

PAULO HENRIQUES CHIXARO

**REPRESENTAÇÃO COMPUTACIONAL GRÁFICA DE SUPERFÍCIES
"B-SPLINE" COMO SUBSÍDIO À CONFIGURAÇÃO DE FORMAS
MOLDADAS DE CASCOS DE EMBARCAÇÕES**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre
em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Naval

Orientador:
Prof. Dr. Mardel Bongiovanni de Conti

São Paulo
2002

O wonder!
How many goodly creatures are there here!
How beauteous mankind is!
O brave new world

Aldous Leonard Huxley (1894-1963)

À minha esposa Ivone e meus
filhos Paulo e Davi sem os
quais eu nada teria
conseguido

AGRADECIMENTOS

Ao meu super orientador e amigo Prof. Dr. Mardel Bongiovanni de Conti (espero que me perdoe pelo super sem ter que quantificar) pela atenção e dedicação a este orientando que gostou muito de ter tido a oportunidade de conhece-lo.

A minha querida esposa Ivone por toda a força, ajuda e motivação.

Aos meus filhos Paulo e Davi pela compreensão e apoio mesmo sabendo de todo o tempo que lhes foi roubado.

Aos amigos de jornada Profa. Elaine e prof. Rogério da Fatec Ourinhos.

Aos meus amigos por todas as palavras de motivação e incentivo.

Ao Centro Estadual de Educação Tecnológica “Paula Souza” que me ajudou e permitiu abraçar esta empreitada.

Ao Prof. e grande amigo Dr. Milton Damato da Fatec Ourinhos.

Ao Prof. Ms. Andre Trindade Presende da Fatec Ourinhos..

Ao Prof. Ms. Silvio Lago da Fatec São Paulo.

Aos novos amigos do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da USP pelo apoio, incentivo e grandes “papos” nos almoços quando de minhas idas a São Paulo.

Aos professores e amigos das Fatec’s Jahu, Americana, Indaiatuba e ETE de Araraquara, pela boa convivência e amizade gerada nos fins de semana em Jahu.

Ao prof. Ms Sergio Lukine idealizador e batalhador deste projeto.

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	i
Lista de Tabelas.....	ii
Lista de Símbolos.....	iii
Resumo.....	iv
Abstract.....	v
1. Introdução	1
2. Curvas e superfícies “B-spline”	3
2.1 Considerações gerais	3
2.2 Representação matemática de curvas e superfícies “B-spline”	6
2.3 Técnica de determinação da distribuição de curvaturas	12
2.4 Estima de Coeficientes de forma de distribuição de áreas seccionais e de centros de áreas.....	14
2.5 Obtenção de Planos de linhas	15
2.6 Outras técnicas	16
3. Desenvolvimento do programa de computador.....	20
3.1 Considerações gerais	20
3.2 Visualização da superfície.....	22
3.3 Modificações na superfície.....	23
3.4 Monitoramento de parâmetros representativos da superfície (coeficientes e relações de forma, áreas seccionais, centros, etc.).....	24
4. Exemplos de aplicação.....	27
4.1 Aplicação a uma superfície de forma prismática	27
4.2 Aplicação a uma forma carenada	29
5. Conclusões.....	37
6. Referências Bibliográficas.....	38
7. Lista de sítios	40
Anexo I Curvas de Bézier.....	41
Anexo II Geometria em 3D.....	44
Anexo III Exibir pontos na tela do computador com a sensação de tridimensionalidade.....	46
Anexo IV Expressões para o cálculo dos coeficientes de forma	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.2.1 Curva “ <i>B-spline</i> ”.....	7
Figura 2.2.2 Segmento de reta em uma “ <i>B-spline</i> ”	8
Figura 2.2.3 Curva “ <i>B-spline</i> ” com mudança de um ponto de controle	9
Figura 2.2.4 Superfície “ <i>Bspline</i> ”	11
Figura 2.3.1 Gráfico de distribuição de curvatura (1 e 2).....	12
Figura 2.3.2 Gráfico de distribuição de curvatura (3 e 4).....	13
Figura 2.5.1 Planos de linhas (Balizas, Linhas d’água e perfil).....	15
Figura 2.6.1 Síntese do modelo descrito em PRESS at all [1998]	17
Figura 2.6.2 Síntese do modelo proposto em ANDRADE [2001].....	19
Figura 3.1.1 Extruturograma do programa desenvolvido.....	21
Figura 3.2.1 Visualização de uma superfície “ <i>B-spline</i> ”	22
Figura 3.3.1 Mudanças nas coordenadas de pontos de controle.....	23
Figura 3.4.1 Superfície com os coeficientes de forma, centros e áreas.....	25
Figura 3.4.2 Superfície após mudança de coordenadas.....	26
Figura 4.1.1 Superfície com os coeficientes de forma	27
Figura 4.2.1 Casco com coeficientes de forma obtidos pelo programa	32
Figura 4.2.2 Casco após primeiro acerto	33
Figura 4.2.3 Casco com coeficientes após segundo acerto.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1.1 Comparação com valores obtidos pelo programa	28
Tabela 4.2.1 Cotas do casco considerado	29
Tabela 4.2.2 Coordenadas das larguras (x) em cada uma das 12 balizas (z).....	30
Tabela 4.2.3 Coordenadas das alturas (y) em cada uma das 12 balizas (z)	30
Tabela 4.2.4 Coordenadas das balizas (z)	31
Tabela 4.2.5 Coordenadas (x;y;z) dos pontos de controle	31
Tabela 4.2.6 Coordenadas após primeiro ajuste	33
Tabela 4.2.7 Coordenadas após segundo acerto	34
Tabela 4.2.8 Comparação entre os coeficientes de forma.....	35

LISTA DE SÍMBOLOS

- A_m : área da seção mestra (m^2).
- A_x : área máxima de seção (m^2).
- A_{wp} : área da linha d'água de projeto (m^2).
- B : boca (m).
- B/H : relação boca calado.
- C_b : coeficiente de bloco.
- C_m : coeficiente de seção mestra.
- C_p : coeficiente prismático longitudinal.
- C_{vp} : coeficiente prismático vertical.
- C_{wp} : coeficiente de linha d'água de projeto.
- H : calado (m).
- K_b : posição vertical do centro de carena (m).
- L : comprimento do casco na linha d'água de projeto (m).
- LCB : posição longitudinal do centro de carena medida a partir da proa (m).
- LCF : coordenada longitudinal do centro de flutuação da linha d'água de projeto (m).
- L/B : relação comprimento boca.
- L/H : relação comprimento calado.
- $L/V^{1/3}$: relação entre comprimento e a raiz cúbica do volume.
- V : volume do casco (m^3).
- V/L^3 : relação entre volume e o cubo do comprimento.

RESUMO

O trabalho trata da representação computacional gráfica de superfícies “B-spline” como subsídio à configuração de formas moldadas de cascos de embarcações. Permite-se alterar as superfícies por meio de araste de pontos de controle assim como exibir vistas em perspectiva, cortes (planos de linha), relações e coeficientes de forma, típicos da representação de cascos de deslocamento.

ABSTRACT

This study is about computational graphical representation of "B-spline" surfaces as support to design molded shapes of ship hulls. The system enables to modify the shapes by changing the position of control points. It also presents perspective views, plan views and form coefficients typically used in ship hull representation.

1. Introdução

O trabalho é interdisciplinar, envolvendo Tecnologias da Informação, Computação Gráfica e Engenharia Naval.

Tem-se como objetivo propor, implementar e avaliar representação computacional gráfica de superfícies “B-spline” como subsídio à configuração de formas moldadas de cascos de embarcações..

Aplica-se potencialmente ao projeto automatizado de cascos, em processos de otimização, os quais não estão no escopo do presente trabalho.

No capítulo dois, discute-se a representação matemática de superfícies “B-spline”. Apresentam-se também técnicas relativas a determinação de distribuição de curvaturas, de coeficientes de forma e de obtenção de planos de linha. Expõe-se brevemente um modelo de projeto otimizado de casco a partir de HARRIES & ABT [1999] que utiliza as representações aqui estudadas. Expõe-se também, de forma breve, a proposta de um modelo para desenvolvimento de projetos preliminares de embarcação a partir de ANDRADE [2001].

No capítulo três, discute-se o desenvolvimento do programa que permite a visualização das superfícies “B-spline”, a possibilidade de modificação destas superfícies pela mudança de posição de pontos de controle e o monitoramento de coeficientes e relações de forma, áreas seccionais, centros, etc.

No capítulo quatro têm-se aplicações do programa a uma forma prismática e a uma forma carenada (continuidade da função que descreve a superfície de classe 2).

No capítulo cinco tem-se as conclusões e por último a bibliografia e os sítios pesquisados na “*Internet*”.

2. Curvas e superfícies “B-spline”

2.1 Considerações gerais

No trabalho opta-se por representações “B-spline”, que podem ser úteis na concepção de cascos de embarcações (ver ABT et al [2001] e ROGERS [1977]).

Carl de Boor, professor da Universidade de Wisconsin e autor em 1972 da fórmula recursiva que define uma curva “B-spline”, considera I.J. Schoenberg¹ como sendo o criador das curvas “B-spline”. Esta consideração deve-se ao texto publicado em 1946 por Schoenberg no jornal “*Quarterly Applied Mathematic*”, com o título de “*Contribution to the problem of approximation of equidistant data by analytic functions*”, onde se tem, pela primeira vez a palavra “Basis-splines” sendo usada no sentido de aproximações polinomiais pedaço a pedaço conectadas de maneira “suave”.

Estas idéias surgiram nas indústrias de construção de navios e aviões, durante a Segunda Guerra Mundial. Em BARTELS [1987], Robin Forrest descreve a técnica usada pelas indústrias inglesas de fabricação de aviões na construção de moldes, que eram obtidos passando-se finas pranchas de madeira (viotes) através de pontos prendidos no assoalho de um grande galpão como uma técnica de carenamento. Estes prendedores foram chamados por Forrest de “patos”.

¹ I.J. Schoenberg nasceu em 21 de Abril de 1903 em Galatz na Romania, morreu em Madison estado de Wisconsin nos EUA em 21 de Fevereiro de 1990 tendo estudado matemática na Universidade de Jassy, em Berlim e também em Goettingen. Em 1930 foi para Universidade de Chicago e em 1933 transferiu-se para Princeton. Entre textos e livros teve 174 publicações. Quarenta destas publicações dedicadas as “B-splines”. Foi durante muito tempo, membro do centro de pesquisas matemáticas avançadas na Universidade de Wisconsin-Madison. Bibliografia segundo BOOR [2002].

O inconveniente deste processo era que, se um galpão destes fosse destruído pelo inimigo, todo o projeto seria perdido. Esta preocupação levou Forrest a pensar em modelar as curvas entre os “patos” por seções cônicas, e assim poder documentar matematicamente cada projeto, e refazê-lo caso fosse necessário. Estes modelos de carenamento cônico foram substituídos no início dos anos 60 pelo que se passou a chamar de “*spline*” por J.C. Ferguson, engenheiro da Boeing.

De acordo com SABO [1998], as “idéias geométricas” que estão por trás das curvas de Bézier (Anexo I), foram desenvolvidas por Paul de Casteljaou a partir de 1959, enquanto trabalhava na Citroen e, concomitantemente, por Pierre Bézier² trabalhando na Renault. Ambos pesquisavam métodos mais eficientes para a modelagem de carroçarias de automóveis. Entretanto, deve-se também creditar a importante participação de Birkhoff e Carl de Boor (na época Engenheiro da General Motors), que apresentaram em 1964 em um simpósio organizado pela GM o trabalho “*Piecewise polynomial interpolation and approximation*”.

De acordo com DAVIS [1996] (professor do Instituto Politécnico Worcester), quando perguntaram a Ray Sarraga do Centro de pesquisas da General Motors, qual o impacto das “*B-splines*” nos projetos geométricos

² Pierre Etienne Bézier nasceu em 1 de Setembro de 1910 em Paris e morreu em 1999. Graduou-se em engenharia mecânica pela *Ecole des Arts et Metiers* em 1930. Em 1933, Bézier entrou para a fábrica de Automóveis Renault, onde trabalhou por 42 anos. Bezier começou suas pesquisas em CAD/CAM em 1960 quando devotou seu tempo trabalhando no seu sistema UNISURF. A partir 1960, suas pesquisas focaram em desenhar máquinas, curvas *free-form* interativas e desenhos de superfície. A carreira acadêmica de Bezier começou em 1968 quando tornou-se professor de engenharia de produção no *Conservatoire National des Arts et Metiers*, onde lecionou até 1979. Ele escreveu quatro livros, inúmeros *papers* e recebeu vários títulos como "Doctor Honoris Causa" inclusive da Universidade de Berlim. Biografia publicada no volume 22 (novembro 1990 em uma edição especial voltada para as técnicas desenvolvidas por Bézier) da revista *Computer Aided Design*.

dos automóveis, ele respondeu: “Isto é a mesma coisa que perguntar qual o impacto do uso do motor a gasolina nos automóveis”. Tom Grandine da companhia de aviação Boeing acrescentou: “Nenhum avião deixa a Boeing sem levar alguns bilhões de “*B-splines*” em seu desenvolvimento. As “*splines*” demonstram que algumas coisas boas acontecem quando se usa corretamente a matemática”. Ainda citando FARIN [1990], lembra: “A decisão de usar computadores para desenvolvimento de projetos força ao projetista descrever todos os desenhos em termos matemáticos”.

2.2 Representação matemática de curvas e superfícies “B-spline”

Define-se uma curva “B-spline” da seguinte maneira:

Dados:

$n + 1$ pontos de controle $P_0, P_1, P_2, \dots, P_n$ em \mathbb{R}^3 , com $n \in \mathbb{N}$;

$m \in \mathbb{N}^*$, ordem que se deseja para a curva “B-spline” (valor que define o grau dos polinômios que irão compor a curva);

o vetor nó $U = \{u_0, u_1, u_2, u_3, \dots, u_s\} \subset \mathbb{N}$ com $s = m + n$ com a condição de que para todo $u_k \in U$ com $k \in \{x \in \mathbb{N} / 0 \leq x < s\}$ tenha-se $u_k \leq u_{k+1}$ e as diferenças $u_{k+m} - u_{k+m-1}$ com $k \in \{x \in \mathbb{N} / 0 \leq x \leq s - 2m + 1\}$ tenham sempre o mesmo valor;

$t \in \mathbb{R}$ com $u_0 \leq t < u_s$;

Define-se a curva “B-spline” através da relação, $BS(t) = \sum_{i=0}^n N_{i,m}(t) \cdot P_i$

onde os polinômios $N_{i,m}(t)$ de grau $m - 1$ (quando $m = 1$ tem-se para os $N_{i,m}(t)$, polinômios do grau zero e neste caso apenas os pontos de controle pertencem a curva), são escritos através da seguinte fórmula recursiva:

$$N_{i,1}(t) = \begin{cases} 1 & \text{se } u_i \leq t < u_{i+1} \\ 0 & \text{se } t < u_i \text{ ou } t \geq u_{i+1} \end{cases} \text{ e}$$

$$N_{i,m}(t) = \frac{(t - u_i) \cdot N_{i,m-1}(t)}{u_{i+m-1} - u_i} + \frac{(u_{i+m} - t) \cdot N_{i+1,m-1}(t)}{u_{i+m} - u_{i+1}}.$$

Nesta fórmula recursiva, define-se $\frac{0}{0}$ como sendo igual a 0.

Na figura 2.2.1 ilustra-se uma curva “*B-spline*” dada por quatro segmentos, definidos por polinômios de terceiro grau, obtida a partir dos pontos $P_0, P_1, P_2, \dots, P_6$.

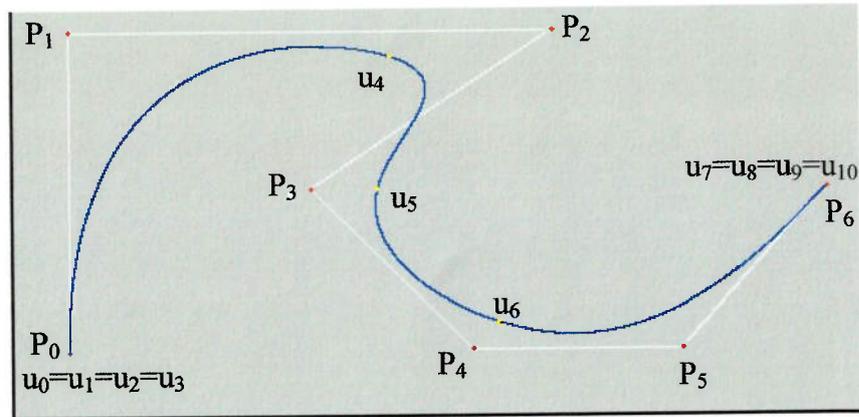


Figura 2.2.1 Curva “*B-spline*”

Ordem $m = 4$, vetor nó $U = \{0, 0, 0, 0, 1, 2, 3, 4, 4, 4, 4\}$ e
 $P_0 = (0,8; 0,8)$, $P_1 = (0,8; 5,1)$, $P_2 = (7,1; 5,1)$, $P_3 = (3,9; 3)$, $P_4 = (6; 0,8)$
 $P_5 = (8,8; 0,8)$, $P_6 = (10,7; 3)$.

Uma curva “*B-spline*” no plano, definida por $n+1$ pontos de controle $P_0, P_1, P_2, \dots, P_n$ e de ordem m , tem os segmentos obtidos para $u_i \leq t < u_{i+m}$ totalmente contidos nas regiões convexas, definidas pelos segmentos de retas mais externos tomando-se os pontos $P_i, P_{i+1}, \dots, P_{i+m-2}, P_{i+m-1}$ dois a dois. Esta propriedade permite que se tenha trechos de retas em uma curva “*B-spline*” bastando para isto, que se tenha no trecho em que se deseja um segmento de reta para a curva, m pontos consecutivos alinhados.

Na figura 2.2.2 ilustra-se uma curva “*B-spline*” com o trecho em vermelho sendo um segmento de reta.

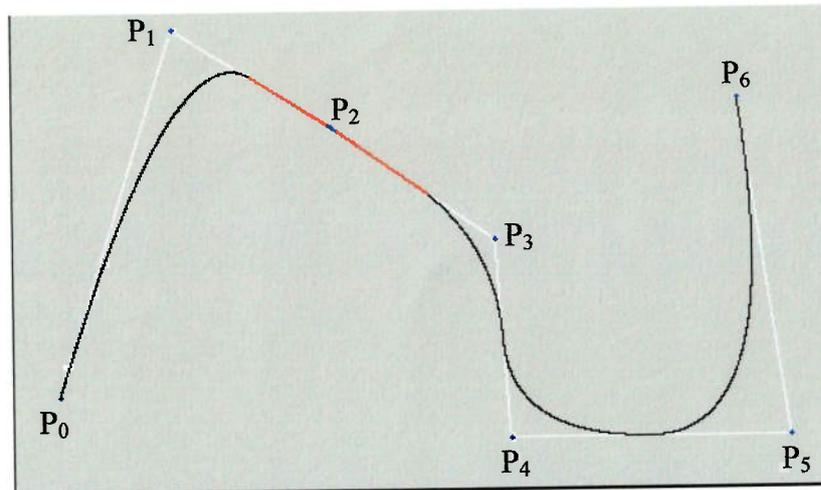


Figura 2.2.2 Segmento de reta em uma “*B-spline*”

$P_0 = (0,6;1,2)$, $P_1 = (2,2;6,2)$, $P_2 = (4,2;4,8)$, $P_3 = (6,4;3,3)$, $P_4 = (6,5;0,7)$
 $P_5 = (10,2;0,7)$, $P_6 = (9,5;5,2)$ com ordem $m=3$ e vetor nó
 $U = \{0,0,0,1,2,3,4,5,5,5\}$.

Dada a curva “*B-spline*”

$$BS(t) = \sum_{i=0}^n N_{i,m}(t) \cdot P_i$$

mutando-se de posição apenas o ponto de controle P_k para P'_k , tem-se

uma nova curva $BS'(t)$

$$BS'(t) = \sum_{i=0}^{k-1} N_{i,m}(t) \cdot P_i + N_{k,m}(t) \cdot P'_k + \sum_{i=k+1}^n N_{i,m}(t) \cdot P_i$$

como $P'_k = P_k + V$ tem-se:

$$BS'(t) = \sum_{i=0}^{k-1} N_{i,m}(t) \cdot P_i + N_{k,m}(t) \cdot P_k + N_{k,m}(t) \cdot V + \sum_{i=k+1}^n N_{i,m}(t) \cdot P_i$$

ou ainda, que: $BS(t) = BS'(t) + N_{k,m}(t) \cdot V$

tem-se portanto que $BS(t) \neq BS'(t)$ somente quando $N_{k,m}(t) \neq 0$ ou seja, nos trechos obtidos quando $u_k \leq t < u_{k+m}$. Esta propriedade da curva “*B-spline*” permite mudanças em trechos limitados da curva.

Ilustra-se na figura 2.2.3 uma mudança no ponto de controle P_1 da “*B-spline*”. Esta mudança, de acordo com o que se comentou acima, tem reflexos apenas nos trechos obtidos por $u_1 \leq t < u_4$.

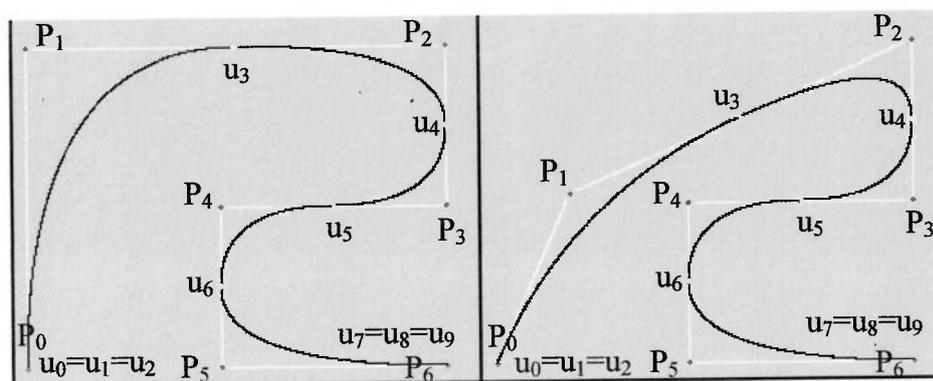


Figura 2.2.3 Curva “*B-spline*” com mudança de um ponto de controle

$P_0 = (0,2; 0,2)$, gráfico a esquerda $P_1 = (0,2; 4,2)$, a direita $P_1 = (1,2; 2,5)$,

$P_2 = (5,7; 4,2)$, $P_3 = (4,2; 2,3)$, $P_4 = (2,7; 2,3)$, $P_5 = (2,7; 0,2)$, $P_6 = (4,2; 0,2)$,
com ordem $m = 3$ e vetor nó $U = \{0, 0, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 5, 5\}$.

Define-se superfície “*B-Spline*” da seguinte maneira:

Dados:

$(m + 1) \cdot (n + 1)$ pontos de controle representados na matriz

$$\begin{pmatrix} P_{00} & P_{01} & \dots & P_{0n} \\ P_{10} & P_{11} & \dots & P_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{m0} & P_{m1} & \dots & P_{mn} \end{pmatrix} \text{ com suas coordenadas em } \mathfrak{R}^3, \text{ com } m \in \mathbb{N} \text{ e } n \in \mathbb{N};$$

$k, l \in \mathbb{N}^*$, ordem que se deseja para as curvas “*B-spline*” definidas

pelos pontos respectivamente das $(m + 1)$ linhas e $(n + 1)$ colunas;

O vetor nó $X = \{x_0, x_1, x_2, x_3, \dots, x_s\} \subset \mathbb{N}$ com $s = m + k$ com a condição de que para todo $x_i \in X$ com $i \in \{a \in \mathbb{N} / 0 \leq a < s\}$ tenha-se $x_i \leq x_{i+1}$ e as diferenças $x_{i+m} - x_{i+m-1}$ com $i \in \{a \in \mathbb{N} / 0 \leq a \leq s - 2m + 1\}$ tenham sempre o mesmo valor;

O vetor nó $Y = \{y_0, y_1, y_2, y_3, \dots, y_r\} \subset \mathbb{N}$ com $r = n + l$ com a condição de que para todo $y_i \in Y$ com $i \in \{a \in \mathbb{N} / 0 \leq a < r\}$ tenha-se $y_i \leq y_{i+1}$ e as diferenças $y_{i+n} - y_{i+n-1}$ com $i \in \{a \in \mathbb{N} / 0 \leq a \leq r - 2n + 1\}$ tenham sempre o mesmo valor;

$t, u \in \mathfrak{R}$ com $x_0 \leq t < x_s$ e $y_0 \leq u < y_r$;

Define-se superfície “*B-spline*” através da relação

$$SBS(t, u) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n M_{i,k}(t) N_{j,l}(u) \cdot P_{ij} \quad \text{onde os polinômios}$$

$M_{i,k}(t)$ e $N_{j,l}(u)$ de grau $m-1$ e $n-1$ respectivamente, são escritos através das seguintes fórmulas, recursivas:

Para os $M_{i,k}(t)$ tem-se:

$$M_{i,1}(t) = \left\{ \begin{array}{l} 1 \quad \text{se } x_i \leq t < x_{i+1} \\ 0 \quad \text{se } t < x_i \quad \text{ou } t \geq x_{i+1} \end{array} \right\} \text{ e}$$

$$M_{i,k}(t) = \frac{(t - x_i) \cdot M_{i,k-1}(t)}{x_{i+k-1} - x_i} + \frac{(x_{i+k} - t) \cdot M_{i+1,k-1}(t)}{x_{i+k} - x_{i+1}}$$

e para os $N_{j,l}(u)$ tem-se:

$$N_{j,1}(u) = \left\{ \begin{array}{l} 1 \quad \text{se } y_j \leq u < y_{j+1} \\ 0 \quad \text{se } u < y_j \quad \text{ou } u \geq y_{j+1} \end{array} \right\} \text{ e}$$

$$N_{j,l}(u) = \frac{(u - y_j) \cdot N_{j,l-1}(u)}{y_{j+l-1} - y_j} + \frac{(y_{j+l} - u) \cdot N_{j+1,l-1}(u)}{y_{j+l} - y_{j+1}}.$$

Nestas fórmulas recursivas, define-se $\frac{0}{0}$ como sendo igual a 0.

Na figura 2.2.4 ilustra-se uma superfície “*B-spline*” dada por 12 pontos de controle com ordem $k = 3$ e $l = 3$, vetor no $X = \{0,0,0,1,2,2,2\}$, vetor nó $Y = \{0,0,0,1,1,1\}$.

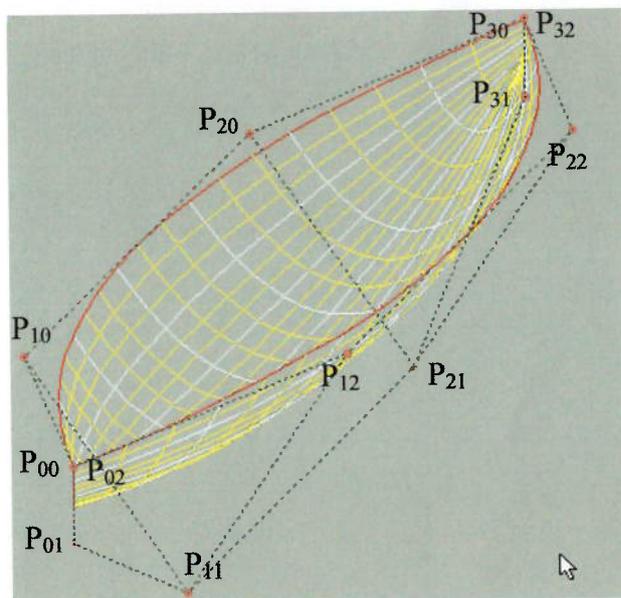


Figura 2.2.4 Superfície “*B-spline*” dada pelos pontos: $P_{00}=(0;15;40)$, $P_{01}=(0;10;40)$, $P_{02}=(0;15;40)$, $P_{10}=(-10;15;30)$, $P_{11}=(0;0;30)$, $P_{12}=(10;15;30)$, $P_{20}=(-10;15;10)$, $P_{21}=(0;0;10)$, $P_{22}=(10;15;10)$, $P_{30}=(0;15;0)$, $P_{31}=(0;10;0)$, $P_{32}=(0;15;0)$.

2.3 Técnica de determinação da distribuição de curvaturas

Segundo BEIER [1987], a distribuição de curvaturas ao longo de uma curva no plano ou no espaço pode dar indicações de qualidade no traçado desta curva.

Pode-se exibir, em pontos da curva, segmentos de reta indicando a curvatura. Em BEIER [1987] tem-se algoritmos que permitem obter estes segmentos e são utilizados nos gráficos das figuras 2.3.1 e 2.3.2.

No gráfico 1 da figura 2.3.1 (gráfico da esquerda), tem-se uma distribuição de curvatura sem descontinuidade, coisa que não acontece no gráfico 3 da figura 2.3.2 (gráfico da esquerda). No gráfico 2 da figura 2.3.1 (gráfico da direita), tem-se uma descontinuidade no ponto onde a curva se liga com um segmento de reta. No gráfico 4 da figura 2.3.2 (gráfico da direita), localizam-se os dois pontos de inflexão da curva

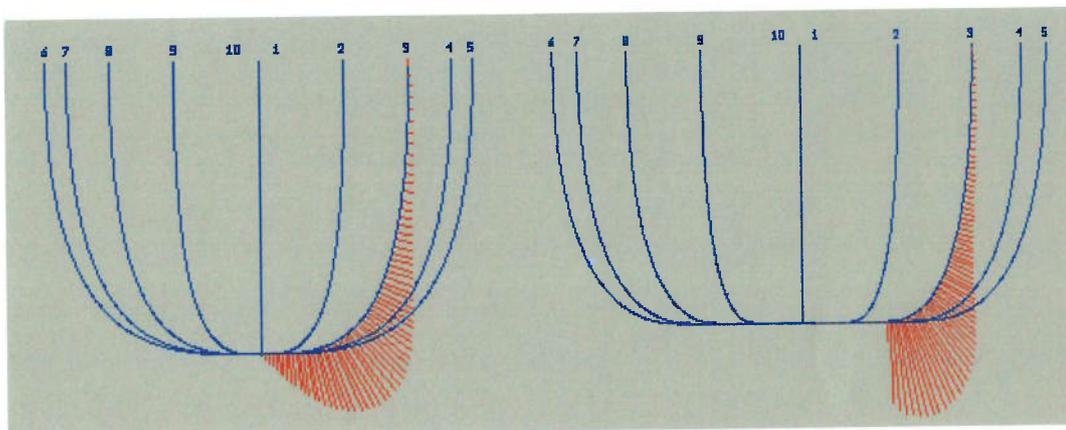


Figura 2.3.1 Gráfico de distribuição de curvatura (1 e 2).

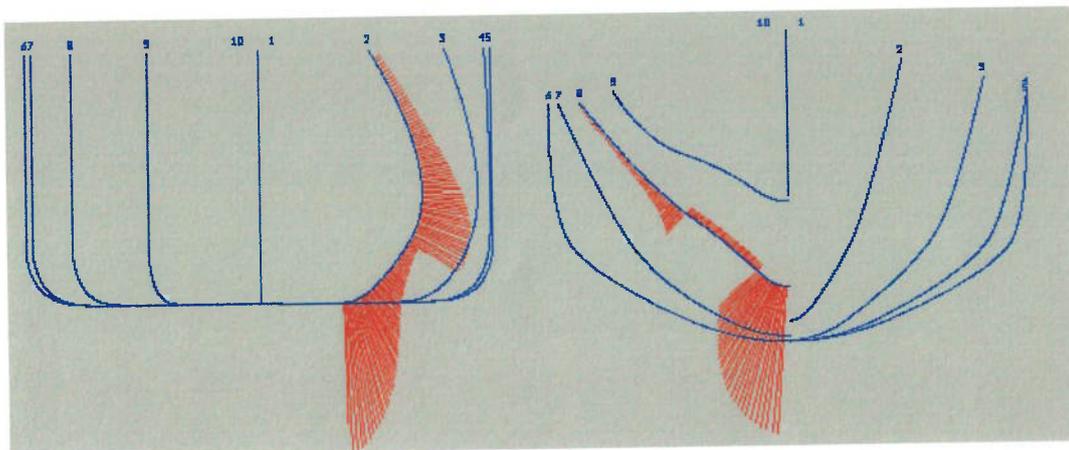


Figura 2.3.2 Gráfico de distribuição de curvatura (3 e 4).

2.4 Estima de Coeficientes de forma de distribuição de áreas seccionais e de centros de áreas

Com a representação matemática da superfície “B-spline” tem-se a possibilidade, também, do cálculo aproximado dos coeficientes de forma da superfície que se está representando. A finalidade é para que o projetista possa acompanhar o que acontece com estes coeficientes, distribuição de áreas seccionais e centros de áreas enquanto alterações nos pontos de controle, são feitas. As fórmulas utilizadas para estes cálculos estão descritas no Anexo IV.

2.5 Obtenção de Planos de linhas

Tem-se ainda a possibilidade de obtenção do plano de linhas da superfície: linhas d'água; plano de balizas; planos de alto. Na figura 2.5.1 ilustra-se um casco com seus planos de linhas seccionado em 12 seções.

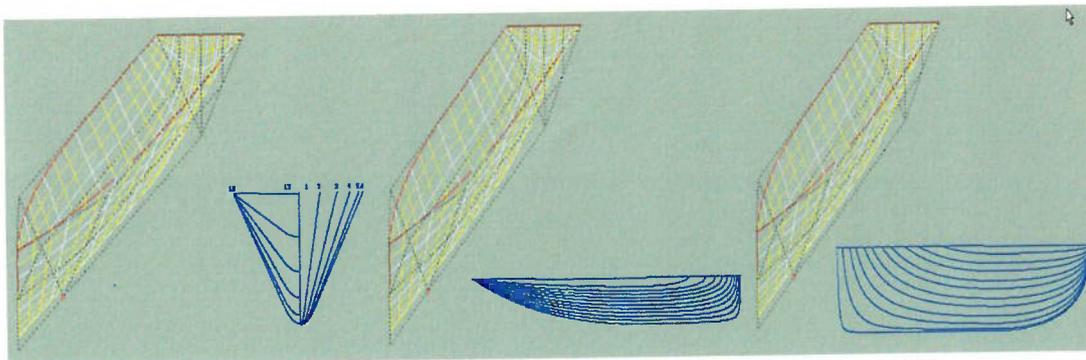


Figura 2.5.1 Planos de linhas (Balizas, Linhas d'água e perfil)

Superfície dada pelos pontos $(0;10;30)$, $(0;5;30)$, $(0;0;30)$, $(0;5;30)$, $(0;10;30)$, $(-5;10;22,5)$, $(-2,5;5;22,5)$, $(0;0;22,5)$, $(2,5;5;22,5)$, $(5;10;22,5)$, $(-5;10;0)$, $(-2,5;5;0)$, $(0;0;0)$, $(2,5;5;0)$, $(5;10;0)$, $(-5;10;0)$, $(-2,5;10;0)$, $(0;10;0)$, $(2,5;10;0)$, $(5;10;0)$

2.6 Outras técnicas

Na maneira tradicional de projetos de cascos, desenha-se, modela-se e testa-se em tanques de prova até que se tenha o casco desejado.

Em ABT et al [2001] é apresentada uma abordagem de modelo paramétrico para projeto de cascos de embarcações com a qual se pode criar, segundo os autores, cascos rapidamente e eficientemente usando-se programas de análise hidrodinâmica e de modelagem de cascos.

O método se baseia principalmente nos parâmetros de forma para obtenção das balizas. É introduzida uma definição de linguagem paramétrica, orientada a projetos com descritores de alto nível para características de cascos que são bem conhecidas na Arquitetura Naval. Está presente um modelo de sistema que produz uma descrição matemática completa do casco, via otimizações geométricas, habilitando a possibilidade de variações efetivas no casco mantendo constante alguns parâmetros selecionados, enquanto ajusta automaticamente outros.

As superfícies são produzidas ainda segundo os autores, com excelente carenagem. A técnica de modelagem apresentada no documento é baseada em uma abordagem de geração de curvas paramétricas desenvolvida por HARRIES & ABT [1999] e tem sido utilizada pelo autor, com sucesso, para a geração e otimização automática de “cascos lisos (sem saliências)”.

O método utiliza um processo de geração de curvas paramétricas aonde os vértices de todas as curvas “*B-spline*” são calculados para uma otimização geométrica, empregando critérios de carenamento como medida

de mérito e capturando características globais da embarcação como restrições. Neste processo o carenamento é automático.

Com programas de hidrodinâmica, testam-se as modificações. As ferramentas integradas com o programa de modelagem, permitem repetir sistematicamente o processo de modelar e testar. A técnica utilizada de verificação das medidas de mérito é a do Gradiente conjugado, descrita em PRESS at all [1998].

Tem uma síntese do modelo no extrutograma da figura 2.6.1.

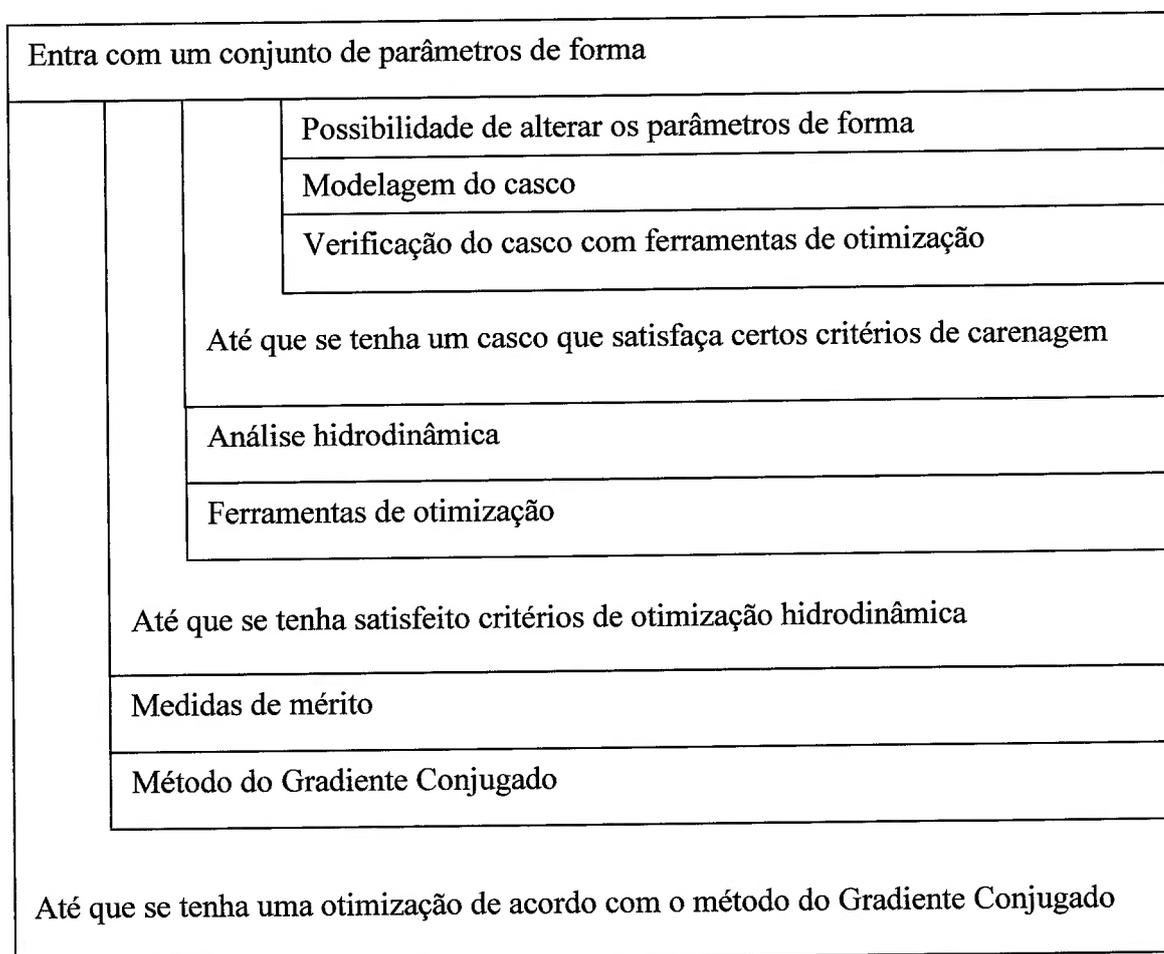


Figura 2.6.1 Síntese do modelo descrito em PRESS at all [1998]

Em ANDRADE [2001] tem-se a proposta de um modelo para projetos preliminares de embarcação, formulados como um problema de otimização por múltiplos critérios, onde a definição da forma do casco é incorporada, de modo hierárquico, como objetivo deste processo de otimização.

Tem-se no extruturograma da figura 2.6.2 uma síntese do modelo proposto.

Valores iniciais para dimensões principais e coeficientes de forma	
	Modelo de otimização proposto por Lyon e Mistree com base na técnica da programação por objetivos
	Acertos nas dimensões principais e coeficientes de forma
Até que se tenha uma solução ótima de acordo com o modelo de otimização	
	Definição da linha d'água de Projeto
	Otimização por múltiplos critérios empregando-se técnicas de programação por objetivos
Até que se tenha esta otimização	
	Distribuição das áreas das linhas d'água ao longo do calado
	Otimização por múltiplos critérios empregando-se técnicas de programação por objetivos
Até que se tenha esta otimização	
	Seção mestra
	Otimização por múltiplos critérios empregando-se técnicas de programação por objetivos
Até que se tenha esta otimização	
	Perfil longitudinal da embarcação
	Otimização por múltiplos critérios empregando-se técnicas de programação por objetivos
Até que se tenha esta otimização	
	Plano de linhas d'água
	Otimização por múltiplos critérios empregando-se técnicas de programação por objetivos
Até que se tenha esta otimização	
Até que se tenha um casco otimizado	

Figura 2.6.2 Síntese do modelo proposto em ANDRADE [2001]

3. Desenvolvimento do programa de computador

3.1 Considerações gerais

A intenção de ter-se desenvolvido um programa no contexto desta dissertação foi concretizar a implementação de uma ferramenta para visualização e interação com superfícies “B-spline”.

O programa é estruturado em três blocos a saber:

- Bloco de acertos do ambiente e entrada de dados.
- Bloco de manipulação da superfície através de pontos de controle com uso do “*mouse*”, e visualização da mesma em 3D (técnica descrita no ANEXO III).
- Bloco de visualização da superfície.

Na figura 3.3.1 tem-se no extrutograma uma síntese do programa.

INÍCIO DO PROGRAMA	
Acertos no ambiente do programa com possibilidades de mudanças nas cores dos textos, nas cores das barras de interação com o usuário, na quantidade de pontos de controle e na escala de exibição da superfície	
Entrada dos dados via teclado, via arquivo anteriormente salvo pelo próprio programa, via arquivo externo gerado por outros programas ou uso de arquivo já existente no próprio programa	
	Acertos na superfície via “ <i>mouse</i> ” ou teclado com a possibilidade de exibir valores dos coeficientes de forma, curva de áreas seccionadas e plano de baliza.
Até que não se queira mais fazer acertos	
	Visualização da superfície com possibilidades de rotação, translação, ampliação ou redução (Anexo II) Mudar o valor do grau das curvas que compõe a superfície Salvar a superfície em arquivo para uso posterior Imprimir a superfície em papel Alterar o grau dos polinômios que compõem a superfície Visualizar plano de linhas com técnica de distribuição de curvatura
Até que não se queira fazer mais nenhum dos itens acima	
Até que não se queira mais executar o programa	
FIM	

Figura 3.1.1 Extruturograma do programa desenvolvido.

3.2 Visualização da superfície

No programa, obtêm-se apenas alguns pontos da superfície, espaçados uniformemente. Ligam-se estes pontos através de quadriláteros que são preenchidos com uma cor cinza. Toma-se o ponto médio de cada um dos quadriláteros e obtém-se a distância destes pontos até uma posição predefinida de um observador em relação aos três eixos de coordenadas. Após todas estas distâncias serem calculadas elas são classificadas em ordem decrescente, tomando-se o cuidado de se levar junto com as coordenadas dos poliedros as cores de contorno de cada um dos lados dos quadriláteros. Em seguida é só exibir os quadriláteros, com suas respectivas cores de contorno, começando pelos que estão mais distantes até os mais próximos. Assim tem-se a superfície com as linhas escondidas sobrepostas pelas linhas que o observador vê por estarem mais próximas. Os pontos são projetados conforme expressões matemáticas descritas no Anexo III. Na figura 3.2.1 tem-se uma superfície obtida desta forma.

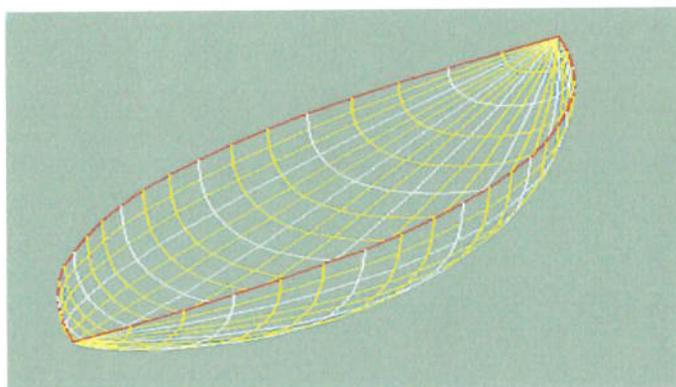


Figura 3.2.1 Visualização de uma superfície “B-spline”

Dada pelos pontos $(0;10;40)$, $(0;10;40)$, $(0;10;40)$, $(0;10;40)$, $(-10;10;30)$, $(-10;0;30)$, $(10;0;30)$, $(10;10;30)$, $(-10;10;10)$, $(-10;0;10)$, $(10;0;10)$, $(10;10;10)$, $(0;10;0)$, $(0;10;0)$, $(0;10;0)$, $(0;10;0)$, $(0;10;0)$, $(0;10;0)$

3.3 Modificações na superfície

Tem-se no programa a possibilidade de se mudar, com auxílio de um “mouse”, a posição de qualquer dos pontos de controle. Para melhor visualização, o programa exibe os pontos que podem ser escolhidos pelo usuário e seu “mouse” em uma cor diferente dos outros. Assim, se o usuário deseja mudar de posição um ponto qualquer, basta vincular o “mouse” ao ponto. Após se chegar na posição desejada, libera-se o “mouse” do ponto.

Tem-se por definição, no programa, que os pontos de controle são sempre simétricos em relação ao plano zy e as mudanças de rotação, aumento e diminuição e translação somente são consideradas para efeitos visuais pois a matriz dos pontos não sofre alterações com estas mudanças. Assim estes pontos iniciais somente sofrem deformações que são transmitidas a seus simétricos através de somas ou diferenças nas suas coordenadas. Na superfície da figura 3.3.1 tem-se uma mudança nas coordenadas $(-5;10;22,5)$ e $(5;10;22,5)$ para $(-10;10;22,5)$ e $(10;10;22,5)$.

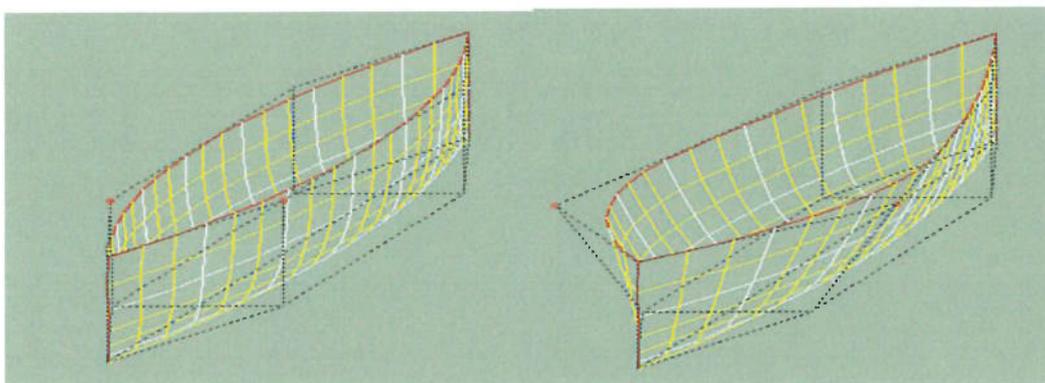


Figura 3.3.1 Mudanças nas coordenadas de pontos de controle.

Superfície dada pelos pontos $(0;10;30)$, $(0;0;30)$, $(0;0;30)$, $(0;0;30)$, $(0;10;30)$, $(-5;10;22,5)$, $(-5;0;22,5)$, $(0;0;22,5)$, $(5;0;22,5)$, $(5;10;22,5)$, $(-5;10;7,5)$, $(-5;0;7,5)$, $(0;0;7,5)$, $(5;0;7,5)$, $(5;10;7,5)$, $(0;10;0)$, $(0;0;0)$, $(0;0;0)$, $(0;0;0)$, $(0;0;0)$, $(0;10;0)$

3.4 Monitoramento de parâmetros representativos da superfície (coeficientes e relações de forma, áreas seccionais, centros, etc.)

No programa para o cálculo deste coeficiente, primeiramente obtém-se a altura da linha d'água de projeto (DWL). Em seguida obtém-se os comprimentos: (L) do casco; (B) da boca; (H) do calado. Seciona-se o casco em 60 balizas e por somas de trapézios obtém-se a área de cada uma das balizas. Novamente por soma de trapézios, integra-se de todas estas áreas e tem-se o volume do casco submerso.

Para o cálculo dos demais coeficientes obtém-se as áreas da seção máxima (A_x), dos planos de linha d'água, etc.. também por somas de trapézios.

Para cada alteração nos pontos do poliedro de controle, o programa exhibe o valor dos coeficientes e relações de forma assim como os centros e curva de áreas seccionadas. Mostra também as variações em porcentagem em relação a última alteração feita.

Na figura 3.4.1 tem-se um casco com os respectivos coeficientes de forma, distribuição de áreas seccionais e centros de áreas.

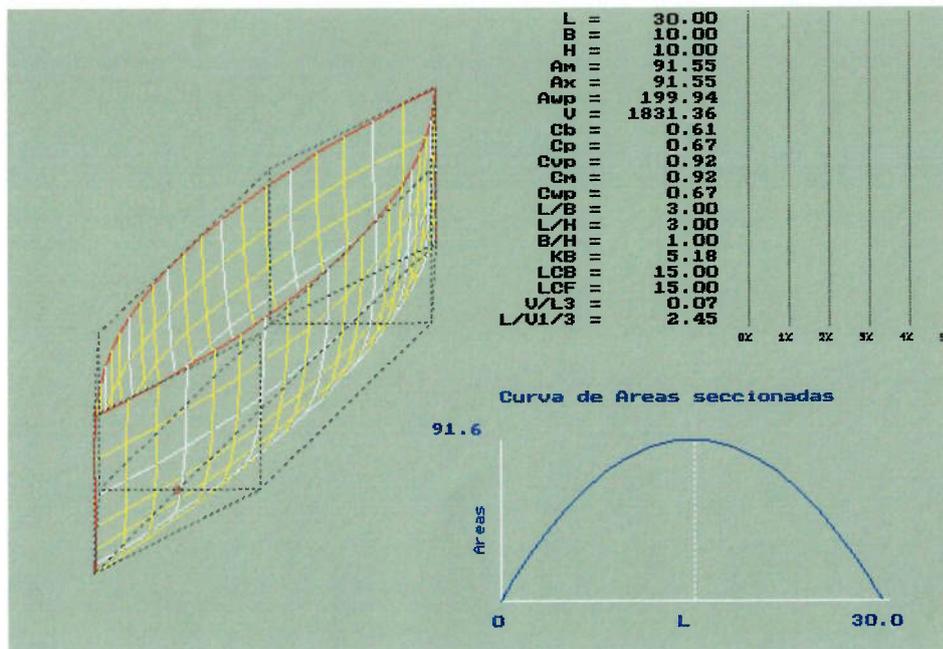


Figura 3.4.1 Superfície com os coeficientes de forma, centros e áreas

Dada pelos pontos $(0;10;30)$, $(0;0;30)$, $(0;0;30)$, $(0;0;30)$, $(0;10;30)$, $(-5;10;22,5)$, $(-5;0;22,5)$, $(0;0;22,5)$, $(5;0;22,5)$, $(5;10;22,5)$, $(-5;10;7,5)$, $(-5;0;7,5)$, $(0;0;7,5)$, $(5;0;7,5)$, $(5;10;7,5)$, $(0;10;0)$, $(0;0;0)$, $(0;0;0)$, $(0;0;0)$, $(0;10;0)$

Mudando-se as coordenadas dos pontos $(-5;0;22,5)$ e $(5;0;22,5)$ para $(-5;1;22,5)$ e $(5;1;22,5)$ tem-se um novo casco com os valores dos coeficientes de forma na figura 3.4.2.

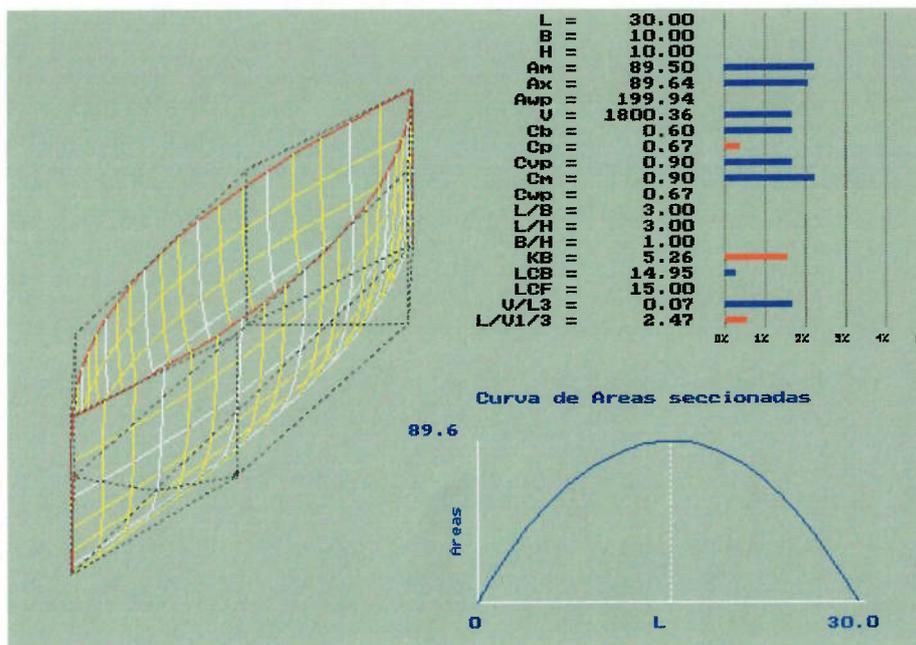


Figura 3.4.2 Superfície após mudança de coordenadas

Dada pelos pontos (0;10;30) , (0;0;30) , (0;0;30) , (0;0;30) , (0;10;30) , (-5;10;22,5) , (-5;1;22,5) , (0;0;22,5) , (5;1;22,5) , (5;10;22,5) , (-5;10;7,5) , (-5;0;7,5) , (0;0;7,5) , (5;0;7,5) , (5;10;7,5) , (0;10;0) , (0;0;0) , (0;0;0) , (0;0;0) , (0;10;0)

Tem-se com esta alteração que alguns coeficientes tiveram mudanças para valores menores (assinalados em azul) e outros para valores maiores (assinalados em vermelho). Estas mudanças não foram maiores que três por cento em relação aos valores iniciais conforme se observa na escala com os traços verticais que vai de 0% a 5%. As maiores mudanças foram na área da seção mestra (Am) e do coeficiente da seção mestra (Cm). Tem-se na figura que alguns coeficientes se mantiveram inalterados como Awp (área de linha d'água de projeto) , o LCF (centro longitudinal de flutuação) e Cwp (Coeficiente de linha d'água de projeto).

4. Exemplos de aplicação

4.1 Aplicação a uma superfície de forma prismática

A forma escolhida é a da figura 4.1.1, obtida por uma superfície “B-spline” com ordens $k=2$ e $l=2$ (método descrito no capítulo 2.2). A escolha desta superfície deve-se à facilidade de obtenção de suas dimensões e de seus coeficientes de forma (expressões para o cálculo, definidas no Anexo IV) pois a superfície é formada totalmente por placas planas. Esta superfície é descrita no programa através dos valores das coordenadas dos seus pontos de controle.

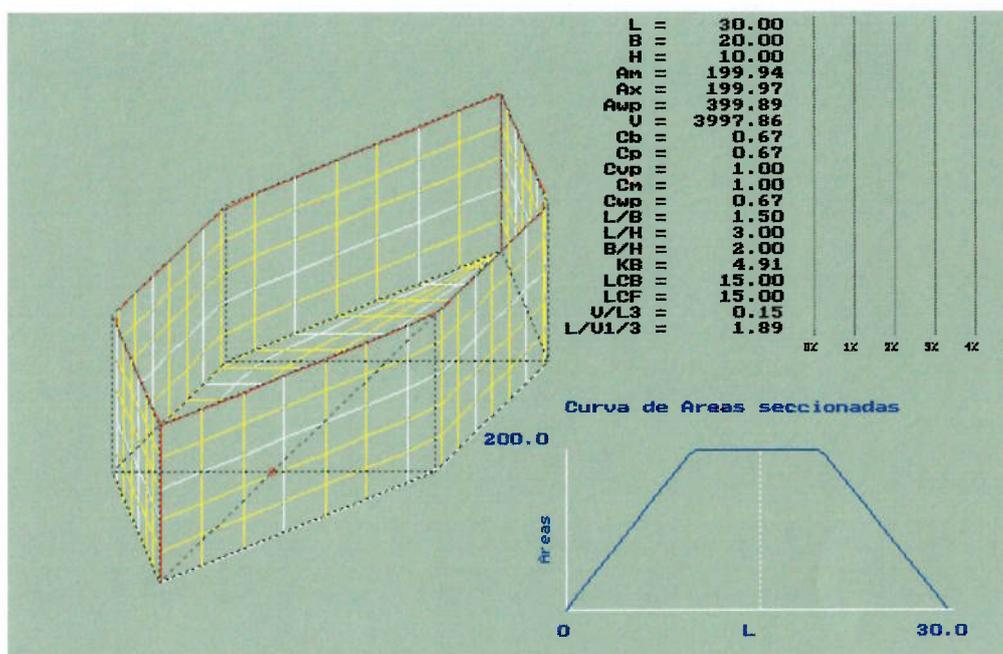


Figura 4.1.1 Superfície com os coeficientes de forma obtida pelos pontos de controle: $(0;10;30)$, $(0;0;30)$, $(0;0;30)$, $(0;0;30)$, $(0;10;30)$, $(-10;10;20)$, $(-10;0;20)$, $(0;0;20)$, $(10;0;20)$, $(10;10;20)$, $(-10;10;10)$, $(-10;0;10)$, $(0;0;10)$, $(10;0;10)$, $(10;10;10)$, $(0;10;0)$, $(0;0;0)$, $(0;0;0)$, $(0;0;0)$, $(0;0;0)$, $(0;10;0)$

Tem-se uma comparação entre os valores obtidos pelas expressões matemáticas e os valores obtidos pelo programa, na tabela 4.1.1. Na tabela 4.1.1 as unidades de medida são; m (metros), m^2 (metro quadrado) e m^3 (metro cúbico).

Tabela 4.1.1 Comparação com valores obtidos pelo programa

	Valores obtidos pelo programa	Valores de referência	% de desvio em relação ao valor de referência
L	30,00	30	0,00%
B	20,00	20	0,00%
H	10,00	10	0,00%
A_m	199,94	200	0,03%
A_x	199,97	200	0,02%
A_w	399,89	400	0,03%
V	3997,86	4000	0,05%
C_b	0,67	2/3	-0,50%
C_p	0,67	2/3	-0,50%
C_{vp}	1,00	1	0,00%
C_m	1,00	1	0,00%
C_{wp}	0,67	2/3	-0,50%
L/B	1,50	3/2	0,00%
L/H	3,00	3	0,00%
B/H	2,00	2	0,00%
KB	4,91	5	1,80%
LCB	15,00	15	0,00%
LCF	15,00	15	0,00%
V/L^3	0,15	$4000/30^3$	-1,28%
$L/\sqrt[3]{V}$	1,89	$30/\sqrt[3]{4000}$	-0,01%

Com os valores obtidos na tabela 4.1.1 tem-se um desvio médio de -0,04 % e um desvio padrão de 0,54 %, com relação aos valores de referência.

4.2 Aplicação a uma forma carenada

A segunda forma escolhida é um casco dado pela tabela de cotas 4.2.1, obtida a partir de USNA [2002].

Meia-boca a partir da Linha de Centro (medidas em pés)

Balizas	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Amurada	3,85	8,14	10,19	11,15	11,40	11,40	11,26	11,07	10,84	10,53	10,09
Linhas d'água (valores em pés)											
18	3,72										
16	3,20	7,92	10,13	11,15							
14	2,41	7,36	9,93	11,10	11,39	11,40	11,26	11,07	10,84	10,53	10,09
12	1,58	6,26	9,20	10,70	11,19	11,32	11,21	11,02	10,76	10,45	10,02
10	0,97	5,19	8,39	10,21	10,93	11,17	11,05	10,84	10,59	10,27	9,84
8	0,46	4,07	7,43	9,63	10,64	10,98	10,87	10,66	10,41	10,07	9,64
6	0,00	2,94	6,25	8,81	10,15	10,65	10,56	10,32	9,97	9,56	9,04
4		1,80	4,60	7,23	8,88	9,65	9,67	9,25	8,50	7,27	3,08
2		0,72	2,44	4,44	5,85	6,39	5,46	0,80			

Alturas a partir da linha de Base (medidas em pés)

Balizas	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Amurada	18,50	17,62	16,85	16,19	15,65	15,24	14,97	14,79	14,71	14,71	14,70
Linhas de alto (valores em pés)											
10			14,20	9,24	5,63	4,48	4,49	5,11	6,08	7,52	11,74
8		16,59	9,14	4,82	3,24	2,71	2,77	3,16	3,71	4,36	4,97
6		11,51	5,65	3,00	2,07	1,88	2,10	2,55	3,10	3,69	4,30
4		7,87	3,40	1,76	1,32	1,41	1,78	2,30	2,86	3,45	4,08
2	13,09	4,36	1,63	0,82	0,73	1,02	1,53	2,10	2,68	3,27	3,97
Quilha	6,00	0,66	0,10	0,09	0,28	0,71	1,34	1,95	2,54	3,14	3,70

Tabela 4.2.1 Cotas do casco considerado

Os pontos de controle da superfície “*B-spline*” que correspondem a esta forma, foram obtidos com o uso das técnicas de ajuste de superfícies descritas em ROGERS & ADAMS [1990], a partir de programa desenvolvido por LAZANHA [não publicado]. Para ser possível usar-se estas técnicas foram acrescentados alguns pontos na tabela 4.2.1 (obtidos a partir do plano de balizas encontrado na própria referência), para ter-se 23 pontos desde a quilha até a linha d'água a 14 pés (12 pontos de cada lado e mais o ponto da quilha) distribuídos em 12 balizas e

listados nas tabelas 4.2.2, 4.2.3 e 4.2.4 (somente estão listados 12 dos 23 pontos de cada uma das balizas, pois os outros 11 se obtém por simetria). A parte acima da linha d'água a 14 pés foi desprezada. O casco é colocada nos eixos xyz com: comprimento popa / proa na direção do eixo z com popa a partir de z igual a zero; a boca na direção do eixo x com eixo de simetria (meia boca) em x igual a zero e linhas d'água na direção do eixo y com os pontos da quilha a partir de y igual a zero. Os valores listados nas tabelas 4.2.2, 4.2.3 e 4.2.4 tem como unidade, pés.

z \ x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,30	0,40	0,46	0,70	0,80	0,90	0,97	1,20	1,58	2,00	2,41
3	0,00	0,72	1,80	2,00	2,94	4,00	4,07	5,19	5,70	6,26	7,00	7,36
4	0,00	2,00	2,44	4,00	4,60	6,00	6,25	7,43	8,00	8,39	9,20	9,93
5	0,00	2,00	4,00	4,44	6,00	7,23	8,00	8,81	8,63	10,21	10,70	11,10
6	0,00	2,00	4,00	5,85	6,00	8,00	8,88	10,15	10,64	10,93	11,19	11,39
7	0,00	2,00	4,00	6,00	6,39	8,00	9,65	10,65	10,98	11,17	11,32	11,40
8	0,00	2,00	4,00	5,46	6,00	8,88	9,67	10,56	10,87	11,05	11,21	11,26
9	0,00	2,00	4,00	5,00	6,00	8,00	9,25	10,32	10,66	10,84	11,02	11,07
10	0,00	2,00	4,00	4,20	6,00	8,00	8,50	9,97	10,41	10,59	10,76	10,84
11	0,00	2,00	2,80	4,00	6,00	8,00	8,80	9,56	10,07	10,27	10,45	10,53
12	0,00	2,00	3,08	4,00	6,00	8,00	9,04	9,65	9,84	10,00	10,02	10,09

Tabela 4.2.2 Coordenadas das larguras (x) em cada uma das 12 balizas (z)

z \ y	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00
2	6,00	7,00	7,50	8,00	8,50	9,00	9,50	10,00	11,00	12,00	13,09	14,00
3	0,66	2,00	4,00	4,36	6,00	7,87	8,00	10,00	11,00	12,00	13,00	14,00
4	0,10	1,63	2,00	3,40	4,00	5,65	6,00	5,00	9,14	10,00	12,00	14,00
5	0,09	0,82	1,76	2,00	3,00	4,00	4,82	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00
6	0,28	0,73	1,32	2,00	2,07	3,24	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00
7	0,71	1,02	1,41	1,88	2,00	2,71	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00
8	1,34	1,53	1,78	2,00	2,10	2,77	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00
9	1,95	2,10	2,30	2,45	2,55	3,16	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00
10	2,54	2,68	2,86	3,00	3,10	3,71	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00
11	3,14	3,27	3,30	3,45	3,69	4,36	5,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00
12	3,76	3,91	4,00	4,08	4,30	4,97	6,00	8,00	10,00	11,75	12,00	14,00

Tabela 4.2.3 Coordenadas das alturas (y) em cada uma das 12 balizas (z)

Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	105,92	102,0	91,8	81,6	71,4	61,2	51,0	40,8	30,6	20,4	10,2	0,0

Tabela 4.2.4 Coordenadas das balizas (z)

Com o ajuste obtém-se uma matriz com 12 linhas e 7 colunas. Cada elemento desta matriz está associado a 3 valores (x, y e z). Cada elemento corresponde a um ponto de controle da superfície “*B-spline*” e tem como coordenadas os valores listados na tabela 4.2.5 (Os valores estão listados da esquerda para a direita, de cima para baixo, valores em pés, desde a baliza onde $z=105,9$ pés até a baliza em que $z = 0,0$ pés).

X	y	Z	X	y	Z	X	y	Z
0.0	14.0	105.9	-11.5	14.5	70.3	-11.0	14.3	27.0
0.0	14.0	105.9	-9.8	7.3	70.3	-11.2	7.9	27.0
0.0	14.0	105.9	-7.8	3.3	70.3	-8.0	2.2	27.0
0.0	14.0	105.9	0.0	-0.3	70.3	0.0	2.6	27.0
0.0	14.0	105.9	7.8	3.3	70.3	8.0	2.2	27.0
0.0	14.0	105.9	9.8	7.3	70.3	11.2	7.9	27.0
0.0	14.0	105.9	11.5	14.5	70.3	11.0	14.3	27.0
-3.0	14.4	101.4	-11.4	14.2	59.5	-10.7	14.3	16.2
-0.7	8.6	101.4	-11.2	8.0	59.5	-10.8	7.7	16.2
-0.9	6.3	101.4	-8.3	2.0	59.5	-7.4	2.7	16.2
0.0	2.4	101.4	0.0	0.4	59.5	0.0	3.2	16.2
0.9	6.3	101.4	8.3	2.0	59.5	7.4	2.7	16.2
0.7	8.6	101.4	11.2	8.0	59.5	10.8	7.7	16.2
3.0	14.4	101.4	11.4	14.2	59.5	10.7	14.3	16.2
-7.8	14.2	91.6	-11.4	14.2	48.6	-10.2	14.3	5.4
-6.5	11.8	91.6	-11.6	8.1	48.6	-10.7	7.5	5.4
-3.6	8.1	91.6	-8.6	1.7	48.6	-7.4	4.1	5.4
0.0	-0.7	91.6	0.0	1.0	48.6	0.0	3.1	5.4
3.6	8.1	91.6	8.6	1.7	48.6	7.4	4.1	5.4
6.5	11.8	91.6	11.6	8.1	48.6	10.7	7.5	5.4
7.8	14.2	91.6	11.4	14.2	48.6	10.2	14.3	5.4
-10.2	13.9	81.1	-11.1	14.2	37.8	-9.9	14.0	0.0
-7.8	8.2	81.1	-11.5	8.1	37.8	-10.7	10.3	0.0
-6.3	4.9	81.1	-8.0	1.6	37.8	-7.6	3.7	0.0
0.0	-0.4	81.1	0.0	1.9	37.8	0.0	4.1	0.0
6.3	4.9	81.1	8.0	1.6	37.8	7.6	3.7	0.0
7.8	8.2	81.1	11.5	8.1	37.8	10.7	10.3	0.0
10.2	13.9	81.1	11.1	14.2	37.8	9.9	14.0	0.0

Tabela 4.2.5 Coordenadas (x;y;z) dos pontos de controle

Colocam-se as coordenadas dos pontos, listados na tabela 4.2.5 no programa e obtém-se a superfície que é mostrada na figura 4.2.1 com seus coeficientes de forma, centros e áreas seccionadas do casco (as unidades dos valores obtidos são: pés; pés quadrados; pés cúbicos).

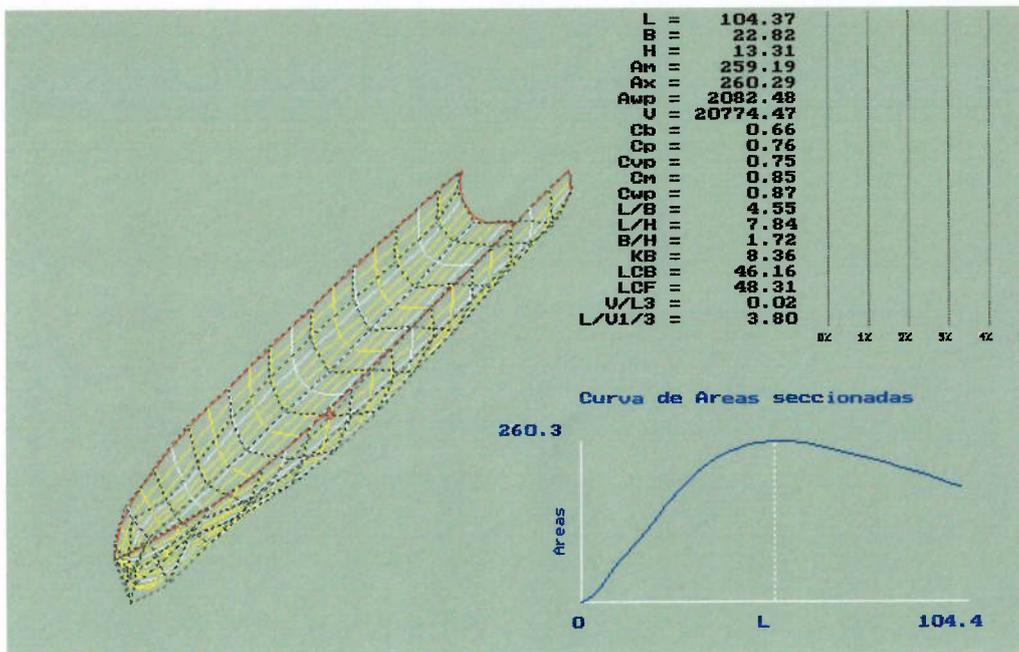


Figura 4.2.1 Casco com coeficientes de forma obtidos pelo programa

Em seguida faz-se através do programa, mudanças na tabela de pontos de controle, somente nos pontos da borda do plano de linha d'água de projeto, para que se tenha os valores das coordenadas dos pontos da borda iguais aos valores informados pela tabela de cotas dada e tem-se uma nova tabela de pontos 4.2.6 (em vermelho tem-se os valores que foram alterados através do programa) que gera uma nova superfície, que está na figura 4.2.2. (as unidades dos valores obtidos são: pés; pés quadrados; pés cúbicos).

x	y	z	x	y	z	x	y	z
0.0	14.0	105.9	-11.1	14.0	70.2	-10.9	14.2	27.0
0.0	14.0	105.9	-9.8	7.3	70.3	-11.2	7.9	27.0
0.0	14.0	105.9	-7.8	3.3	70.3	-8.0	2.2	27.0
0.0	14.0	105.9	0.0	-0.3	70.3	0.0	2.6	27.0
0.0	14.0	105.9	7.8	3.3	70.3	8.0	2.2	27.0
0.0	14.0	105.9	9.8	7.3	70.3	11.2	7.9	27.0
0.0	14.0	105.9	11.1	14.0	70.2	10.9	14.2	27.0
-2.3	14.1	101.1	-11.3	14.1	59.4	-10.8	14.2	16.2
-0.7	8.6	101.4	-11.2	8.0	59.5	-10.8	7.7	16.2
-0.9	6.3	101.4	-8.3	2.0	59.5	-7.4	2.7	16.2
0.0	2.4	101.4	0.0	0.4	59.5	0.0	3.2	16.2
0.9	6.3	101.4	8.3	2.0	59.5	7.4	2.7	16.2
0.7	8.6	101.4	11.2	8.0	59.5	10.8	7.7	16.2
2.3	14.1	101.1	11.3	14.1	59.4	10.8	14.2	16.2
-7.3	14.1	91.5	-11.5	14.1	48.6	-10.4	14.2	5.4
-6.5	11.8	91.6	-11.6	8.1	48.6	-10.7	7.5	5.4
-3.6	8.1	91.6	-8.6	1.7	48.6	-7.4	4.1	5.4
0.0	-0.7	91.6	0.0	1.0	48.6	0.0	3.1	5.4
3.6	8.1	91.6	8.6	1.7	48.6	7.4	4.1	5.4
6.5	11.8	91.6	11.6	8.1	48.6	10.7	7.5	5.4
7.3	14.1	91.5	11.5	14.1	48.6	10.4	14.2	5.4
-10.0	14.0	81.0	-11.4	14.1	37.8	-10.0	14.2	-0.3
-7.8	8.2	81.1	-11.5	8.1	37.8	-10.7	10.3	0.0
-6.3	4.9	81.1	-8.0	1.6	37.8	-7.6	3.7	0.0
0.0	-0.4	81.1	0.0	1.9	37.8	0.0	4.1	0.0
6.3	4.9	81.1	8.0	1.6	37.8	7.6	3.7	0.0
7.8	8.2	81.1	11.5	8.1	37.8	10.7	10.3	0.0
10.0	14.0	81.0	11.4	14.1	37.8	10.0	14.2	-0.3

Tabela 4.2.6 Coordenadas após primeiro ajuste

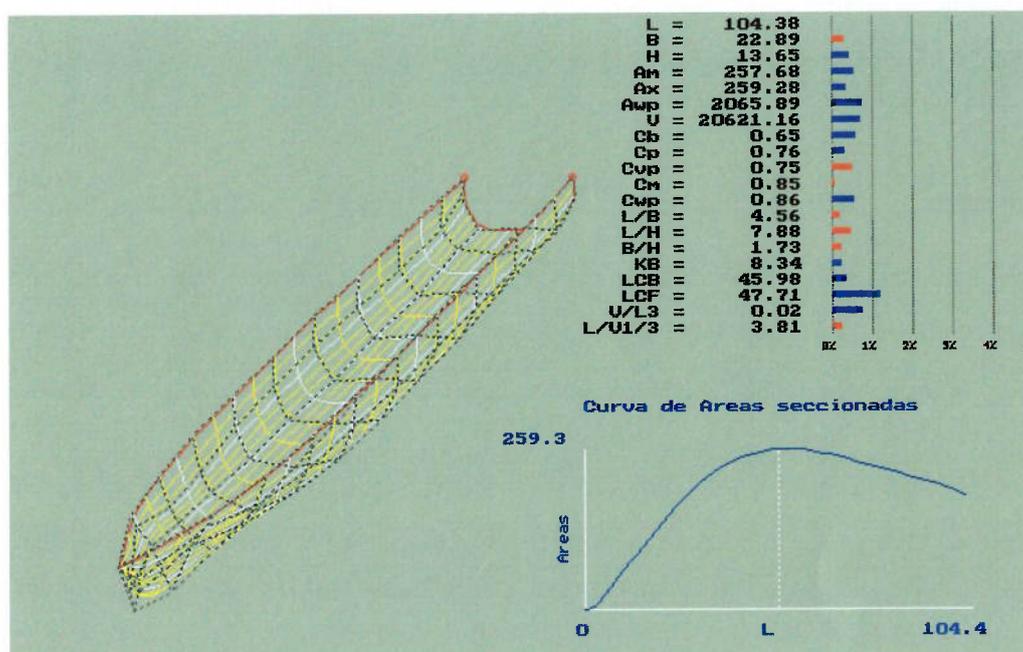


Figura 4.2.2 Casco após primeiro acerto

Novamente muda-se alguns pontos de controle, agora, somente pontos referentes a quilha, para que se tenha os valores das coordenadas dos pontos da quilha iguais aos valores informados nos pontos da tabela de cota dada e tem-se uma nova tabela de pontos 4.2.7 (em vermelho tem-se os valores que foram

alterados) que gera uma nova superfície, que está na figura 4.2.3. (as unidades dos valores obtidos são: pés; pés quadrados; pés cúbicos).

X	y	Z	X	y	Z	X	y	Z
0.0	14.0	105.9	-11.1	14.0	70.2	-11.2	14.2	27.0
0.0	14.0	105.9	-9.6	7.0	70.2	-10.9	8.0	27.0
0.0	14.0	105.9	-7.8	3.3	70.3	-8.0	2.2	27.0
0.0	14.0	105.9	0.0	-1.0	70.2	-0.0	2.2	27.0
0.0	14.0	105.9	7.8	3.3	70.3	8.0	2.2	27.0
0.0	14.0	105.9	9.6	7.0	70.2	10.9	8.0	27.0
0.0	14.0	105.9	11.1	14.0	70.2	11.2	14.2	27.0
-2.3	14.1	101.1	-11.3	14.1	59.5	-10.8	14.2	16.2
-0.7	8.6	101.4	-10.7	8.0	59.5	-10.8	7.7	16.2
-0.9	6.3	101.4	-8.3	2.0	59.5	-7.4	2.7	16.2
0.0	0.3	101.1	0.0	-0.3	59.4	0.0	2.6	16.2
0.9	6.3	101.4	8.3	2.0	59.5	7.4	2.7	16.2
0.7	8.6	101.4	10.7	8.0	59.5	10.8	7.7	16.2
2.3	14.1	101.1	11.3	14.1	59.5	10.8	14.2	16.2
-7.5	14.1	91.5	-11.5	14.1	48.6	-10.4	14.2	5.4
-6.5	11.8	91.6	-11.2	8.3	48.6	-10.7	7.5	5.4
-3.6	8.1	91.6	-8.6	1.7	48.6	-7.4	3.2	5.4
0.0	-2.2	91.5	0.0	1.0	48.6	-0.0	3.3	5.4
3.6	8.1	91.6	8.6	1.7	48.6	7.4	3.2	5.4
6.5	11.8	91.6	11.2	8.3	48.6	10.7	7.5	5.4
7.5	14.1	91.5	11.5	14.1	48.6	10.4	14.2	5.4
-10.0	14.0	81.0	-11.4	14.1	37.8	-10.0	14.2	-0.3
-7.7	8.2	81.1	-10.8	8.3	37.8	-10.7	10.3	0.0
-6.3	4.9	81.1	-8.0	1.6	37.8	-7.6	3.8	-0.3
0.0	-1.6	81.0	0.0	1.6	37.8	0.0	3.8	-0.3
6.3	4.9	81.1	8.0	1.6	37.8	7.6	3.8	-0.3
7.7	8.2	81.1	10.8	8.3	37.8	10.7	10.3	0.0
10.0	14.0	81.0	11.4	14.1	37.8	10.0	14.2	-0.3

Tabela 4.2.7 Coordenadas após segundo acerto

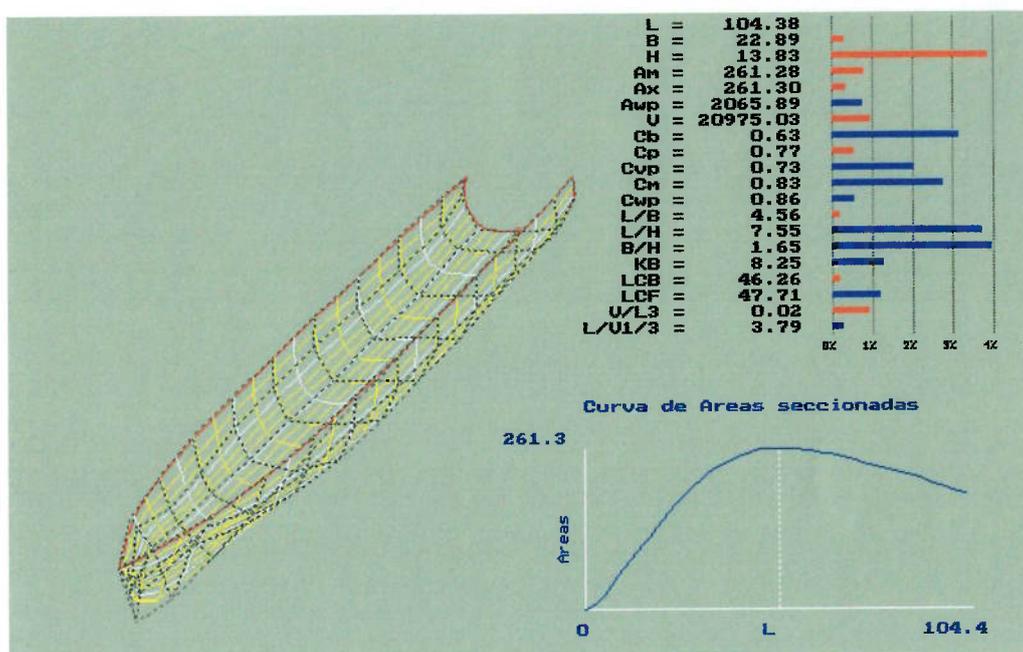


Figura 4.2.3 Casco com coeficientes após segundo acerto

Tem-se na tabela 4.2.8 um resumo com os valores obtidos através das expressões matemáticas dos coeficientes de forma (estes valores são assumidos

como sendo os valores que se quer chegar) e os valores obtidos pelo programa após ajuste e mudanças nos pontos de controle da superfície.

	Valores dados pela tabela de cotas (usados como referência)	Valores obtidos após ajuste com programa do LAZANHA	Valores obtidos após primeiro acerto	Valores obtidos após segundo acerto
L	105,92	104,37	104,38	104,38
B	22,80	22,82	22,89	22,89
H	13,91	13,31	13,65	13,83
A_m	260,55	259,19	257,68	261,28
A_x	260,55	260,29	259,28	261,30
A_{wp}	2082,45	2082,48	2065,89	2065,89
V	20787,58	20774,47	20621,16	20975,03
C_b	0,62	0,66	0,65	0,63
C_p	0,75	0,76	0,76	0,77
C_{vp}	0,72	0,75	0,75	0,73
C_m	0,82	0,85	0,85	0,83
C_{wp}	0,86	0,87	0,86	0,86
L/B	4,65	4,55	4,56	4,56
L/H	7,61	7,84	7,88	7,55
B/H	1,64	1,72	1,73	1,65
KB	8,62	8,36	8,34	8,25
LCB	46,23	46,16	45,98	46,26
LCF	48,04	48,31	47,71	47,71
V/L^3	0,02	0,02	0,02	0,02
$L/\sqrt[3]{V}$	3,85	3,80	3,81	3,79
Desvio Padrão		2,69%	2,50%	1,51%

Tabela 4.2.8 Comparação entre os coeficientes de forma

Na tabela 4.2.8 tem-se que o desvio padrão da superfície, após ajuste com programa do LAZANHA [não Publicado], em relação aos valores calculados como referência é de 2,69 %, após o primeiro acerto passa a ser de 2,50 % e após o segundo acerto 1,51 %. Tem-se portanto que com o uso do programa é

possível se caminhar para o conjunto de valores, adotados como referência para o casco considerado.

5. Conclusões

Conforme o proposto, neste trabalho de pesquisa, tem-se a interdisciplinaridade das Tecnologias da Informação, Computação Gráfica e da Engenharia Naval.

Mostra-se que as ferramentas da Computação Gráfica usadas no programa desenvolvido, atendem satisfatoriamente a possibilidade de visualização e de interação com as superfícies “B-spline”.

A possibilidade do monitoramento dos Coeficientes de Forma, Centros e Áreas Secionais assim como a possibilidade de rotações, translações, ampliação e redução das superfícies e também a interação com Planos de Linhas e Distribuição de Curvaturas das superfícies, aliadas a uma interface amigável do programa, podem contribuir como subsídios à configuração de formas moldadas de cascos de embarcações.

Como continuidade desta pesquisa sugerimos o desenvolvimento de uma metodologia que ligue as possibilidades do programa aqui estudado com as metodologias de configuração de cascos já existentes tais como as que foram abordadas no capítulo 2.6 deste trabalho.

Como contribuição a esta continuidade tem-se em anexo a esta dissertação um CD com os programas fontes e executáveis, relativos ao método implementado, assim como, exemplos de aplicações de modo que possam vir a ser complementados e aprimorados.

6. Referências Bibliográficas

ABT, Claus ; HARRIES, Stefan ; HOCHKIRCH, Karsten: **Hydrodynamic Modeling of Sailing Yachts**. 15th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, Annapolis. 2001.

ANDRADE, Bernardo L. R.: **Modelo de síntese e otimização por múltiplos critérios para o projeto preliminar de embarcações**. Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia. 2001.

BARTELS; BEATTY; BARSKY: **An Introduction to Splines for Use in Computer Graphics and Geometric Modeling**. 1987.

BEIER, Klaus Peter: **The Porcupine Technique**. University of Michigan – Department of Naval Architecture and Marine Engineering. October. 1987.

DAVIS, Paul: **B-splines and Geometric design**. SIAM (Science and Industry Advance with Mathematics) News, vol. 29, no. 5. 1996.

FARIN, Gerald: **Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design**. 2. ed. Arizona: Computer Science and Scientific Computing, 444 p. 1990.

GILLMER Thomas C. ; JOHNSON Bruce: **Introduction to Naval Architecture**. Naval Institute Press. Distributed by Airlife Publishing Ltd. 1982.

HARRIES, S. ; ABT, C.: **Parametric Design and optimization of sailing yachts**. 40th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, Annapolis. 1999.

PRESS, W.H. ; Flannery, B.P. ; Teukolsky, S.A. e Vetterling, W.T.: **Numerical recipes in C**. Cambridge University, New York. 1988.

ROGERS, David F.: **B-Spline Curves and Surfaces for Ship Hull Definition.**
Paper presented at SCAHD'77. Computer-Aided Hull Surface Definition
Symposium Annapolis, Maryland. 1977.

ROGERS, David F.; ADAMS, J. Alan: **Mathematical Elements for Computer
Graphics.** 2. ed. McGraw-hill, 611 p. 1990.

SCHOENBERG, Isaac. J.: **Contribution to the problem of approximation of equidistant
data by analytic functions.** Journal - Quarterly Applied Mathematic, vol. 4, pp. 45-99, 112-
141. 1946.

7. Lista de sítios

GRANERO, Juliano Chaves.: **Biblioteca para manipulação do *mouse* em um ambiente DOS V 2.0.** Disponível em <http://atlas.ucpel.tche.br/~jcgran/mouse.htm>.

Acesso em 30 de julho de 2002.

BOOR, Carl de.: **Bibliografia de Isaac J. Schoenberg.** Disponível em: <http://www.cs.wisc.edu/~deboor>. Acesso em 25 de fevereiro de 2002.

SABO, DAVID W.: **Computer Graphics for Computer Systems Technology.**

Disponível em: <http://apples.soe.bcit.ca/comp4560/TOC.html>. Acesso em 14 de março de 2002.

USNA.: **EN200 Naval Engineering I Course Objectives Chapter 2.** Disponível em: <http://www.usna.edu/NAOE/courses/en200/ch02.pdf>. Acesso em 2 de Julho de 2002.

Anexo I Curvas de Bézier

Para $n + 1$ pontos (P_0, P_1, \dots, P_n) de \mathbb{R}^3 , de acordo com FARIN [1990]

define-se a curva de Bézier pela relação $B(t)$ dada por:

$$B(t) = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} (1-t)^{n-i} t^i P_i$$

Os polinômios $J_{n,i}(t) = \binom{n}{i} (1-t)^{n-i} t^i$ com $i \in \{0, 1, 2, \dots, n\}$ e $t \in [0, 1]$ são

chamados de polinômios de Bernstein. Na figura AI.1, tem-se os gráficos

desses polinômios para $1 \leq n \leq 3$.

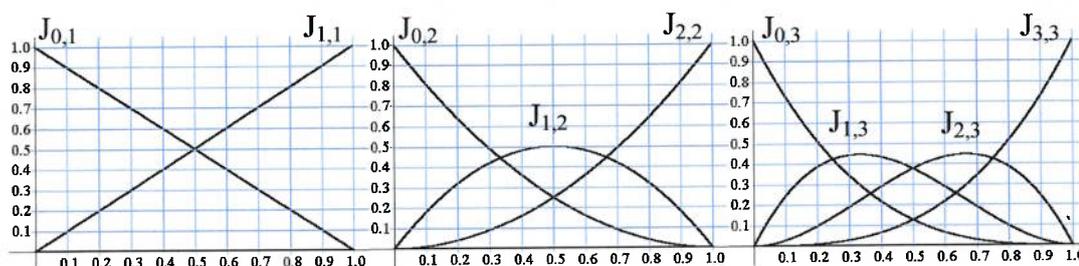


Figura AI.1 - Polinômios de Bernstein

Na figura AI.2, ilustra-se uma curva de Bézier obtida a partir de pontos

P_0, P_1, P_2 e P_3 específicos.

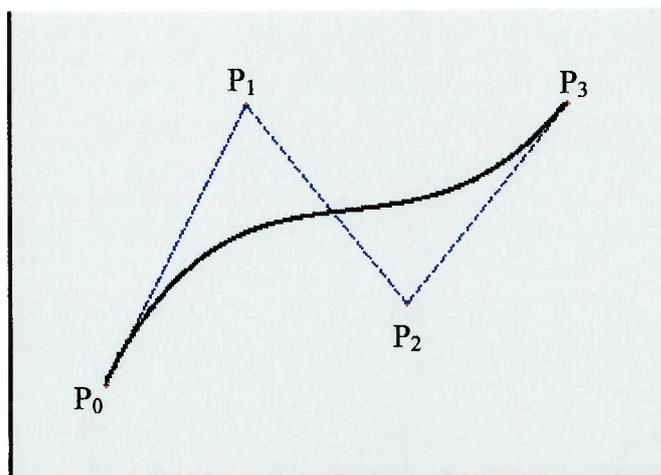


Figura AI.2 - Curva de Bézier dada por quatro pontos

$P_0=(1,2;1,5)$, $P_1=(3;5,5)$, $P_2=(5,1;2,6)$ e $P_3=(7,2;5,5)$

Uma propriedade das curvas de Bézier, é que elas são invariantes para uma transformação afim ou seja:

Dada uma transformação T afim em \mathfrak{R}^3 e dada uma curva de Bézier $B(t)$ através dos pontos $P_0, P_1, P_2, \dots, P_n$ de controle, aplicar esta transformação em $B(t)$ é o mesmo que aplicar a transformação em cada um dos pontos de controle e depois obter a nova curva através dos pontos transformados.

São transformações afim as rotações, mudanças de escala, translações e reflexões.

Dada a curva de Bézier

$$B(t) = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} (1-t)^{n-i} t^i P_i$$

Se mudarmos de posição apenas o ponto de controle P_k para P'_k , tem-se uma nova curva $B'(t)$

$$B'(t) = \sum_{i=0}^{k-1} \binom{n}{i} (1-t)^{n-i} t^i P_i + \binom{n}{k} (1-t)^{n-k} t^k P'_k + \sum_{i=k+1}^n \binom{n}{i} (1-t)^{n-i} t^i P_i$$

mas $P'_k = P_k + V$ e assim tem-se:

$$B'(t) = \sum_{i=0}^{k-1} \binom{n}{i} (1-t)^{n-i} t^i P_i + \binom{n}{k} (1-t)^{n-k} t^k P_k + \binom{n}{k} (1-t)^{n-k} t^k V + \sum_{i=k+1}^n \binom{n}{i} (1-t)^{n-i} t^i P_i$$

ou ainda

$$B'(t) = B(t) + \binom{n}{k} (1-t)^{n-k} t^k V$$

Em $B'(t)$, para qualquer $0 < t < 1$ o polinômio $\binom{n}{k}(1-t)^{n-k}t^k$ assume um valores diferentes de zero e assim para qualquer t do intervalo, $B'(t) \neq B(t)$.

Portanto nas curvas de Bézier qualquer mudança em apenas um ponto de controle, provoca alterações na curva inteira.

Nas curvas de Bézier o número de pontos de controle, fixa o grau das curvas. Um polígono de controle com $n+1$ pontos produz uma curva de grau n . Assim o uso das curvas de Bézier implica em se trabalhar com polinômios de grau muito elevado aumentando com isto o esforço computacional.

Anexo II Geometria em 3D

Transformações em pontos dados através de suas coordenadas em \mathfrak{R}^3

Dado um conjunto de pontos de \mathfrak{R}^3 com coordenadas $(x_1 ; y_1 ; z_1)$, $(x_2 ; y_2 ; z_2)$, $(x_3 ; y_3 ; z_3)$..etc., para obter-se uma: mudança de escala; rotação; reflexão; cisalhamento, multiplica-se a matriz

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix}, \text{ formada pelos valores das coordenadas dadas, pela matriz}$$

$$T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \text{ com } a_{ij} \in \mathfrak{R} \text{ e } i, j \in \{1,2,3\}, \text{ obtendo-se a matriz } R = A \times T$$

que é a matriz das novas coordenadas dos pontos dados após a transformação.

Mudança de escala

Para $a_{11} = a_{22} = a_{33} = n$ e os demais valores iguais a zero, tem-se na matriz

$R = A \times T$ um efeito de ampliação/redução.

Rotação em relação aos eixos

Eixo dos x

$$\text{Para } T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \text{sen } \alpha \\ 0 & -\text{sen } \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \text{ tem-se na matriz } R = A \times T \text{ uma rotação de}$$

um ângulo α em relação ao eixo dos x .

Eixo dos y

Para $T = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\operatorname{sen} \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \operatorname{sen} \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix}$ tem-se na matriz $R = A \times T$ uma rotação de

um ângulo α em relação ao eixo dos y .

Eixo dos z

Para $T = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \operatorname{sen} \alpha & 0 \\ -\operatorname{sen} \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ tem-se na matriz $R = A \times T$ uma rotação de

um ângulo α em relação ao eixo dos z .

Translação

Para ter-se uma translação pode-se acrescentar uma quarta linha na matriz transformação. É conveniente também acrescentar uma quarta coluna na matriz dos pontos com números uns e uma quarta coluna na matriz transformação com zeros com exceção da quarta linha e quarta coluna que preenche-se com o

número um. Assim tem-se a matriz transformação $T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ a & b & c & 1 \end{bmatrix}$ que leva o

ponto de coordenadas $(x; y; z)$ para a posição transladada de coordenadas

$(x + a; y + b; z + c)$.

Anexo III Exibir pontos na tela do computador com a sensação de tridimensionalidade

Colocando-se o ponto $(x_1; y_1; z_1)$ conforme fig.AIV.1.1, com o eixo z sobre a bissetriz entre os eixos x e y.

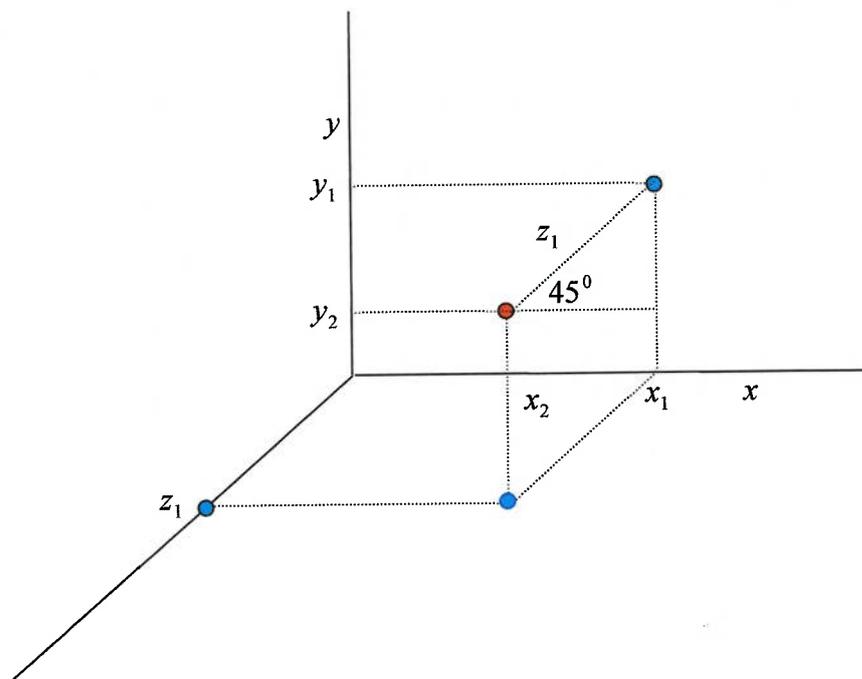


Fig. AIII.1 Pontos de 3D marcados em 2D

tem-se:

$$\cos 45^\circ = \frac{x_1 - x_2}{z_1} \quad \text{e} \quad \text{sen} 45^\circ = \frac{y_1 - y_2}{z_1}$$

então:

$$\frac{\sqrt{2}}{2} z_1 = x_1 - x_2 \quad \text{e} \quad \frac{\sqrt{2}}{2} z_1 = y_1 - y_2$$

então:

$$x_2 = x_1 - \frac{\sqrt{2}}{2} z_1 \quad \text{e} \quad y_2 = y_1 - \frac{\sqrt{2}}{2} z_1$$

então:

$$(x_2, y_2) = \left(x_1 - z_1 \frac{\sqrt{2}}{2}, y_1 - z_1 \frac{\sqrt{2}}{2} \right)$$

Anexo IV Expressões para o cálculo dos coeficientes de forma

Estas expressões são encontradas em GILLMER [1982].

Coeficiente de bloco - razão entre o volume do casco e o volume do paralelepípedo cuja superfície circunscreve.

$$C_b = \frac{\nabla}{B.L.H}$$

Coeficiente prismático longitudinal - razão entre o volume do casco e o volume do cilindro de comprimento L e base igual a seção transversal de área máxima do navio.

$$C_p = \frac{\nabla}{L.A_x}$$

Coeficiente de seção mestra - razão entre a área da seção média do navio (A_m) e área do retângulo de lados B e H.

$$C_m = \frac{A_m}{B.H}$$

Coeficiente prismático vertical - razão entre o volume do casco e o volume do cilindro de altura H e base igual a área do plano de linha d'água na altura H (A_w).

$$C_{pv} = \frac{\nabla}{H.A_w}$$

Coeficiente volumétrico - razão entre o volume do casco e o comprimento (L).

$$C_v = \frac{\nabla}{L^3}$$

Relação Comprimento / Volume -

$$\frac{L}{\sqrt[3]{\nabla}}$$

Coeficiente de área de linha d'água de Projeto - razão entre a área do plano de linha d'água na altura H (A_w) e a área do retângulo de lados L e B.

$$C_{wp} = \frac{A_w}{L.B}$$

Centro longitudinal de flutuação - $LCF = \frac{2}{A_{wp}} \int_0^L z \cdot x(z) \cdot dz$

Centro Longitudinal de Carena - $LCB = \frac{\int_0^L z \cdot A_s(z) \cdot dz}{\nabla}$

Centro Vertical de Carena - $KB = \frac{\int_0^H y \cdot A_{wp}(y) \cdot dy}{\nabla}$