

# SÍNTESE DE CASCOS DE EMBARCAÇÕES ATRAVÉS DE MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO APLICADOS A CURVAS B-SPLINE

Luiz Henrique Maiorino Barbarini  
Prof. Dr. Emílio Carlos Nelli Silva



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos

**USP** Universidade de São Paulo  
Brasil

São Paulo, 22 de outubro de 2007

# Sumário



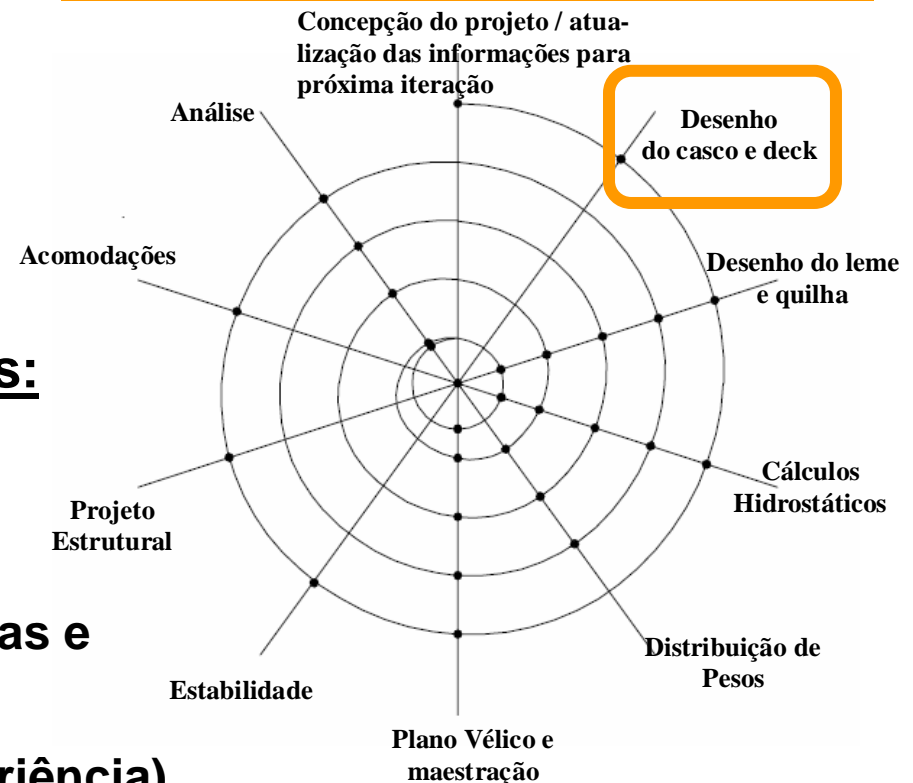
- 1. Introdução**
- 2. Motivação**
- 3. Objetivo**
- 4. Revisão Bibliográfica**
- 5. Curvas Paramétricas**
- 6. Formulação do Problema de Otimização**
- 7. Princípios de projeto de cascos de veleiro**
- 8. Otimização paramétrica do casco**
- 9. Modelagem Paramétrica**
- 10. Resultados**
- 11. Conclusões**

# Introdução



Veleiros são embarcações de origem milenar, propelidas pela ação do vento sobre suas velas.

## Espiral de Projeto: foco “monocasco em sloop”



### Método tradicional de projeto de cascos:

- Iterativo (tentativa e erro)
- Grande demanda de tempo
- Interferência humana avaliações qualitativas e não objetivas
- Requer pessoal especializado (arte + experiência)

J. Harvey Evans, 1954

## Motivação

### Cenário atual:

**Velejadores: requerimentos específicos e complexos em curto tempo**

**vs.**

**Estaleiros: busca de ferramentas para viabilizar o projeto com os requisitos**

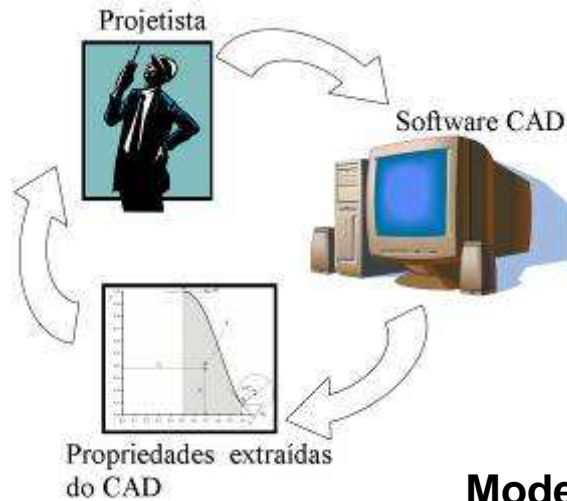


**Como lidar com a necessidade de se projetar e construir, com prazos curtos e recursos limitados, novos produtos que possuam características customizadas?**

***R: Concentrar o tempo e trabalho na concepção e especificação, deixando o computador com o trabalho operacional, fornecendo uma solução que atenda o solicitado.***

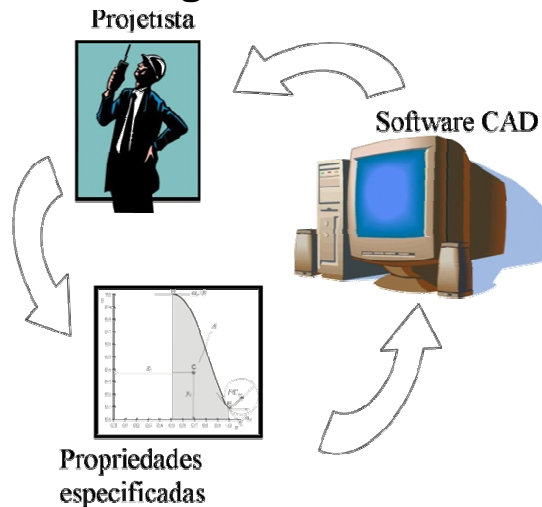
# Motivação

## Método proposto:



- Foco na concepção; não no desenho
- Processo automatizado
- Redução de tempo de desenvolvimento de novos produtos
- Menor interferência humana

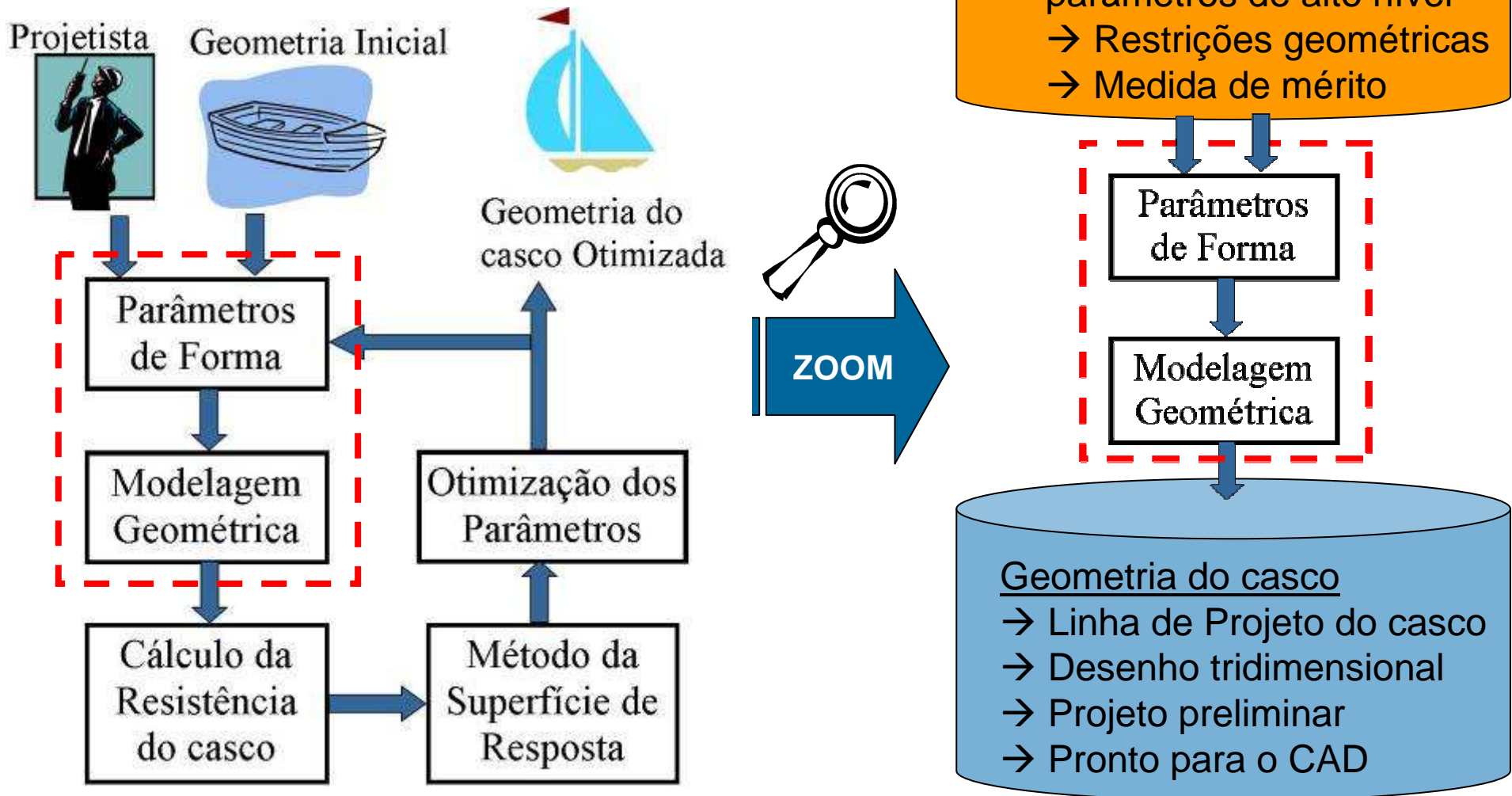
## Modelagem Paramétrica



- Casco parametrizado: curvas B-splines para representar as linhas de projeto
- Ferramenta flexível e integrável a CAD/CAM

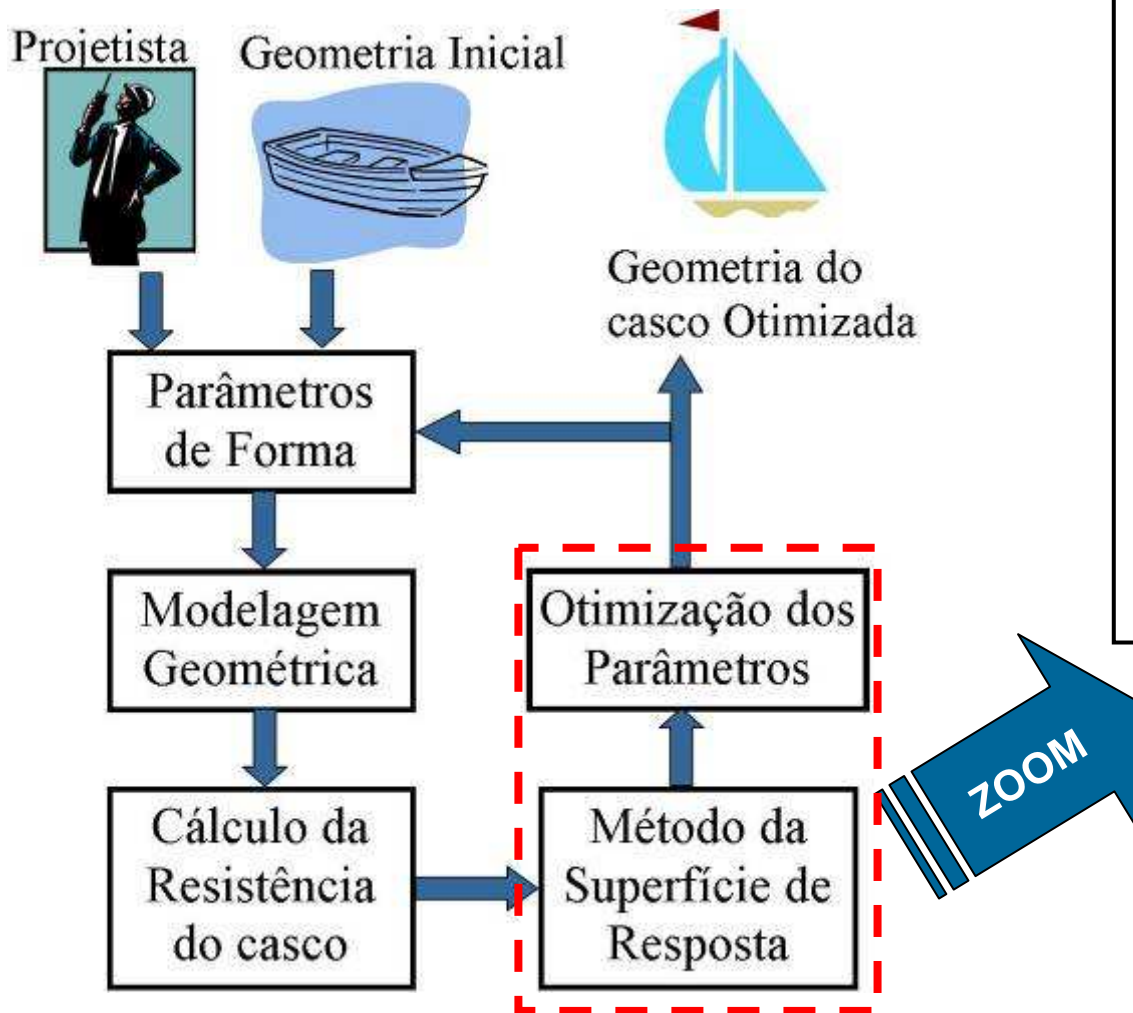
# Objetivo

## Diagrama de Blocos do Processo de Otimização



# Objetivo

## Diagrama de Blocos do Processo de Otimização



**Objetivo: fechar a malha do processo de otimização**

- Otimização paramétrica de baixo custo
- Função objetivo escolhida: Resistência residual do casco
- Modelo empírico: série sistemática de Delft

# Revisão Bibliográfica

## Bibliografias principais:

- HARRIES, S., ABT, C., **Parametric design optimization of sailing yachts**, The Fourteenth Chesapeake, Sailing Yacht Symposium, Annapolis, Maryland, USA, 1998.
  - Abordagem paramétrica do casco, conjunto de curvas próprio para a definição da geometria
  - Formulação de curvas B-Splines uniformes, justificando seu uso
  - Define o conjunto de restrições e função multi-objetivo para o problema de otimização das curvas
  - Propõe uma arquitetura e diagrama de blocos do processo de otimização

---
  
- NARLI, E., SARIÖZ, K., **The Automated Fairing of Ship Hull Lines Using Formal Optimization Methods**, Istanbul Technical University, faculty of Naval Architecture and Ocean Engineering, Istanbul, Turkey, 2003.
  - Abordam especificamente o processo de suavização de curvas B-Splines, utilizando como partida a forma de Wigley
  - Justifica a abordagem de simplificar um problema tridimensional por vários problemas de curvas plana.

# Revisão Bibliográfica

## Outras Bibliografias de apoio:

### Otimização e projeto de cascos:

- HARRIES, et al., **The FANTASTIC roro: CFD optimisation of the forebody and experimental verification**, NAV 2003, Palermo, 2003. (Competição de otimização de embarcações RoRo)
- LARSSON, L., ELIASSON, R., **Principles of Yacht Design**, EUA, 1994.
- HAFTKA, R. T., GÜRDAL, Z., **Elements of Structural Optimization, Solid Mechanics and its Applications**, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1995.
- FASSARDI, C., HOCHKIRCH, K., **Sailboat Design by Response Surface Optimization**, 2nd High Performance Yacht Design Conference, Auckland, fevereiro de 2006.

### Curvas:

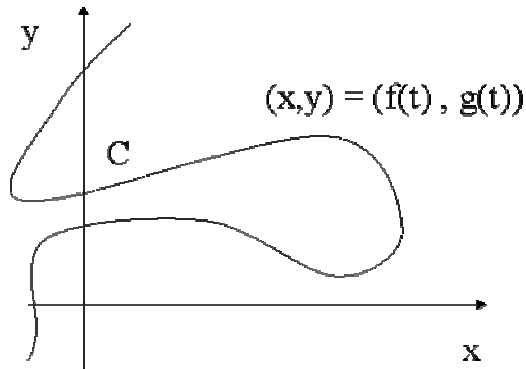
- FARIN, G., **Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design**, Second Edition, Academic Press, Arizona, EUA, 1990.
- YAMAGUCHI, F., **Curves and Surfaces in Computer Aided Geometric Design**, Springer-Verlag, Berlin, 1988.
- NOWACKI, H., LIU, X., **Fairing Composite Polynomial Curves with Constraints**, Computer Aided Geometric Design, Vol. 11, 1-15, 1994.

# Revisão Bibliográfica

## Evolução do processo de suavização de curvas:

- (SNAITH et al., 1972): suavização baseada em **rotinas iterativas**, com a observação **visual** das curvas, modificando-as até que um resultado satisfatório fosse alcançado;
- (SAPIDIS et al., 1990): propõe um algoritmo automático de suavização para curvas **B-Spline**. O algoritmo é baseado em **remover e recolocar nós** na Spline.
- (HUANZONG et al., 1991): método de suavização, minimizando a **energia de tensão** elástica de curvas que compunham a superfície de um casco;
- (MORETON et al., 1992): técnicas **não-lineares** de otimização para minimizar um funcional de **suavidade**, baseado na variação da curvatura;
- (NOWACKI et al., 1994): métodos para traçar curvas suaves **restritas**, cujo critério de **suavidade** é baseado na combinação linear do quadrado da segunda e terceira derivada.

# Curvas Paramétricas



$$f(t) = (x(t), y(t))$$

$t \in [0,1]$  é a Variável Paramétrica

## Forma Polinomial

$$x(t) = a_x t^3 + b_x t^2 + c_x t + d_x$$

$$y(t) = a_y t^3 + b_y t^2 + c_y t + d_y$$

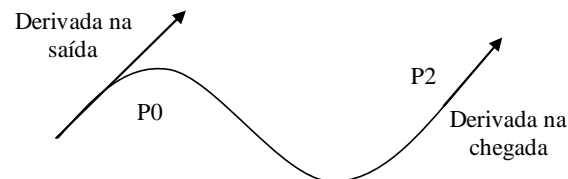
## Forma Matricial

$$f(t) = Ct$$

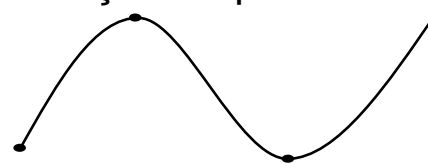
$$C = \begin{bmatrix} a_x & b_x & c_x & d_x \\ a_y & b_y & c_y & d_y \end{bmatrix} \quad t = \begin{bmatrix} t^3 & t^3 \\ t^2 & t^2 \\ t & t \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

## Porque estas curvas nos interessam?

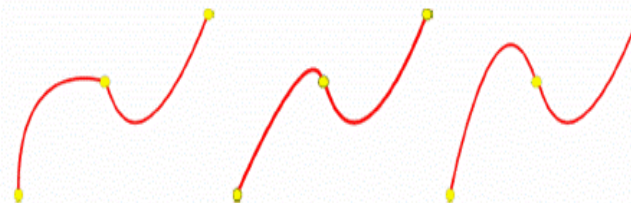
### Derivadas nas extremidades



### Interpolação/ Aproximação de pontos



### Continuidade



### Armazenagem



## Principais tipos de curvas

- Hermite
- Bézier
- Spline / B-Splines
- NURBS

## Critérios avaliados

- Continuidade da curva
- Custo computacional
- Formulação matemática
- Capacidade da curva de representar o objeto
- Custo de memória para armazenagem
- Controle local

# Curvas Paramétricas

## Justificativas

### Escolha da curva (polinomial cúbica)

<i>Curva</i>	<i>Hermite</i>	<i>Bézier</i>	<i>B-Spline Uniforme</i>	<i>B-Spline Não-uniforme</i>
Propriedade “Convex Hull”	N/A	Sim	<b>Sim</b>	Sim
Pontos de controle interpolam alguns pontos da curva	Sim	Sim	<b>Não</b>	Não
Continuidade Paramétrica C	1	1	<b>2</b>	2
Continuidade Geométrica G	1	1	<b>2</b>	2
Tipo de Controle	global	pseudo-local	<b>local</b>	local

**NURBS** (*Non-Uniforms Rational B-Splines*): utiliza uma coordenada homogênea extra e formulação racional, para permitir o traçado de curvas mais complexas, que não podem ser representadas por curvas polinomiais (ex. círculos, elipses, etc.). **Não é necessária para o problema em questão.**

# Curvas Paramétricas

## Formulação utilizada

### Funções de Base da B-Spline

$$s(t) = \sum_{i=0}^{L+n-1} P_i N_{i,n}(t)$$

$$N_{i,0} = \begin{cases} 1 & \text{se } t_i \leq t \leq t_{i+1} \\ 0 & \text{nos outros casos} \end{cases}$$

$$N_{i,n} = \frac{t - t_{i-1}}{t_{i+n-1} - t_{i-1}} N_{i,n-1}(t) + \frac{t_{i+n} - t}{t_{i+n} - t_i} N_{i+1,n-1}(t)$$

### B-Spline Cúbica

$$s(t) = P_{i-2} N_{i-2,3} + P_{i-1} N_{i-1,3} + P_i N_{i,3} + P_{i+1} N_{i+1,3}$$

### B-Spline Uniforme

$$t_{i+1} - t_i = d$$

$$N_{i,n} = \frac{t - t_i}{nd} N_{i,n-1}(t) + \frac{t_i + (n+1)d - t}{nd} N_{i+1,n-1}(t)$$

$$x(t) = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} P_0 & P_1 & P_2 & P_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 0 & 4 \\ -3 & 3 & 3 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u^3 \\ u^2 \\ u \\ 1 \end{bmatrix}$$

### Considerações Importantes do modelo

- ✓ Largamente utilizada na literatura mais recente da mesma aplicação
- ✓ Harries et al., 1998: “*Uniform knot vectors are the convenient choice*”.

### Curvas vs. Superfícies

- ✓ Narli et al., 2003: “*The 3-dimensional ship hull fairing problem is generally reduced to the fairing of 2-dimensional ship hull design curves(...). The main reason behind this is the complexity of the 3-dimensional fairing problem. In addition a robust theory for the fairness of curves would greatly contribute to surface fairing methodologies.*”

## Formulação do Problema de Otimização

*Encontrar uma curva B-Spline cúbica uniforme, com determinado número de pontos de controle, de forma a satisfazer os parâmetros determinados e ser considerada “suave” em relação ao problema em questão.*

$$\min_{P_y} \sum_1^3 E_i$$

sujeito à:

$$c(x) \leq 0$$

$$ceq(x) = 0$$

$$A \cdot x \leq b$$

$$Aeq \cdot x = beq$$

$$lb \leq x \leq ub$$

Uma curva suave deve cumprir com os seguintes requisitos:

- Não possuir ruído
- Não possuir regiões planas
- Continuidade para a primeira e segunda derivadas
- Livre de variações desnecessárias, como por exemplo, pontos de inflexão
- Distribuição da curvatura uniforme
- Preservação de forma

# Formulação do Problema de Otimização

1. Função Objetivo  $f(x)$ : 
$$E_n = \int_{t_B}^{t_E} \left\{ \left( \frac{d^n x}{dt^n} \right)^2 + \left( \frac{d^n y}{dt^n} \right)^2 \right\} dt$$

Multi-objetivo:

$$F = e_1 E_1 + e_2 E_2 + e_3 E_3$$

2. Variáveis de Projeto: coordenada  $y$  dos pontos de controle ( $P_{yj}$ )

## 3. Restrições

3.a Posição dos pontos inicial e final  $x_B = x|_{t=0}$   $x_E = x|_{t=1}$   
 $y_B = y|_{t=0}$   $y_E = y|_{t=1}$

3.b Ângulo da tangente nas extremidades  $\alpha_B, \alpha_E$

3.c Curvatura  $C$  em um ponto  $C = \frac{x' y'' - x'' y'}{(x'^2 + y'^2)^{3/2}}$

3.d Área entre a curva e o eixo  $x$

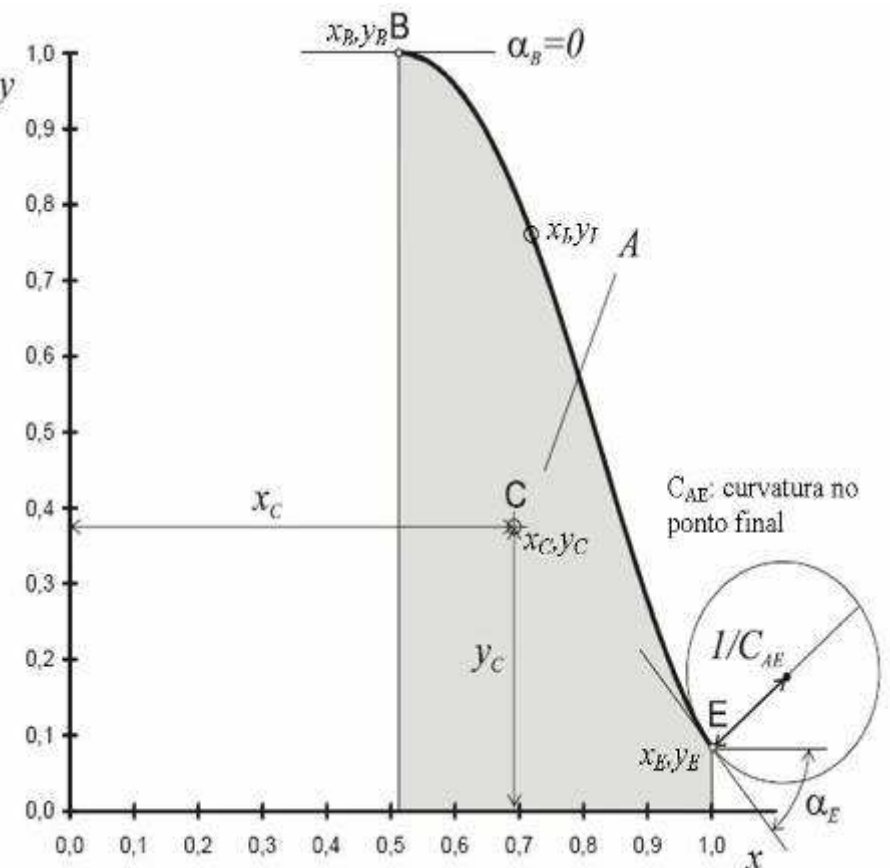
$$A = \frac{1}{2} \left[ \int_{t_B}^{t_E} (y x' - x y') dt + y_E x_E - y_B x_B \right]$$

3.e Centróide da Área

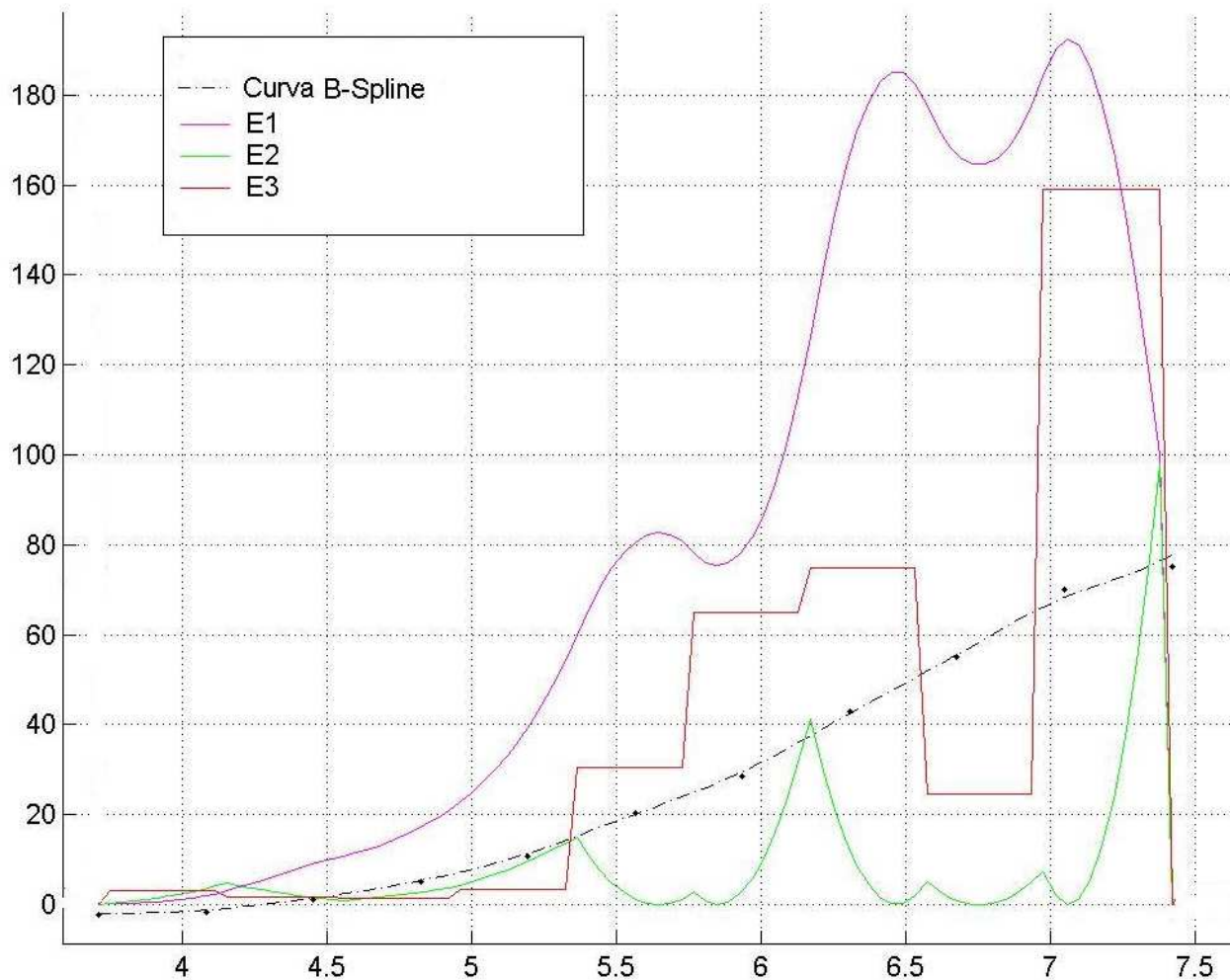
$$x_C A = M_y = \frac{1}{3} \left[ \int_{t_B}^{t_E} (y x' - x y') x dt + y_E x_E^2 - y_B x_B^2 \right]$$

3.f Interpolação em um ponto intermediário

$$x_I = x|_{t=t_I} \quad y_I = y|_{t=t_I}$$



# Formulação do Problema de Otimização



Função Multi Objetivo  
Critério de suavização  
("Fairness criteria")

$$E_n = \int_{t_B}^{t_E} \left\{ \left( \frac{d^n x}{dt^n} \right)^2 + \left( \frac{d^n y}{dt^n} \right)^2 \right\} dt$$

$$F = e_1 E_1 + e_2 E_2 + e_3 E_3$$

- $e_i$  são obtidos experimentalmente
- $E_1$ : medida de elasticidade (forma da curva)
- $E_2$ : medida de flexão (curvatura da curva)
- $E_3$ : medida de torção

# Formulação do Problema de Otimização

## Implementação

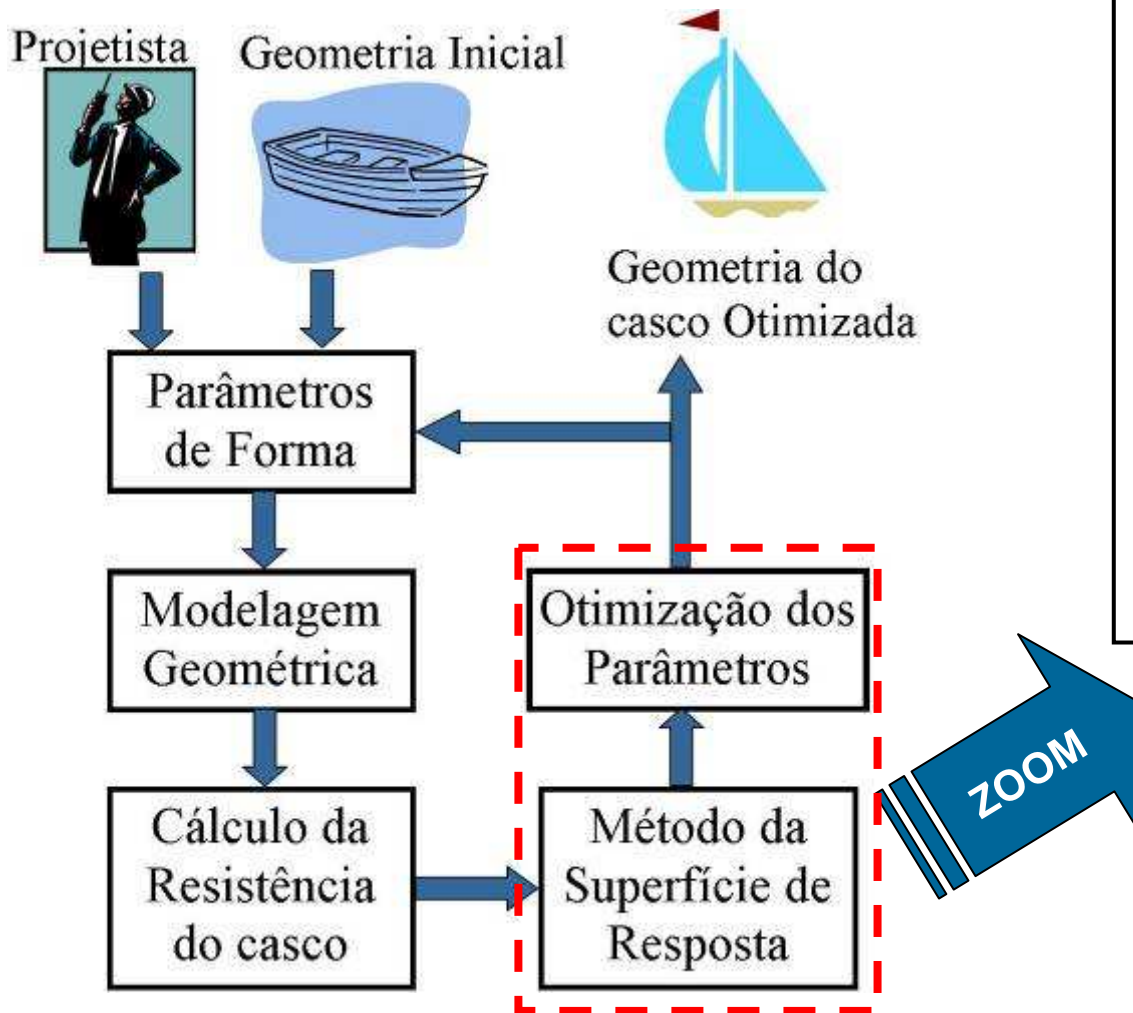
- Software utilizado: MatLab 6.5 (conjunto de rotinas e comandos numéricos)
- Rotina *fmincon* (Media Escala):

$[Pout]= fmincon(@fobj,Pin,A,b,Aeq,beq,lb,ub,@restr_n_lin,option,ctes)$

- Problema não-linear
- Algoritmo de Otimização: PQS (Programação Quadrática Seqüencial) – Método de Newton ("interior-reflective Newton method") (MATLAB, 2002)
  - o Aproximar problema não-linear por subproblemas de PQ com restrições lineares.
  - o Aproximação da matriz Hessiana pelo método de Quase-Newton com aproximação BFGS.
  - o Esta formará o subproblema, cuja solução é proverá uma direção de busca para o método de busca linear.
- Limitações da função *fmincon*:
  - somente aceita variáveis reais
  - as funções devem ser contínuas
  - pode retornar um mínimo-local

## Slide anterior: Objetivo

### Diagrama de Blocos do Processo de Otimização



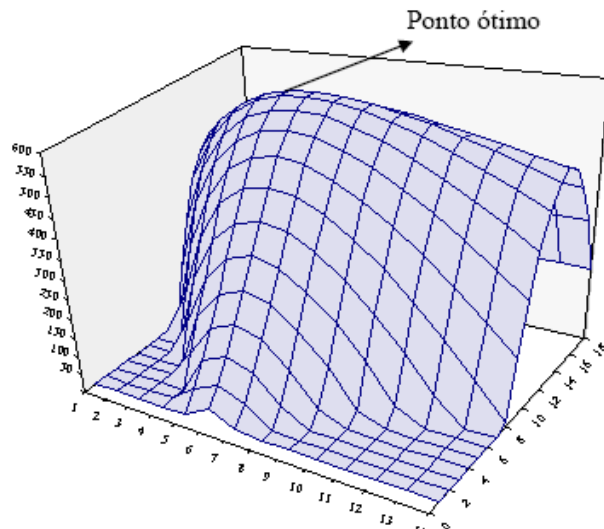
**Objetivo: fechar a malha do processo de otimização**

- Otimização paramétrica de baixo custo
- Função objetivo escolhida: Resistência residual do casco
- Modelo empírico: série sistemática de Delft

# Otimização Paramétrica do Casco

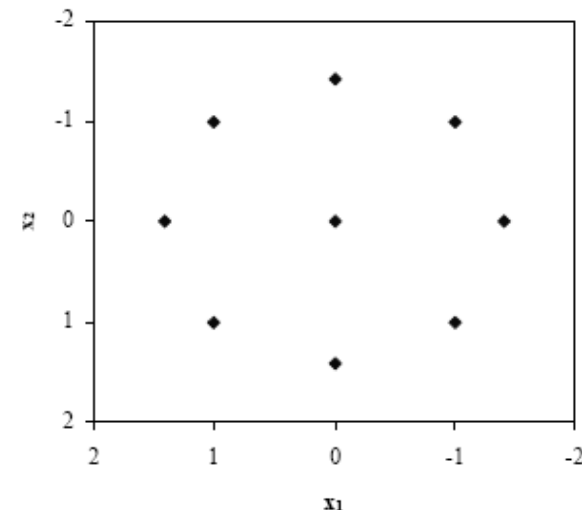
**Método da Superfície de Resposta** → consiste em:

- Avaliar a função objetivo com uma combinação adequada das variáveis de projeto
- Obter um número suficiente de valores da função objetivo
- Aproximar uma superfície que descreverá a função objetivo.



**Estimação dos Parâmetros utilizando projeto de Experimentos (DoE):**

→ Método CCD (“Central Composite Design”)



**Modelo de Segunda ordem:**

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1^2 + \beta_4 x_2^2 + \beta_5 x_1 x_2$$

**Coeficientes  $\beta_i$ 's obtidos pelo MMQ:**

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

# Otimização Paramétrica do Casco

Problema de Otimização: otimizar a resistência residual do casco gerado, para uma velocidade de 4 nós. ( $F_n = 0,4$ ) 
$$F_n = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L_{WL}}}$$

Função objetivo: Resistência residual calculada segundo o modelo empírico da série sistemática da Delft University of Technology, na Holanda:

Para  $F_n$  entre 0,125 e 0,450:

$$R_r = (\Delta_{cg})(a_0 + a_1 C_p + a_2 LCB + a_3 (B_{WL}/T_c) + a_4 L_{WL}/\nabla_C^{1/3} + a_5 C_p^2 + a_6 C_p L_{WL}/\nabla_C^{1/3} + a_7 LCB^2 + a_8 (L_{WL}/\nabla_C^{1/3})^2 + a_9 (L_{WL}/\nabla_C^{1/3})^3)$$

Variáveis de projeto:  $C_p$  e  $LCB$ :

➤ (LARSSON et al., 1994) sugere que variações de 10% a 20% podem ocorrer na resistência residual, variando-se os parâmetros de forma do casco, como  $L_{WL}/\nabla_C^{1/3}$ ,  $C_p$  e  $LCB$ .

➤  $C_p$  (coeficiente prismático): está fortemente relacionado com a geometria do casco, pois é o índice que melhor expressa o quanto um barco é fino nas extremidades

➤  $LCB$  (centro de carena): utilizado para avaliar a distribuição do volume ao longo do comprimento do casco, além da estabilidade

$$0,00 \leq LCB \leq -6,00 \quad 2,76 \leq \frac{L_{WL}}{B_{WL}} \leq 5,00$$

Restrições:

$$0,52 \leq C_p \leq 0,60$$

➤ Obtidas do modelo empírico

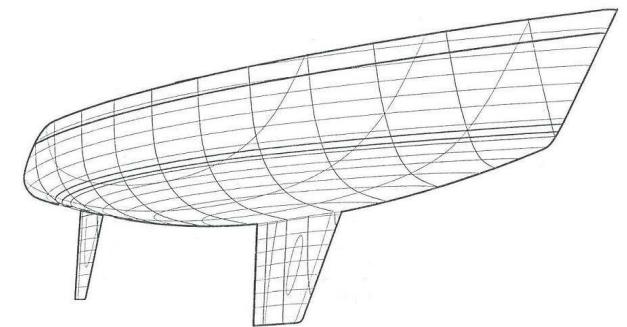
$$4,34 \leq \frac{L_{WL}}{(v_c)^{1/3}} \leq 8,50 \quad 2,46 \leq \frac{B_{WL}}{T_c} \leq 19,32$$

# Modelagem Paramétrica

## Conjunto de curvas paramétricas do casco :

#	Curva	Parâmetros necessários	Dados Obtidos
1	Curva de Áreas Seccionais	$\nabla_C ; L_{WL}, LCB; C_P; A_{BM}$	$A_{Bi}, x_{BM}$
2	Curva da Baliza Maior	$A_{BM}; B_{MAX}; B_{WL}; FB$	$T_{CBM}$
3	Curva da Linha D'água	$L_{WL}; x_{BM}; B_{WL}; A_{WP}$	$B_B$
4	Curva da Linha da Quilha	$L_{WL}; x_{BM}; T_{CBM}; L_{OA}$	$T_{CB}$
5	Curva da Linha de Borda	$L_{OA}; B_{MAX}; B_{POPA}$	$B_{MAXB}$
6	Curvas das Balizas	$B_{MAXB}; B_{WL}; A_B; T_{CB}; FB$	Casco

$A_{BM}$  – Área da baliza maior  
 $A_{Bi}$  – Área da Baliza  $i$   
 $T_{CBM}$  – Calado da baliza maior  
 $B_{Bi}$  – Boca da baliza  $i$   
 $T_{CBi}$  – Calado na baliza  $i$   
 $B_{POPA}$  – Boca na Popa  
 $B_{MAXBi}$  – Boca máxima na baliza  $i$



Exemplo de aplicação: *Yacht YD-40* – Book: “Principles of Yacht Design” (Larsson, L. and Eliasson, R.)

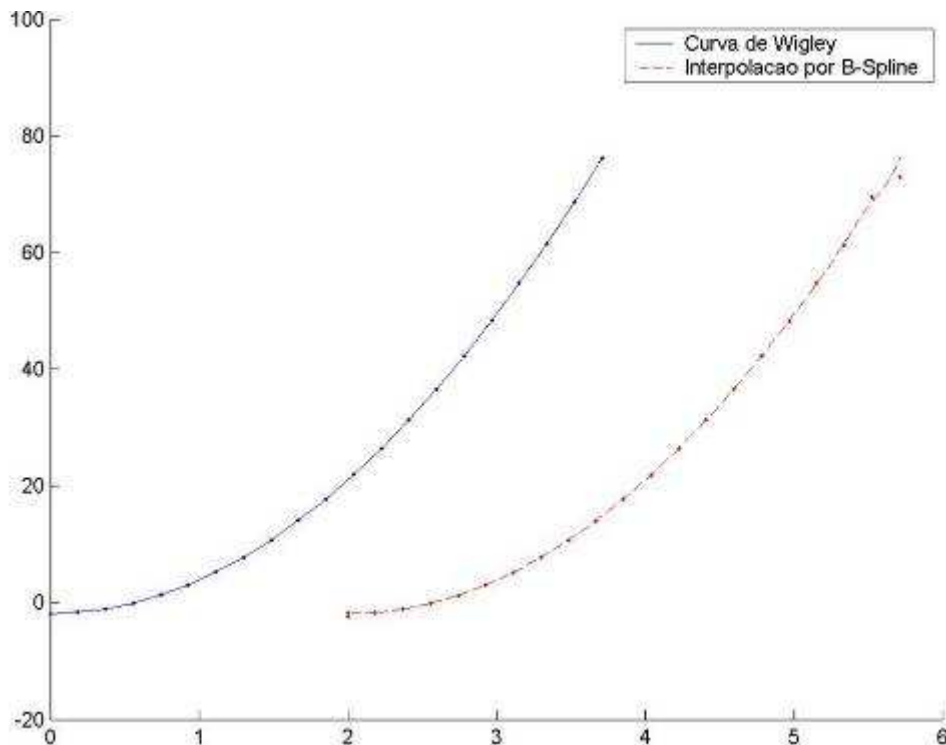
$L_{OA}$ [m]	$L_{WL}$ [m]	$B_{WL}$ [m]	$B_{MAX}$ [m]	$T_C$ [m]	$C_P$	[m <sup>3</sup> ]	$x_{LCB}$ [m]	$A_{WP}$ [m <sup>2</sup> ]
12,05	10,02	3,17	3,71	0,57	0,56	7,632	5,36	22,61

# Resultados

## Aplicação e desempenho do algoritmo

### Comparação com a Curva de Wigley (NARLI et al.,2003)

Curva de Wigley interpolada por B-Spline



**Objetivo:** testar o resultado da suavização, comparando com uma curva polinomial

1. Interpola-se a curva de Wigley por uma B-Spline
  2. Aplica-se uma distorção aleatória
  3. Aplica-se o método de suavização
- Restrições: pontos de controle variam em até 10% em uma direção, e pontos inicial e final não são alterados

**OBS.:**

Narli et. al, 2003: f.o.  $E_c(s) = \int C(s)^2 ds$

# Resultados

## Aplicação e desempenho do algoritmo

### Resultados

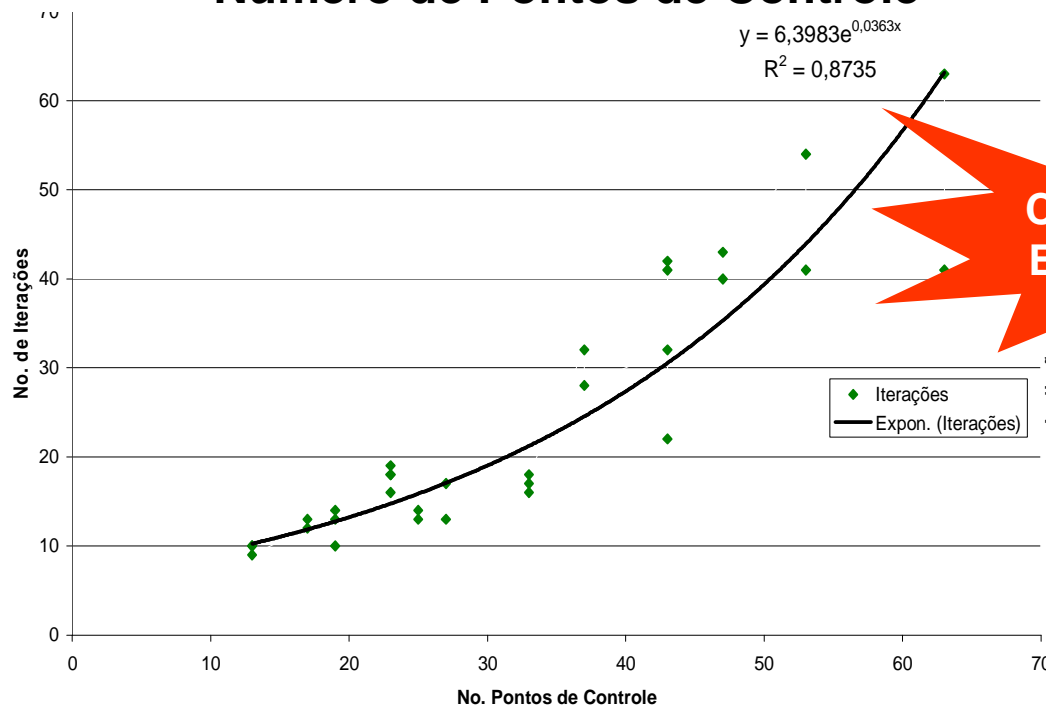
- ❑ Análise da função objetivo
  - $E_2$  e a  $E_c$  têm efeitos semelhantes para o método
  - Para esta aplicação,  $E_3$  terá peso nulo (curvas no espaço)
  - Ponderação dos  $e_i$  provê mais recursos e flexibilidade para a geração das curvas
  
- ❑ 100% dos testes convergiram
  
- ❑ Influência do número de pontos de controle
  - Vários pontos de controle: redução maior de  $E_2$  → minimiza-se as irregularidades, mantendo-se a forma
  - Poucos pontos de controle: redução maior de  $E_1$  → altera-se a forma da curva
  - **Indício dos valores dos  $e_i$  na função objetivo**
  
  - Pouca influência na qualidade do resultado (suavidade)
  - O aumento do número de pontos de controle influi exponencialmente no custo computacional

# Resultados

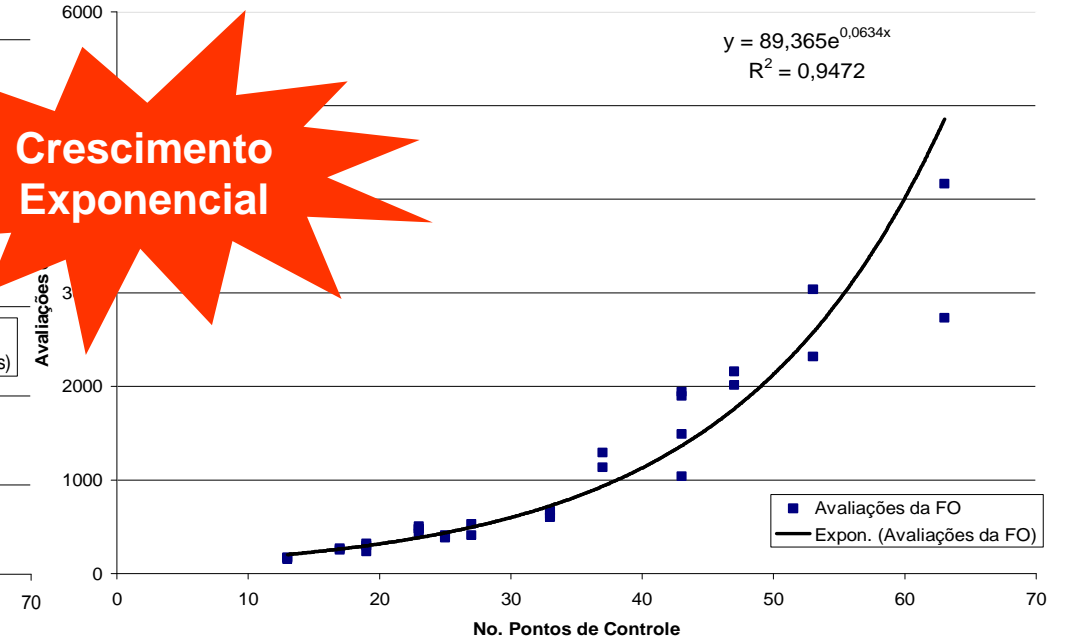
## Desempenho do software

### Esforço Computacional

Iterações  
vs.  
Número de Pontos de Controle



Avaliações da função objetivo  
vs.  
Número de Pontos de Controle



**Crescimento Exponencial**

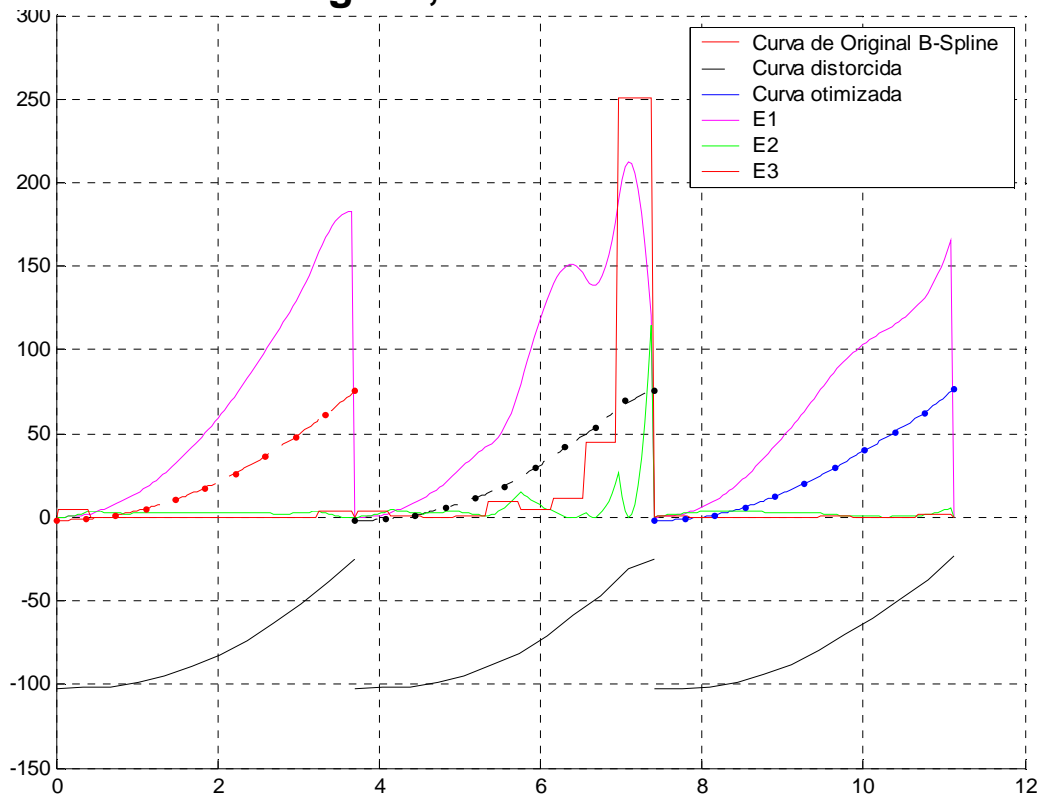
**Conclusão:** O número de pontos de controle tem uma relação exponencial com o custo computacional do algoritmo. Todavia, a qualidade do resultado da suavização não é tão influenciada por este fator.

# Resultados

## Aplicação e desempenho do algoritmo

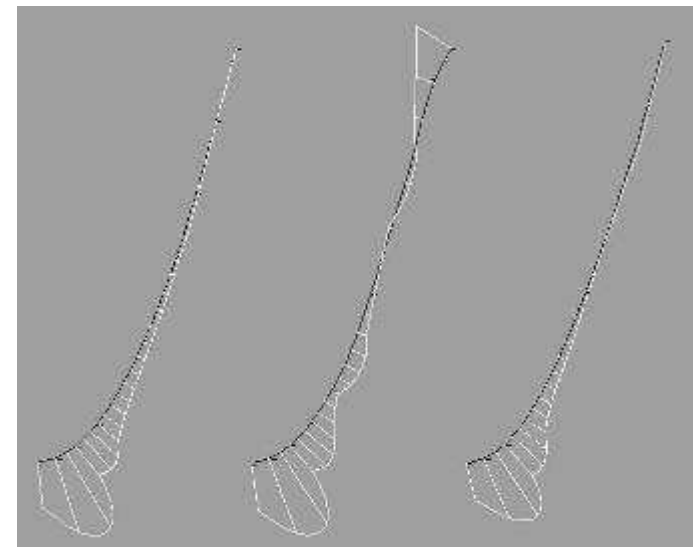
### Exemplo de medida quantitativa da suavização

Curvas original, distorcida e otimizada



Função objetivo:  $F = E_1 + E_2 + E_3$

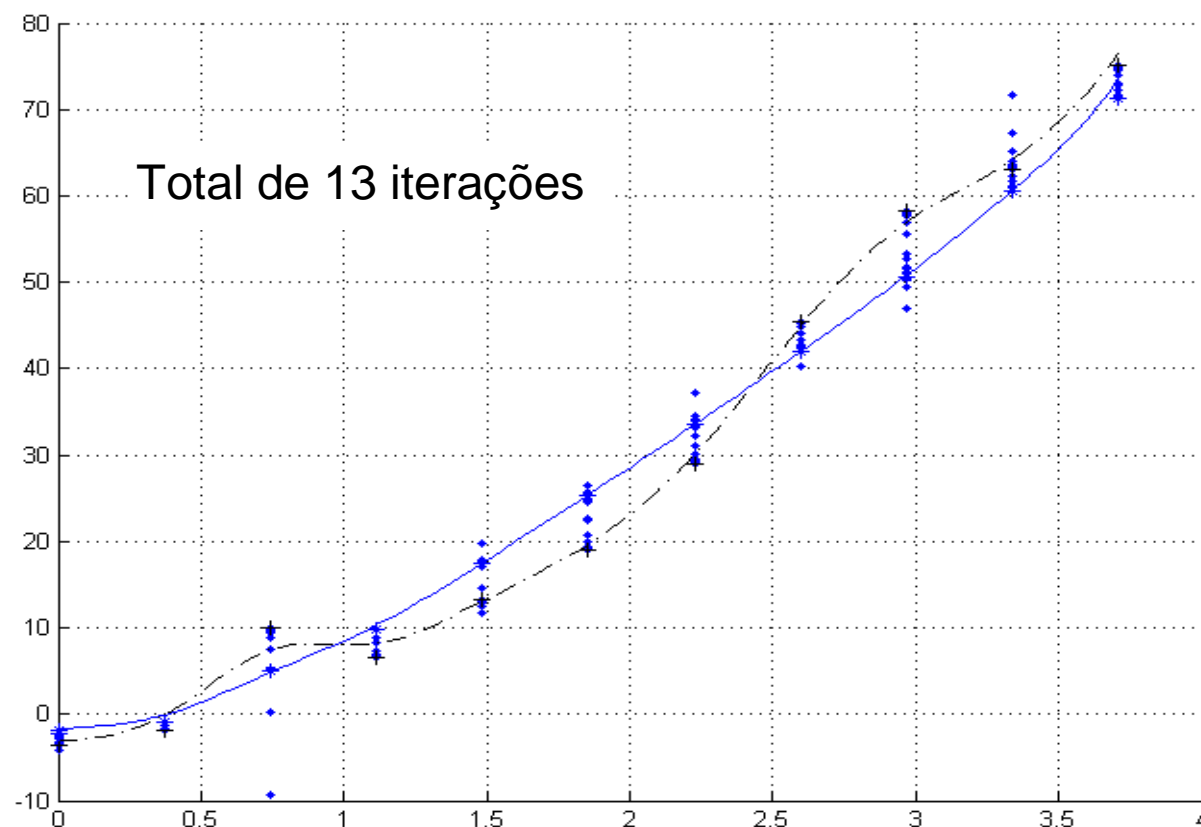
	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_c$
<b>Curva de Wigley</b>	243,45	8,2173	3,5778	0,1398
<b>Curva Distorcida</b>	291,469	27,4533	141,4394	0,0869
<b>Curva Otimizada</b>	240,859	7,8289	1,6732	0,0102
<b>Melhoria em relação à curva distorcida</b>	17%	71%	99%	88%
<b>Melhoria em relação à curva de Wigley</b>	1%	5%	53%	93%



# Resultados

## Aplicação e desempenho do algoritmo

### Exemplo de otimização com pontos de controle parciais

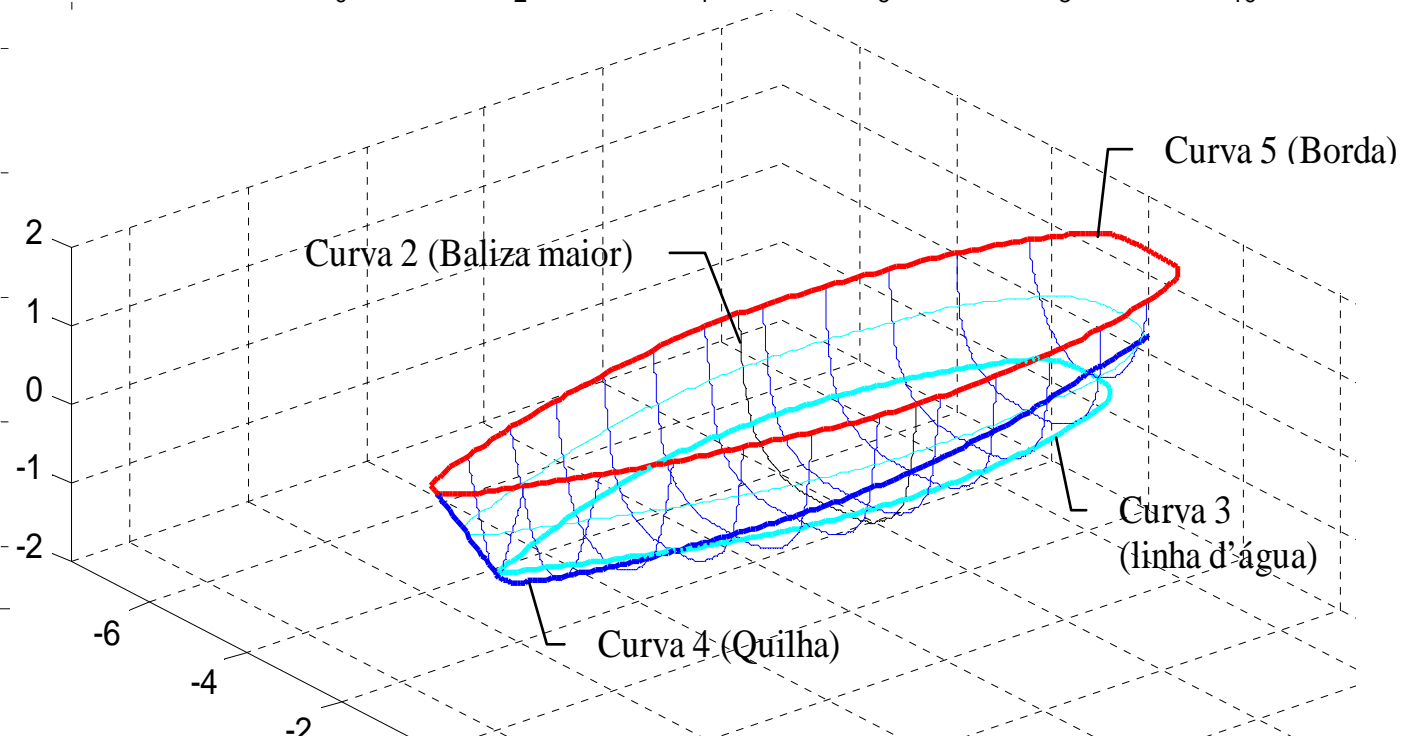
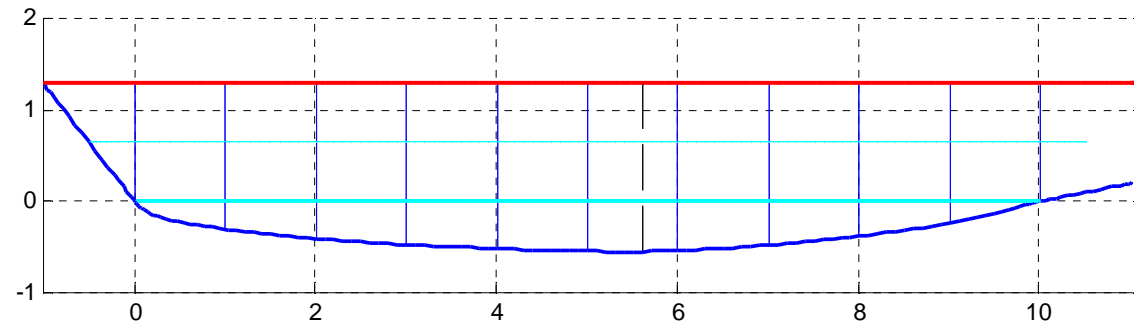
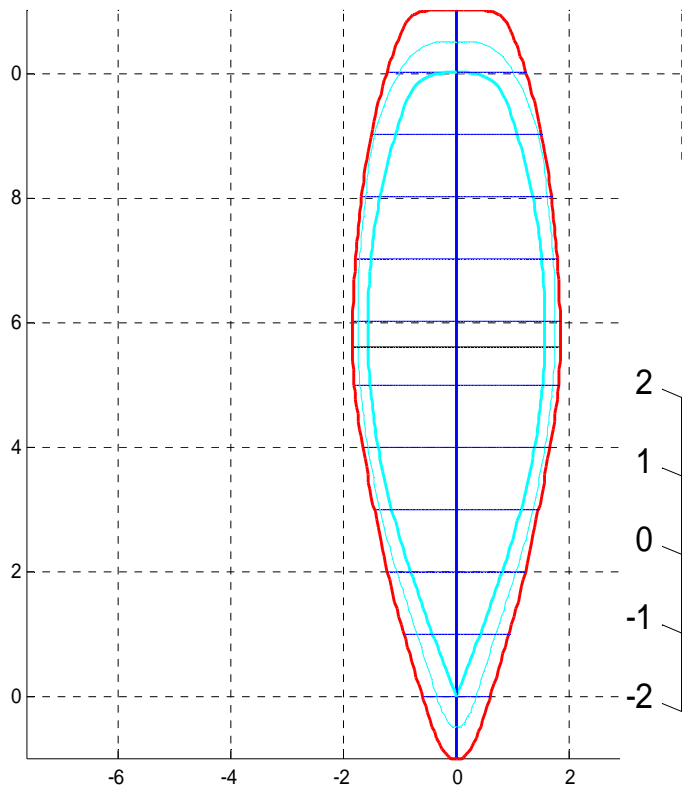


**Conclusão:** Utilizar apenas um grau de liberdade para os pontos de controle diminui a complexidade do modelo matemático de otimização, e, ainda assim, alcança-se resultados satisfatórios em termos da minimização de energia da curva.

# Resultados

## Modelagem os parâmetros do veleiro YD-40

Vistas superior, lateral e isométrica



# Resultados

## Síntese das curvas por otimização

### Curva 1 - Áreas seccionais das balizas

minimizar  $E_2$

$P_{yi}$

tal que:

$$|\nabla c - \nabla c^*| \leq 0,01$$

$$|xLCB - xLCB^*| \leq 0,01$$

$$|\text{máx}(y(t)) - A_{BM}| \leq 0,01$$

$$P_{yi} > 0$$

**Entradas:**

$$L_{WL}=10.02, \nabla c = 7,632$$

$$xLCB = 5,36$$

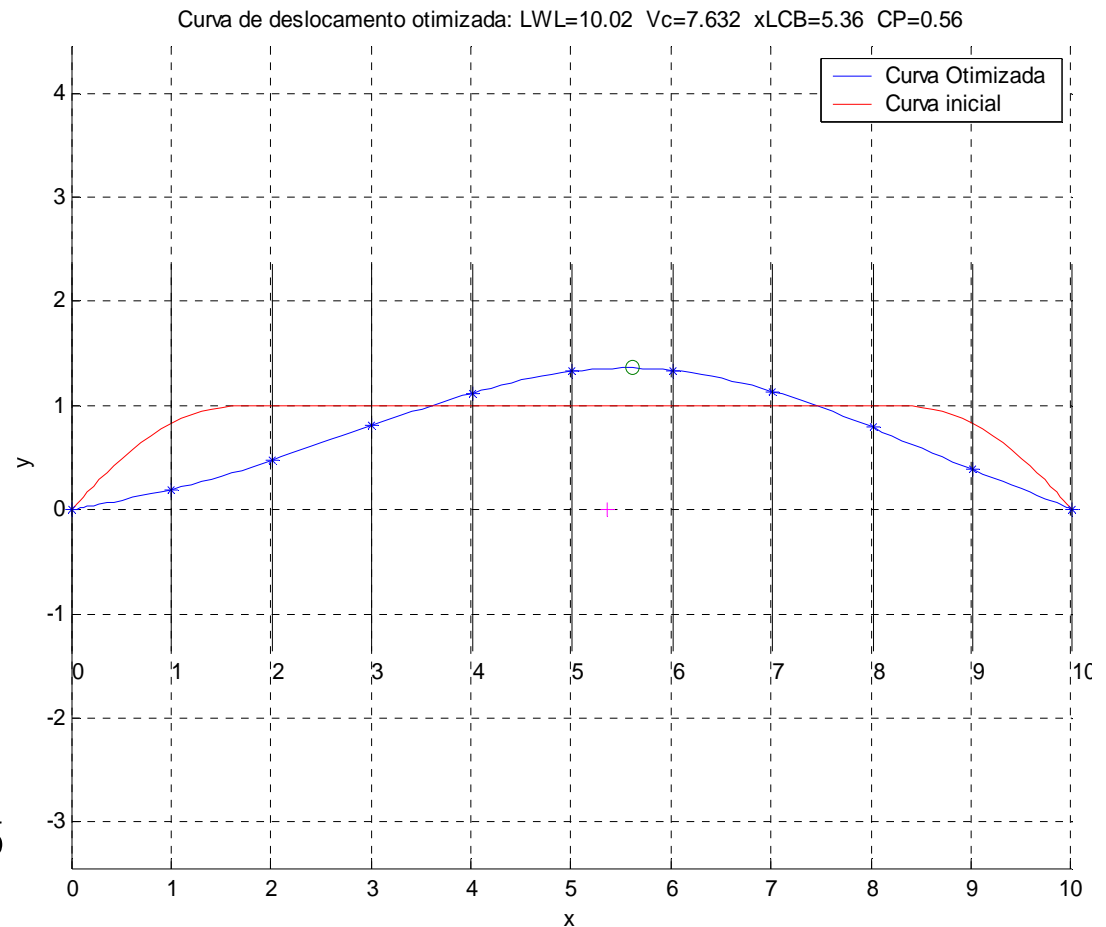
$$C_P = 0,56$$

**Calcula:**

$$A_{BM} = \nabla c / (L_{WL} * C_P) = 1,36$$

**Valores iniciais:**

$$P_{yi} = 1,0$$



# Resultados

## Síntese das curvas por otimização

### Curva 3 – Curva da linha d'água de projeto

### Resultado

minimizar  $E_1 + E_2$

$P_{yi}$

tal que:

$$20^\circ \leq \alpha_B^* \leq 25^\circ$$

$$|\alpha_E - \alpha_E^*| = 0^\circ$$

$$|B_{WL} - B_{WL}^*| \leq 2\%$$

$$|A_{BM} - A_{BM}^*| \leq 0,01$$

$$|A_{WP} - A_{WP}^*| \leq 0,5\%$$

$$0 < P_{yi} \leq B_{WL}$$

**Entradas:**

$$A_{WP} = 22,61$$

$$B_{WL} = 3,17$$

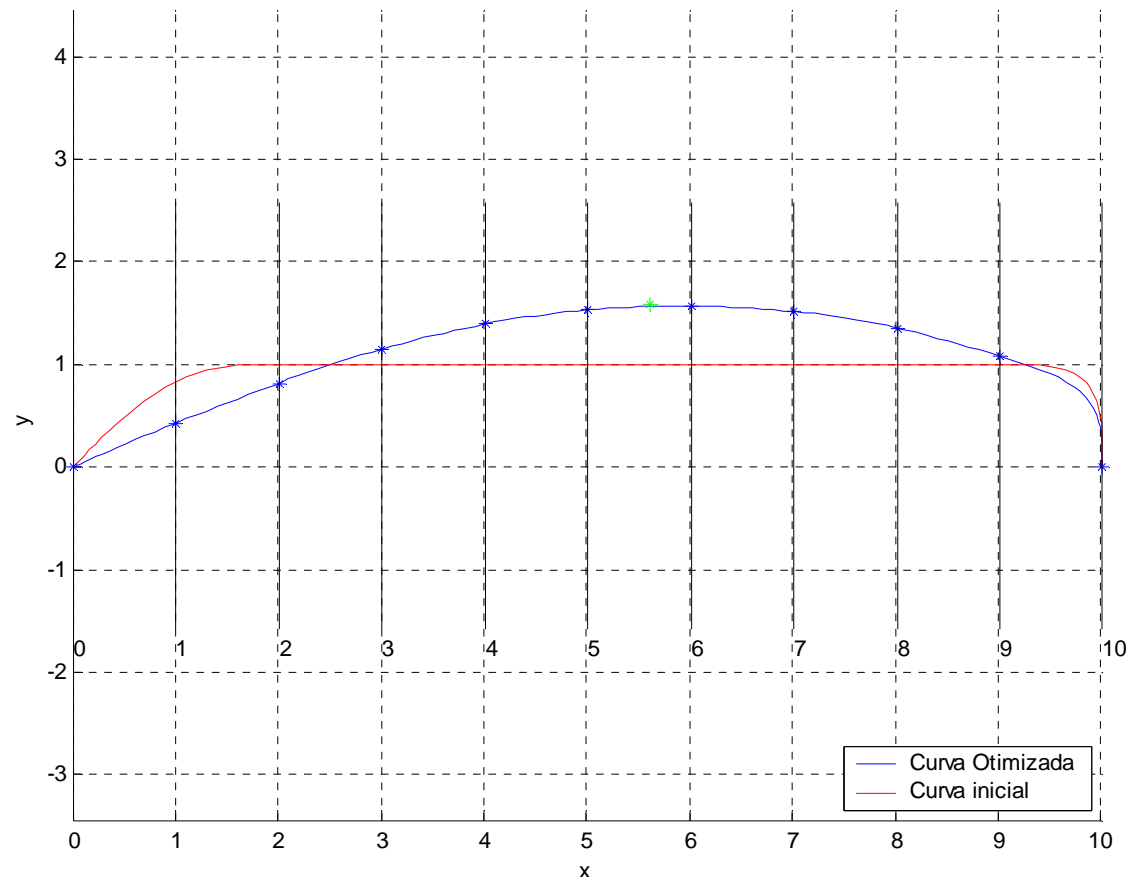
$$x_{BM} = 5,61$$

$$\alpha_E = 0^\circ$$

**Valores iniciais:**

$$P_{yi} = 1,0$$

Curva da linha d'água otimizada:  $A_{wp}=22.61$   $B_{wl}=3.17$



# Resultados

## Síntese das curvas por otimização

### Curva 6 – Curva das balizas

minimizar  $E_1 + E_2$

$P_{yi}$

tal que:

$$|\alpha_B - \alpha_B^*| = 0^\circ$$

$$|\alpha_E - \alpha_E^*| \leq 1^\circ$$

$$|B_{WLi} - B_{WLi}^*| \leq 1\%$$

$$|A_{Bi} - A_{Bi}^*| \leq 1\%$$

$$C_{MAXi} \leq C_{emp}$$

$$0 < P_{yi} \leq B_{MAXBi}$$

Entradas:

$[B_{WLi}]$

$[B_{MAXBi}]$

$[T_{CBi}]$

$[A_{Bi}]$

$\alpha_{Bi} = 90^\circ$

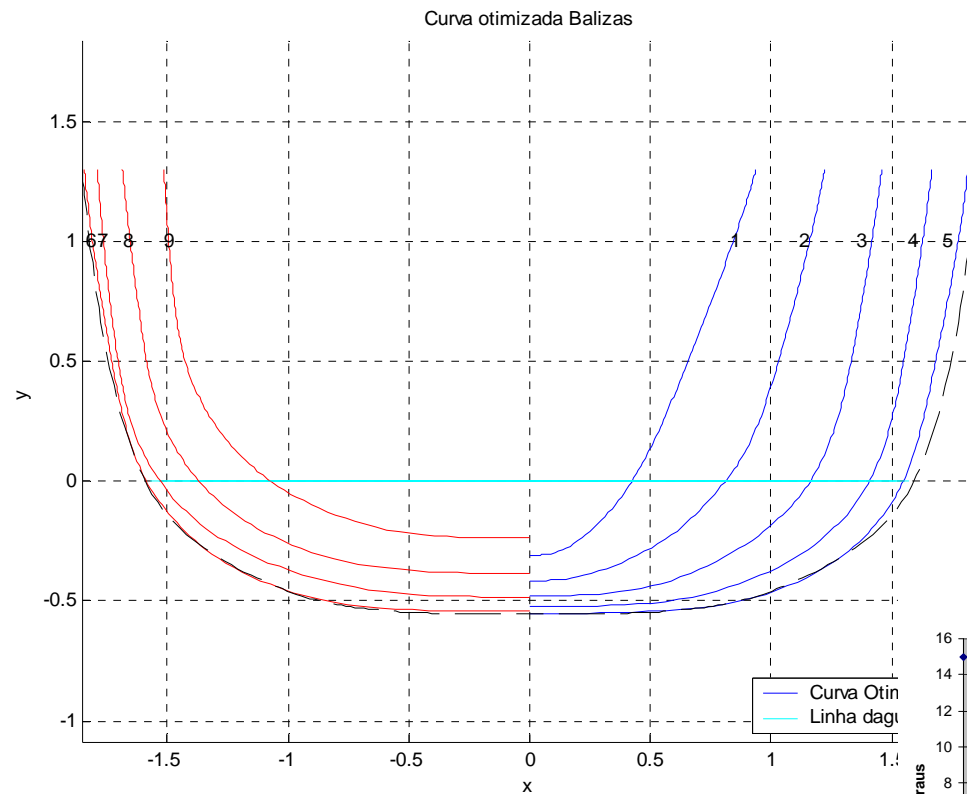
$[\alpha_{Ei}] =$

[15 15 10 8 6 5 5 5 5 5]

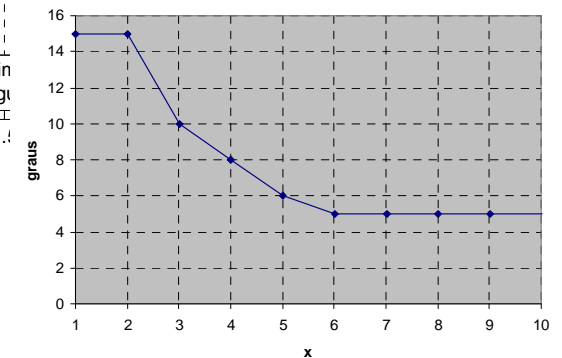
$FB = 1,3$

Valores iniciais:

$[P_{yi}] = B_{MAXi} [1:10]/10$



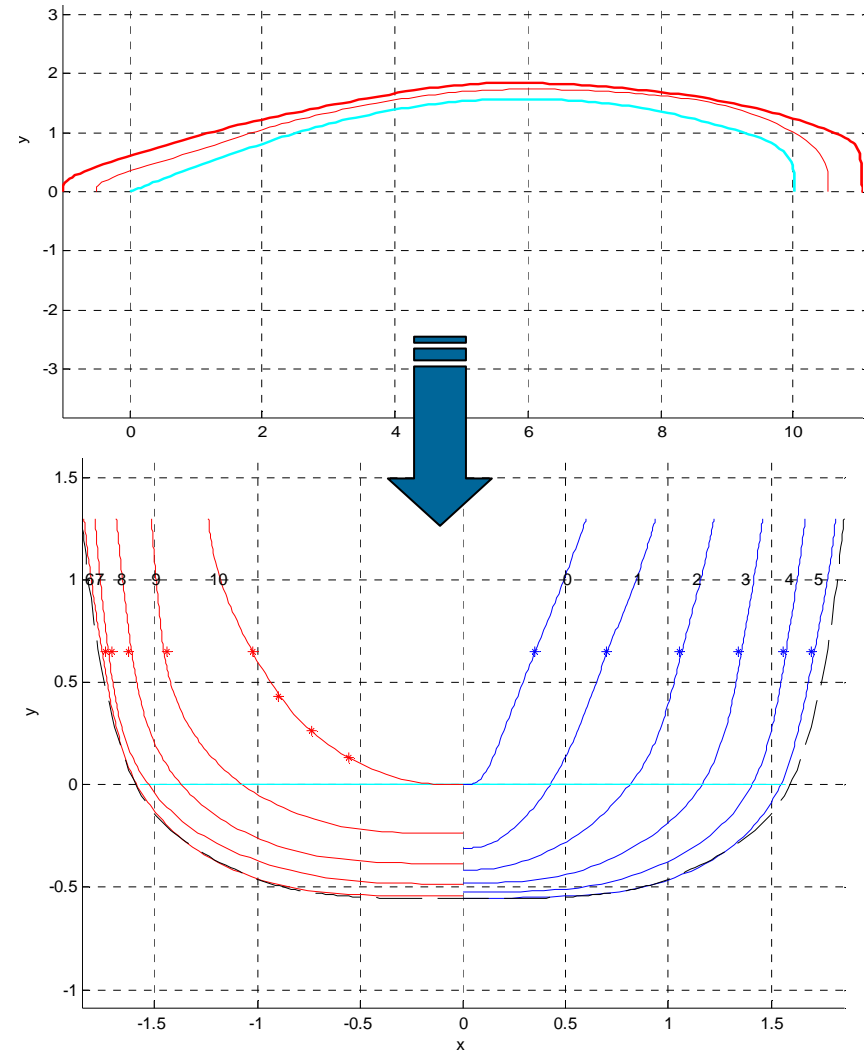
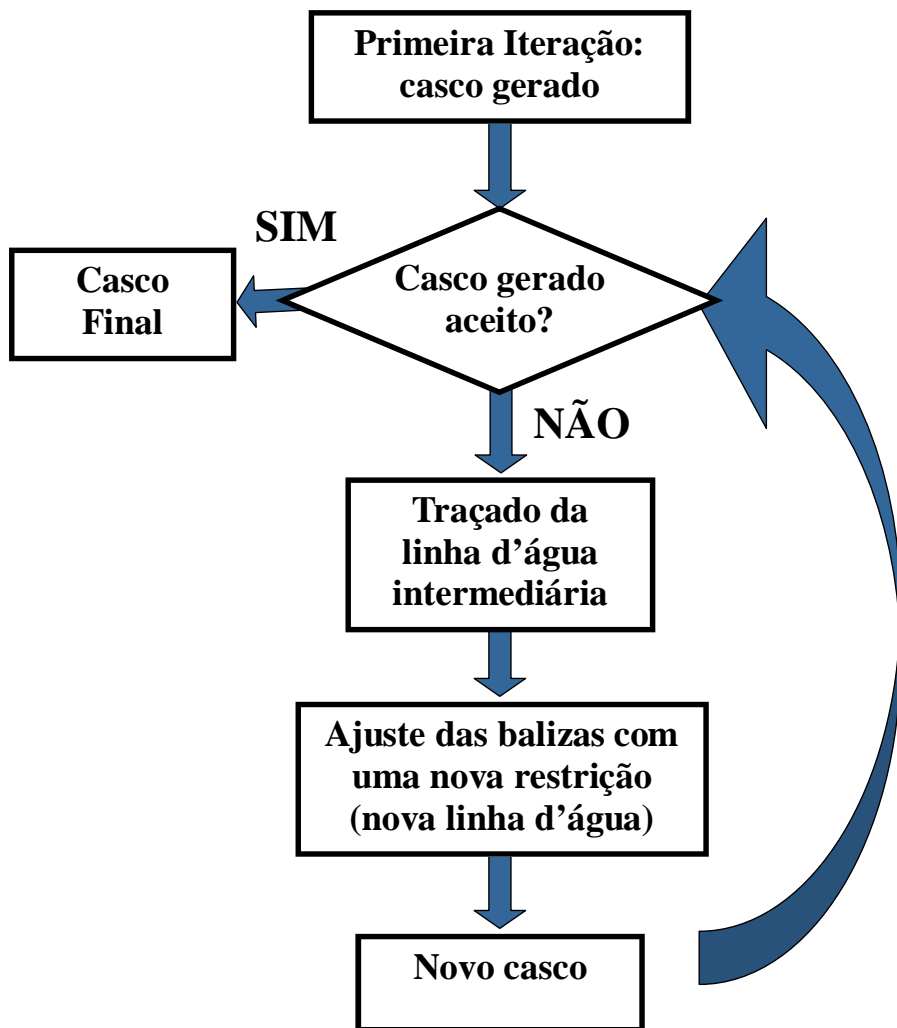
Ângulos de saída das balizas



# Resultados

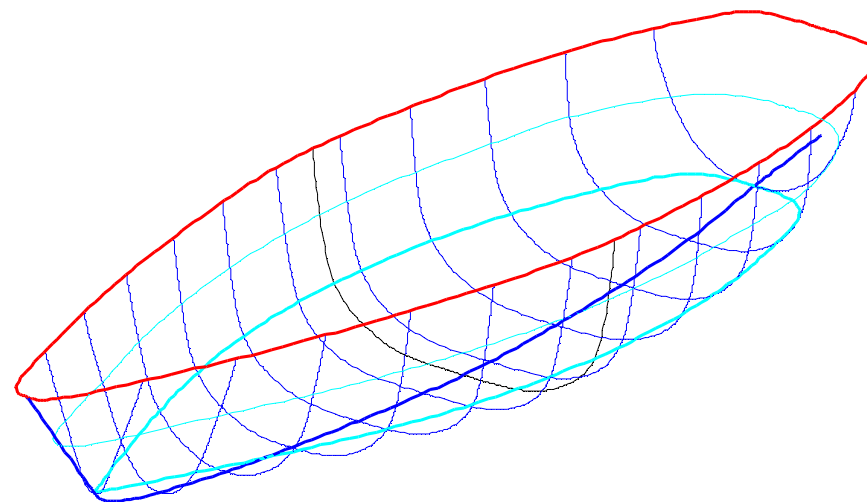
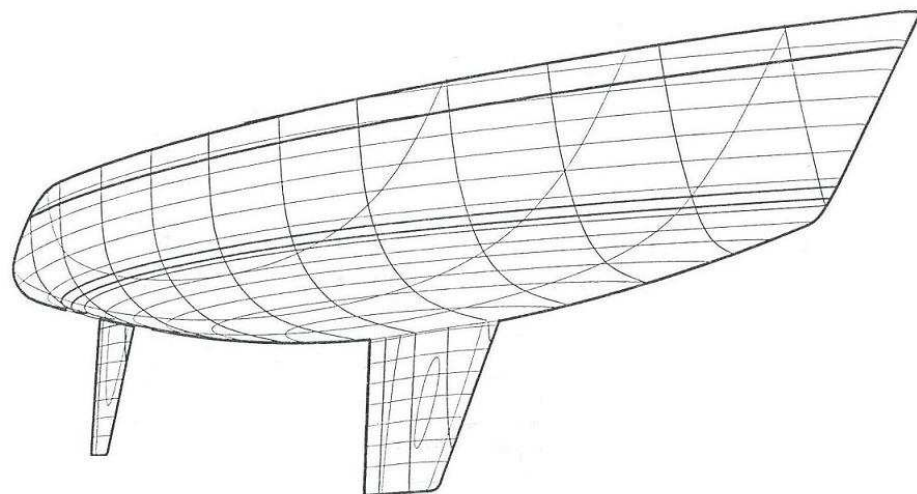
## Implementação com mais linhas d'água

### Implementação com mais linhas d'água



# Resultados

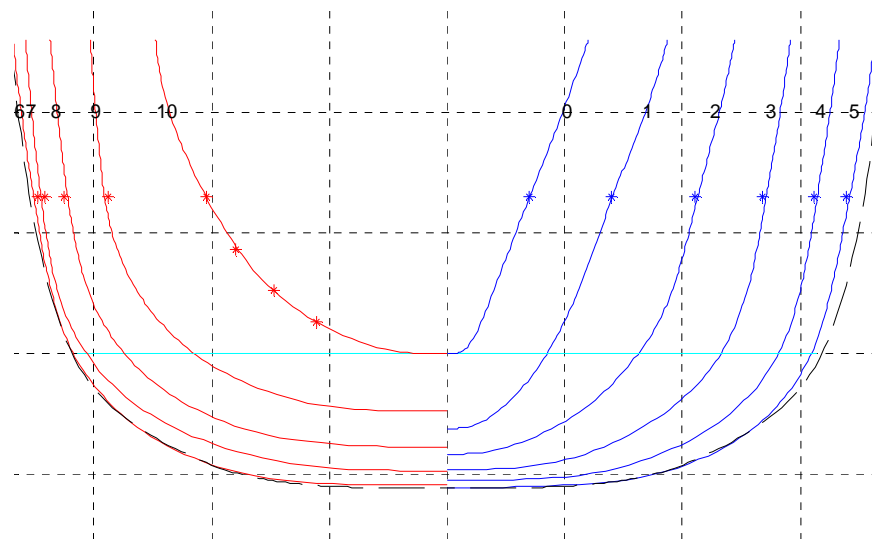
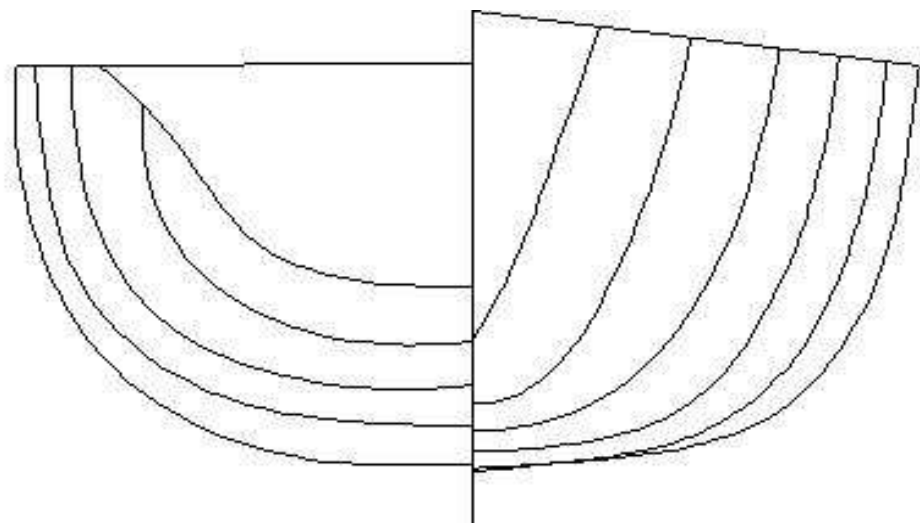
## Comparação com o veleiro YD-40



	<i>YD-40</i>	<i>Casco Gerado</i>	<i>desvio</i>
<b>Volume de deslocamento [m<sup>3</sup>]</b>	7,632	7,74518	1,461%
<b>Superfície molhada [m<sup>2</sup>]</b>	25,220	25,2445	0,097%
<b>Boca máxima [m]</b>	3,17	3,17338	0,107%
<b>Comprimento da linha d'água [m]</b>	10,02	10,02	0,000%
<b>Área interior a <math>D_{WL}</math> (WPA) [m<sup>2</sup>]</b>	22,61	22,6063	0,016%
<b>Centro de flutuação (<math>x_F</math>) [m]</b>	0; 5,674	0; 5,5391	2,435%
<b>Centro de carena (<math>x_{LCB}</math>) [m]</b>	0; 5,36	0; 5,36396	0,074%

# Resultados

## Comparação com o veleiro YD-40



	<i>YD-40</i>	<i>Casco Gerado</i>	<i>desvio</i>
<b>Volume de deslocamento [m<sup>3</sup>]</b>	7,632	7,74518	1,461%
<b>Superfície molhada [m<sup>2</sup>]</b>	25,220	25,2445	0,097%
<b>Boca máxima [m]</b>	3,17	3,17338	0,107%
<b>Comprimento da linha d'água [m]</b>	10,02	10,02	0,000%
<b>Área interior a <math>D_{WL}</math> (WPA) [m<sup>2</sup>]</b>	22,61	22,6063	0,016%
<b>Centro de flutuação (<math>x_F</math>) [m]</b>	0; 5,674	0; 5,5391	2,435%
<b>Centro de carena (<math>x_{LCB}</math>) [m]</b>	0; 5,36	0; 5,36396	0,074%

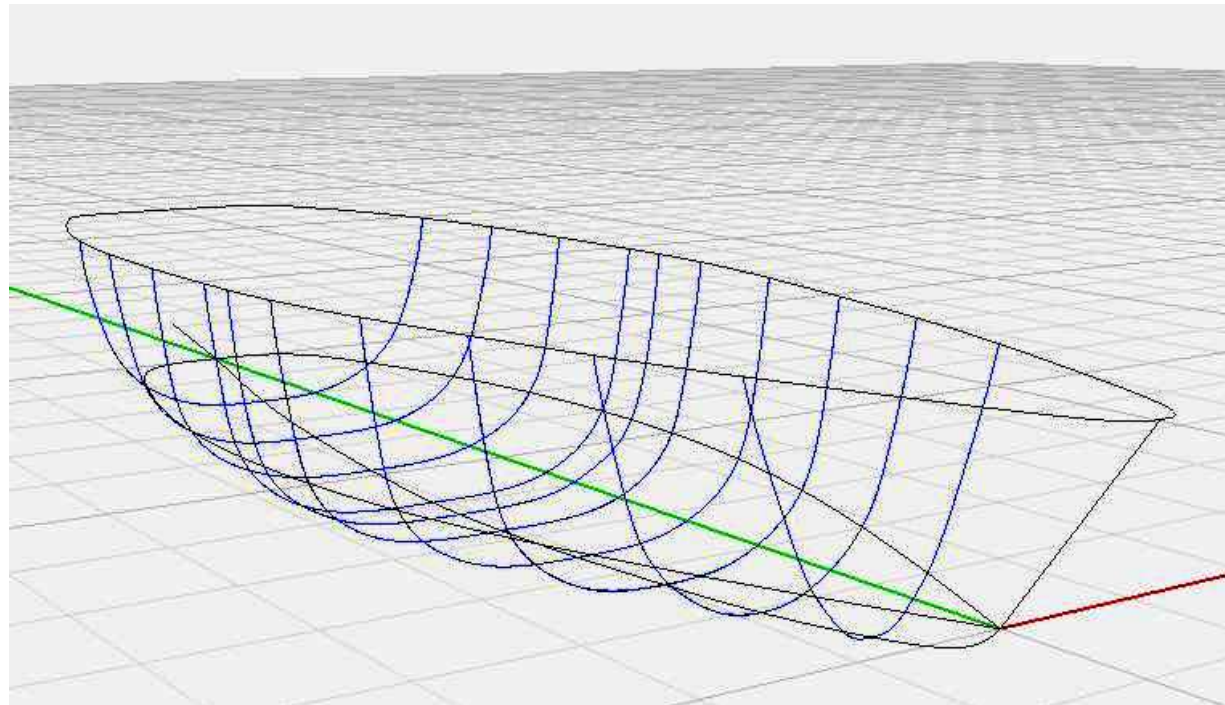
# Resultados

## Análise e pós-processamento dos resultados em CAD

### ❑ Objetivos:

- Explorar os recursos de software CAD (análises geométricas, hidrostáticas, etc)
- Manipulação do casco gerado, interpolação por superfícies
- Finalização do desenho do projeto
- Integração com o pacotes CAM (visão fim a fim)

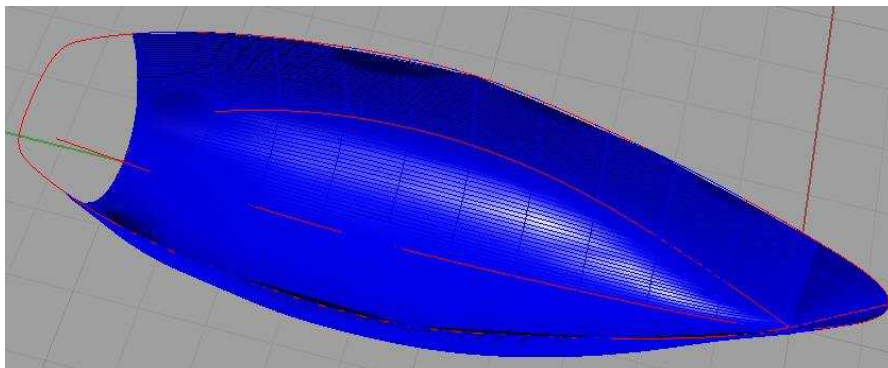
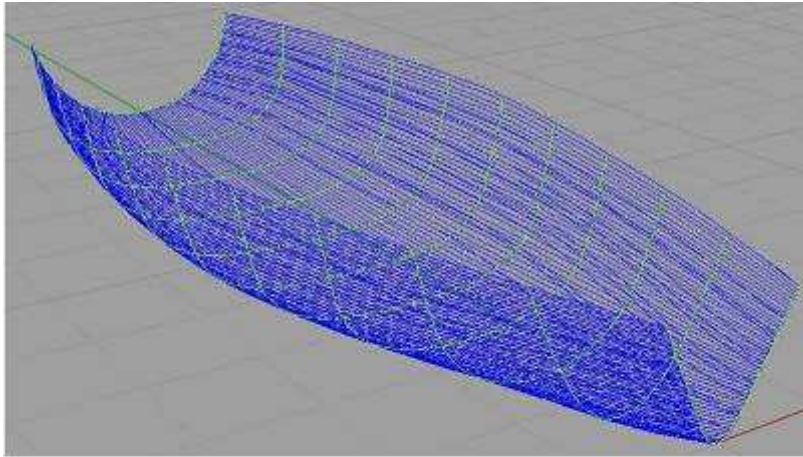
### ❑ Implementação de algoritmo para exportar em formato .dxf



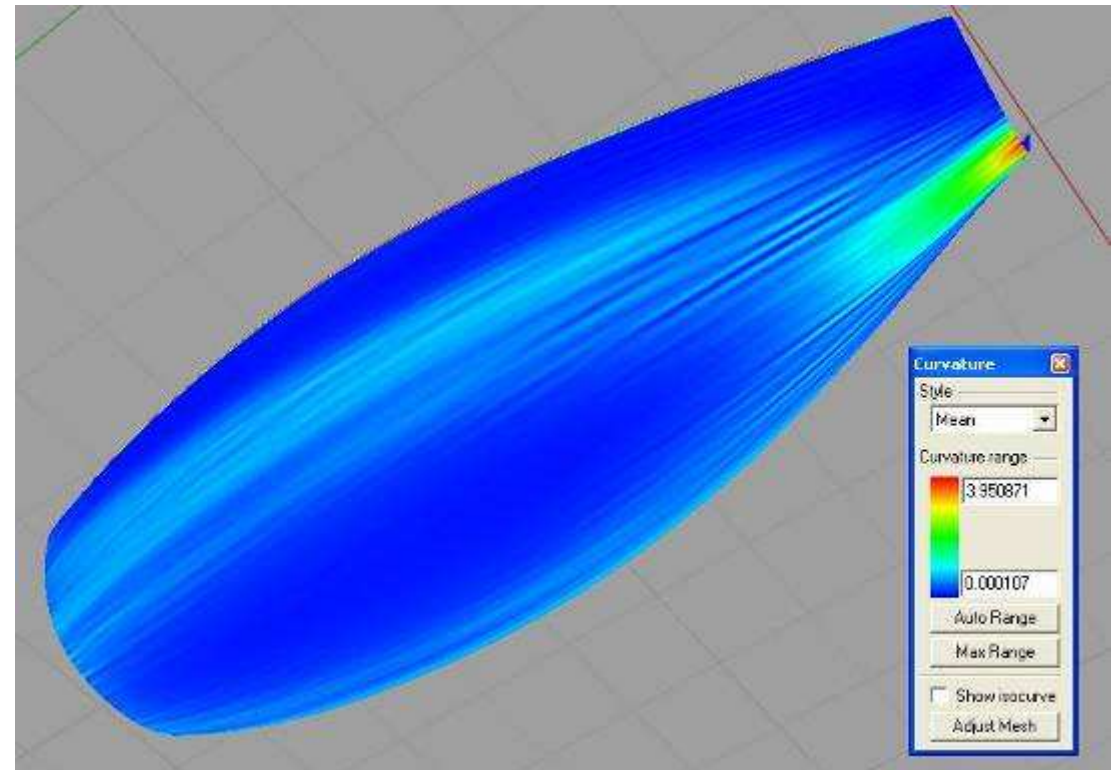
# Resultados

## Análise e pós-processamento dos resultados em CAD

### Exemplo de análises em CAD



### Análise de curvatura



Interpolação por superfícies

*Ferramenta mais adequada: Loft (transição de perfis) – Superfície B-Spline*

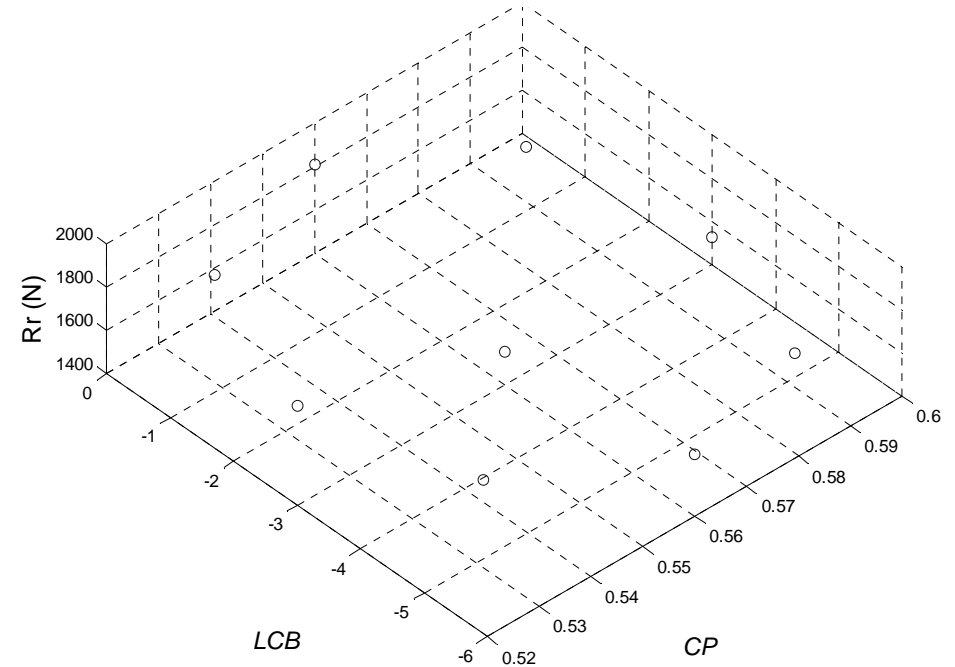
# Resultados

## Otimização Paramétrica do casco

Obtenção da Superfície de Resposta:

Tabela de CCD

	$x_1$	$x_2$	$C_P$	$LCB$	$R_r$
1	0	0	0,56	-3,00	15.561
2	1	1	0,59	-0,88	16.526
3	-1	1	0,53	-0,88	18.999
4	-1	-1	0,53	-5,12	18.086
5	1	-1	0,59	-5,12	15.613
6	$\sqrt{2}$	0	0,60	-3,00	15.294
7	0	$\sqrt{2}$	0,56	0,00	18.146
8	$-\sqrt{2}$	0	0,52	-3,00	18.591
9	0	$-\sqrt{2}$	0,56	-6,00	16.854



Encontram-se os valores de  $\beta$ 's e obtém-se a função da superfície de resposta:

$$R_r(C_P, LCB) = 31192,31 - 100799,05C_P + 150,79LCB + 86319,29C_P^2 + 21,54LCB^2 - 0,17 \cdot 10^{-7}C_P LCB$$

# Resultados

## Otimização Paramétrica do casco

Problema de otimização:  $\min R_r(C_p, LCB)$

sujeito à:

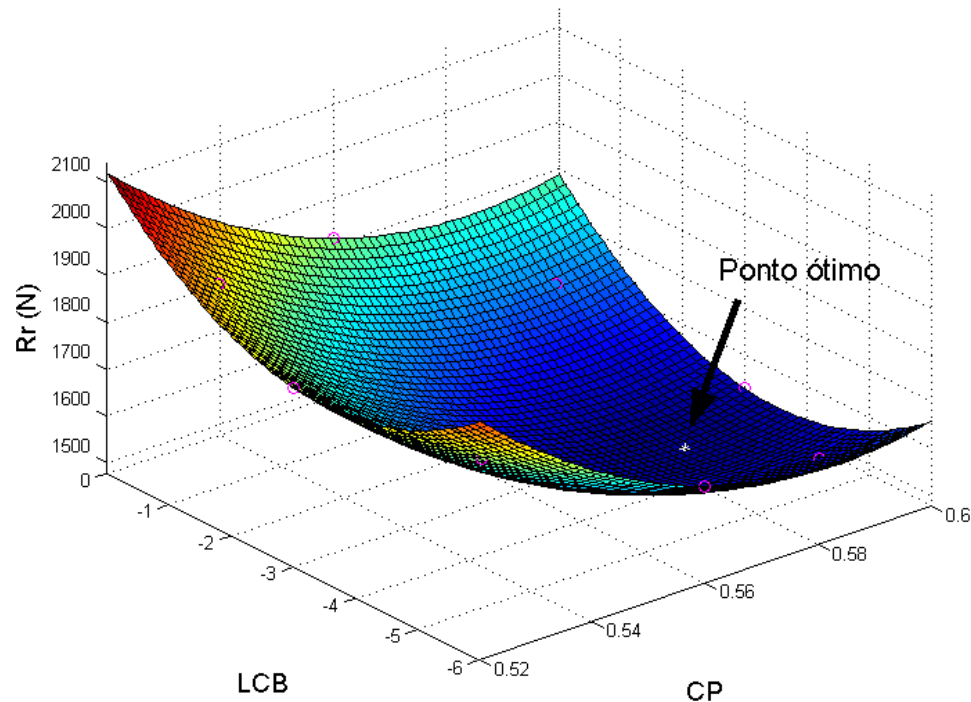
$$0,00 \leq LCB \leq -6,00$$

$$0,52 \leq C_p \leq 0,60$$

*Restrições do modelo empírico*

Resultados:

Superfície de Resposta



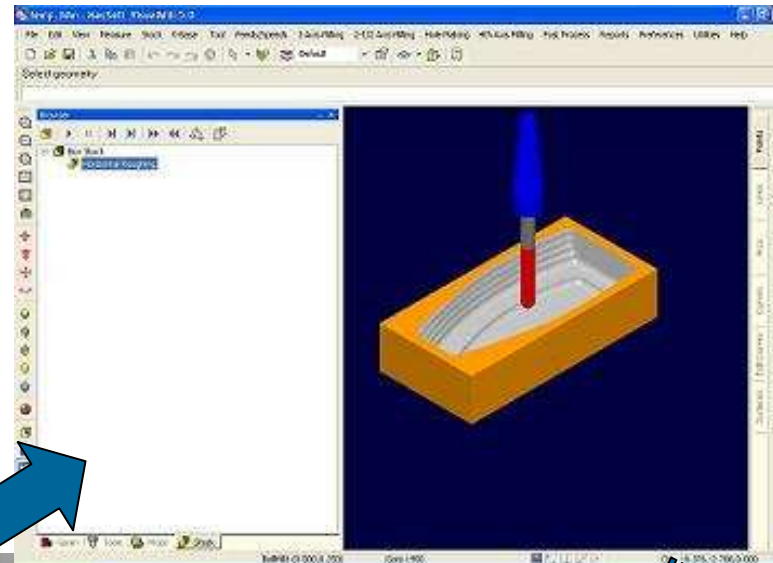
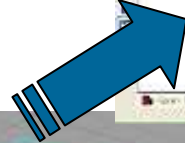
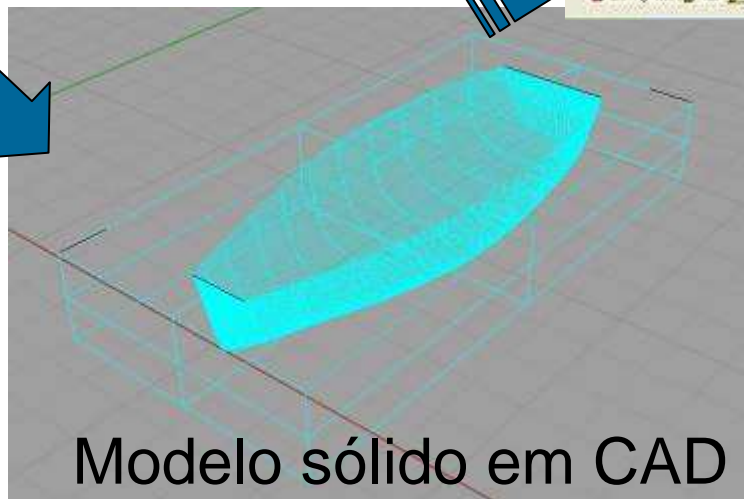
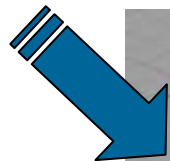
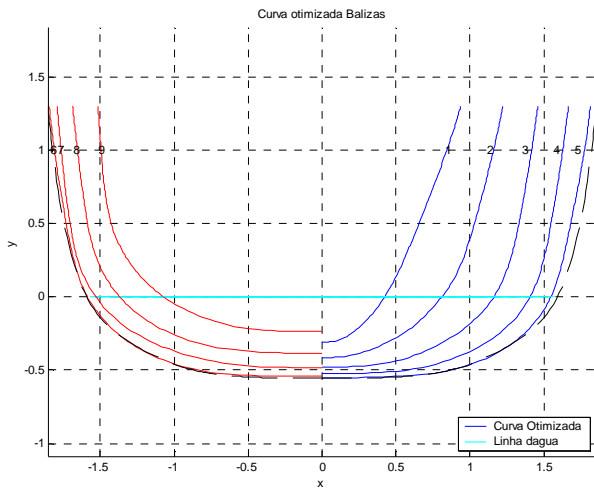
**Tabela comparativa de valores**

	Inicial	Final
$R_r$	1550 N	1501 N
$C_p$	0,56	0,58
LCB	-3,493	-3,499

**Redução de 3,17% na função objetivo**

# Resultados Integração com Software CAM

## Curvas paramétricas em Matlab



Software CAM  
(VisualMill)



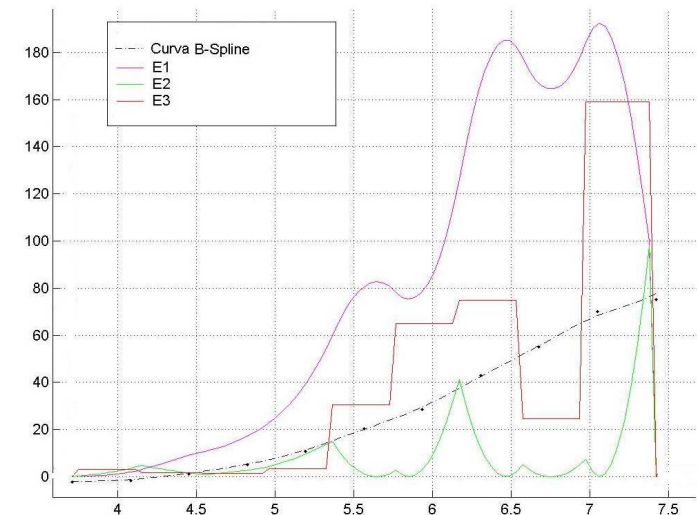
## Código G

```
G90
G21
G0X-0.0748Y6.084
Z1.55
G1X-
0.0754Y6.055Z1.5398F
2.7
X-
0.0739Y5.7031Z1.4114
X-
0.0567Y5.2952Z1.2628
X0.Y4.7862Z1.0763
X0.0445Y5.1417F3.7
X0.0585Y5.3162
X0.0753Y5.7707
X0.0705Y6.4372
X0.0395Y7.2448
X-0.0428
X-0.0552Y7.0147
X-0.0754Y6.0559
X-0.0739Y5.7031
X-0.0567Y5.2952
X0.Y4.7862
```

# Conclusões

## Discussão dos resultados do algoritmo implementado

- A ponderação das diferentes energias na função objetivo é afetada pelo número de pontos de controle utilizado.
- A ponderação das energias na função objetivo propicia mais recursos para a síntese das curvas.
- A energia de torção não produz resultados interessantes para curvas planas.
- A integral da curvatura e a energia de flexão produzem o mesmo efeito para o algoritmo, e não há necessidade de adicionar  $E_c$  na fórmula da função objetivo.



## Discussão dos resultados da modelagem

- A formulação de B-Spline utilizada é adequada e orientada ao problema
- O casco gerado é visualmente parecido com o casco original (YD-40)
- Através da análise em CAD, as dimensões geométricas possuem um desvio muito pequeno.

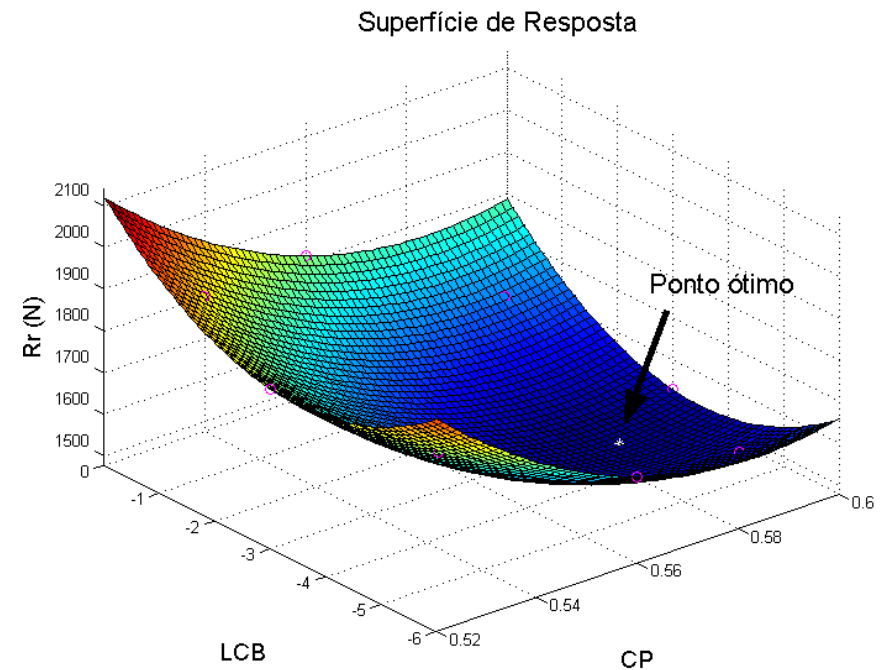
# Conclusões

## Discussão dos resultados da otimização paramétrica

➤ Buscou-se foi demonstrar que o MSR é uma alternativa interessante e de baixo custo para substituir análises pesadas de otimização (uma alternativa simples frente a algoritmos genéticos).

➤ Em termos percentuais, a otimização da resistência residual é pequena. Isso porque quase não houve variação no *LCB*, que já se encontrava próximo do ponto ótimo.

➤ O método é capaz de analisar várias outras combinações de parâmetros ou mesmo utilizar outras velocidades do barco.



# Conclusões

## Discussão sobre o método proposto

- Aplicando o algoritmo a um exemplo, aponta que o modelo elaborado fornece resultados compatíveis com a experiência e prática de projetos de embarcações.
- Ferramenta desejável para:
  - projeto preliminar e rápida geração de cascos parametrizados
  - auxílio à tomada de decisão e análise
  - modificações de projetos existentes
- Resultados são bons o suficiente para servirem como projeto final em CAD ou outras ferramentas
- Ganhos satisfatórios em relação a esforço e tempo



## Desenvolvimentos Futuros

- Pode-se estudar com maior enfoque o MSR para análise de outras funções objetivo e outras combinações de variáveis de projeto.
- Desenvolvimento de uma ferramenta capaz de traduzir um perfil de missão específico para grandezas de entrada da ferramenta implementada neste trabalho.



## Comentários Finais

*Embora a ferramenta de proposta conduza ao estado da arte em termos de Projeto de Embarcações e integração CAD/CAM, esta não substitui a arte e experiência do projetista, mas provê um instrumento personalizado de modelagem.*

*Não existe um casco ótimo para todas as condições, mas sim, uma forma geométrica melhor para determinada condição*

*Outras ferramentas complexas estão disponíveis no mercado. O fundamental é a escolha do software mais adequado para o problema.*

*Não existe uma ferramenta mágica ainda, e o computador provê um resultado que atende às restrições especificadas, mas nem sempre preenche os desejos do cliente.*

# Agradecimentos

Professores:

✓ Prof. Dr. Bernardo Luis Rodrigues Andrade / EPUSP / PNV

Outros:

✓ Empresa Böning Tecnologia em Automação



✓ Escola Politécnica da Universidade de São Paulo



# Obrigado!

**Luiz Henrique Maiorino Barbarini –  
luiz.barbarini@poli.usp.br**