Virtuais, VPH, comparou-se os resultados obtidos naquele método com um dos cascos da série Keuning & Gerritsma (1982). Os dados utilizados são os da série e estão mostrados na Figura 7 (entrada e saída). O modelo utilizado (e o desenho de seu perfil) pode ser visto na Figura 10 e as diferenças dos resultados na Tabela 4.



Figura 10 – Modelo 190 – Série Keuning & Gerritsma (1982)

Tabela 4 –	Diferenças	para o	VPH
------------	------------	--------	-----

	3		
V [kt]	Rt _{exp} [N]	Rtprog [N]	Diferença
5,36	7,7	7,858	2%
6,07	9,0	9,034	0%
6,68	10,3	10,128	-2%
7,37	11,6	11,447	-1%
7,85	12,5	12,408	-1%

4.3 – Método de Holtrop

O método de Holtrop foi aferido pelos exemplos dos artigos de Holtrop e Mannen (1982) e Holtrop (1984), que se complementam. Os parâmetros propulsivos, por exemplo, são unicamente determinados no artigo de 1982. Aqui se mostrará a aferição da resistência ao avanço apenas, como pode ser visto na Tabela 5. Os dados de entrada e saída podem ser vistos na Figura 8.

a 5 – Diferenc	ças para Hoitr	ор
Rtartigo [kN]	Rtprog [kN]	Diferença
662	657	-1%
715	710	-1%
756	750	-1%
807	800	-1%
864	856	-1%
925	916	-1%
	A 5 – Dhereno Rtartigo [kN] 662 715 756 807 864 925	A 5 – Diferenças para Holtr Rtartigo [kN] Rtprog [kN] 662 657 715 710 756 750 807 800 864 856 925 916

Tabela 5 – Diferenças para Holtrop

5 – Exemplo de Aplicação

Para exemplificar a aplicação utilizou-se uma embarcação da série sistemática desenvolvida para a guarda costeira americana, (Kowalyshyn & Metcalf, 2006).

O artigo relata uma série de experimentos em modelos de 10 pés (Figura 11), e por fim uma prova com uma embarcação de 80 pés. Os planos de linhas básicos originais (parente e variantes) estão escalados para uma embarcação de 47 pés (Figura 12). Desse modo escolheu-se a forma referente a esta embarcação. A mesma possui *deadrise* variável, e por isso o método mais apropriado é o VPH. Para validar o método os resultados experimentais em escala 1:8 (10 pés) e 1:1 (80 pés) serão comparados aos resultados calculados.



Figura 11 – Teste dos Modelos da USCG

Os dados de entrada do modelo de 10 pés se encontram na Figura 13. Estes foram comparados com os resultados dos testes em tanque de provas da referência. Os resultados calculados comparados com os do tanque de provas podem ser vistos na Tabela 6.



Figura 12 – Plano de Balizas – USCG 47'

Comparou-se também os resultados de testes com a embarcação real, de 80 pés. Os também razoavelmente valores foram próximos (Castelli, 2015). Ηá que se considerar que a definição da forma embutida no método VPH não contempla inclinação do costado nem quina dupla (spray reversers), que existem no casco original e no protótipo. Desta maneira, definiu-se uma forma de uma só quina e costado vertical para ser o exemplo de projeto, um crew boat para o pré-sal. Esta forma ficou ligeiramente diferente da original, de 80 pés (de L_{wl}), da qual foram mantidas as dimensões principais, os deadrises à meia nau

e à popa, afilando-se a proa. Deste modelo foram tiradas as características hidrostáticas, sendo seu deslocamento um pouco menor que o do protótipo (68 t) e fez-se o LCG sobre o LCB na condição estática (sem *trim*). Para este *crew boat* foi estimada uma velocidade de 35 nós, o que o faria levar, em mar calmo, 4 horas de viagem a uma plataforma (ou 2 a 3 horas a um *hub*). Os dados de entrada e resultados do *crew boat* do exemplo podem ser vistos nas Figuras 14, 15, 16, 17 e 18.

Nestes gráficos há uma região delimitada por um marcador vermelho, que marca o limite indica Fn=0,4, que 0 início de do desenvolvimento do fenômeno de planeio, e limita a funcionalidade do método de Savitsky e do VPH. Até essa velocidade as estimativas são feitas utilizando o método de Holtrop. Os gerados interpolando inputs são as características do casco no equilíbrio estático a velocidade nula, e no equilíbrio dinâmico a velocidade equivalente a Fn 0,4. Apesar do pequeno salto na junção Holtrop-VPH pode-se considerar que os métodos se complementam satisfatoriamente.



Figura 13 – Modelo USCG 5631 (10 ft), com o método VPH

Tabela	a 6 - Resist	ência ao a	avanço
M	odelo USC	G 5631-10) ft
V(kt)	R-VPH	R-Exp	Erro
. ,	(kN)	(kN)	
5	33,5	14,4	133%
6	36,6	28,2	30%

13	62,6	59,5	5%
14	63,8	61,5	4%
15	65,1	63,1	3%
16	66,5	64,7	3%
17	68,1	66,3	3%
18	70,1	68,1	3%
19	72,3	70,0	3%
20	74,8	72,2	4%
21	77,7	74,7	4%

Na Figura 15 o gráfico "Relevant Parameters X Fn" foi gerado pelo programa. No gráfico há curvas dos comprimentos molhados, na quilha (Lk), na quina (Lc) e médio (Lm), afundamento (d) e trim dinâmico.

O eixo "X" foi configurado para ser Fn, apenas para ilustrar as ferramentas do programa. Entre números de Froude de 0,4 a 1,1 pode-se perceber que o fenômeno de planeio não está plenamente desenvolvido. Deste ponto em diante o *trim* se desenvolve consideravelmente, aumentando o empuxo, e retirando o casco da água, conforme a variação dos outros quatro parâmetros.

Analisando o casco até 50 nós, o máximo trim encontrado foi de 6º, próximo a velocidade de projeto. Apesar de ser um *trim* um pouco acentuado, é sabido que o método de Savitsky, portanto o VPH, superestimam o *trim*, gerando resultados de 1º a 3º acima do *trim* real experimentado pelas embarcações. Em todos os casos avaliados da série da USGC o método superestimou o *trim* em 2º ou mais. Isto foi detalhadamente demonstrado em Schachter et al (2015), onde se provou uma precisão razoavelmente válida.

Utilizou-se a ferramenta "Input Exchange" de transpor os dados entrada para necessários para processar o método de Savitsky. O deadrise (B) considerado nessa operação é o de meia-nau. Esse valor é próximo ao deadrise medido no LCG, no LCP (ou Lp) e no comprimento molhado estático, conforme recomendacões е estudos. (Savitsky, 2012). Os input e output na velocidade de projeto podem ser vistos na Figura 18.

A análise por Savitsky (como casco prismático) foi feita para avaliar o *porpoising*,







Figura 15 – Parâmetros Relevantes do Crew Boat 80 ft



Figura 16 – Crew Boat 80 ft por Savitsky

a estabilidade dinâmica longitudinal. Pode-se perceber que a 35 nós estimou-se a mesma resistência: VPH-93,29kN e SAV-93,87kN. Isto indica que o tratamento do casco como prismático é aceitável. Em Schachter et al (2016) há comparações completas dos métodos com valores experimentais para Resistência (Dt), trim e submersão (d), para diversas séries. A avaliação de porpoising pode ser vista nas Figuras 17 e 18, sendo a 18 uma adaptação exclusiva do programa EqDin, que permite explicitar a velocidade na análise de porpoising de Savitsky (1964). Como se pode verificar, a 35 nós não haverá porpoising $(\beta=25,4^{\circ} \text{ será um pouco acima das 3 curvas});$ só haveria *porpoising* a 45 nós, se β =0,0. Para o β utilizado, nem a 50 nós haveria instabilidade.



Figura 17 – Análise de Porpoising (1)



Figura 18 – Análise de Porpoising (2)

6 - Conclusão

Apresentou-se o desenvolvimento de um software a ser integrado a um sistema computacional para projetos conceituais (SFDS), também de funcionamento autônomo, parte do módulo de Equilíbrio Dinâmico, aplicado a lanchas planadoras (métodos de Savitsky e VPH) e de deslocamento convencional e de alta velocidade (Holtrop).

Embora ainda precise de aperfeiçoamentos, acredita-se que o programa é uma ferramenta promissora e inédita no mercado, por tratar da sustentação dinâmica, buscar o ponto de equilíbrio (centro de pressão, com o peso e CG) e determinar o arraste ou a resistência ao avanço, de abordar cálculos de estabilidade dinâmica longitudinal (*porpoising*), inclusive em uma função inédita da velocidade.

Os métodos analítico-empíricos e estatístico programados apresentaram, como pôde ser visto, uma precisão razoável com os dados de tanques de provas.

software e sua interface 0 foram desenvolvidos com uma ergonomia de menus baseada na filosofia de projeto mencionada. Resultados numéricos de equilíbrio dinâmico, estabilidade dinâmica, resistência ao avanço, e coeficientes propulsivos, diversos gráficos de todos os parâmetros calculados, animação da variação do trim com a velocidade, avisos de inconsistência de parâmetros, permitem ao avaliar alternativas de projeto, usuário variando a forma, trim dinâmico, e outros parâmetros em tempo real e em qualquer ordem. Esta dinâmica agiliza os cálculos, permite o controle sistemático do projeto e o programa provê a versatilidade de transpor dados de um método a outro, permitindo o input (em qualquer ordem ou unidade) dos dados de entrada, faixas desejadas e propriedades (há defaults) em dois sistemas de unidades, convertendo-os e apresentando ambos, assim como os dados de entrada e de saída, organizados em colunas lado a lado. Os resultados podem ser exportados para

planilhas Excel, além das telas poderem ser impressas.

7 – Agradecimento

O autor gostaria de agradecer à **ANP** pelo patrocínio que tornou possível este projeto.

8 - Referências Bibliográficas

Castelli, L.C., *Ferramenta computacional para projeto conceitual de embarcações de planeio e seu sistema propulsivo.* Projeto de Graduação, 1-92, DENO/UFRJ, 2015

Hadler, J.B., *The Prediction of Power Performance on Planing Craft*, SNAME Annual Meeting, New York, 1-40, November, 1966

Holtrop, J., A statistical Re-Analysis of Resistance and Propulsion Data. I.S.P. V.31(363), 272-276, 1984

Holtrop, J., & Mennen, G. G., *An approximate Power Prediction Method.* I.S.P. V.29 (335), 166-170, 1982

Keane, A.J., Price, W.G. e Schachter, R.D., *Optimization techniques in ship concept design*, Trans. RINA, V.133/A, 123-143, 1991

Keuning, J.A. e Gerritsma, J., *Resistance tests* of a series of planing hull forms with 25 degrees deadrise angle, I. S. P., 222-249, 1982

Kowalyshyn, D.H., & Metcalf, B., *A USGC systematic series of high speed planing hulls*, Trans. SNAME, 268-309, 2006

Ribeiro, H.J.C., *Equilíbrio dinâmico de cascos planadores*, Dissertação de Mestrado, 1-188, COPPE/UFRJ, 2002

Savitsky, D., *Hydrodynamic design of planing hulls,* SNAME Marine Tech., 71-95, October, 1964

Savitsky, D., *The effect of bottom warp on the performance of planing hulls,* 3rd SNAME Chesapeake Power Boat Symposium, 1-38, Annapolis, June 2012

Savitsky, D., *Semi-displacement hulls - a misnomer?*, 4th SNAME Chesapeake Power Boat Symposium, 1-20, Annapolis, June, 2014

Savitsky, D., DeLorme, M. F., & Datla, R., Inclusion of whisker spray drag in performance prediction method for high-speed planing hulls, SNAME Marine Tech., 35-56, January, 2007

Schachter, R.D., *Optimization techniques with knowledge based control in ship concept design*, Ph.D. Thesis, Dept. of Mech. Eng., Brunel University, pp. 1-207, London, 1990 Schachter, R.D., Fernandes, A.C., Bogosian Neto, S., Jordani, C.G., e Castro, G.A., *The Solution-Focused design process organization approach applied from ship design to offshore platforms design.* ASME Transactions, Journal of OMAE, OMAE-05-1042, pp. 1-10, 2006

Schachter, R.D., Ribeiro, H.J.C., Conceição, C.A.L., Dynamic equilibrium evaluation for planing hulls with arbitrary geometry and variable deadrise angles – The Virtual Prismatic Hulls Method, Journal of Ocean Engineering, Volume 115, pp. 67-92, 2016