

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica
Departamento de Engenharia Naval e Oceânica



**“ANALISE DA TOPOLOGIA ESTRUTURAL E SUA
INFLUÊNCIA NO CUSTO DE FABRICAÇÃO DO CASCO
DE CATAMARÃS EM ALUMÍNIO”**

RAFAEL LINS COSENTINO

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Janeiro/2014

ANALISE DA TOPOLOGIA ESTRUTURAL E SUA INFLUÊNCIA NO CUSTO DE
FABRICAÇÃO DO CASCO DE CATAMARÃS EM ALUMÍNIO

RAFAEL LINS COSENTINO

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO NAVAL.

Aprovado por:

Alexandre Teixeira de Pinho Alho, D.Sc.
(Orientador)

Marta Cecília Tapia Reyes, D.Sc.

Annelise Zeemann, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Janeiro/2014

Projeto Final apresentado ao DENO como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Naval.

ANALISE DA TOPOLOGIA ESTRUTURAL E SUA INFLUÊNCIA NO CUSTO DE FABRICAÇÃO DO CASCO DE CATAMARÃS EM ALUMÍNIO

RAFAEL LINS COSENTINO

JANEIRO/2014

Orientador: Alexandre Teixeira de Pinho Alho

Departamento: Engenharia Naval e Oceânica

Resumo do Trabalho:

A existência de centros urbanos onde o transporte terrestre encontra-se saturado abre espaço para soluções fluviais e marítimas. Uma dessas alternativas é a utilização de embarcações de alta velocidade viabilizando a mobilidade urbana. Observa-se assim uma demanda crescente por projetos de embarcações costeiras capazes de realizar este tipo de serviço com segurança e eficiência. Neste contexto, a embarcação tipo catamarã representa a concepção de casco mais comumente utilizada em locais onde as condições de vento e ondas causam maior efeito sobre a estabilidade transversal.

Dependendo das características de porte e de operação da embarcação, o alumínio se apresenta como a escolha de material mais eficiente para a fabricação do casco. Nos anos recentes, a utilização do alumínio tem sido crescente em diversos setores de construção naval. Para que o maior custo com a construção em alumínio seja justificado, a embarcação deve possuir uma topologia estrutural eficiente, ou seja, deve-se alcançar uma solução de projeto que satisfaça os requisitos de resistência estrutural, empregando-se a menor quantidade de material possível.

O objetivo do presente trabalho envolve, portanto, o desenvolvimento de uma ferramenta de projeto aplicada à análise preliminar do peso de material e dos respectivos custos de material e de construção do casco de um catamarã em alumínio. Como exemplo de aplicação, são apresentados os resultados obtidos para a análise da topologia estrutural de um catamarã típico dedicado ao transporte de passageiros.

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais, meus irmãos e todos da minha família, por tudo o que sempre fizeram e ainda fazem por mim.

Agradeço aos meus amigos que compartilharam direta ou indiretamente desta minha caminhada árdua e sempre me apoiaram.

Agradeço, ao professor Alexandre Alho pela orientação dada neste trabalho e pelo companheirismo dedicado aos alunos da graduação como um dos professores mais próximos do corpo docente do curso de Engenharia naval e Oceânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Agradeço, por fim, a todos que de alguma forma puderam e desejaram contribuir para que eu chegasse a este fim que almejei. Se fosse capaz de lembrar e listar todos, o faria.

*"É fazendo que se aprende a fazer aquilo que se deve aprender a fazer."
Aristoteles.*

Índice

1. Introdução	5
2. Construção de Embarcações em Alumínio	6
2.1 Ligas de Alumínio Utilizadas na Construção de Embarcações.....	8
3. Metodologia	11
4. Descrição da Ferramenta de Projeto	13
4.1 A Aba “Input”	13
4.2 A Aba “3.2.1_3.2.2”	15
4.3 A Aba “3.2.3_3.2.4”	19
4.4 A Aba “Características da forma”	23
4.5 A Aba “topologia peso e custo de alumínio”	26
4.6 A Aba “custos manufatura”	28
4.7 A Aba “Modulo de Seção Transversal” e aba “Modulo de Seção Longitudinal”	32
4.8 A Aba “Resultados”	32
5. Exemplo de Aplicação	34
5.1 Casco de Referência	35
5.2 Apresentação e análise dos Resultados	35
6. Conclusões	42
7. Referências Bibliográficas	43

1. INTRODUÇÃO

A existência de centros urbanos onde o transporte terrestre encontra-se saturado, ou ainda, economicamente ou tecnicamente inviável, abre espaço para soluções fluviais e marítimas. Uma dessas alternativas é a utilização de embarcações de alta velocidade viabilizando a mobilidade urbana em diversos cenários brasileiros e mundiais. Existe uma demanda crescente por projetos de embarcações costeiras capazes de realizar este tipo de serviço com segurança e eficiência. No caso do Brasil, o potencial para a instalação deste tipo de serviço é extenso devido ao vasto litoral e ao grande número de hidrovias.

A embarcação tipo catamarã representa a concepção de casco mais comumente utilizada em locais onde as condições de vento e ondas causam maior efeito sobre a estabilidade transversal. Isso se deve ao fato deste tipo de embarcação ser menos suscetível aos movimentos de jogo (*roll*), devido a sua melhor estabilidade transversal em comparação às embarcações do tipo monocasco. Observa-se, também, que as acelerações provocadas pelo movimento de jogo são comparativamente menores, oferecendo, assim, mais conforto e segurança à tripulação e aos passageiros.

Dependendo das características de porte e de operação da embarcação, o alumínio se apresenta como a escolha de material mais eficiente para a fabricação do casco. Desde 1960, a utilização do alumínio tem sido crescente em diversos setores de construção naval, devido, basicamente, a três das suas principais propriedades: elevada razão entre resistência mecânica e peso (massa), alta resistência à corrosão em ambiente marinho e boa soldabilidade de algumas de suas ligas. Seja em embarcações de alta velocidade, barcos de recreio, barcos de serviço, barcos de pesca, superestruturas, ou até mesmo na indústria offshore, o alumínio vem ganhando espaço e sua utilização em novos projetos na construção naval nunca foi tão intensa quanto na atualidade.

Especificamente, quando se trata de embarcações de alta velocidade, o alumínio mostra-se como uma opção vantajosa, tendo em vista a redução do peso leve em função do seu baixo peso específico. Em consequência, observa-se uma menor demanda de potência, e, conseqüentemente, um menor consumo de combustível. Tal economia nos custos de operação compensa um possível custo inicial mais elevado decorrente do maior custo de material e de construção do alumínio em comparação ao aço. Desta forma, o alumínio se apresenta com uma opção atraente para embarcações de serviço de alto desempenho.



Figura 1: Catamarã de Transporte de passageiros.



Figura 2: Construção de um Catamarã de alumínio.

Para que o maior custo com a construção em alumínio seja justificado, a embarcação deve possuir uma topologia estrutural eficiente, ou seja, deve-se alcançar uma solução de projeto que satisfaça os requisitos de resistência estrutural, empregando-se a menor quantidade de material possível. Garantir o menor custo de construção e o menor custo com material é essencial para que a embarcação seja viável financeiramente e a opção pelo alumínio se traduza em economia.

O objetivo do presente trabalho envolve o desenvolvimento de uma ferramenta de projeto aplicada à análise preliminar do peso de material e dos respectivos custos de material e de construção da estrutura de um catamarã de alta velocidade. O desenvolvimento da ferramenta de projeto teve por base as regras da sociedade classificadora ABS - American Bureau of Shipping, para embarcações de alta velocidade, bem como as restrições impostas pelos requisitos de projeto da embarcação. Como exemplo de aplicação, são apresentados os resultados obtidos para a análise da topologia estrutural de um catamarã típico dedicado ao transporte de passageiros.

2. CONSTRUÇÃO DE EMBARCAÇÕES EM ALUMÍNIO

O material mais largamente utilizado na construção de navios é o aço. Tipicamente, a construção em aço é realizada através da edificação de blocos e sua posterior montagem para a construção do casco. Os blocos são formados por painéis, os quais são fabricados através da soldagem de perfis estruturais às chapas. Tal processo construtivo – fabricação dos painéis \Rightarrow edificação e montagem dos blocos – é adotado devido à baixa expansão térmica do aço, o que não é verificado com o alumínio.

A expansão térmica do alumínio equivale ao dobro daquela verificada com o aço. Além disso, as soldas em alumínio diminuem em cerca de 6% seu volume ao se solidificarem. Tal mudança nas dimensões do material pode acarretar distorções e trincas. Isso impõe a adoção de outra estratégia para a construção em alumínio. A estratégia mais utilizada é a construção,

primeiramente, de um “esqueleto” formado por perfis estruturais, para, em seguida, realizar-se seu recobrimento com chapas, tal como ilustrado nas Figuras 2, 3 e 4.



Figura 3: Construção de embarcações em alumínio.

A priori, isto seria apenas uma inversão na sequência de construção, onde os reforçadores impediriam uma expansão livre da chapa. Todavia, isso implica numa série de dificuldades na construção, principalmente na soldagem dos reforçadores às chapas. O grande problema neste processo construtivo envolve o acesso do operário aos lugares mais confinados e sua consequente influência na qualidade da soldagem. Cabe ressaltar ainda que, em alguns casos, observa-se alguma dificuldade para o posicionamento das máquinas de solda (MIG ou TIG) nas proximidades da junta a ser soldada. Isso consome demasiado tempo, além de proporcionar risco à qualidade da solda.



Figura 4: Método construtivo: posicionamento das cavernas.

2.1 LIGAS DE ALUMÍNIO UTILIZADAS NA CONSTRUÇÃO DE EMBARCAÇÕES

As ligas de alumínio são classificadas com base nos elementos que são adicionados ao alumínio puro (series 1xxx a 7xxx) e atribuem propriedades únicas ao material. Além disso são agrupadas com base no processo de fabricação e nos mecanismos de obtenção de propriedades mecânicas por tratamento térmico ou por conformação a frio.

As ligas da família 5000 (Al-Mg) obtêm suas propriedades por solução sólida dos elementos de liga e também por trabalho a frio além disso são as mais importantes deste grupo por apresentarem uma relativa alta resistência após a solda e boa soldabilidade. Ao soldar-se estas ligas se ultrapassa facilmente a temperatura de recozimento do material em certas áreas da zona termicamente afetada (ZTA) e uma vez que a recristalização ocorre rapidamente, em especial no metal encruado, a resistência mínima desta zona será bem próxima da resistência da liga na condição totalmente recozida. Desta forma deve-se tratar a resistência à tensão máxima do material após a solda como a resistência à tensão máxima do material base recozido. Entretanto, para muitas ligas da família 5000 esta resistência do material recozido é relativamente alta.

As propriedades das ligas após a solda devem ser claramente conhecidas, visto que em relação ao aço há uma regra geral: uma boa solda é mais resistente que o material-base. Todavia, no caso de algumas ligas de alumínio o oposto ocorre.

O alumínio possui algumas propriedades que tornam sua soldagem diferente da soldagem dos aços, tais como:

- A formação de um filme de óxido de alumínio na superfície;
- A alta condutividade térmica do material;
- O alto coeficiente de expansão térmica do material;
- A baixa temperatura de fusão do material;
- A ausência de mudança de cor quando a temperatura se aproxima da de fusão.

O alumínio é um metal ativo e reage com o oxigênio do ar produzindo óxido em sua superfície. O ponto de fusão do óxido é de aproximadamente 1926 °C, diferentemente dos

660 °C do alumínio, ou seja, uma temperatura 2,95 vezes maior. Além disso, o óxido de alumínio absorve vapor d'água do ar, sendo assim uma fonte de hidrogênio que é uma das causas da porosidade presente em juntas de solda de alumínio. O hidrogênio entra na poça de fusão e é solúvel no alumínio derretido. Quando o alumínio se solidifica, este suporta menos hidrogênio na solução e o hidrogênio é expulso durante a solidificação, causando a porosidade. O problema decorrente da porosidade é a redução da resistência da solda e a sua ductilidade.

Outro possível defeito na solda ocorre caso não se retire a camada de óxido da superfície a ser soldada. Pelo fato de o ponto de fusão do óxido ser mais alto que o da liga de alumínio, o óxido fica preso na poça de fusão, ocasionando uma falta de fusão. Como consequência ocorre a redução na ductilidade, que pode resultar na formação de trincas. A solda deve ser feita o mais rápido possível (no máximo até oito horas) após a camada de óxido ter sido removida a fim de se obter uma solda de boa qualidade. Depois deste período a qualidade da solda decresce devido à evolução da espessura da camada de óxido.

Outras características que diferenciam as soldas em alumínio das soldas em aço são a sua alta condutividade térmica (propriedade que leva a optar por uma forma diferente na montagem dos blocos) e sua baixa temperatura de fusão. O alumínio conduz o calor de 3 (três) a 5 (cinco) vezes mais rápido que os aços, dependendo da liga. Por isso, é necessário adicionar mais calor ao alumínio. É fundamental a utilização de processos de soldagem rápidos, como MIG.

As ligas selecionadas para este projeto pertencem à família 5xxx e são ligas encontradas comercialmente no Brasil e tem como propriedades:

Tabela 1: Propriedades das ligas usualmente utilizadas na construção naval.

Ligas	Tensão de Escoamento (sem solda) MPa	Tensão de Escoamento (pós-solda) MPa	Tensão Última (pós-solda) MPa	Módulo de Elasticidade MPa	Peso Específico t/m ³	Custo R\$/kg
5052	65	65	170	72.000	2,68	15,0
5083-O	145	145	170	72.000	2,66	18,0
5083-H111	145	145	269	72.000	2,66	20,0
5083-H32	305	165	276	72.000	2,66	22,0

As propriedades das ligas da Tabela 1 foram retiradas regras impostas pela classificadora ABS para a classificação de materiais Rules For Materials and Welding - Part 2 Aluminium and Fiber Reinforced Plastics (FRP) - 2013. A designação "pós-solda" encontrada na tabela se refere a tensão mínima de escoamento e última que as ligas deverão apresentar após serem soldadas.

Ligas de AlMg são dúcteis no estado recozido, mas endurecem rapidamente sob trabalho a frio e tem alta resistência à corrosão em ambientes marítimos. Em geral a resistência mecânica aumenta com os teores crescentes de Mg. O alumínio 5083 contém de 3

a 5% de adição de cromo e manganês, apresentando as melhores características das ligas de alumínio semiacabados da série 5000. Garante uma boa soldabilidade, além de oferecer uma interessante resistência a corrosão, sobretudo na atmosfera marinha.

As ligas da família 5052, apesar de sua ótima soldabilidade e resistência a corrosão em atmosfera marinha, se encontram em um patamar bem inferior ao avaliar-se a tensão de escoamento após a solda. O baixo valor do limite de tensão de escoamento dessa liga no estado recozido resulta no aumento dos escantilhões, visto que tal limite é imposto pelas sociedades classificadoras para o dimensionamento da estrutura.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho teve por objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta de projeto aplicada à análise preliminar do peso de material e dos respectivos custos de material e de construção da estrutura de um catamarã de alta velocidade. Para tal, foi desenvolvida uma ferramenta de projeto através da planilha de cálculo Microsoft Excel, versão 2010, tendo por base as regras da sociedade classificadora ABS - American Bureau of Shipping, para embarcações de alta velocidade (ABS, 2013).

A ferramenta de projeto desenvolvida oferece recursos para a determinação das espessuras mínimas do chapeamento, das alturas mínimas das almas dos reforçadores longitudinais e transversais, bem como a comparação entre os valores de módulos de seção longitudinal/transversal requeridos e projetados. Além disso, a planilha possibilita o cálculo do peso da estrutura e seus respectivos custos de aquisição e de construção de forma simplificada, tendo por base as características do material e da topologia estrutural.

A planilha de cálculo possui onze (11) variáveis independentes, cujos valores podem ser alterados em busca da solução mais eficiente. O processo de busca da melhor solução foi automatizado através de uma rotina em VBA – Visual Basics for Applications, a qual realiza uma varredura de todas as possibilidades de topologia estrutural para a embarcação em análise.

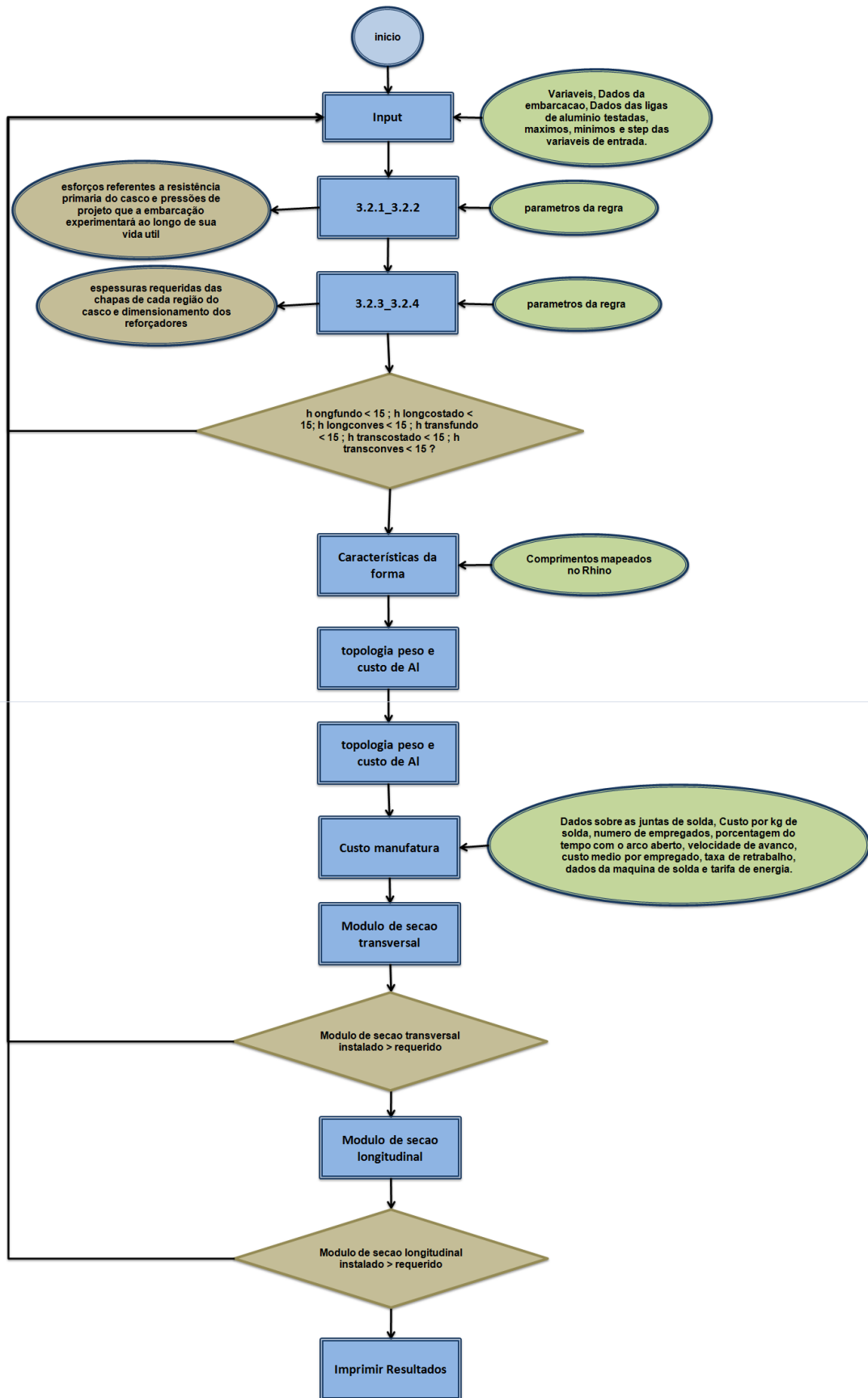


Figura 5: Fluxograma de cálculo da ferramenta de projeto.

4. DESCRIÇÃO DA FERRAMENTA DE PROJETO

A ferramenta de projeto desenvolvida possui onze (11) variáveis independentes, cuja variação permite a determinação da solução mais eficiente em termos dos custos de material e de construção da estrutura. As variáveis independentes incluem as seguintes características do projeto estrutural da embarcação:

- O espaçamento de cavernas;
- O espaçamento entre os reforçadores longitudinais de fundo e convés;
- O espaçamento entre os reforçadores longitudinais de costado;
- A espessura dos reforçadores transversais de costado;
- A espessura dos reforçadores transversais convés;
- A espessura dos reforçadores transversais fundo;
- A espessura dos reforçadores longitudinais de costado;
- A espessura dos reforçadores longitudinais convés;
- A espessura dos reforçadores longitudinais fundo;
- A liga de alumínio utilizada para o chapeamento;
- A liga de alumínio utilizada para os reforçadores.

Estabelecidas as características da embarcação e os respectivos valores limite das variáveis independentes, a planilha de cálculo realiza uma varredura em busca da solução ótima quanto aos custos de aquisição e de construção. A Figura 5 ilustra o fluxograma de cálculo da ferramenta de projeto.

4.1 A ABA “INPUT”

Nesta aba é realizada a entrada das propriedades da embarcação, bem como a seleção das ligas de alumínio que serão consideradas para o cálculo dos parâmetros da regra e dos escantilhões da topologia originalmente arbitrada. Nesta aba também são definidos os valores máximos e mínimos e o passo de variação das variáveis independentes a serem utilizados na varredura da solução. Assim sendo, é possível definir o grau de refinamento e a abrangência da varredura a ser executada.

Uma decisão importante feita nesta aba envolve a definição da liga de alumínio a ser utilizada na construção da embarcação. O material a ser utilizado pode ser selecionado de forma independente para o chapeamento do casco e para os reforçadores. Independentemente da configuração estabelecida, todas as combinações de ligas de alumínio são testadas para ambos os grupos de material: chapeamento e reforçadores.

Nas Figuras 6 a 10 é apresentado um exemplo da configuração da aba “Input”.

COMPRIMENTO	16	m	L	
DISTÂNCIA ENTRE casco	3,4	m	BCL	
DESLOCAMENTO	13,7	ton	DISP	
BOCA DOS casco	1,3	m	BW	
NUMERO DE CASCOS	2	-	NH	
COMPRIMENTO DOS CASCOS	16	m	LW	
VELOCIDADE DE SERVIÇO	25	knot	V	
TENSÃO DE ESCOAMENTO	165	Mpa	oy	
MÓDULO DE ELASTICIDADE	7,20E+04	MPA	E	
CALADO	0,6	m	D	
COEFICIENTE DE BLOCO	0,54	-	CB	
ESPAÇAMENTO DE LONGITUDINAIS DO COSTADO	300	mm	_sc	
ESPAÇAMENTO DE LONGITUDINAIS DO FUNDO E CONVÉS	150	mm	_s	
ESPAÇAMENTO DE CAVERNAS	1250,00	mm	LCAV	

Figura 6: Dados da Embarcação.

Espressuras casco	espessuras (mm)		espessuras reais	
t fundo	3,16		4,00	mm
tcostado	4,63		5,00	mm
t conveses	2,91		3,00	mm
t antepara	2,60		3,00	mm
alturas e espessuras reforços	longitudinais			
	h (cm)	t (mm)		
Fundo	15	5		
costado	15	4		
convés	7	3		
	transversais			
	h (cm)	t (mm)		
Fundo	11	4		
costado	6	4		
convés	5	3		

Figura 7: Espessuras dos elementos estruturais: casco e reforçadores.

longitudinais				
ESPACAMENTO (mm)	Minimo	Maximo	step	iteracoes
S	100	600	100	5
Sc	200	1000	100	8
NUMERO DE REFORCADORES:	Minimo	Maximo		
Fundo meio casco	1	6		
Costado	1	6		
Conves meio casco	1	6		
flat cross metade	2	17		
transversais				
ESPACAMENTO (mm)	Minimo	Maximo	step	iteracoes
lcav	500	3000	250	10
NUMERO DE REFORCADORES:	Maximo	Minimo	step	iteracoes
cavernas	32	4	1	28
LONGITUDINAIS (mm)				
	min	max	step	iteracoes
tlfun	4	5	1	1
tlcost	4	5	1	1
tlconv	3	4	1	1
TRANSVERSAIS				
	min	max	step	
ttfund	4	5	1	1
ttcost	4	5	1	1
ttconv	3	4	1	1

Figura 8: Valores máximos, mínimos e taxa de variação das variáveis de entrada.

variaveis de entrada				min	max	step	iteracoes
seletor de liga casco	3		ligcasco	1	3	1	2
seletor de liga reforçadores	3		ligrefor	1	3	1	2
		tensao de esc pos solda	tensao de esc sem solda	tensao ultima pos solda	E	desidade	preco
id	ligas	mpa	mpa	mpa	MPA	ton/m3	R\$/ton
1	5083-O	145	145	170	72000	2,66	0,018
2	5083-H111	145	145	269	72000	2,66	0,02
3	5083-H32	165	305	276	72000	2,66	0,022
4	5086-H112	117	125	241	71000	2,66	0,02
5	5456-H116	179	230	290	72000	2,66	
6	5454-H34	110	200	214	70000	2,69	
7	5086-O	100	117	241	71000	2,66	

Figura 9: Propriedades das ligas de alumínio e respectivos controles.

mod secao long							
RESULTADOS :		meia secao				requeridos	
Área de al meia seção:	1116,20	cm2				Momento de Inércia :	73,21 cm ² m ²
Altura da linha neutra:	1,11	m				Módulo de Seção :	87,66 cm ² m
Momento de Inércia meia:	77,43	cm ² m ²					
Módulo de Seção meiaA:	69,53	cm ² m		secao completa	139,06		cm ² m
secao transversal							
RESULTADOS :		meia secao				requeridos	
Área de al meia seção:	608,92	cm2				Momento de Inércia :	85,92 cm ² m ²
Altura da linha neutra:	1,64	m				Módulo de Seção :	102,88 cm ² m
Momento de Inércia meia:	86,99	cm ² m ²					
Módulo de Seção meiaA:	52,94	cm ² m		secao completa	105,87		cm ² m
peso total de aluminio			4,938	ton			
custo de aluminio			R\$ 102.824,33				
custo de manufatura			R\$ 56.550,74				

Figura 10: Resultados impressos na aba Input.

4.2 A ABA “3.2.1_3.2.2”

Nesta aba são aplicados os procedimentos de cálculo sugeridos na Parte-3, Capítulo-2, Seção-1 e na Parte-3, Capítulo-2, Seção-2 das regras para embarcações de alta velocidade segundo ABS (2013).

Na Seção-1 são calculados os esforços referentes à resistência primária do casco, ou seja, a embarcação é modelada como uma viga por ter uma dimensão que se destaca em relação às outras. Nesta seção são determinados os valores do módulo de seção requerido e do momento de inércia requerido da viga navio para os esforços transversais e longitudinais. Nas Figuras 11 e 12 são apresentados exemplos dos cálculos dos módulos de seção requeridos e respectivos momentos de inércia.

Na Seção-2 são calculadas as pressões de projeto que a embarcação experimentará durante a operação. A forma de calcular as pressões varia de acordo com a região do casco que esta sendo considerada e o fenômeno físico considerado no cálculo. As regiões da embarcação a serem consideradas são: fundo, convés, costado e antepara estanke. Os fenômenos físicos se dividem em estáticos e dinâmicos, tendo como principal carga estática as pressões hidrostáticas causadas pelo mar ou por algum líquido ou granel que seja transportado em um tanque estrutural.

PARTE 3 - CONSTRUÇÃO DO CASCO
CAPÍTULO 2 - ARRANJO ESTRUTURAL DO CASCO
SEÇÃO 1 - RESISTÊNCIA PRIMÁRIA DO CASCO

1.1.1 - MÓDULO DE SEÇÃO REQUERIDO - TODAS AS EMBARCAÇÕES

$$SM = C_1 C_2 L^2 B (C_3 + 0.7) K_3 C Q$$

ONDE:

$$C1 = C_1 = 0.044L + 3.75$$

$$C2 = C_2 = 0.01$$

L = Comprimento embarcação

$$K3 \quad K_3 = \left(0.70 + 0.30 \left[\frac{V/\sqrt{L}}{2.36} \right] \right)$$

C = C = 1.0 for steel craft, 0.90 for aluminum craft

Q = Q for aluminum:

$$= 0.9 + q_5$$

Qo

1,09

$$q_5 = 115/\sigma_y$$

V = velocidade da embarcação

B = boca da embarcação

Cb = coeficiente de bloco

Figura 11: Cálculos do módulo de seção.

1.5 - MOMENTO DE INÉRCIA REQUERIDO DA VIGA NAVIO

$$I = \frac{L}{QC} \frac{SM}{K} \text{ cm}^2 \cdot \text{m}^2$$

ONDE:

$$K = 13,33$$

TABLE 2
Factor, K

L (m, ft)	Steel	Aluminum
Restricted Service L < 61 m (200 ft)	50	13.33
Unrestricted Service L ≤ 61 m (200 ft)	40	13.33

3.3 - CARGAS TRANSVERSAIS EM CATAMARÃ

$$MTB \quad M_{tb} = K_1 \Delta B_{cl} (1 + n_{cg}) \quad \text{fletor}$$

$$MTT \quad M_{tt} = K_2 \Delta L (1 + n_{cg}) \quad \text{torçor}$$

$$SM \quad SM = \frac{M_t C Q}{f_p} \text{ cm}^2 \cdot \text{m}$$

$$I \quad I = \frac{L}{QC} \frac{SM}{K} \text{ cm}^2 \cdot \text{m}^2$$

ONDE:

$$K1 \quad K_1 = 2.5$$

$$K2 \quad K_2 = 1.25$$

Figura 12: Procedimentos de cálculo segundo as regras da Seção 1 (ABS, 2013).

PARTE 3 - CONSTRUÇÃO DO CASCO
CAPÍTULO 2 - ARRANJO ESTRUTURAL DO CASCO
SEÇÃO 2 - PRESSÕES DE PROJETO

3.1.1 - PRESSÃO DE SLAMMING NO FUNDO

PBCG	70,74 kN/m ²	$P_{bcg} = \frac{N_1 \Delta}{L_w N_h B_w} [1 + n_{cg}] F_D$
------	-------------------------	---

3.1.2 - PRESSÃO DE SLAMMING NO FUNDO - EMBARCAÇÕES MENORES QUE 61m

PBXX	70,74 kN/m ²	$P_{bxx} = \frac{N_1 \Delta}{L_w N_h B_w} [1 + n_{cg}] F_D F_V$
------	-------------------------	---

3.1.3 - PRESSÃO HIDROSTÁTICA

PD	30,52 kN/m ²	$P_d = N_3 (0.64H + d)$	
----	-------------------------	-------------------------	--

3.1.3 - PRESSÃO HIDROSTÁTICA

PD	30,52 kN/m ²	$P_d = N_3 (0.64H + d)$	
----	-------------------------	-------------------------	--

ONDE:

NCG	2,90		longitudinal	
	2,99		Ad=	3750,00 cm ²
				2250,00 cm ²
			Ar=	158691,67
NXX	2,90			6,40
N1	0,10	$N_1 = 0.1 (0.01, 0.069)$		0,60
N2	0,01	$N_2 = 0.0078$		
N3	9,80	$N_3 = 9.8 (1.0, 0.44)$		
H	3,93 m	$H =$ wave parameter, $0.0172L + 3.653$ m		3,15
h1/3	2,50 m	$h_{1/3} =$ significant wave height, m (ft),		
FD	0,55	$F_D =$ design area factor given in 3-2-2/Figure 6 for given values of A_D and A_R . Generally not to be taken less than 0.4. See 3-2-2/Table 2 for minimum values of F_D for craft less than 24 m (79 ft) in length.		
FV	1,00	$F_V =$ vertical acceleration distribution factor		

Figura 13: Procedimentos de cálculo das pressões hidrostáticas e de “slamming”.

No caso de embarcações com sustentação dinâmica e alta velocidade o fenômeno de “slamming” tem influência fundamental na pressão exercida no chapeamento do casco e nos reforçadores. Este fenômeno ocorre quando a proa da embarcação sai completamente da água e retorna provocando um impacto de alta intensidade nesta região. Tais impactos podem resultar em cargas de grande magnitude no casco da embarcação. Na Figura 13, é apresentado um exemplo dos cálculos das pressões de “slamming” e hidrostática.

A obtenção dos parâmetros cujos valores são apresentados graficamente foi automatizada através do ajuste de curvas aos dados originais. Um exemplo disto é o fator de Áreas F_D , cujo ajuste é apresentado na Figura 14. Já a razão de áreas utilizada na definição deste fator é condicionada à configuração longitudinal ou transversal utilizada na topologia originalmente arbitrada para o casco. A seleção desse valor também foi automatizada tal como ilustrado na Figura 15.

FIGURE 3
Design Area Factor F_D

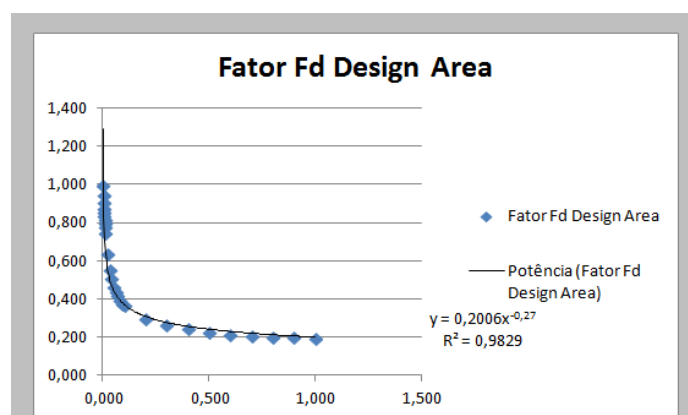
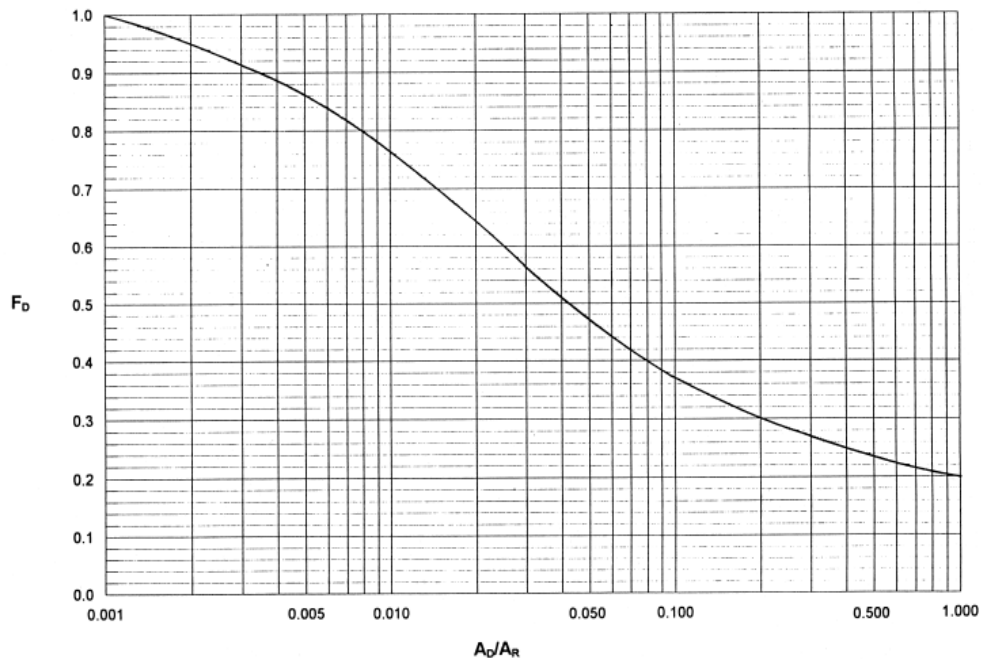


Figura 14: Ajuste do Fator de áreas F_D .

longitudinal		transversal	
Ad=	3750,00 cm ²	Ad=	3750,00 cm ²
	2250,00 cm ²		5156,25 cm ²
Ar=	158691,67	Ad/Ar-long	0,02
	6,40	Ad/Ar-trans	0,03
	0,60	Ad/Ar=	0,02

3.3 - PRESSÕES DE PROJETO NOS COSTADOS		$P_{max} = \frac{N_1 \Delta}{L_w N_k B_w} [1 + n_{xx}] \left[\frac{70 - \beta_{xx}}{70 - \beta_{cf}} \right] F_D \text{ kN/m}^2$	
PS	24,25 kN/m ²	$p_z = N_3 (H_z - y)$	Pressao Slaming maxi 70,74 kN/m ²
Y	0,64 m	0,64	$D + 1.22 (D + 4)$
HS	3,11 m	$H_z = 0.083L + d \text{ in meters}$	3,11
3.5 - WET DECK		1,93	
PWD	0,06 kN/m ²	$P_{wd} = 30N_1 F_D F_I V V_f (1 - 0.85h_d/h_{1/3})$	
9.3 - ANTEPARA ESTANQUE			
PW	15,68 kN/m ²	$p_w = N_3 h$	
HW	1,60 m		
7 - CONVESES			
		2,36 kN/m ²	
PD2	13,16 kN/m ²	SUPERIOR	tab4

Figura 15: Procedimentos para o cálculo da razão de áreas e das pressões no casco.

4.3 A ABA “3.2.3_3.2.4”

Nesta aba são aplicados os procedimentos de cálculo sugeridos na Parte-3, Capítulo-2, Seção-3 e na Parte-3, Capítulo-2, Seção-4 das regras para embarcações de alta velocidade segundo ABS (2013).

Na Seção-3 são calculadas as espessuras requeridas das chapas de cada região que compõe o casco: fundo, costado, convés e anteparas. O procedimento sugerido impõe a adoção dois critérios para a definição da espessura requerida:

- O primeiro critério leva em consideração os valores de pressão hidrostática e de “slamming” (vide Seção-3, aba "3.2.1_3.2.2") para a região em questão, a tensão limite de escoamento do material e um fator calculado a partir da razão entre o espaçamento de cavernas e o espaçamento entre reforçadores longitudinais. A planilha faz o teste automaticamente e

seleciona o fator de acordo com a configuração da topologia adotada, longitudinal ou transversal. Para definir automaticamente o coeficiente de razão de aspecto (K) é ajustado um polinômio de segundo grau que representa de forma satisfatória os dados da tabela, como pode ser visto na Figura 16.

- O segundo critério utiliza uma base estatística e faz um cálculo de uma espessura mínima para cada região considerando somente a tensão limite de escoamento após a solda, considerando a liga de alumínio selecionada e o comprimento total da embarcação.

O valor a ser adotado deve ser o maior dentre as espessuras mínimas requeridas calculadas (Figura 17).

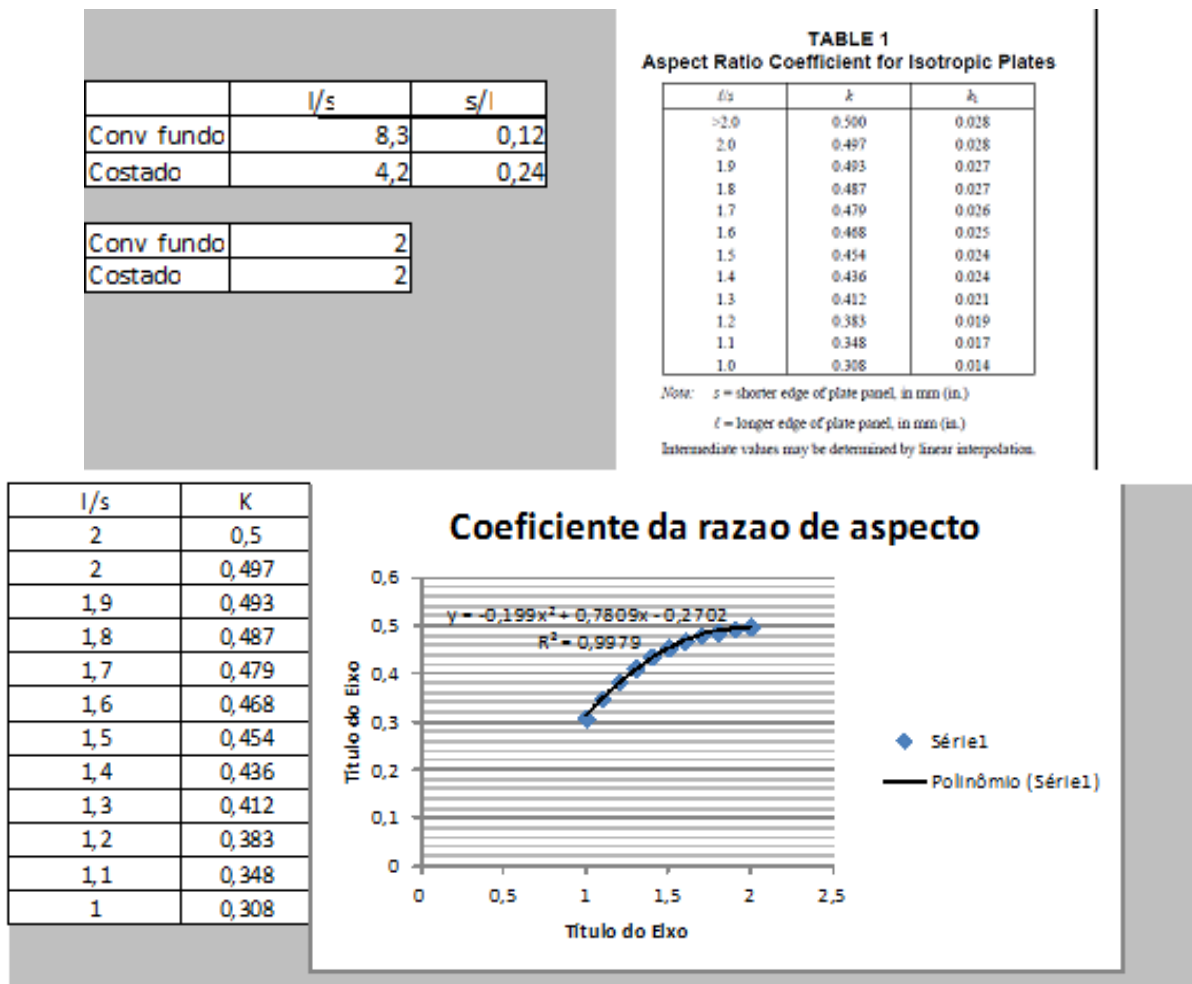


Figura 16: Ajuste do coeficiente de razão de aspecto.

PARTE 3 - CONSTRUÇÃO DO CASCO
CAPÍTULO 2 - ARRANJO ESTRUTURAL DO CASCO
SEÇÃO 3 - CHAPEAMENTO

1.3 - ESPESSURAS

1.3.1 - NÃO DEVEM SER INFERIORES A $t = s \sqrt{\frac{pk}{1000\sigma_a}}$ mm

ONDE:

P É A PRESSÃO MAIOR CALCULADA NO MEMBRO

K É DEPENDENTE DA RAZÃO DE ASPECTO

S É O ESPACAMENTO ENTRE REFORCADORES

K 0,5 CONVES E FUNDO

k 0,5 COSTADO

NEM INFERIORES A

$$t_d = 0.70 \sqrt{Lq_a} + 1.0 \text{ mm}$$

ONDE:

L É O COMPRIMENTO TOTAL DA EMBARCAÇÃO

q_a É UM FATOR ADIMENSINAL DEPENDENTE

DA TENSÃO LIMITE DE ESCOAMENTO DO MATERIAL UTILIZADO

Figura 17: Procedimento adotado para a determinação das espessuras mínimas.

PARTE 3 - CONSTRUÇÃO DO CASCO
CAPÍTULO 2 - ARRANJO ESTRUTURAL DO CASCO
SEÇÃO 4 - MEMBROS INTERNOS

1.3.1- MÓDULO DE SEÇÃO REQUERIDO $SM = \frac{83.3 \times ps \ell^2}{\sigma_a}$ cm³

1.3.2 - MOMENTO DE INÉRCIA REQUERIDO $I = \frac{260 ps \ell^3}{K_4 E}$ cm⁴

ONDE:

p É A A MÁXIMA PRESSÃO NA REGIÃO EM QUESTÃO

S É O ESPACAMENTO ENTRE REFORCADORES

ℓ É O VAO QUE SERÁ SUPOSTO PELO REFORCADOR

σ_a É A MÁXIMA TENSÃO ADMITIDA NA REGIÃO ESTUDADA

E É O MÓDULO DE ELASTICIDADE DA LIGA TESTADA

K₄ É UM FATOR QUE VARIA DE ACORDO COM A REGIÃO ESTUDADA

Figura 18: Procedimentos para o cálculo dos valores do módulo de seção e inércia requeridos.

Na Seção-4 são dimensionados os reforçadores do chapeamento do casco. O procedimento sugerido atribui valores mínimos ao módulo de seção e à inércia dos reforçadores nas diferentes áreas da embarcação, conveses, fundo e costado. O cálculo dos módulos de seção mínimos requeridos é feito a partir das pressões nas diferentes áreas do casco, da tensão de escoamento da liga utilizada, do vão sustentado pelo reforçador e do espaçamento entre reforçadores. O cálculo da inércia mínima requerida de cada reforçador é obtido de maneira similar, porém utiliza-se o módulo de elasticidade do material e um fator K4 que varia de acordo com a região do casco que esta sendo tratada. Desta forma, obtém-se os valores requeridos mínimos para estas propriedades. Na Figura 18 é apresentado procedimento para o cálculo do modulo de seção mínimo requerido e da inércia mínima requerida.

Para automatizar o dimensionamento dos reforçadores foi adotada somente uma geometria de seção transversal, a qual pode ser vista na Figura 19. A geometria escolhida foi uma barra chata que tem duas dimensões principais: a altura e a espessura. Utilizando os valores dos módulos de seção e de inércia mínimos calculados e as espessuras dos reforçadores de cada região, os quais são definidos como variáveis de entrada, são obtidas as alturas mínimas dos reforçadores. Na Figura 20 são ilustrados os resultados obtidos na aba “3.2.3_3.2.4”.

Os procedimentos contidos nas abas 3.2.1_3.2.2 e 3.2.3_3.2.4 permitem o dimensionamento preliminar da topologia estrutural da embarcação. Nas seções seguintes, são descritos os procedimentos adotados para as estimativas do peso estrutural e respectivos custos de material e de fabricação do casco embarcação.

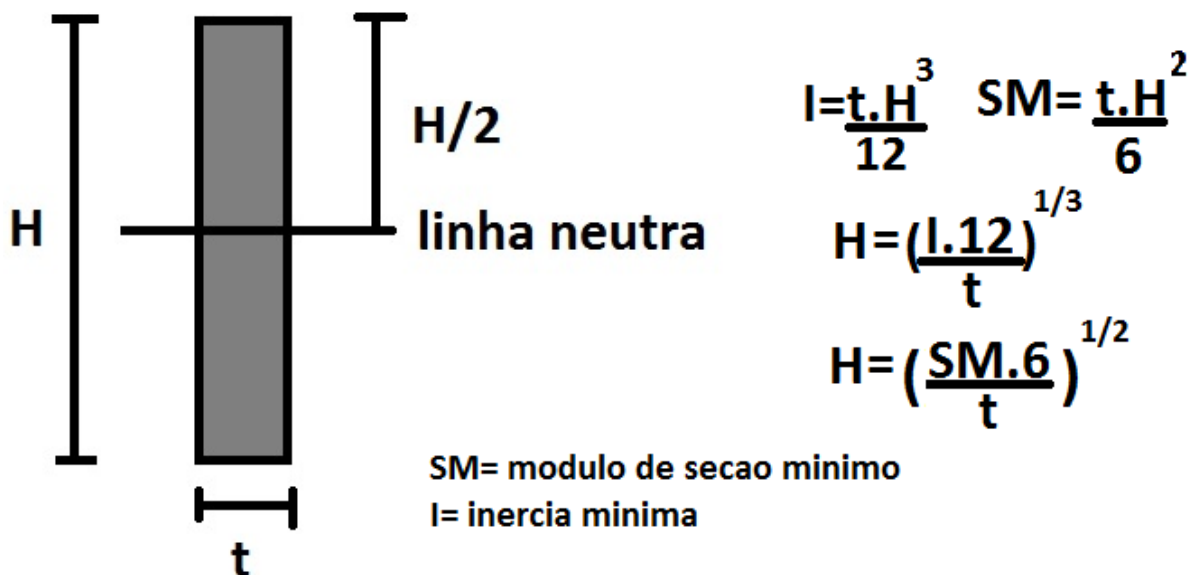


Figura 19: Procedimento para o cálculo da altura mínima dos reforçadores.

resultados				
Espessuras casco		espessuras (mm)		espessuras reais
t fundo		3,49	4,00	mm
t costado		4,94	5,00	mm
t conveses		3,21	3,50	mm
t antepara		2,85	3,50	mm
alturas e espessuras reforços		longitudinais		
		h (cm)	t (mm)	
Fundo		15	5	
costado		15	4	
convés		7	3	
		transversais		
		h (cm)	t (mm)	
Fundo		11	4	
costado		6	4	
convés		5	3	

Figura 20: Resultados apresentados na ABA“3.2.3_3.2.4”.

4.4 A ABA “CARACTERÍSTICAS DA FORMA”

Para a determinação do peso e respectivos custos de material e construção da estrutura é necessário adicionar à planilha os dados referentes à geometria do casco da embarcação em análise. Os valores das áreas do chapeamento de cada região do casco devem ser adicionadas diretamente à planilha. O casco é dividido em quatro áreas: fundo, costado, convés principal e convés superior como pode ser visto na Figura 21.

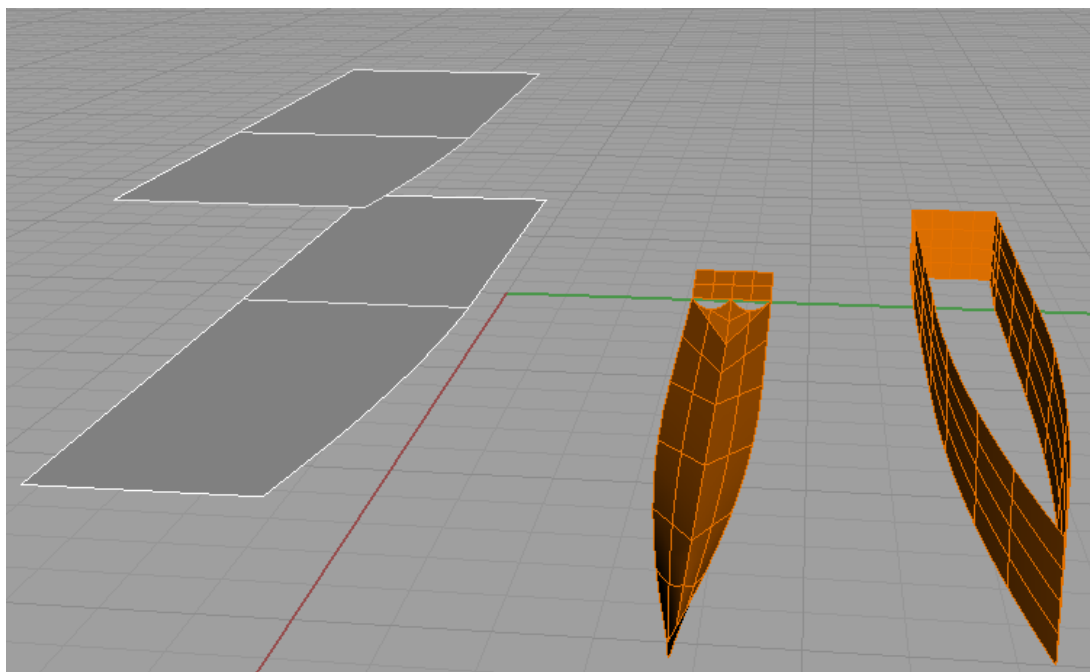


Figura 21: Divisão de áreas do casco.

Para a obtenção do comprimento de cada reforçador o casco é mapeado por cortes de balizas, com espaçamento de 25,0 centímetros, e cortes de linhas d'água e linhas do alto com espaçamentos de cinco 5,0 centímetros. Com esse procedimento tem-se o comprimento de cada reforçador da embarcação segundo os espaçamentos de cavernas e os espaçamentos entre reforços longitudinais múltiplos da distância entre cortes mapeados. O pequeno espaçamento entre os cortes mapeados permitiu um refinamento satisfatório da geometria da embarcação e conseqüentemente da varredura a ser realizada. Um exemplo da inclusão dos dados na planilha pode ser visto na Figura 24.

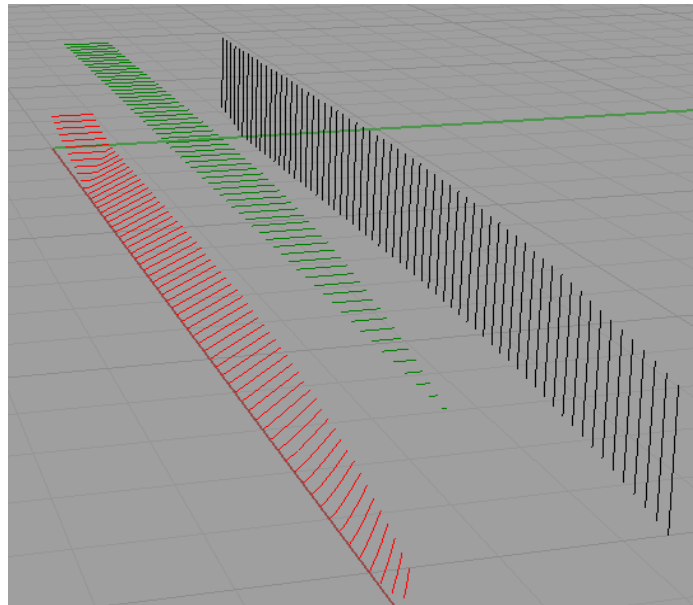


Figura 22: Mapeamento dos comprimentos transversais do casco.

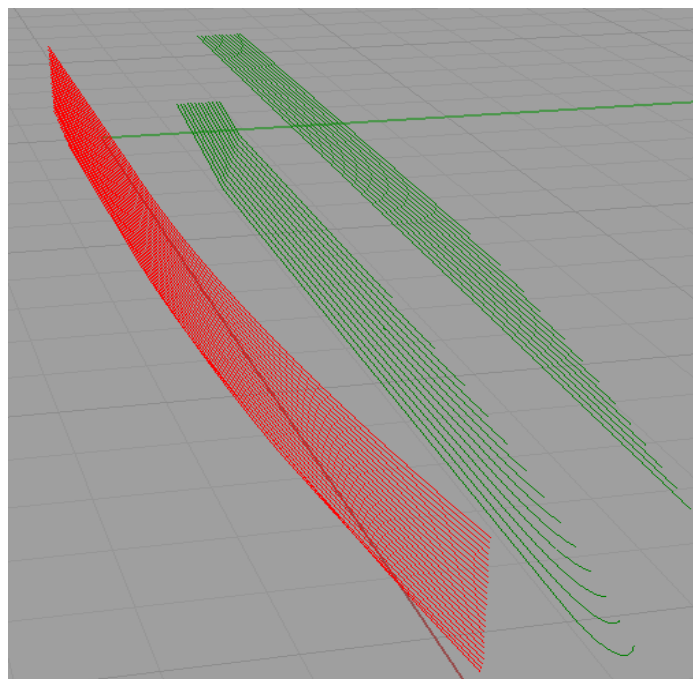


Figura 23: Mapeamento dos comprimentos longitudinais do casco.

ÁREAS DE UM CASCO (METADE EMBARCACAO)	
	AREA (m2)
FUNDO	18,91
COSTADO	42,03
CONVES 1	46,09
CONVES 2	35,46

Figura 24: Exemplo do input das áreas do casco na planilha.

COMPRIMENTOS DOS REFORCADORES			
Fundo longitudinais		conves longitudinais	
posicao Y (cm)	Lreforco (m)	posicao Y (cm)	Lreforco (m)
0	16,18	0	16
5	15,75	5	15,66
10	15,34	10	15,3
15	14,92	15	14,93
20	14,49	20	14,54
25	14,03	25	14,12
30	13,54	30	13,68
35	13	35	13,2
40	12,42	40	12,69
45	11,75	45	12
50	10,96	50	11,48
55	9,95	55	10,72
60	8,35	60	9,74

fundo transv		costado transv	
posicao X (cm)	Lreforco (m)	posicao X (cm)	Lreforco (m)
0	0,625	1	0
25	0,624	2	25
50	0,623	3	50
75	0,622	4	75
100	0,621	5	100
125	0,622	6	125
150	0,631	7	150
175	0,641	8	175
200	0,651	9	200
225	0,66	10	225
250	0,67	11	250
275	0,68	12	275
300	0,69	13	300
325	0,69	14	325
350	0,69	15	350
375	0,69	16	375
400	0,69	17	400
425	0,69	18	425
450	0,69	19	450
475	0,69	20	475

Figura 25: Exemplo do input dos comprimentos mapeados na planilha.

4.5 A ABA “TOPOLOGIA PESO E CUSTO DE ALUMÍNIO”

Com o casco mapeado tem-se informação do comprimento (L) de um reforçador tendo somente sua posição. O comprimento dos reforçadores e as áreas do chapeamento são utilizados na próxima etapa, na qual é calculado o volume de material necessário à construção do casco da embarcação. Este cálculo é dividido em três partes: cálculo do volume de material utilizado no chapeamento externo, cálculo do volume de material utilizado nos reforçadores longitudinais e cálculo do volume de material utilizado nos reforçadores transversais.

- Volume do Chapeamento Externo:

O cálculo do volume do chapeamento externo é realizado de forma simples: a área do chapeamento de uma dada região é multiplicada pela respectiva espessura obtida na aba "3.2.3_3.2.4", tal como ilustrado na Figura 26.

chapeam. DE UM CASCO (METADE EMBARCACAO)			
	AREA (m2)	t(m)	vol (m3)
FUNDO	18,91	0,004	0,07564
COSTADO	42,03	0,005	0,21015
flat cross	46,09	0,0035	0,161315
CONVES 2	35,46	0,0035	0,12411

Figura 26: Cálculo do volume de material do chapeamento do casco.

- Volume dos Reforçadores Longitudinais:

Para o cálculo do volume dos reforçadores longitudinais é estabelecido um espaçamento mínimo entre reforçadores para que a planilha possa ser automatizada. O espaçamento mínimo estabelecido foi de 100 milímetros. Este valor não entra como variável de entrada, somente estabelece um número máximo de reforçadores para os quais a embarcação poderá ser testada.

A planilha é programada para calcular, a partir do espaçamento de reforçadores longitudinais do convés, do fundo e do costado estabelecidos como variável de entrada na aba "input", o número de reforçadores que estarão presentes em cada região da topologia testada e a sua posição no casco. Com essas informações, a planilha busca automaticamente o comprimento do reforçador na aba "Características da Forma" e o associa à identificação do reforçador.

Para cada topologia haverá um dado número de reforçadores para uma dada região do casco e cada reforçador terá seu comprimento associado. Com esses dados, a planilha recorrerá aos resultados da aba "3.2.3_3.2.4" para calcular a área transversal de cada reforço nas diferentes regiões do casco. Ao multiplicar-se a área pelo comprimento tem-se o volume de material de cada reforçador. Na Figura 27 é apresentado um exemplo do cálculo do volume de material referente aos reforçadores longitudinais.

reforçadores Longitudinais (meio casco)		L (m)	area (m2)	vol (m3)	y(m)	z(m)
longitudinal fundo 1 (central)	0	16,18	0,000375	0,006068		0 0,00
longitudinal fundo 2	1	14,92	0,00075	0,01119		0,15 0,07
longitudinal fundo 3	2	13,54	0,00075	0,010155		0,3 0,15
longitudinal fundo 4	3	11,75	0,00075	0,008813		0,45 0,22
longitudinal fundo 5	4	8,35	0,00075	0,006263		0,6 0,29
longitudinal fundo 6	5	0	0,00075	0		0 0,00
longitudinal fundo 7	6	0	0,00075	0		0 0,00
					y(m)	z(m)
long costado 1	1	16,3	0,0006	0,00978		0,3
long costado 2	2	16,3	0,0006	0,00978		0,6
long costado 3	3	16,3	0,0006	0,00978		0,9
long costado 4	4	16,3	0,0006	0,00978		1,2
long costado 5	5	0	0,0006	0		0
long costado 6	6	0	0,0006	0		0
long costado 7	7	0	0,0006	0		0
long costado 8	8	0	0,0006	0		0
long costado 9	9	0	0,0006	0		0
long costado 10	10	0	0,0006	0		0
long costado 11	11	0	0,0006	0		0
long costado 12	12	0	0,0006	0		0
long costado 13	13	0	0,0006	0		0
					y(m)	z(m)
long conves casco 1 (central)	0	16	0,000105	0,00168		0 1,6
long conves casco 2	1	14,93	0,00021	0,003135		0,15 1,6
long conves casco 3	2	13,68	0,00021	0,002873		0,3 1,6
long conves casco 4	3	12	0,00021	0,00252		0,45 1,6
long conves casco 5	4	9,74	0,00021	0,002045		0,6 1,6
long conves casco 6	5	9,74	0,00021	0,002045		0,75 1,6
long conves casco 7	6	0	0,00021	0		0

Figura 27: Cálculo do volume de material dos reforçadores longitudinais.

- Volume dos Reforçadores Transversais:

O volume de material dos reforçadores transversais é calculado de maneira análoga ao realizado para os reforçadores longitudinais. Neste caso, é adotado como referência um espaçamento mínimo de cavernas é 250 milímetros.

A planilha calcula a partir do espaçamento de cavernas estabelecido como variável de entrada o número de cavernas que estão presentes na topologia testada e a sua posição no casco. Com estas informações, a planilha busca automaticamente o comprimento referente para cada região do casco e o associa à identificação de cada caverna.

Para cada topologia testada haverá um número de cavernas associado e para cada caverna haverá o comprimento de reforçadores de cada região do casco associado. Com esses dados, a planilha recorrerá aos resultados da aba "3.2.3_3.2.4" para calcular a área transversal de cada reforço nas diferentes regiões do casco. Ao multiplicar-se a área pelo comprimento tem-se o volume de material de cada reforço. Na Figura 28 é apresentado um exemplo do cálculo do volume de material dos reforçadores transversais.

Com os três volumes de material calculados, a planilha busca automaticamente na aba "input" o peso específico e o preço de cada liga utilizada no chapeamento do casco e nos reforçadores. Multiplicando o volume de material pelo respectivo peso específico e, posteriormente, pelo custo por unidade de peso da liga de alumínio utilizada é obtido o peso de alumínio da embarcação e o custo de material, respectivamente (Figura 29).

		Reforços transversais			metade do casco		
x(cm)		metade do Fundo			metade costado		
		L (m)	area (m2)	vol (m3)	L (m)	area (m2)	vol (m3)
150	1	0,631	0,00065	0,00041	1,3	0,0004	0,00052
300	2	0,69	0,00065	0,000449	1,3	0,0004	0,00052
450	3	0,69	0,00065	0,000449	1,3	0,0004	0,00052
600	4	0,69	0,00065	0,000449	1,3	0,0004	0,00052
750	5	0,684	0,00065	0,000445	1,298	0,0004	0,000519
900	6	0,662	0,00065	0,00043	1,288	0,0004	0,000515
1050	7	0,619	0,00065	0,000402	1,271	0,0004	0,000508
1200	8	0,554	0,00065	0,00036	1,25	0,0004	0,0005
1350	9	0,479	0,00065	0,000311	1,229	0,0004	0,000492
0	10	0	0,00065	0	0	0,0004	0
0	11	0	0,00065	0	0	0,0004	0
0	12	0	0,00065	0	0	0,0004	0
0	13	0	0,00065	0	0	0,0004	0
0	14	0	0,00065	0	0	0,0004	0
0	15	0	0,00065	0	0	0,0004	0
0	16	0	0,00065	0	0	0,0004	0

Figura 28: Cálculo do volume de material dos reforçadores transversais.

peso chapas um casco (metade embarcacao)		1,519	ton
peso meia secao longitudinais		0,754	ton
peso meia embarc transversais		0,103	ton
peso total meia embarcacao		2,377	ton
peso total de aluminio		4,753	ton
liga casco		20	R\$/kg
liga reforcos		22	R\$/kg
Custo de aluminio		R\$ 98.494,46	

Figura 29: Exemplo de resultados da aba “topologia peso e custo de alumínio”.

4.6 A ABA “CUSTOS MANUFATURA”

Nesta aba é calculado o custo de fabricação da estrutura. A estimativa dos custos é baseada na quantidade de solda a ser depositada na embarcação, no tempo, e na energia gastos para a construção do casco.

O cálculo do volume de material depositado é feito a partir de uma estimativa para a área do cordão de solda de cada junta soldada (como visto nas Figuras 31 e 32), tendo por base a espessura das chapas a serem soldadas e um fator de segurança que considera o retrabalho, o desperdício dos consumíveis e problemas no processo de fabricação. Com essa área estimada e com os dados dos comprimentos dos reforçadores e das juntas de solda,

mapeados na aba "características da forma", é possível fazer o cálculo do volume e do peso do material depositado na soldagem de toda a estrutura.

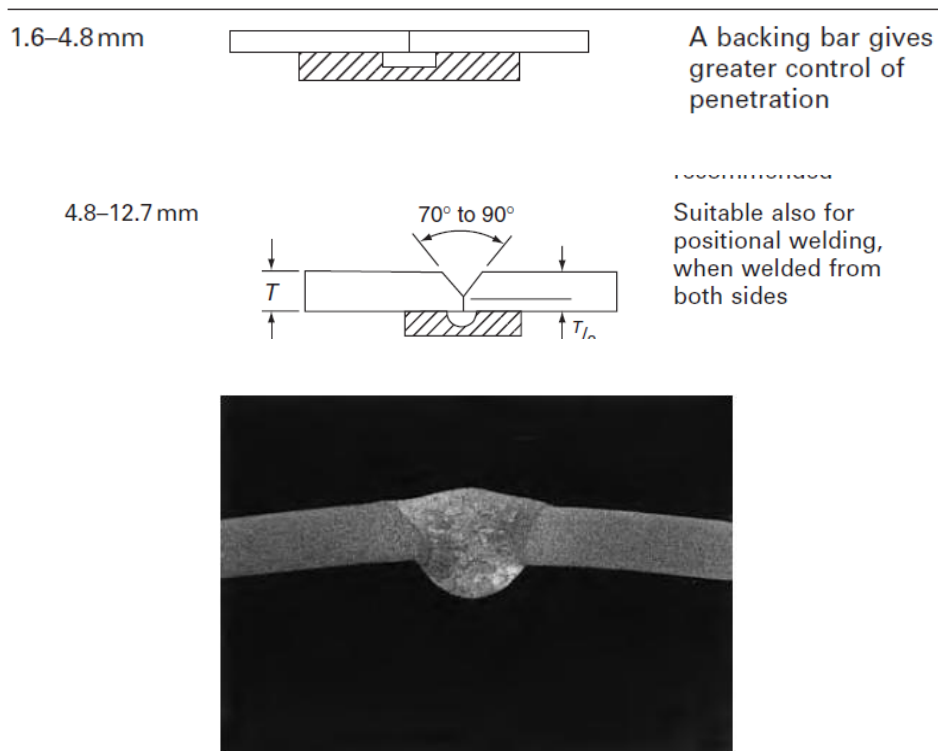


Figura 30: Tipos de juntas de união de Chapas do Casco.

chapeam. DE UM CASCO (METADE EMBARCAÇAO)			
Asolda (m2)	FUNDO	COSTADO	flat cross
FUNDO	0,00002	0,000024	(-)
COSTADO	(-)	0,000022	0,0000126
flat cross	(-)	(-)	0,000012
CONVES 2	(-)	(-)	0,000012
Lsolda (m)	FUNDO	COSTADO	flat cross
FUNDO	19,64	32,6	(-)
COSTADO	(-)	7,57	32,6
flat cross	(-)	(-)	40,428
CONVES 2	(-)	(-)	36,43
Peso solda (Kg)	FUNDO	COSTADO	flat cross
FUNDO	0,85	2,11	(-)
COSTADO	(-)	0,44	1,11
flat cross	(-)	(-)	1,34
CONVES 2	(-)	(-)	1,20
kilos de solda me la embarcacao	7,0538807 kg		

Figura 31: Exemplo do cálculo do peso de solda do chapeamento do casco.

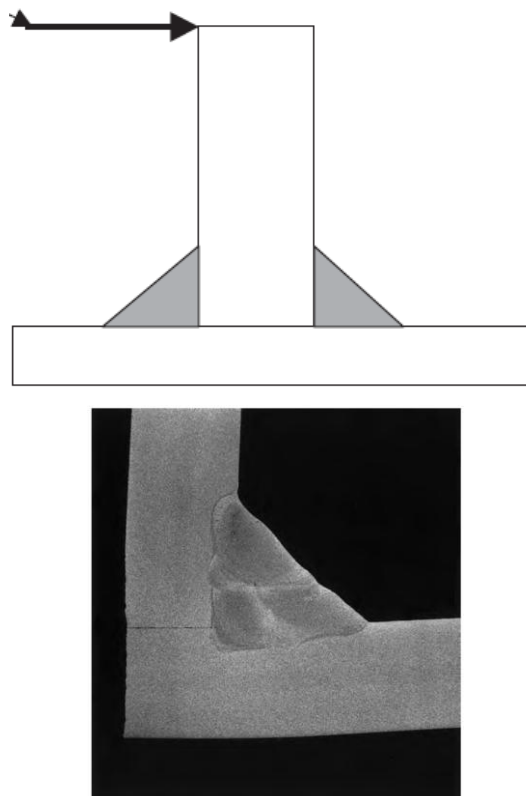


Figura 32: Tipos de juntas reforçadores.

reforçadores Longitudinais (meio casco)		Lsolda (m)	Isolda Long fundo	82,34	m
longitudinal fundo 1 (central)	0	16,18	Asolda (m2)	0,000024	
longitudinal fundo 2	1	14,03	peso soldado	5,335632	kg
longitudinal fundo 3	2	10,96			
longitudinal fundo 4	3	0			
longitudinal fundo 5	4	0			
longitudinal fundo 6	5	0			
longitudinal fundo 7	6	0			
long costado 1	1	16,3	Isolda long costado	97,8	m
long costado 2	2	16,3	Asolda (m2)	0,000036	
long costado 3	3	16,3	peso soldado	9,50616	kg
long costado 4	4	0			
long costado 5	5	0			
long costado 6	6	0			
long costado 7	7	0			
long costado 8	8	0			
long costado 9	9	0			
long costado 10	10	0			
long costado 11	11	0			
long costado 12	12	0			
long costado 13	13	0			
long conves casco 1 (central)	0	16	Isolda long conves	102,68	m
long conves casco 2	1	14,12	Asolda (m2)	0,0000168	
long conves casco 3	2	11,48	peso soldado	4,6575648	kg
long conves casco 4	3	9,74			
long conves casco 5	4	0			
long conves casco 6	5	0			
long conves casco 7	6	0			

Figura 33: Exemplo do cálculo do peso de solda dos reforçadores longitudinais.

A estimativa do tempo de construção é baseada nos parâmetros de soldagem sugeridos por Mathers (2002). Uma estimativa para o tempo de solda efetiva é obtida considerando a velocidade de avanço de soldagem média para as soldas da embarcação e os comprimentos de cada junta soldada mapeados na aba "Características da forma". Este "tempo de solda efetiva" representa uma estimativa do tempo gasto para se realizar uma solda aprovada pela sociedade classificadora. São considerados no custo de fabricação todos os encargos associados aos soldadores e montadores durante o tempo de construção. Este tempo de construção será calculado a partir dos minutos de solda efetiva levando em consideração o tempo ocioso do soldador e o tempo de montagem e preparação das juntas. Também é levado em consideração o tempo de retrabalho, caso algo saia errado na solda ou ela não seja aprovada pela sociedade classificadora e precise ser refeita como pode ser visto na Figura 34.

numero de soldadores	2
numero montadores	2
horas diarias trabalhadas	16 hrs/dia
% tempo com arco aberto	25%
tempo arco aberto	4 hrs/dia
metros de solda casco	507,822 metros
metros de solda reforços	3638,196 metros
velocidade de avanço casco	700 mm/min
velocidade de avanço reforços	600 mm/min
% de retrabalho	50% mm/min
minutos de trabalho	7151,85
horas de trabalho	119,1975 hotas
dias de trabalho	29,799375 dias
meses uteis	1,49 meses
custo medio empregado	R\$ 6.000,00 por mes
custo total empregados	R\$ 35.759,25

Figura 34: Dados utilizados para o cálculo do custo com mão de obra.

maquina esab Smashweld® 318 Plus/408 Plus	
diam do arame	1,00 mm
area do arame	7,85E-07 m2
velocidade do arame	11,25 m/min
vazao de mat de adicao	8,83E-06 m3/min
taxa de deposicao	1,43 kg/h

Figura 35: Características da máquina de solda de referência.

potencia maquina esab Smashweld® 318 Plus/408 Plus	11,8 KVA
energia total gasta para o processo	5626,12 KVAh
tarifa KVA*horas	R\$ 0,27 R\$/KVAh
total gasto com energia	R\$ 1.519,05

Figura 36: Exemplo do cálculo do custo de energia.

Para calcular a energia gasta com a soldagem da embarcação foi selecionada uma máquina de solda que atenda os requisitos do projeto de construção da estrutura (Figura 35). Com base nos dados de potência utilizada pela máquina é feita uma estimativa para a quantidade de energia gasta durante a soldagem e montagem da estrutura e com o custo por unidade de potência se define o custo de energia, conforme ilustrado na Figura 36.

4.7 A ABA “MÓDULO DE SEÇÃO TRANSVERSAL” E ABA “MÓDULO DE SEÇÃO LONGITUDINAL”

Nestas abas são verificados os valores dos módulos de seção das topologias originais segundo os valores requeridos pelas regras da classificadora.

Para o cálculo dos módulos de seção transversais e longitudinais da embarcação e compará-los com os valores requeridos, cada elemento longitudinal ou transversal que contribui para o módulo de seção é modelado. Para que seja possível automatizar o cálculo dos módulos de seção, é considerado inicialmente o número máximo possível de reforçadores que serão testados (em função do espaçamento mínimo entre reforçadores). Como foi feito na aba "topologia, custo e peso de Al", caso o reforçador exista para uma determinada topologia testada, ele é levado em consideração e sua altura deixa de ser zero na planilha de cálculo. As espessuras e alturas da topologia são retiradas dos resultados da aba "3.2.3_3.2.4". Nas Figuras 37 a 39 é demonstrado um exemplo dos cálculos e dos resultados da planilha.

4.8 A ABA “RESULTADOS”

Nesta aba são impressos os resultados obtidos para a topologia estrutural em análise. Foram incluídas na programação da varredura em VBA (Visual Basics For Applications) controles para a impressão dos resultados. Os controles incluídos são baseados em requisitos impostos pelas regras da sociedade classificadora ABS, a saber: ambos os valores dos módulos de seção transversal e longitudinal acima do mínimo requerido. Portanto, se algum dos módulos de seção calculados nas abas "Modulo de Seção Transversal" e "Modulo de Seção Longitudinal" for menor que os requeridos calculados na aba "3.2.1_3.2.2" o resultado não será impresso.

Modulo de secao transversal												
Elemento	ESPESSURA (mm)	ALTURA (mm)	Centro Zg (M)	Ângulo (GRAUS)	Área [cm2]	Iyy	Izz	ângulo rad	Mom.Area	Izz'[mm4]	Izz''[m4]	
bb	longitudinal fundo 1 (central)	5,00	210,00	0,00	0,00	10,50	2,2E+03	3,9E+06	0,00	0,00	3,9E+06	1,9E-07
bb	longitudinal fundo 2	5,00	210,00	0,12	0,00	10,50	2,2E+03	3,9E+06	0,00	1,27	3,9E+06	9,6E-07
bb	longitudinal fundo 3	5,00	210,00	0,24	0,00	10,50	2,2E+03	3,9E+06	0,00	2,54	3,9E+06	3,3E-06
bb	longitudinal fundo 4	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00
bb	longitudinal fundo 5	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00
bb	longitudinal fundo 6	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00
bb	longitudinal fundo 7	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00
be	longitudinal fundo 8	5,00	210,00	0,12	0,00	10,50	2,2E+03	3,9E+06	0,00	1,27	3,9E+06	9,6E-07
be	longitudinal fundo 9	5,00	210,00	0,24	0,00	10,50	2,2E+03	3,9E+06	0,00	2,54	3,9E+06	3,3E-06
be	longitudinal fundo 10	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00
be	longitudinal fundo 11	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00
be	longitudinal fundo 12	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00
be	longitudinal fundo 13	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00
bb	long conves casco 1 (central)	4,00	90,00	1,555	0,00	3,60	4,8E+02	2,4E+05	0,00	5,60	2,4E+05	4,4E-05
bb	long conves casco 2	4,00	90,00	1,555	0,00	3,60	4,8E+02	2,4E+05	0,00	5,60	2,4E+05	4,4E-05
bb	long conves casco 3	4,00	90,00	1,555	0,00	3,60	4,8E+02	2,4E+05	0,00	5,60	2,4E+05	4,4E-05
bb	long conves casco 4	4,00	90,00	1,555	0,00	3,60	4,8E+02	2,4E+05	0,00	5,60	2,4E+05	4,4E-05
bb	long conves casco 5	4,00	0,00	1,600	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00
bb	long conves casco 6	4,00	0,00	1,600	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00
bb	long conves casco 7	4,00	0,00	1,600	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00
be	long conves casco 8	4,00	90,00	1,555	0,00	3,60	4,8E+02	2,4E+05	0,00	5,60	2,4E+05	4,4E-05
be	long conves casco 9	4,00	90,00	1,555	0,00	3,60	4,8E+02	2,4E+05	0,00	5,60	2,4E+05	4,4E-05
be	long conves casco 10	4,00	90,00	1,555	0,00	3,60	4,8E+02	2,4E+05	0,00	5,60	2,4E+05	4,4E-05
be	long conves casco 11	4,00	0,00	1,600	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00
be	long conves casco 12	4,00	0,00	1,600	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00
be	long conves casco 13	4,00	0,00	1,600	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00

Figura 37: Exemplo da planilha de cálculo do módulo de seção transversal

Elemento	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	Centro Zg (M)	Ângulo (GRAUS)	Área [cm2]	Izz	Iyy	ângulo rad	Mom.Area	Izz'[mm4]	Izz''[m4]
C.FUNDO 01	689,00	4,00	0,15	25,85	27,56	1,1E+08	3,7E+03	0,45	4,13	2,1E+07	2,6E-06
C.fundo 2	689,00	4,00	0,15	25,85	27,56	1,1E+08	3,7E+03	0,45	4,13	2,1E+07	2,6E-06
C.costado1	1300,00	5,00	0,95	90,00	65,00	9,2E+08	1,4E+03	1,57	61,75	9,2E+08	2,0E-04
C.costado 2	1300,00	5,00	0,95	90,00	65,00	9,2E+08	1,4E+03	1,57	61,75	9,2E+08	2,0E-04
conves flat bar	3000,00	3,50	1,60	0,00	105,00	7,9E+09	1,1E+03	0,00	168,00	1,1E+03	7,0E-04
C.convesII	3000,00	3,50	3,94	0,00	105,00	7,9E+09	1,1E+03	0,00	413,70	1,1E+03	4,2E-03

secao transversal

RESULTADOS : meia secao

Área de al meia seção: 579,22 cm2

Altura da linha neutra: 1,68 m

Momento de Inércia meia: 88,78 cm²m²

Módulo de Seção meia: 52,72 cm²m

secao completa 105,44 cm²m

requeridos		
Momento de Inércia :	75,81	cm²m²
Módulo de Seção :	90,78	cm²m

Figura 38: Exemplo do resultado da planilha de cálculo do módulo de seção transversal

Elemento	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	Centro Zg (M)	Ângulo (GRAUS)	Área [cm2]	Izz	Iyy	ângulo rad	Mom.Area	Izz'[mm4]	Izz''[m4]
C.FUNDO 01	689,00	0,00	0,00	25,85	0,00	0,0E+00	0,0E+00	0,45	0,00	0,0E+00	0,0E+00
C.fundo 2	689,00	0,00	0,00	25,85	0,00	0,0E+00	0,0E+00	0,45	0,00	0,0E+00	0,0E+00
C.costado1	1300,00	0,00	0,00	90,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00	1,57	0,00	0,0E+00	0,0E+00
C.costado 2	1300,00	0,00	0,00	90,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00	1,57	0,00	0,0E+00	0,0E+00
conves flat bar	16000,00	3,50	0,20	0,00	560,00	1,2E+12	5,7E+03	0,00	112,00	5,7E+03	5,8E-05
C.convesII	12000,00	3,50	2,40	0,00	420,00	5,0E+11	4,3E+03	0,00	1008,00	4,3E+03	6,3E-03

mod secao long

RESULTADOS : meia secao

Área de al meia seção: 1116,20 cm2

Altura da linha neutra: 1,11 m

Momento de Inércia meia: 77,43 cm²m²

Módulo de Seção meia: 69,53 cm²m

secao completa 139,06 cm²m

requeridos		
Momento de Inércia :	73,21	cm²m²
Módulo de Seção :	87,66	cm²m

Figura 39: Exemplo do resultado da planilha de cálculo do modulo de seção longitudinal

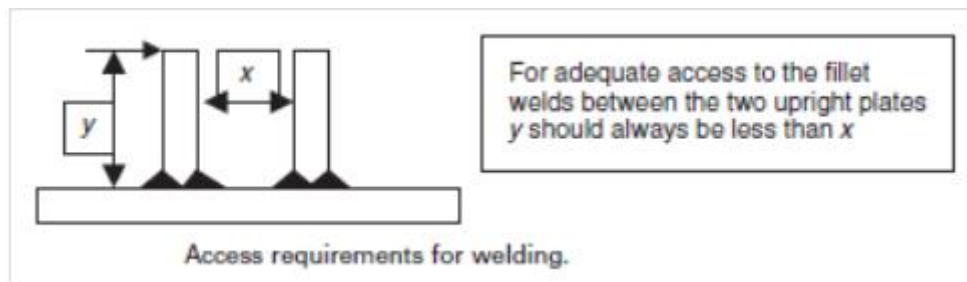


Figura 40: Recomendação para espaçamento mínimo entre reforçadores (Mathers, 2002).

As outras restrições impostas são provenientes de decisões mais avançadas de projeto. Inicialmente se limitou a altura dos reforçadores longitudinais e transversais com base em uma restrição construtiva sugerida por Mathers (2002). O resultado da topologia testada só seria impresso caso a altura do reforçador fosse menor ou igual ao espaçamento entre reforços tal como ilustrado na Figura 40. Após um estudo mais avançado dos arranjos típicos das embarcações estudadas como referência, constatou-se que os reforços longitudinais e transversais não poderiam ser maiores que quinze centímetros, caso contrário, inviabilizariam a instalação de equipamentos fundamentais para a operação do catamarã, tal como motores e hidrojetos. Por tanto o resultado da topologia testada só é impresso se os reforçadores apresentarem altura menor que 15 cm. Com estas restrições impostas são impressos na aba "resultados" as características das topologias que atendam todos os requisitos citados.

5. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Como exemplo de aplicação, a ferramenta de projeto desenvolvida foi aplicada à análise da topologia estrutural de um catamarã típico destinado ao transporte de passageiros em água interiores. A análise conduzida envolveu a varredura das possibilidades de topologia para a embarcação em estudo, considerando-se os limites impostos pelas características do casco aos valores máximos e mínimos das variáveis de entrada e com um valor de variação consistente com o refinamento necessário.

Tabela 2: Características principais do casco de referência.

Comprimento total:	16,00 m
Boca total:	6,00 m
Boca dos cascos	1,30 m
Pontal máximo:	3,40 m
Calado máximo:	0,80 m
Deslocamento:	13,7 t
Velocidade máxima:	25 nós

5.1 CASCO DE REFERÊNCIA

O projeto foi desenvolvido tendo como referência o casco de uma embarcação tipo catamarã dedicada ao transporte de passageiros. Na Tabela 2 são apresentadas as dimensões principais do casco de referência

5.2 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os parâmetros utilizados na varredura da solução são representados na Figura 42. As limitações para os espaçamentos entre reforços foram físicas, ou seja, os valores máximos das variáveis livres referentes à espaçamentos foram balizados pelas larguras e comprimentos das chapas onde os reforçadores serão instalados, e os valores mínimos foram adequados às capacidades soldagem e de inspeção. Foram obtidas como resultado as topologias fornecidas por todas as combinações decorrentes da variação das variáveis livres, considerando-se as restrições estabelecidas pela regra e pelas características do projeto. Nas Figuras 43 a 45 são apresentados os melhores resultados obtidos na primeira varredura.

Feita a análise dos resultados, notou-se que algumas topologias obtidas sugeriam espessuras no casco maiores que 6,5 milímetros, o que fugiria dos limites das simplificações dos parâmetros de soldagem feitas na aba de custos de manufatura. Por este motivo foram descartados os resultados com espessuras no casco maiores que 6,5 milímetros. Com esta nova restrição, o número de topologias validas caiu de 18.582 para 4.114.

_sc	ESPAÇAMENTO DE LONGITUDINAIS DO COSTADO		
_s	ESPAÇAMENTO DE LONGITUDINAIS DO FUNDO E CONVÉS		
LCAV	ESPAÇAMENTO DE CAVERNAS		
id (liga casco)	Identificacao das ligas do casco		
id (liga reforc)	identificacao das ligas do s reforçadores		
t fundo	Espessura do chapeamento do fundo		
tcostado	Espessura do chapeamento do costado		
t conveses	Espessura do chapeamento dos conveses		
t long fundo	Espessuras dos longitudinais do fundo		
t long costado	Espessuras dos longitudinais do costado		
t long conves	Espessuras dos longitudinais dos conveses		
h long fundo	Altura da alma dos reforçadores longitudinais do fundo		
h long costado	Altura da alma dos reforçadores longitudinais do costado		
h long conves	Altura da alma dos reforçadores longitudinais dos conveses		
t trans fundo	Espessuras dos reforçadores transversais do fundo		
t trans costado	Espessuras dos reforçadores transversais do costado		
t trans flat cross	Espessuras dos reforçadores transversais do conves principal		
t trans conves II	Espessuras dos reforçadores transversais do conves II		
h trans fundo	Altura da alma dos reforçadores transversais do fundo		
h trans costado	Altura da alma dos reforçadores transversais do costado		
h trans conves	Altura da alma dos reforçadores transversais dos conves casco		
h trans flatcross	Altura da alma dos reforçadores transversais entre cascos		
h trans conves II	Altura da alma dos reforçadores transversais do conves II		

Figura 41: Legenda das tabelas de apresentação de resultados.

longitudinais				
ESPACAMENTO (mm)	Minimo	Maximo	step	iteracoes
S	100	600	100	5
Sc	200	1000	100	8
transversais				
ESPACAMENTO (mm)	Minimo	Maximo	step	iteracoes
lcav	500	3000	250	10
LONGITUDINAIS (mm)				
	min	max	step	iteracoes
tlfun	4	5	1	1
tlcost	4	5	1	1
tlconv	3	4	1	1
TRANSVERSAIS				
	min	max	step	
ttfund	4	5	1	1
ttcost	4	5	1	1
ttconv	3	4	1	1
ligas				
	min	max	step	iteracoes
ligcasco	1	3	1	2
ligrefor	1	3	1	2

Figura 42: Parâmetros utilizados na primeira varredura.

_sc	_s	LCAV	Peso de Al	Custo de Al	Custo manufatura	Custo total	id (liga casco)	id (liga reforc)	t fundo	tcostado	t conveses
(mm)	(mm)	(mm)	ton	R\$	R\$	R\$	(-)	(-)	(mm)	(mm)	(mm)
1000	600	750	5,91748	R\$ 116.487,45	R\$ 38.142,37	R\$ 154.629,82	2	1	8	9	5
300	200	1000	4,691	R\$ 96.593,46	R\$ 58.116,18	R\$ 154.709,64	3	1	4	5	3,5
300	200	1000	4,6959	R\$ 96.681,72	R\$ 58.163,97	R\$ 154.845,69	3	1	4	5	3,5
300	200	1000	4,69507	R\$ 96.666,66	R\$ 58.240,02	R\$ 154.906,67	3	1	4	5	3,5
900	600	750	5,93356	R\$ 116.776,94	R\$ 38.142,37	R\$ 154.919,32	2	1	8	9	5
1000	600	750	5,92797	R\$ 116.676,27	R\$ 38.270,15	R\$ 154.946,42	2	1	8	9	5
1000	600	750	5,92615	R\$ 116.643,54	R\$ 38.332,50	R\$ 154.976,03	2	1	8	9	5
300	200	1000	4,69997	R\$ 96.754,92	R\$ 58.287,80	R\$ 155.042,72	3	1	4	5	3,5
900	600	750	5,9388	R\$ 116.871,35	R\$ 38.270,15	R\$ 155.141,50	2	1	8	9	5

Figura 43: Resultado das melhores topologias obtidas

t long fundo	t long costado	t long conves	h long fundo	h long costado	h long conves
(mm)	(mm)	(mm)	(cm)	(cm)	(cm)
5	4	4	15	15	6
5	5	4	15	14	6
5	5	4	15	14	6
5	5	4	15	14	6
5	4	4	15	15	6
5	4	4	15	15	6
5	5	4	15	13	6
5	5	4	15	14	6
5	4	4	15	15	6

Figura 44: Resultado das melhores topologias obtidas

t trans fundo	t trans costado	t trans flat cross	t trans conves II	h trans fundo	h trans costado	h trans conves	h trans flatcross	h trans conves II
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
4	4	3	3	13	13	8	24	16,8
4	4	3	3	10	7	5	20	14
5	4	3	3	9	7	5	20	14
4	5	3	3	10	6	5	20	14
4	4	3	3	14	14	8	24	16,8
5	4	3	3	12	13	8	24	16,8
4	4	3	3	13	13	8	24	16,8
5	5	3	3	9	6	5	20	14
5	4	3	3	12	14	8	24	16,8

Figura 45: Resultado das melhores topologias obtidas

A topologia que apresenta o menor custo total não é a mesma que tem o menor peso de material. Isso é um resultado esperado uma vez que o custo de fabricação foi considerado e a topologia mais leve não necessariamente é a que tem a construção mais simples. Nas Figuras 46 a 48 é demonstrada a comparação entre as características da topologia mais leve e as características da topologia com menor custo de construção.

Nota-se que todos os espaçamentos entre reforçadores da estrutura mais leve são menores que os espaçamentos da estrutura mais barata e, além disso, o material utilizado nos reforçadores da estrutura mais leve foi a liga de alumínio mais resistente e mais cara, enquanto na estrutura mais barata foi utilizada uma liga intermediária, porém mais barata. Esses fatores fizeram com que os reforçadores da topologia mais leve fossem menores em altura e espessura, porém, resultou em um aumento significativo da quantidade de juntas soldadas e, conseqüentemente, dos custos de fabricação. A diferença de peso entre as duas topologias não é tão significativa. porém, o custo de fabricação faz com que a topologia mais leve esteja somente na 1.833^a posição em um ranking de custo, entre as 4.114 topologias válidas.

_sc	_s	LCAV	Peso de Al	Custo AL	Custo manufatura	Custo total
(mm)	(mm)	(mm)	ton	R\$	R\$	R\$
300	200	1000	4,691	R\$ 96.593,46	R\$ 58.116,18	R\$ 154.709,64
200	100	750	4,42937	R\$ 97.446,11	R\$ 92.961,83	R\$ 190.407,95

Figura 46: Comparação entre topologias.

id (liga casco)	id (liga reforç)	t fundo	t costado	t conveses	t long fundo	t long costado	t long conves	h long fundo	h long costado	h long conves
(-)	(-)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(cm)	(cm)	(cm)
3	1	4	5	3,5	5	5	4	15	14	6
3	3	4	3,5	3,5	4	4	4	9	9	4

Figura 47: Comparação entre topologias.

t trans fundo	t trans costado	t trans flat cross	t trans conves II	h trans fundo	h trans costado	h trans conves	h trans flatcross	h trans conves II
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
4	4	3	3	10	7	5	20	14
4	4	3	3	6	5	5	20	14

Figura 48: Comparação entre topologias.

Uma outra análise realizada consistiu no refinamento da varredura. Os valores máximos e mínimos das variáveis de entrada foram aproximados em torno dos resultados de menor custo total e os incrementos destas variáveis foram reduzidos quando já não estavam no mínimo. Dessa forma foi possível notar se existe algum valor inferior aos valores encontrados na primeira rodada. Os parâmetros utilizados na segunda rodada da varredura são indicados na Figura 49.

longitudinais				
ESPACAMENTO (mm)	Minimo	Maximo	step	iteracoes
S	150	250	50	2
Sc	200	400	50	4
transversais				
ESPACAMENTO (mm)	Minimo	Maximo	step	iteracoes
lcav	1000	1500	250	2
ligas				
	min	max	step	iteracoes
ligcasco	1	3	1	2
ligrefor	1	3	1	2
LONGITUDINAIS (mm)				
	min	max	step	iteracoes
tlfun	4	5	1	1
tlcost	4	5	1	1
tlconv	3	4	1	1
TRANSVERSAIS (mm)				
	min	max	step	
ttfund	4	5	1	1
ttcost	4	5	1	1
ttconv	3	4	1	1

Figura 49: Parâmetros utilizados na segunda varredura.

_sc	_s	LCAV	Peso de Al	Custo AL	Custo manufatura	Custo total
(mm)	(mm)	(mm)	ton	R\$	R\$	R\$
350	200	1000	4,74117	R\$ 98.390,87	R\$ 56.058,89	R\$ 154.449,77
350	200	1000	4,74607	R\$ 98.479,13	R\$ 56.106,67	R\$ 154.585,81
350	200	1000	4,74523	R\$ 98.464,07	R\$ 56.207,49	R\$ 154.671,56
300	200	1000	4,691	R\$ 96.593,46	R\$ 58.116,18	R\$ 154.709,64

Figura 50: Melhores resultados segunda varredura

id (liga casco)	id (liga reforc)	t fundo	tcostado	t conveses	t long fundo	t long costado	t long conves	h long fundo	h long costado	h long conves
(-)	(-)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(cm)	(cm)	(cm)
3	1	4	6	3,5	5	4	4	15	15	6
3	1	4	6	3,5	5	4	4	15	15	6
3	1	4	6	3,5	5	4	4	15	15	6
3	1	4	5	3,5	5	5	4	15	14	6

Figura 51: Melhores resultados segunda varredura

t trans fundo	t trans costado	t trans flat cross	t trans conves II	h trans fundo	h trans costado	h trans conves	h trans flatcross	h trans conves II
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
4	4	3	3	10	7	5	20	14
5	4	3	3	9	7	5	20	14
4	5	3	3	10	6	5	20	14
4	4	3	3	10	7	5	20	14

Figura 52: Melhores resultados segunda varredura

Ao analisar o resultado da segunda varredura nota-se que a topologia de menor custo foi alterada, pois ao reduzir-se o incremento do espaçamento de reforçadores do costado surgiram três novas topologias que apresentam custo total menor que a estrutura de menor custo indicada pela primeira varredura, conforme indicado nas Figuras 49 a 51. A topologia de menor custo foi selecionada para a realização de uma modelação mais refinada da estrutura (Figuras 53 a 56).

Com estes resultados pode-se afirmar que foi atingida a capacidade máxima de refino do modelo matemático, pois os valores dos incrementos já coincidem com os espaçamentos utilizados para fazer o mapeamento do casco da embarcação. Para um dimensionamento preliminar da estrutura, os resultados obtidos foram satisfatórios e podem ser consideradas uma boa base para selecionar a melhor topologia de acordo com as expectativas do projetista.

No entanto, deve-se levar em consideração que os valores utilizados para custo do material, custo por quilo de solda, custo da mão de obra e parâmetros de solda são valores pontuais pesquisados ou estimados para demonstração das funcionalidades do modelo matemático. Estes valores estão sujeitos alteração de acordo com as condições de mercado dos materiais e mão-de-obra e/ou capacidade tecnológica do estaleiro no qual será realizada a construção. Uma pequena variação em seus valores pode ocasionar resultados completamente distintos.

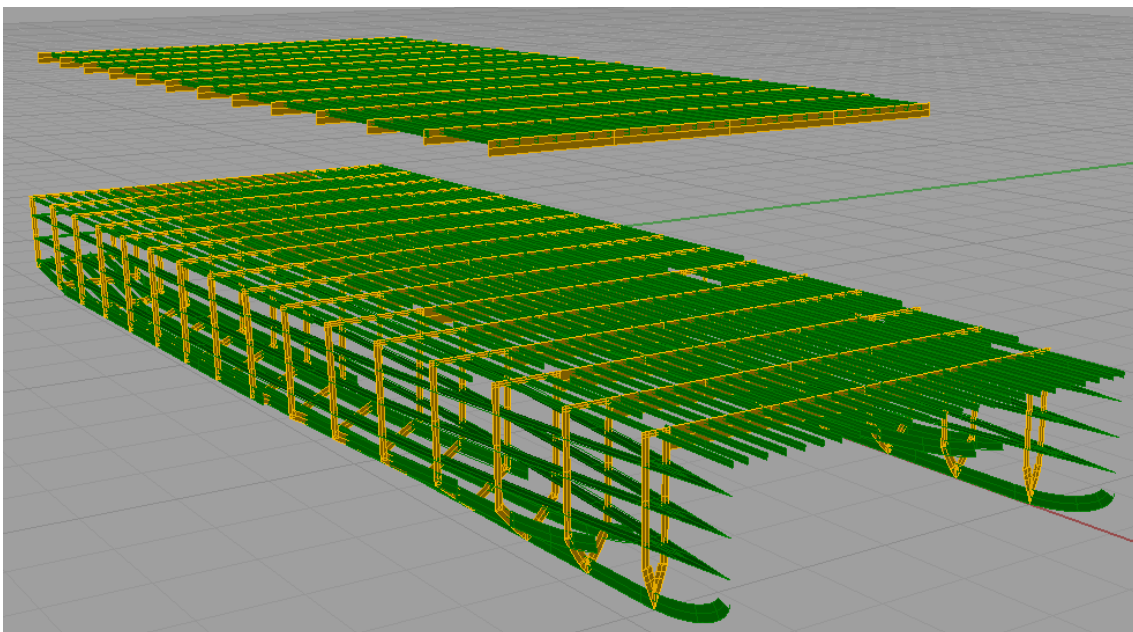


Figura 53: Modelo computacional da topologia estrutural selecionada.

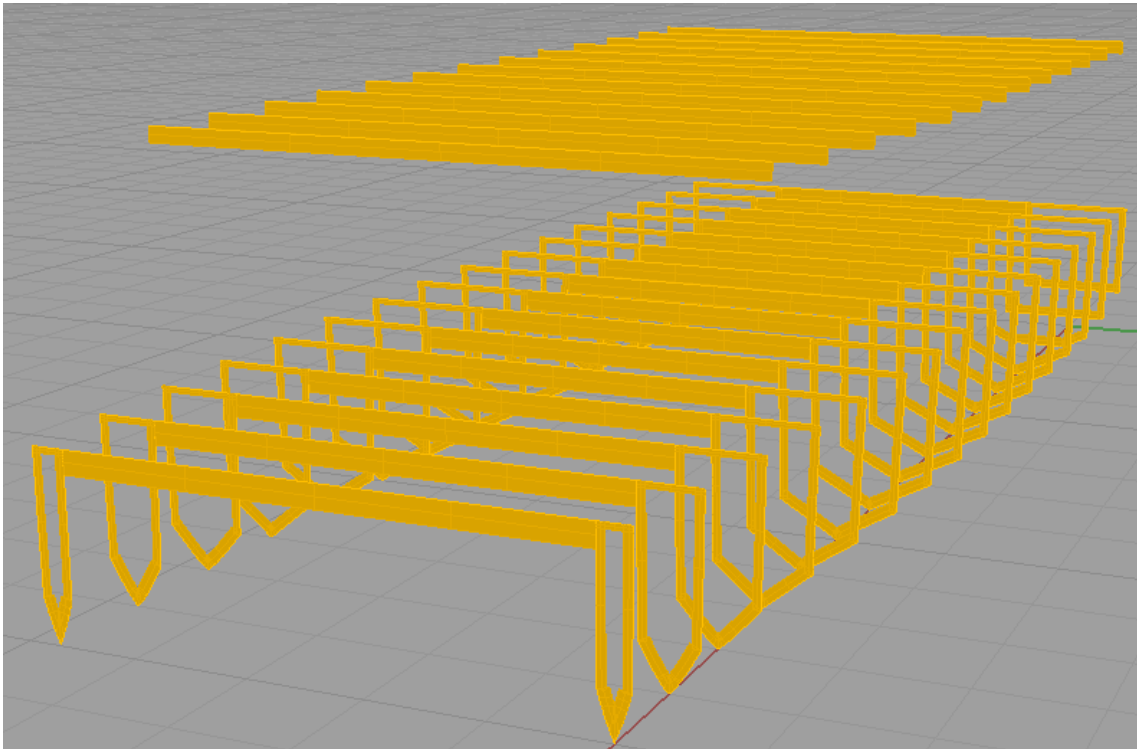


Figura 54: Detalhe dos reforçadores transversais.

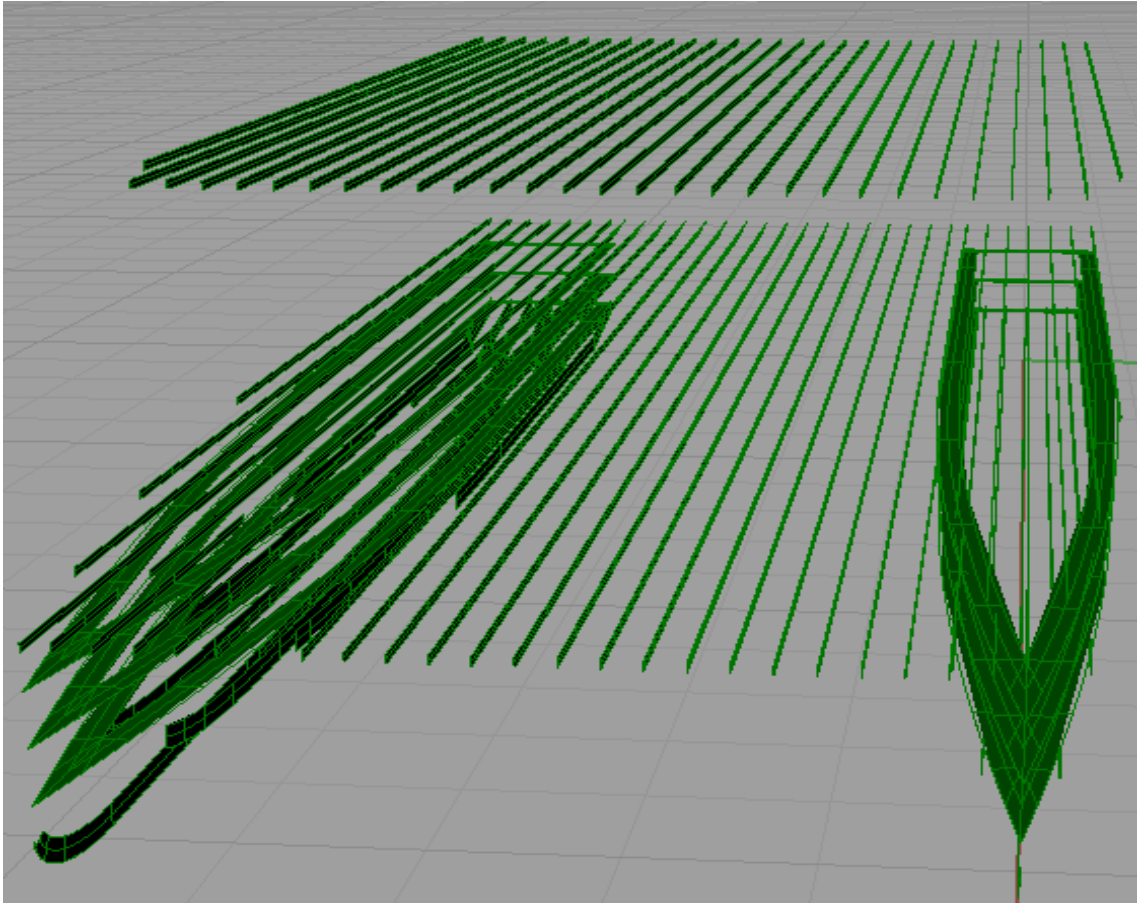


Figura 55: Detalhe dos reforçadores longitudinais

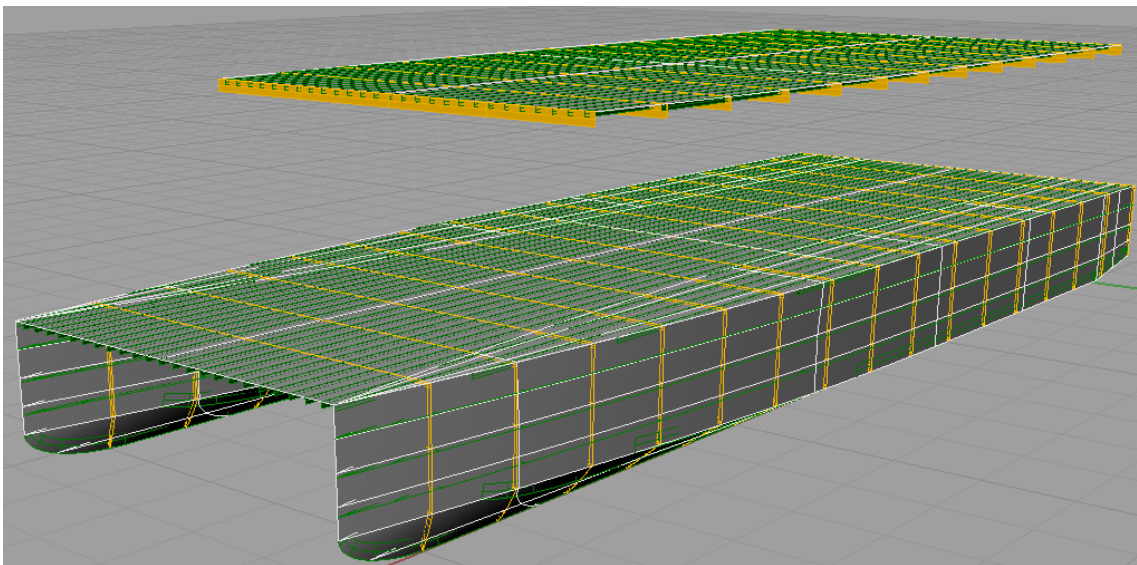


Figura 56: Detalhe do chapeamento do casco.

6. CONCLUSÕES

O objetivo do presente trabalho envolveu o desenvolvimento de uma ferramenta de projeto aplicada à análise preliminar do peso de material e dos respectivos custos de material e de construção do casco de um catamarã em alumínio. Como exemplo de aplicação, foram apresentados os resultados obtidos para a análise da topologia estrutural de um catamarã típico dedicado ao transporte de passageiros.

Os resultados obtidos indicaram que a topologia de menor custo total não é necessariamente a de menor peso de material. Tal resultado é consistente visto que o custo de fabricação foi considerado e a topologia mais leve não necessariamente é a que tem a construção mais simples. O resultado de uma segunda varredura permitiu o refinamento da solução e a obtenção de uma nova topologia de menor custo.

Tais resultados indicam que a planilha de cálculo desenvolvida representa uma ferramenta de projeto útil para o dimensionamento preliminar da estrutura de embarcações do tipo catamarã de alta velocidade em alumínio. De fato, dispõe-se de uma ferramenta de análise a qual possibilita a seleção da melhor topologia de acordo com as expectativas do projetista.

Obviamente, o trabalho desenvolvido representa um primeiro passo no desenvolvimento de um conjunto de ferramentas dedicadas ao projeto embarcações em alumínio, cuja demanda tem sido crescente nos últimos anos. Aprimoramentos são evidentemente necessários, porém, os resultados alcançados demonstram haver um grande potencial de desenvolvimento futuro no que se refere à otimização e à redução do custo de fabricação de embarcações em alumínio.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Bureau of Shipping - Rules for Building And Classing - High-Speed Craft - 2013.

American Bureau of Shipping- Rules For Materials and Welding - Part 2 Aluminium and Fiber Reinforced Plastics (FRP) - 2013

Ferraris, Stefano. “Aluminium Alloys in Third Millennium Shipbuilding: Materials, Technologies, Perspectives”, Fincantieri Cantieri Navali Italiani S.P.A., Naval Vessel Business Unit, Genoa, Italy.

Mathers, Gene. “The Welding Of Aluminium And Its Alloys”, Woodhead Publishing Ltd And Crc Press Llc, 2002.

Pinheiro, Márcio S. “Relatório de Projeto Final - Construção de Embarcações em Alumínio”, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, 2004.

Zbigniew, Sekulski. “Multi-Objective Topology and Size Optimization of High-Speed Vehicle-Passenger Catamarã Structure by Genetic Algorithm”, West Pomeranian University of Technology, Szczecin, Faculty of Maritime Technology, 2010.

Zbigniew, Sekulski. "Least-Weight Topology and Size Optimization of High Speed Vehicle-Passenger Catamarã Structure by Genetic Algorithm", West Pomeranian University of Technology, Szczecin, Faculty of Maritime Technology, 2009.