

4

Cálculo das solicitações de vento usando espaço de imagem

A formulação e a implementação do algoritmo descrito neste capítulo foram feitas por Sérgio Álvares Maffra, tendo sofrido algumas modificações ou correções para serem utilizadas no Sstab [12]. Foram adicionadas novas implementações também para cálculo da correnteza, cálculo do braço de vento e discriminação da área e da força de vento por compartimento.

De acordo com a IMO [3], a força e momento resultantes da ação do vento sobre uma embarcação podem ser computadas como uma função da área projetada do objeto, de seu coeficiente de forma, de seus coeficientes de altura, da velocidade do vento e da densidade do ar:

$$F_w = \frac{1}{2} C_s C_H \rho_w V_w^2 A_w \quad (4.1)$$

F_w	Força do vento
C_s	Coeficiente de forma
C_H	Coeficiente de altura
ρ_w	Densidade do ar
V_w	Velocidade do ar
A_w	Área de vento projetada

Apesar de ser muito mais simples que uma simulação de dinâmica dos fluidos, a metodologia sugerida pela IMO pode ser desafiadora ao lidar com objetos de geometria complexa. Trabalhando diretamente com a geometria do objeto, torna-se necessária a utilização de operações booleanas (interseções, subtrações, adições, etc.), o que é muito difícil de se implementar e gera uma margem de erros devido à imprecisão das variáveis.

Como alternativa, a IMO permite o uso de testes em túneis de vento realizados num modelo da embarcação. Testes em um túnel de vento não são muito práticos, porque geralmente ocorrem muitas mudanças na geometria da

plataforma durante a fase de testes e, a cada mudança, um novo modelo teria que ser construído e testado. A IMO exige que a força de vento seja considerada vinda de qualquer direção, o que elevaria o custo de uma análise usando computação para realizar simulações de dinâmica dos fluidos (CFD), considerando elevado o número enorme de simulações e malhas a serem construídas.

Este trabalho faz uma proposta alternativa em que se utilizam diretamente as primitivas geométricas que compõem o modelo, fazendo uso da equação 4.1 e convertendo o modelo em uma imagem (em pixels). Esta alternativa, que pode ser implementada utilizando a biblioteca gráfica de qualquer placa de vídeo moderna, consiste em converter todas as primitivas geométricas num conjunto de pixels, deixando esta operação ser realizada pela placa gráfica. Agora que o conjunto de pixels foi determinado, indicando a área visível do objeto, bastam computar as somas da área e da força aplicada de cada pixel para se obter área de vento e a força de vento.

De acordo com a presente proposta, a área projetada é na verdade uma aproximação da área real. Isto é consequência de transformar as primitivas geométricas num conjunto de pixels. Por isso também é apresentada uma maneira de computar uma estimativa desse erro.

4.1. Força do vento

Determinar a superfície visível [6] de objetos é um conhecido problema na área de computação gráfica. Diferentes algoritmos já foram propostos, os quais podem ser divididos em duas categorias: algoritmo de imagem e algoritmo de objeto [7].

O algoritmo de objeto resolve o problema de visibilidade trabalhando com as primitivas geométricas, ordenando-os desde os mais afastados até os mais próximos da câmera. Quando há interseção, operações booleanas são necessárias para resolver o problema.

A imagem digital é normalmente representada por uma matriz retangular de valores numéricos que representam cores. O algoritmo de imagem explora diretamente essa propriedade, evitando a maior parte das operações geométricas que o algoritmo de objeto precisa realizar. Algoritmos de imagem trabalham em

paralelo, o que facilita uma implementação mais eficiente. Neste trabalho será mostrado como o algoritmo de Z-Buffer [6] pode ser usado para definir a área exposta ao vento de um modelo complexo.

4.1.1. Modelo

Como mencionado nos capítulos anteriores, o modelo a ser trabalhado é composto por um conjunto de compartimentos individuais que podem ser classificados em externos (casco, elementos de convés, etc.) ou internos (espaços vazios, elevadores, tanques, etc.). A Figura 4.1 mostra os compartimentos externos de uma plataforma semi-submersível. Cada compartimento é composto de um conjunto de faces, sendo cada face definida por uma série de posições no espaço tridimensional, no sistema local de coordenadas.

4.1.2. Determinação da superfície visível utilizando álgebra vetorial

Em uma solução tradicional, as partes visíveis de objetos podem ser computadas usando álgebra vetorial clássica num sistema de coordenadas espaciais. Se for considerado que as faces dos compartimentos não se sobrepõem, um algoritmo de árvore BSP [6] pode ser usado para ordenar as faces e definir quais destas são visíveis, mesmo que o algoritmo se torne lento, com o aumento do número de faces. Este algoritmo deve ser utilizado junto com um algoritmo de operação booleana para obter um conjunto de áreas poligonais visíveis.

A Figura 4.1 mostra um modelo de uma plataforma de petróleo semi-submersível. Se o vento for considerado agindo na mesma direção de visão (direção da projeção), a computação da área visível mostrada em detalhe na Figura 4.1(b) é um exemplo em que o uso da operação booleana se torna necessária, pois a interseção entre várias possíveis áreas visíveis projetadas ocorre.

4.1.3.

Determinação da área visível utilizando a placa gráfica

Para produzir a imagem vista na Figura 4.1(a), a placa de vídeo se utilizou da biblioteca do OpenGL que tratou as primitivas. Este mesmo procedimento pode ser utilizado para determinar a área de vento projetada de uma embarcação.

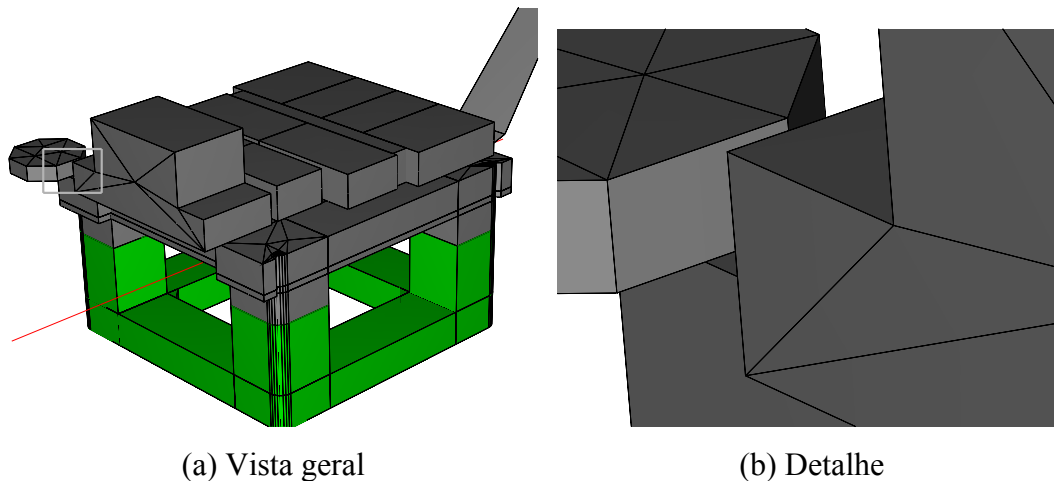


Figura 4.1- Plataforma de óleo semi-submersível

A biblioteca gráfica (OpenGL), utilizada neste trabalho contém uma implementação do algoritmo *Z-Buffer*. Como mencionado anteriormente, este algoritmo evita a ordenação das primitivas e as operações booleanas, transformando cada primitiva num conjunto de pixels. Cada pixel possui um valor de profundidade, que é testado contra os outros pixels da mesma posição para se decidir qual é visível. Os pixels visíveis são então armazenados na imagem final. A próxima sessão mostra como configurar o *software* de *Z-Buffer* da placa gráfica para gerar uma imagem apropriada à computação da força de vento e como computar essa força utilizando esta imagem.

4.1.4.

Configurando o software de Z-Buffer

Gerar imagens utilizando o OpenGL pode ser uma tarefa complexa, devido à imensa quantidade de opções e técnicas de geração de imagem que podem ser utilizadas. Felizmente, a imagem necessária neste trabalho é simples e apenas alguns passos são necessários.

O primeiro passo consiste em configurar a câmera. A câmera precisa estar posicionada de uma maneira que permita observar o objeto inteiro. A direção da câmera (direção de projeção) deve ser a mesma da direção de incidência do vento. Como requerido pela equação 4.1, o plano de projeção precisa ser o plano vertical (vetor Up igual a $(0,0,1)$). Uma projeção ortográfica deve ser utilizada, para se obter uma medida correta da área. Uma projeção em perspectiva não funcionaria, já que esta deformaria o modelo para criar o efeito de perspectiva na imagem.

O segundo passo consiste em escolher as cores apropriadas para o modelo geométrico que representem os possíveis compartimentos da embarcação. Após a imagem final ter sido gerada, não existe mais relação entre os pixels e o compartimento que este representa.

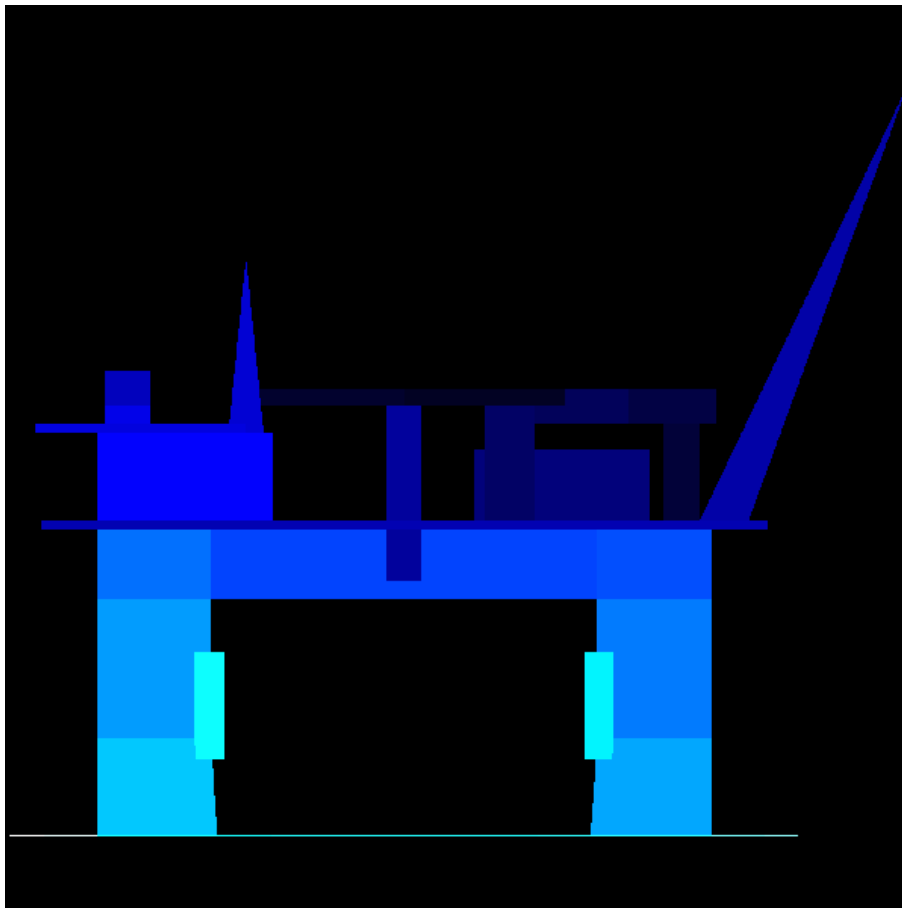


Figura 4.2- Imagem utilizada na computação do vento

Dado um determinado pixel na imagem, é possível determinar todos os parâmetros da equação 4.1, exceto o coeficiente de forma, que só pode ser determinado a partir do compartimento associado ao pixel. A técnica utilizada

para isso é associar a cada compartimento uma cor diferente e única. Assim é possível associar cada pixel ao seu compartimento examinando sua cor.

Como a computação do sombreamento(*lighting*) na biblioteca da placa gráfica pode alterar a cor do objeto a ser renderizado, a opção de sombreamento deve estar desligada, quando gerar a imagem para a computação do vento.

Após realizar todos os procedimentos descritos acima, é necessário gerar a imagem, para obter todas as informações necessárias ao cálculo do vento. A Figura 4.2 mostra um exemplo da imagem gerada e que é utilizada para computar a força do vento.

4.1.5. Computando a força do vento

Computar a força de vento para a imagem gerada é similar a um procedimento de integração numérica, já que cada pixel da imagem pode ser visto como um elemento de integração. As equações 4.2, 4.3 e 4.4 mostram como computar a área, a força do vento e seu centro de aplicação, respectivamente. Note que a área de vento A_W é ponderada pelo coeficiente de forma e pelo coeficiente de altura.

$$A_W = \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^h \frac{1}{2} C_S(Px_{ij}) C_H(Px_{ij}) A_p \quad (4.2)$$

$$F_W = A_W \rho_W V_W^2 \quad (4.3)$$

F_W	Força do vento
A_W	Área de vento
Px_{ij}	Pixel localizado nas coordenadas (i,j) da imagem
ρ_W	Densidade do ar
V_W	Velocidade do ar
A_p	Área do pixel
$C_S(Px)$	Coeficiente de forma do pixel Px
$C_H(Px)$	Coeficiente de altura do pixel Px
w	Largura da imagem em pixels
h	Altura da imagem em pixels

A equação 4.2 depende de duas funções que têm o pixel como parâmetro: o coeficiente de forma (C_S) e o coeficiente de altura (C_H). Ambas podem ser implementadas como tabelas que indicam seus resultados.

A tabela de coeficiente de forma tem as cores de cada compartimento como índice, as mesmas cores usadas para representá-los na imagem. Assim, utilizando-se a cor do pixel, pode-se determinar seu compartimento correspondente na embarcação e, conseqüentemente, obter o fator de forma.

$$C_A = \frac{1}{F_W} \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^h \left[\frac{1}{2} C_S(Px_{ij}) C_H(Px_{ij}) \rho_W V_W^2 A_p \right] h(Px_{ij}) \quad (4.4)$$

C_A Centro de aplicação da força do vento

$h(Px)$ Altura do pixel ij

Início (m)	Fim (m)	Coeficiente de altura
---	15,30	1,00
15,30	30,50	1,10
30,50	46,00	1,20
46,00	61,00	1,30
61,00	76,00	1,37
76,00	91,50	1,43
91,50	106,50	1,48
106,50	122,00	1,52
122,00	137,00	1,56
137,00	152,50	1,60
152,50	167,50	1,63
167,50	183,00	1,67
183,00	198,00	1,70
198,00	213,50	1,72
213,50	228,50	1,75
228,50	244,00	1,77
244,00	256,00	1,79
256,00	---	1,80

Tabela 4.1-Coeficiente de altura

Quando se configura a câmera, alguns parâmetros dessa configuração definem o espaço visível da imagem e o número de pixels, definindo desta maneira o espaço coberto pelos pixels. Assim, é possível a partir das coordenadas (i,j) de um pixel na imagem, descobrir suas coordenadas (x_i,y_j) no espaço. Existe uma tabela, indexada por intervalos de altura, que a partir da altura (x_i,y_j) do pixel, define seu coeficiente de altura, conforme visto na Tabela 4.1.

A equação 4.3 computa a força do vento e tem como parâmetros o resultado da área de vento (A_w), a densidade do vento (ρ_w) e a velocidade do vento (V_w).

Forma	C_s
Esférica	0.4
Cilíndrica	0.5
Superfícies planas e grandes (casco, convés, etc)	1.0
Torre de perfuração	1.25
Cabos em geral	1.2
Treliças	1.3
Partes pequenas	1.4
Partes Isoladas (guindastes, vigas, etc)	1.5
Acomodações no convés e similares	1.1

Tabela 4.2-Coeficiente de forma

A Tabela 4.2 mostra alguns exemplos de coeficientes de forma a serem aplicados aos diferentes tipos de compartimentos num modelo.

4.1.6.

Diagrama de Fluxo para computar a força do vento

O algoritmo para computar a força de vento fica então dividido em duas partes. Primeiro deve-se criar a imagem e depois processar esta mesma. A Figura 4.3 mostra como estes dois processos funcionam. Na primeira parte, percorrem-se todos os compartimentos, onde é selecionada uma cor única para cada tanque e então este tanque é desenhado com esta cor e numa projeção ortográfica. Ao percorrer todos os compartimentos, definem-se também a posição da câmera e as dimensões da imagem a ser representada a partir das coordenadas mínimas e máximas destes compartimentos.



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

tenhamos força e área computada para cada compartimento também. As coordenadas do centro de aplicação da força é obtida pela soma da força de cada pixel multiplicada pelas suas coordenadas e então dividida pela soma das forças de todos os pixels.

4.1.7. Erros de rasterização

O processo adotado para se transformar uma primitiva geométrica (geralmente um polígono) em um conjunto de pixels é chamado de rasterização. Sempre que uma primitiva geométrica é rasterizada, erros ocorrem devido ao processo de discretização em imagens digitais. Linhas contínuas são representadas por um conjunto de pixels (quadrados) e, portanto, podem não ser corretamente representadas numa imagem digital. Os erros de discretização só ocorrem nas bordas das primitivas. A Figura 4.4 mostra como a rasterização de algumas primitivas ficam numa imagem digital. Nota-se como a rasterização de primitivas tenta acompanhar o formato destas (vermelho marca as primitivas).

Como somente os pixels nas bordas contêm erros, é possível computar uma margem de erro para resultado da área projetada. Este erro é dado pela divisão do número de pixels nas bordas pelo número total de pixels. Quanto menor o erro, mais preciso é o resultado para a força do vento.

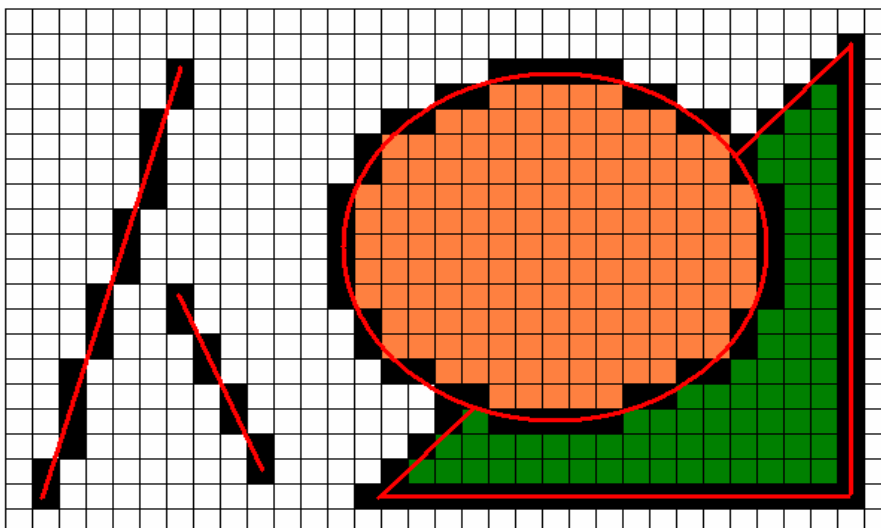


Figura 4.4- Erro de Rasterização

Uma maneira de se reduzir o erro consiste em se aumentar a resolução da imagem gerada. Imagens maiores irão gerar aproximações melhores das

primitivas geométricas, ao custo de mais memória e mais tempo para computação dos resultados.

4.2.

Computando a força da corrente

No presente algoritmo, ainda seguindo os critérios da IMO, é considerada a existência de uma corrente cuja força resultante apresenta a mesma intensidade da força do vento, porém, aplicada em sentido oposto, conforme visto na Figura 4.5, aumentando ainda mais o momento gerado pelas forças externas. Já definido o valor desta força, é necessário computar o seu centro de aplicação e a área submersa visível sujeita a esta nova força.

$$F_S = F_W \quad (4.5)$$

$$A_S = \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^h \frac{1}{2} C_S (Px_{ij}) A_p \quad (4.6)$$

$$C_B = \frac{1}{A_S} \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^h \left[\frac{1}{2} C_S (Px_{ij}) A_p h(Px_{ij}) \right] \quad (4.7)$$

F_S	Força da corrente
A_S	Área da corrente
C_B	Centro de aplicação da força da corrente

O princípio é o mesmo utilizado para computar a área de vento, utilizando o mesmo processo de rasterização de imagem, conforme mostrado na Figura 4.6, em que são convertidos os compartimentos abaixo da linha d'água em pixels.

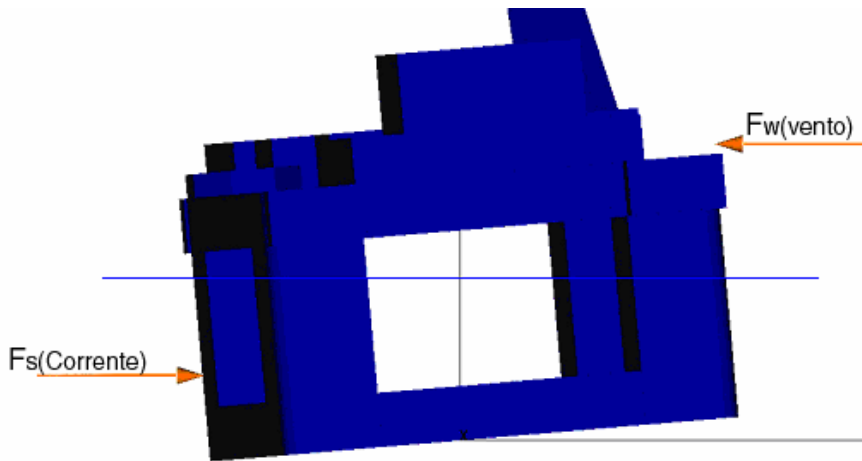


Figura 4.5 – Vento e Corrente

As equações 4.5, 4.6 e 4.7 mostram como computar a força, a área e o centro de aplicação da força da corrente, respectivamente. Nota-se que a área é ponderada apenas pelo coeficiente de forma C_S do compartimento. Não há coeficiente de altura para o cálculo da corrente.

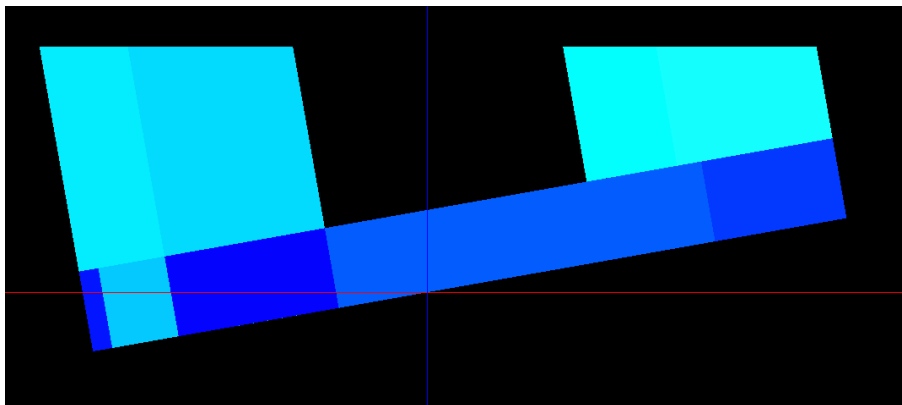


Figura 4.6 - Imagem utilizada na computação da corrente

4.3. Cálculo do braço de vento

A equação 4.8 mostra como é calculado o momento gerado pelas forças de corrente e vento computadas no presente algoritmo, lembrando que $F_S = F_W$. Sendo B o empuxo gerado pelo casco submerso e h o braço de vento, a equação 4.9 mostra o momento causado pelo deslocamento de B . A equação 4.10 mostra finalmente o cálculo de h . A Figura 4.7 ilustra as medidas de C_A , C_B e o deslocamento h de B .

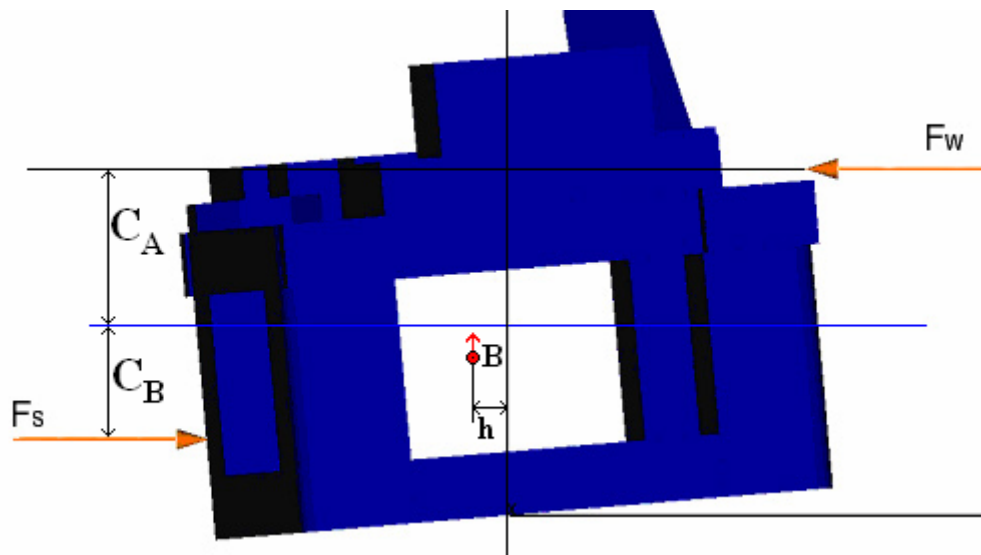


Figura 4.7 – Braço de vento

$$M_w = F_w (C_A + C_B) \quad (4.8)$$

$$M_w = B \cdot h \quad (4.9)$$

$$h = \frac{F_w (C_A + C_B)}{B} \quad (4.10)$$

M_w Momento provocado pela forças de vento e corrente

B Empuxo

h Braço de vento

4.4. Resultados

O algoritmo descrito anteriormente foi implementado no programa Sstab e atualmente está sendo utilizado para calcular as forças de vento e corrente em modelos da Petrobras-BR, para embarcações na fase de projeto e embarcações já existentes. O nome do algoritmo ficou sendo WFE, significando “Wind Force Estimator”. Como exemplo do WFE, são mostrados alguns resultados para uma plataforma de petróleo semi-submersível mostrada na Figura 4.1. Os resultados são comparados com os obtidos em um teste realizado pela BMT Fluid Mechanics Limited [8] em um túnel de vento (WTT).

O relatório dos testes realizados no túnel de vento apresentava resultados para a cota de trânsito e cota de operação. Foram selecionados casos em que o azimute é de 320 graus com relação ao eixo longitudinal, ângulo em que há maior

inclinação da plataforma. Os testes foram realizados com velocidades de vento de: 25,7 m/s, 37,0 m/s e 51,4 m/s. Na tabela 4.3 pode-se ver o deslocamento para cada calado. Estes deslocamentos foram calculados pelo modelo no Sstab e utilizados no WTT como os pesos da plataforma para suas duas cotas. Os resultados são mostrados na tabela 4.4 para o calado de operação e na tabela 4.5 para o calado de trânsito.

Calado(m)	Deslocamento(t)
34	105237,00
16	76590,00

Tabela 4.3 – Deslocamento de cada calado

Ângulo (graus)	Velocidade do Vento	25,7 m/s	37,0 m/s	51,4 m/s
0	WTT	0,188m	0,389m	0,750m
	WFE	0,164m	0,349m	0,655m
	WFE - WTT	-12,77 %	-12,60 %	-12,67 %
5	WTT	0,192m	0,397m	0,767m
	WFE	0,189m	0,391m	0,754m
	WFE - WTT	-1,56 %	-1,51 %	-1,69 %
10	WTT	0,183m	0,379m	0,730m
	WFE	0,214m	0,443m	0,854m
	WFE - WTT	16,94 %	16,89 %	16,99 %
15	WTT	0,187m	0,388m	0,750m
	WFE	0,236m	0,490m	0,945m
	WFE - WTT	26,20 %	26,29 %	26,00 %
20	WTT	0,179m	0,372m	0,718m
	WFE	0,258m	0,535m	1,032m
	WFE - WTT	44,13 %	43,82 %	43,73 %
25	WTT	0,135m	0,281m	0,541m
	WFE	0,278m	0,577m	1,113m
	WFE - WTT	105,93 %	105,34 %	105,73 %

Tabela 4.4 – Valores de braço de vento para o calado de operação

Figuras 4.8 e 4.9 mostram o modelo utilizado no túnel de vento e o modelo utilizado para o algoritmo WFE, respectivamente. Os dois modelos estão inclinados a 5 graus e em calado de operação. Nas Figuras, supõe-se que a direção do vento está da esquerda para a direita da plataforma. A cor cinza da Figura 4.9

representa a área acima da linha d'água exposta ao vento, equivalente ao modelo da Figura 4.8. Pode-se notar a diferença nos detalhes entre o modelo da Figura 4.8 e 4.9 no convés.

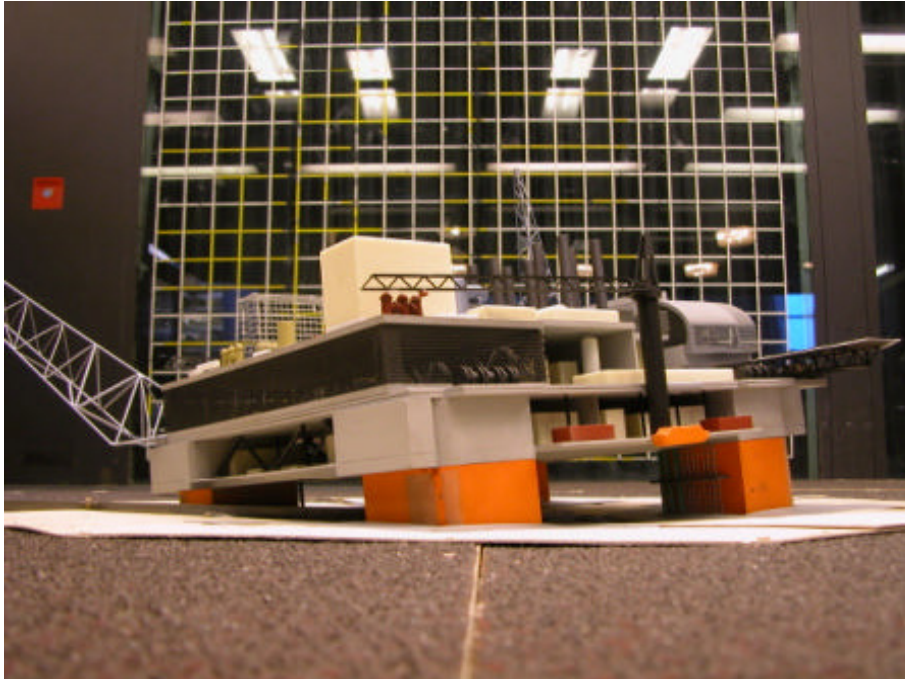


Figura 4.8- Maquete de túnel de vento com cinco graus de inclinação

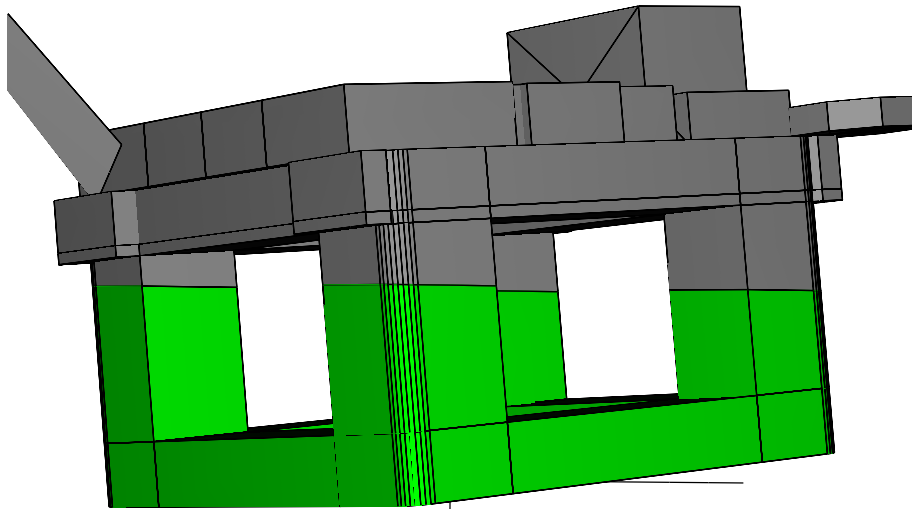


Figura 4.9 – Modelo do Sstab com cinco graus de inclinação

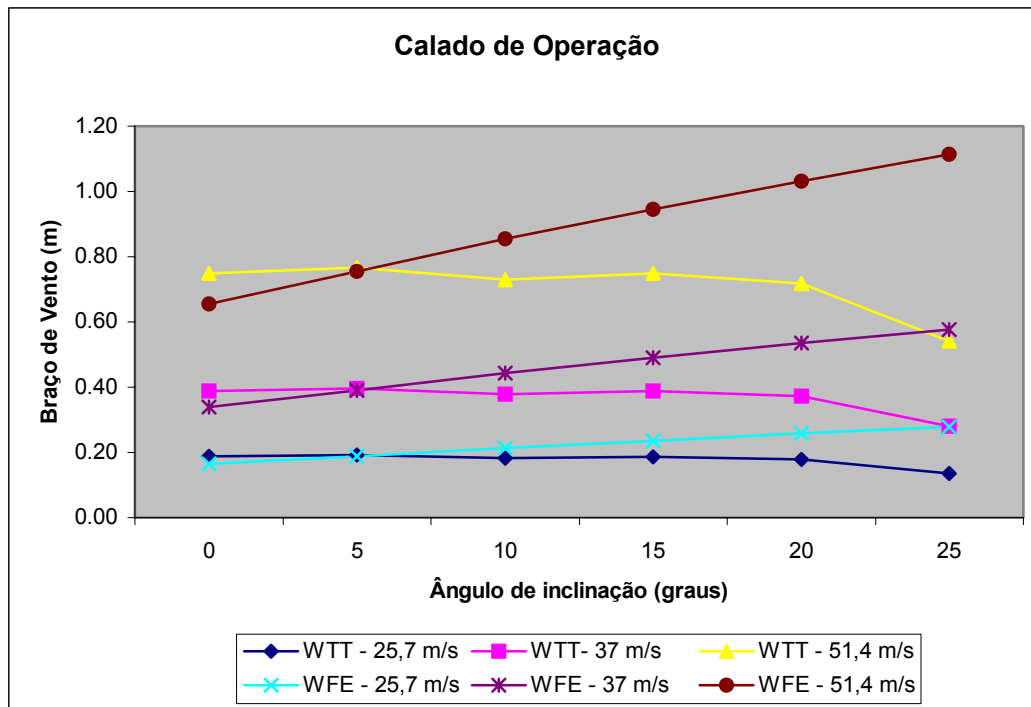


Figura 4.10 – Gráfico de Braço de vento para o calado de operação.

Outro par de imagens, apresentado nas Figuras 4.11 e 4.12, mostra a plataforma a uma inclinação de dez graus. Nestas imagens, percebe-se que o convés da plataforma começa a submergir.

As Figuras 4.10 e 4.13 mostram os gráficos para as curvas de vento nos calados de operação e de trânsito, respectivamente.

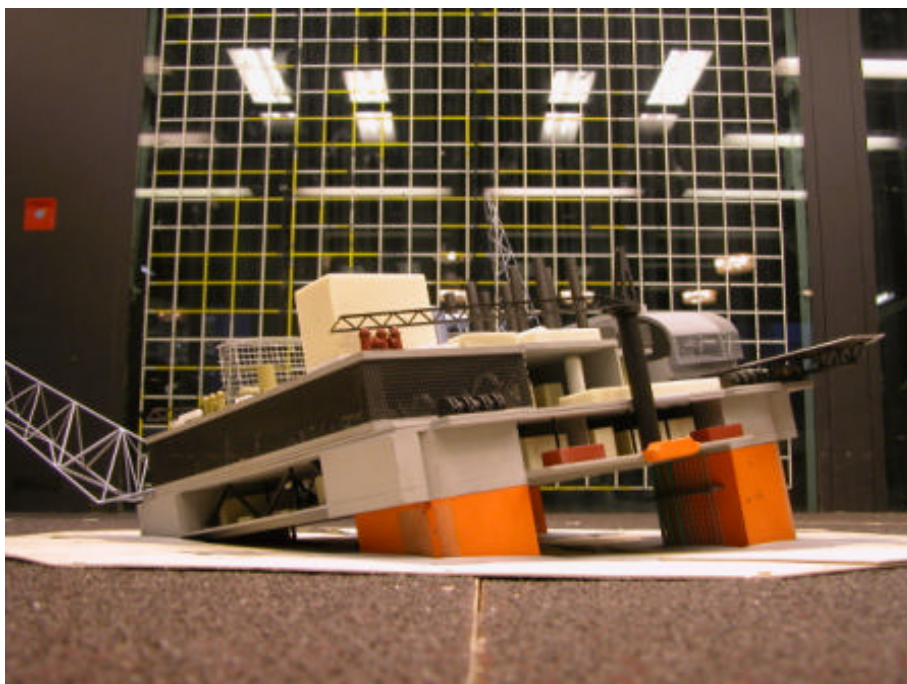


Figura 4.11 - Maquete de túnel de vento com dez graus de inclinação

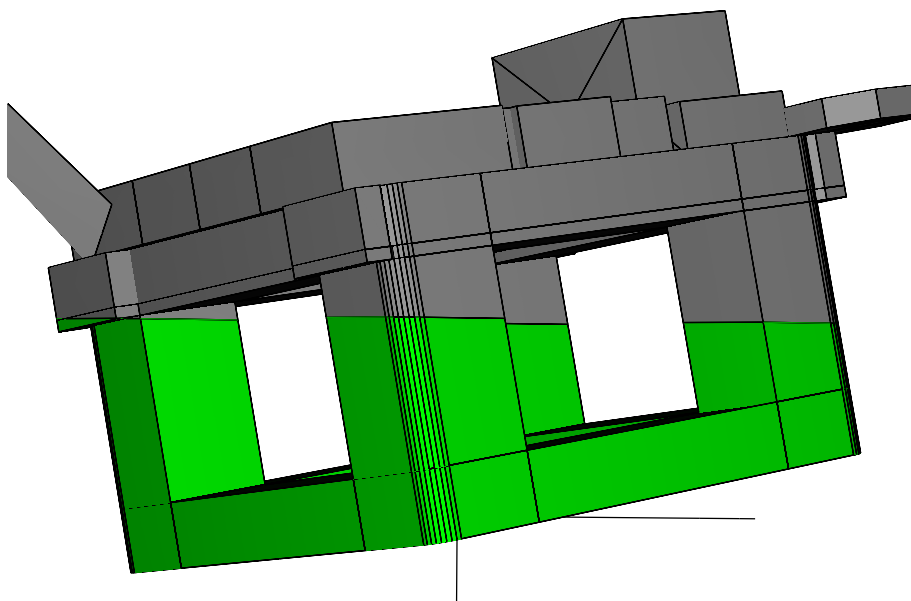


Figura 4.12 -- Modelo do Sstab com dez graus de inclinação

ângulo (graus)	Velocidade do Vento	25.7 m/s	37.0 m/s	51.4 m/s
0	WTT	0,432m	0,895m	1,727m
	WFE	0,311m	0,645m	1,245m
	WFE - WTT	-28,01 %	-27,93 %	-27,91 %
5	WTT	0,410m	0,850m	1,640m
	WFE	0,350m	0,726m	1,401m
	WFE - WTT	-14,63 %	-14,59 %	-14,57 %
10	WTT	0,363m	0,753m	1,452m
	WFE	0,391m	0,811m	1,564m
	WFE - WTT	7,71 %	7,70 %	7,71 %
15	WTT	0,342m	0,709m	1,369m
	WFE	0,433m	0,897m	1,730m
	WFE - WTT	26,61 %	26,52 %	26,37 %
20	WTT	0,328m	0,680m	1,312m
	WFE	0,474m	0,982m	1,895m
	WFE - WTT	44,51 %	44,41 %	44,44 %
25	WTT	0,294m	0,610m	1,177m
	WFE	0,510m	1,056m	2,038m
	WFE - WTT	73,47 %	73,11 %	73,15 %

Tabela 4.5 – Valores de braço de vento para o calado de trânsito

Nos resultados do WFE, são considerados os verdadeiros pesos dos calados de operação e de trânsito, calculados pelo Sstab, ao equilibrar a embarcação em

cada um dos dois calados, respectivamente. Já no túnel de vento, não é garantida a utilização do peso correto da plataforma. Para a equação (4.2), todos os Coeficientes de Forma foram considerados segundo a Tabela 4.2. Ainda para o WFE, para um mesmo calado do braço de vento, quanto maior a inclinação, maior a área de vento exposta e maior valor para o braço de vento, conforme visto na Figura 4.14. Este aumento da área de vento se deve ao fato dos compartimentos do convés superior terem sido modelados como compartimentos fechados, enquanto na maquete isto não ocorre.

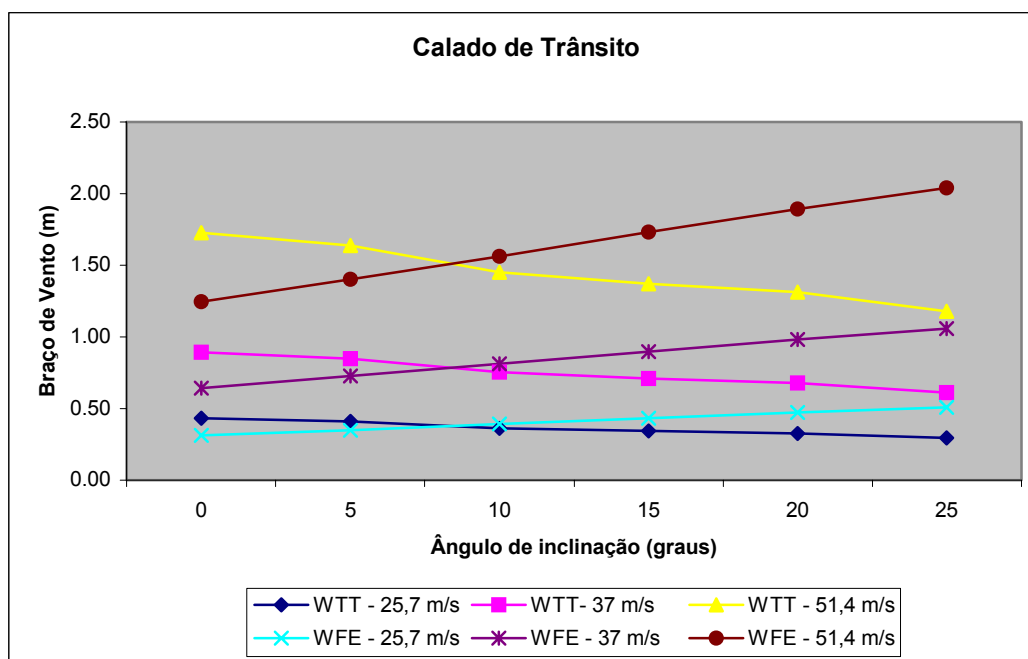


Figura 4.13 – Valores de Braço de vento para o calado de trânsito

Já para o túnel de vento, há uma queda pequena no resultado, conforme se aumenta a inclinação. Para a embarcação em cota paralela, os resultados entre o WTT e WFE foram próximos, mas conforme aumenta a inclinação, o WFE apresentou valores muito maiores, devido ao aumento da área de vento.

Para cota paralela, o WFE sempre obteve resultados abaixo do WTT. Acredita-se que isto ocorra, porque existe uma força aplicada às colunas escondidas da plataforma. Percebe-se na Figura 4.2, que existem duas colunas escondidas e não contribuem para o resultado do algoritmo WFE, mas que na verdade uma força de vento é aplicada sobre estas.

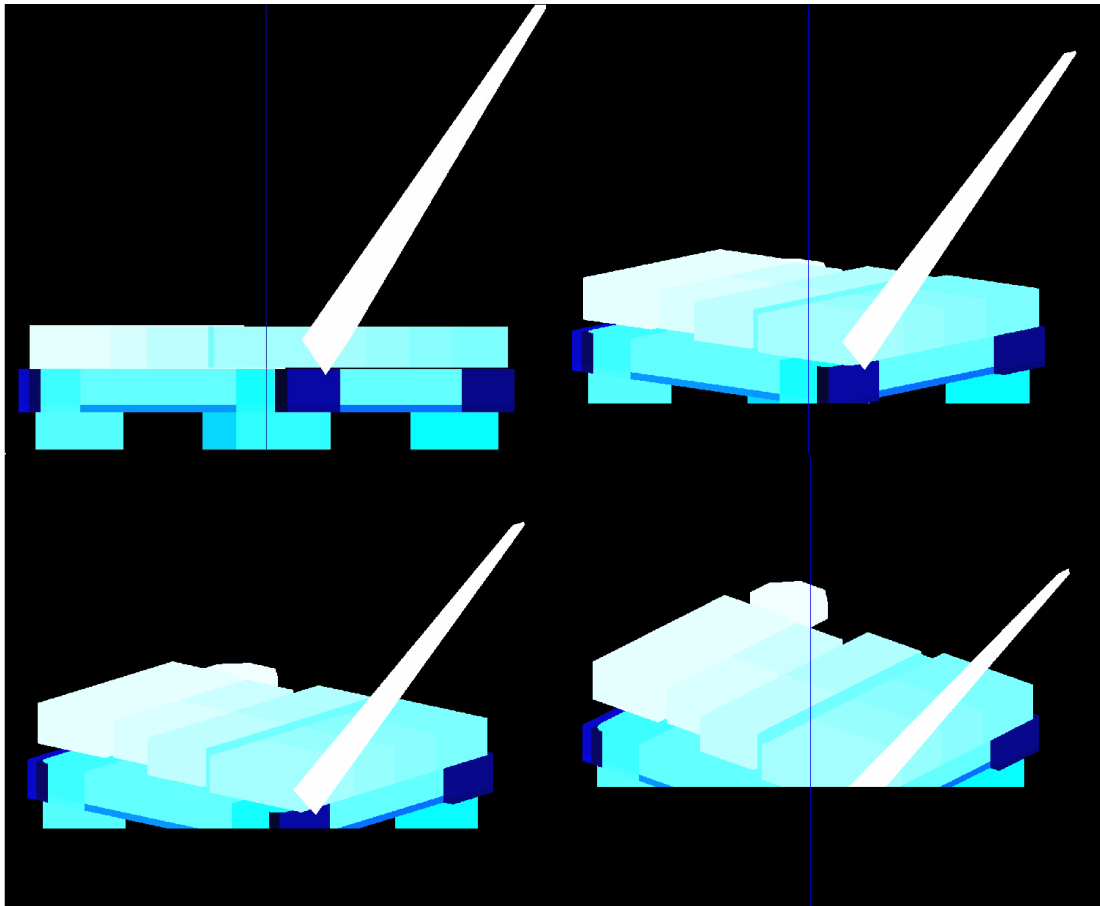


Figura 4.14 – Aumento da área de vento ao aumentar a inclinação

A Figura 4.15 mostra uma seção transversal do modelo e as linhas de vento que mostram a o provável motivo da diferença de resultados. Nota-se como o vento contorna a coluna A e depois se choca com a coluna B. Esta força aplicada à coluna B não seria computada no algoritmo de WFE. Este problema, claro, não acontece para navios.

Um meio de corrigir esse problema é considerar o efeito de Sombra no cálculo da força de arrasto entre dois cilindros [15] [16].

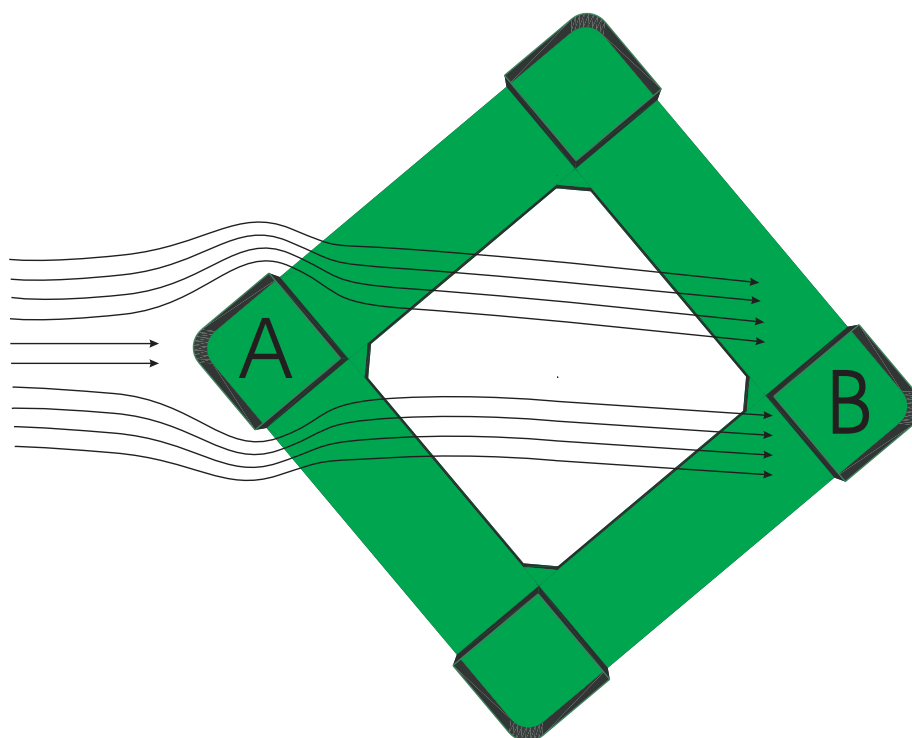


Figura 4.15 – Força do vento em superfícies ocultas.