

ACIDENTE ESTRUTURAL COM DESCARREGADOR DE MINÉRIO CAUSADO POR FORÇAS DEVIDAS AO VENTO

Eduardo de Miranda Batista¹, Max Suell Dutra², Acir Mércio Loredo-Souza³, Tiago José Limoeiro De Oliveira⁴

Resumo: Descarregadores de minério são equipamentos com estruturas de aço de grandes dimensões, submetidos a ações operacionais cíclicas e a forças impulsivas. Além das ações operacionais, a ação do vento deve ser considerada como uma das cargas variáveis principais nesse tipo de estrutura, considerando que o descarregador deve não apenas operar em condições seguras quanto à estabilidade estrutural, às tensões e deslocamentos induzidos, mas também estar apto a permanecer estacionado e imobilizado sobre o píer durante a ocorrência dos ventos mais desfavoráveis. O presente artigo apresenta a descrição de um acidente ocorrido no ano de 2003 com um descarregador de minério no Porto de Sepetiba, no estado do Rio de Janeiro, provocado pela ação do vento, levando à perda completa do equipamento, cuja massa total é de aproximadamente 1200 t. De modo a descrever tecnicamente a ação do vento, as forças aerodinâmicas foram calculadas com base teórica e, adicionalmente, foram realizados ensaios experimentais em túnel de vento considerando os dados do vento registrados no momento do acidente. O sistema hidráulico dos freios foi igualmente analisado, permitindo a comparação entre as forças de frenagem mobilizadas pelo equipamento e as forças de arrasto provocadas pelo vento. Os resultados obtidos foram utilizados para a identificação das causas do acidente, servindo, ainda, para auxiliar na tomada de decisões por parte das autoridades responsáveis pela operação do terminal de minérios de Sepetiba, com o objetivo de evitar a repetição desse tipo de acidente no futuro.

Palavras chave: acidente estrutural, análise estrutural, descarregador de minério, forças do vento, túnel de vento.

STRUCTURAL ACCIDENT OF A SHIP UNLOADER DUE TO WIND FORCES

Abstract: Ship unloaders are large machines with the steel structure subjected to operational cyclic and impulsive loading. Besides the operational loading, the wind must be taken as a main loading for this type of structure, since it must be able not only to behave in safe condition, regarding its stability, stress levels and displacements, but also to remain parked over the pier during the occurrence of the worst wind conditions. The present paper presents the description of the accident caused by wind forces that provoked the lost of a 1,200 ton ship unloader in the Sepetiba Bay Port in 2003. In order to technically describe the occurrence, the wind forces were computed with the help of theoretical background as well as with experimental results raised from wind tunnel tests, taking into account the input of the recorded data of wind during the accident. At the same time the hydraulic brake system was analyzed and the resultant braking forces were compared with the total drag wind force over the ship unloader. The results of the wind structural analysis together with the mechanical braking system were taken to conclude on the main causes of the accident and to improve the decisions that must be taken by the port authorities to avoid this type accident in the future.

Keywords: ship unloader, structural accident, structural analysis, wind forces, wind tunnel.

¹ D.Sc., Engenheiro Civil, Professor Adjunto, Programa de Engenharia Civil da COPPE e Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas da Escola Politécnica, UFRJ, C.P. 68506, CEP 21945-970 Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: batista@coc.ufrj.br

² Dr.-Ing., Engenheiro Mecânico, Professor Adjunto, Programa de Engenharia Mecânica da COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, C.P. 68503, CEP 21945-970 Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: max@mecanica.coppe.ufrj.br

³ Ph.D., Engenheiro Civil, Professor Adjunto, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, Av. Osvaldo Aranha, 99 / 305, CEP 90035-190 Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: acir@ufrgs.br

⁴ M.Sc., Engenheiro Civil, aluno de Doutorado do Programa de Engenharia Civil da COPPE, UFRJ, C.P. 68506, CEP 21945-970 Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: limoeiro@coc.ufrj.br

INTRODUÇÃO

O comportamento estrutural de equipamentos portuários para a operação de minérios está vinculado à ação das cargas de serviço, incluindo as etapas de carga e descarga de material, com o movimento de translação e içamento da caçamba e a movimentação do descarregador sobre o píer. Esse conjunto de operações obriga a estrutura de aço do descarregador a desenvolver tensões e variações de tensões dentro dos limites de segurança do material e dos elementos estruturais, de modo a garantir comportamento estrutural elástico e a evitar a ocorrência de fenômenos de flambagem e de fadiga. Devido à necessidade de se obter um conjunto estrutural leve e estável é usual a utilização de membros estruturais do tipo tubular de seção quadrada ou retangular, os quais constituem os elementos principais do descarregador (pórticos principais). Tais peças são formadas por chapas de aço soldadas, compondo as seções do tipo caixão-soldado, em geral com grande índice de esbeltez local (seção transversal de paredes finas), do que resulta a possibilidade da ocorrência de flambagem local nessas peças.

A presença de descontinuidades formadas pela presença de enrijecedores e elementos diafragma no interior dos membros tubulares, de ligações soldadas entre membros, de elementos adicionais igualmente formados por chapas de aço, como olhais e aberturas de janelas de inspeção, entre outros, associados a soldas e à inevitável variação de tensões provocada pelos procedimentos de operação do descarregador, podem conduzir à fadiga, com posterior propagação de trincas de fratura no material. Esses são alguns dos aspectos principais que devem ser observados no projeto desse tipo de estruturas. Exemplo recente de degradação estrutural provocada por fadiga em descarregador de minério foi tratado por Ronaldo Battista (Battista e Carvalho, 1998), estando relatadas nessa referência as causas dos danos estruturais identificados e as providências adotadas para a recuperação do equipamento.

Outro fator decisivo para a segurança estrutural nas operações de descarregadores de minério é a ação do vento. Trata-se nesse caso da ação de forças que podem levar ao deslocamento descontrolado de translação do equipamento sobre o píer. Esse efeito deve ser previsto no projeto estrutural, de modo a se providenciar os meios de frenagem e imobilização do descarregador, seja em condições de operação seja em situação de paralisação da operação, devido a riscos de acidentes provocados pela elevação das forças devidas ao vento. O não atendimento das condições de frenagem e imobilização do equipamento sob ação do vento podem levar a acidente de gravidade extrema, com eventual perda total do equipamento e, ainda, com possíveis perdas humanas. Esse tipo de acidente não é incomum, podendo-se referenciar, entre outros, o acidente descrito por Joaquim Blessmann, ocorrido em janeiro de 1977 na barragem de Bom Retiro do Sul, no estado Rio Grande do Sul, no Brasil, quando um pórtico de manobras foi arrastado pela ação de vento com velocidade básica de 130 km/h (36,1 m/s), para rajadas de 3 segundos de duração, produzindo a perda total do equipamento (Blessmann, 2001).

O presente artigo trata deste tipo de acidente, por ação do vento sobre descarregador de minério, sendo a análise do problema (Batista e Dutra, 2003) originada pelo acidente ocorrido na noite de 10 de janeiro de 2003, no píer do Terminal de Carvão, Tecar, operado pela Companhia Siderúrgica Nacional, CSN, no Porto de Sepetiba, no Rio de Janeiro. Naquela ocasião, ocorreu a perda total do equipamento, conforme descrição apresentada a seguir, levando a prejuízo da ordem de 10 milhões de dólares, considerando-se o custo aproximado para a reposição de equipamento equivalente, excluídos os prejuízos causados pela destruição parcial do píer e do sistema de esteiras rolantes, pelos danos causados no navio Regina e pela descontinuidade da produção no terminal.

DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO E DA ESTRUTURA

No píer do Tecar do Porto de Sepetiba operam quatro descarregadores de minério, considerando-se no presente artigo dos descarregadores de maior porte, denominados D1 e D2. O acidente a seguir relatado refere-se ao descarregador D1, com perda total, tendo o descarregador D2 sofrido avarias, sem no entanto levar a perda total. A Figura 1 apresenta fotos com uma vista aérea do píer do Tecar antes do acidente e uma vista lateral de um dos descarregadores de maior porte, D2, remanescente sobre o píer após o acidente.

Na Figura 2 apresentam-se os diversos elementos que constituem a estrutura do descarregador, com a identificação da nomenclatura que será adotada no decurso do presente trabalho.



Figura 1: (a) Vista aérea dos descarregadores sobre o píer do Terminal de Carvão da CSN (b) vista lateral do descarregador D2, idêntico ao descarregador sinistrado.

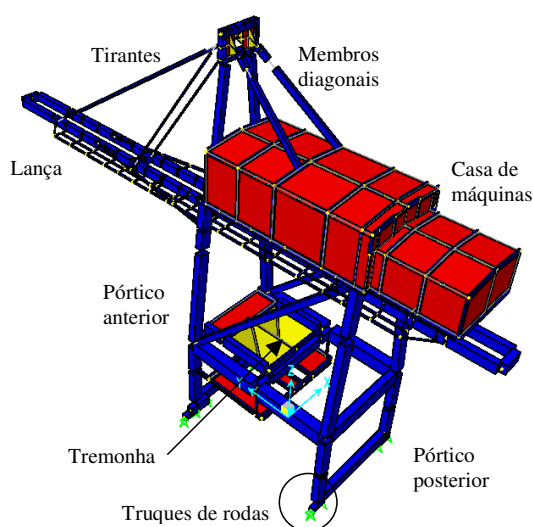


Figura 2: Descarregador de minério e nomenclatura de alguns componentes da estrutura.

Estrutura metálica

A estrutura de aço dos descarregadores D1 e D2, com altura total de 60 m, é composta por um conjunto de elementos principais, a saber: dois pórticos na direção longitudinal do píer, um junto ao cais, denominado de pórtico anterior, e outro posterior ao cais; dois pórticos na direção transversal ao cais; o travamento transversal da estrutura é proporcionado por membros diagonais ligando a face junto ao cais à face oposta ao cais, nascendo essa diagonais na elevação 16,112 m e conectando a outra extremidade no nível inferior da casa de máquinas, na elevação aproximada de 38 m; o piso da casa de máquinas é formado por vigamento em perfis laminados; acima do piso da casa de máquinas, seguindo o pórtico anterior na elevação 38,497 m, está posicionada torre formada por duas pernas para fixação dos tirantes principais de suporte da lança, torre essa estabilizada por dois membros diagonais que se conectam posteriormente aos nós estruturais que recebem as diagonais inferiores; a lança é formada por duas vigas de seção tubular retangular, sendo projetada para ser içada de modo a permitir o recolhimento da mesma na posição vertical. Finalmente, as quatro pernas principais estão apoiadas sobre quatro conjuntos de truques de rodas, cada truque com duas linhas de rodas (diâmetro das rodas de 710mm), as quais se deslocam longitudinalmente sobre o píer sobre linhas duplas de trilhos.

Conforme referido anteriormente, os membros estruturais principais são do tipo caixão fechado soldado, utilizando-se ainda perfis laminados na estruturação da casa de máquinas e seu suporte inferior. A casa de máquinas é fechada lateralmente e coberta com chapas corrugadas, formando um volume análogo a um galpão industrial, elevado a cerca de 40 metros de altura do piso do píer.

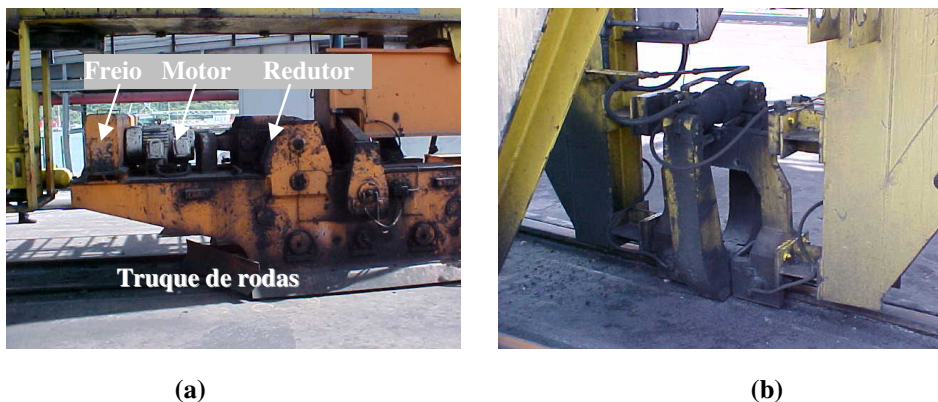
A estrutura metálica apresenta importantes ligações parafusadas, em especial nas pernas verticais e nas diagonais principais, assim como nas vigas da lança.

Os principais equipamentos alojados na estrutura do descarregador são os motores e guinchos no interior da casa de máquinas e na lança; a caçamba que se desloca ao longo da lança; a cabine do operador igualmente móvel ao longo da lança; a tremonha, situada no nível inferior do descarregador até a elevação 19 m, para recebimento do minério despejado pela caçamba e distribuição dessa carga nas esteiras rolantes; e as escadarias de acesso aos níveis superiores do descarregador. Além desses equipamentos o descarregador é dotado de uma grande quantidade de cabos de aço, de cabos de energia elétrica, de polias, pinos, olhais, etc.

Sistema de frenagem e ancoragem

O sistema de frenagem do descarregador é constituído de freios acoplados aos eixos motores e quatro grampos de ancoragem. Os grampos de ancoragem mordem os trilhos transversalmente e foram especificados no projeto original como um sistema de manutenção do posicionamento o descarregador durante sua operação de descarga de minério. Os freios de sapata acoplados ao eixo motor atuam com um torque de projeto de 13,5 kgf.m, estando protegidos da chuva e da contaminação de lubrificantes e pó de minério.

As fotos na Figura 3 apresentam o sistema de freios de sapata e o grampo de ancoragem.



Figuras 3: Sistema de frenagem do descarregador: (a) freio sapata acoplado ao eixo motor; (b) grampo de ancoragem.

A diminuição da velocidade de translação é assegurada por redutores acoplados ao eixo motor, permitindo uma redução total de velocidade de 131,5 vezes. Quando os freios de sapata estão acionados podem ocorrer duas situações: o deslizamento ou o rolamento das rodas sobre os trilhos. O deslizamento ocorre quando a força de atrito provocada pela força vertical de reação da estrutura sobre cada roda e o coeficiente de atrito roda-trilho for inferior à força frenante do sistema do freio acoplado ao motor. Já o rolamento ocorre quando a força de atrito roda-trilho for maior do que a força frenante.

Para situações extremas os descarregadores são dotados de sistema de ancoragem com cabos de aço, conectados a olhais fixos sobre o píer.

DESCRIÇÃO DO ACIDENTE

O acidente com os descarregadores D1 e D2 (ver Figura 1) ocorreu na noite do dia 10 de janeiro de 2003, entre as 23:00 e 23:15 horas (horário de verão). Registros de vídeo na guarita de segurança, na entrada do píer do Tecar, registraram o início de ventos extremamente fortes logo após as 23 horas.

Os descarregadores D1 e D2 estavam posicionados para operação de descarga no navio Stefanial, nos porões 2 e 4, respectivamente, conforme indicado na Figura 4. O deslocamento do descarregador D1 pela ação do vento, na direção oeste-leste, até o final dos trilhos, foi de aproximadamente 310 m, tomando para isso a posição aproximada da linha de

centro do descarregador. Descontando-se 13 m correspondentes à meia largura do descarregador, chegamos a um percurso aproximado de 297 m, até a percussão do pára-choque do descarregador D1 sobre o batente na extremidade leste do píer.

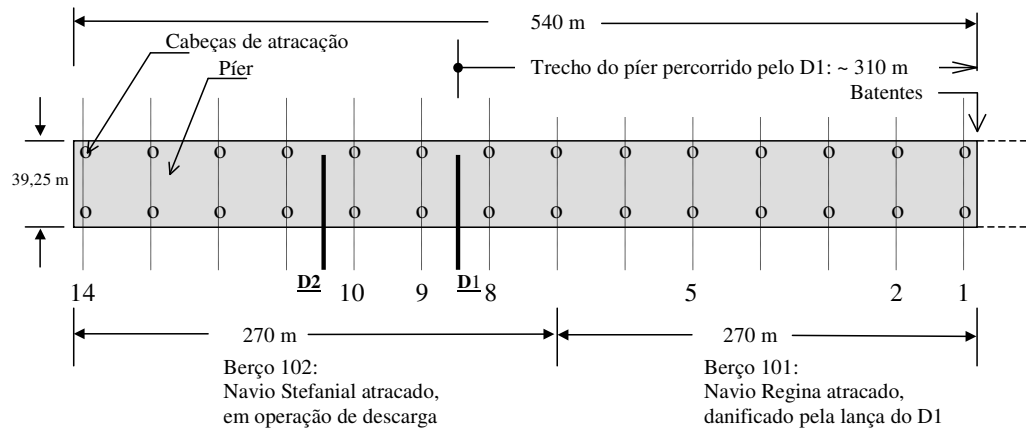


Figura 4: Planta de situação do píer do Tecar e posição dos descarregadores no momento que antecede o acidente. Descarregadores D1 e D2 estacionados e travados pelo sistema de freios, para descarga dos porões do navio Stefanial, quando foram arrastados pela ação do vento até o choque com os batentes no final do píer.

Os batentes nas extremidades dos trilhos são estruturas robustas, de aço, fixadas por chumbadores no piso de concreto do píer, conforme se observa na Figura 5. Segundo informações fornecidas pelo pessoal de operação do terminal, o descarregador D1 chocou-se com o batente e permaneceu sobre o píer, provavelmente com a estrutura danificada. A seguir, o descarregador D2, que se encontrava igualmente em movimento descontrolado, chocou-se com o D1, provocando o colapso estrutural completo desse último, levando ao desabamento da estrutura metálica e à destruição de um vão do píer de concreto. Após esse evento, o descarregador D2 permaneceu sobre o píer, tendo o seu deslocamento travado pelas estruturas remanescentes dos truques de rodas do descarregador D1, as quais não tomaram no mar. A Figura 6 apresenta os resultados do acidente, podendo-se observar o píer de concreto armado destruído.

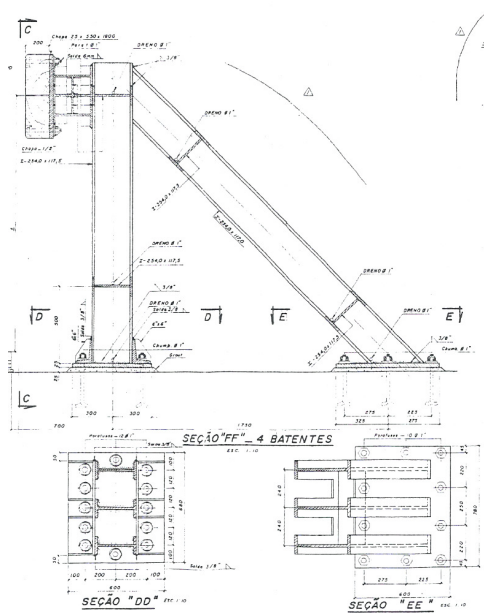


Figura 5: Batente localizado sobre o píer, no final dos trilhos.

A observação dos danos causados nas pernas dos pórticos do descarregador D2, conforme apresentado na Figura 7, apresenta indicações sobre os danos que devem ter afetado o D1 após o choque com os batentes: zonas de plastificação com a formação de mecanismos plásticos locais, os quais correspondem a danos permanentes que reduzem substancialmente a estabilidade da estrutura. A estrutura do descarregador D1, provavelmente com a formação de rótulas e zonas plásticas do tipo observado no D2, ao receber o impacto das cerca de 1200 t de massa do descarregador D2, foi levada ao colapso total.



Figura 6: Descarregador D1 tombado no mar após destruir o deck de concreto do píer e provocar danos no navio Regina. O descarregador D2 permanece em pé, avariado pelo choque contra o D1.



(a)



(b)

Figura 7: Avarias estruturais provocadas no descarregador D2 após o choque com o D1: (a) plastificação completa da seção tubular junto à base do pórtico anterior; (b) plastificação localizada na região vizinha ao apoio rotulado de uma perna do descarregador sobre o truque de rodas.

CARACTERIZAÇÃO DO VENTO DURANTE A TORMENTA

A caracterização do vento está particularmente bem descrita na região do acidente, a partir dos registros do anemômetro de registro contínuo da Companhia Portuária Baía de Sepetiba, CPBS, localizado em terminal de cargas vizinho ao Tecar, posicionado a 47 m de altura do nível do mar, distante cerca de 500 m do local do acidente (este terminal não está mostrado na foto da Figura 1.a, tendo sido construído posteriormente a esse registro).

Os registros da variação da velocidade do vento (em km/h) no tempo, no momento do acidente, estão apresentados na Figura 8. Os dados do anemômetro são registrados continuamente por um sistema de aquisição de dados, gerenciado por programa de computador, e permite a apresentação dos resultados na forma do gráfico apresentado naquela figura. No entanto, não há registros da direção do vento, o que representa uma lacuna importante, como se verá mais adiante.

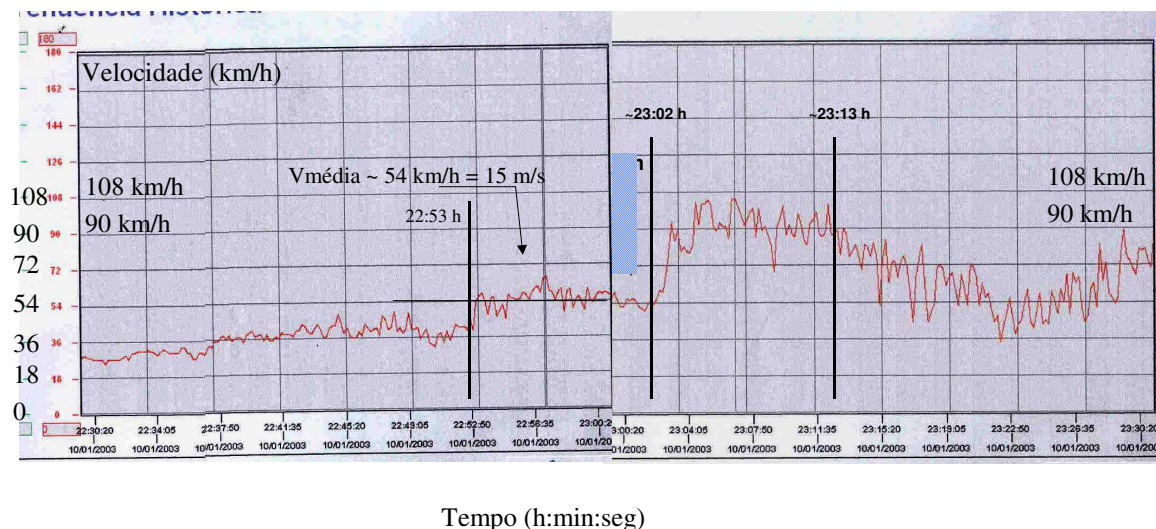


Figura 8: Registro da velocidade do vento captado pelo anemômetro da CPBS, no período precedente e durante a tormenta que causou o acidente.

Os dados de velocidade do vento foram utilizados tanto para a reconstituição da cinemática do acidente (movimento dos descarregadores sobre o píer) quanto para a definição das velocidades básicas do vento adotadas para o cálculo das forças do vento sobre a estrutura do descarregador.

Dos registros do vento fornecidos pela CPBS e apresentados na Figura 8 percebemos o seguinte:

- Até as 22:53 horas, tanto a velocidade média quanto os picos de rajadas do vento permanecem abaixo de 50 km/h (13,9 m/s).
- Entre 22:53 e 23:02 horas, a velocidade média do vento se mantém próxima de 54 km/h (15,0 m/s). Nesse período, o registro de pico máximo de rajada é de 66 km/h (18,3 m/s).
- A partir das 23:02 horas registra-se forte aumento da velocidade do vento, com picos de rajada que atingem o valor máximo de 104,9 km/h (29,1 m/s) às 23:07 horas, e velocidade média da ordem de 90 km/h (25 m/s). Essa característica do vento permanece até as 23:13 horas, quando o valor médio começa a reduzir, mantendo-se no entanto fortes rajadas (parcela flutuante do vento).

Verificamos, portanto, que o vento com velocidades de rajadas acima de 90 km/h (25 m/s) teve ocorrência durante cerca de 11 minutos, tempo suficiente para colocar os descarregadores em movimento e sustentar uma resultante de forças aerodinâmicas sobre as estruturas, que impulsionaram as 1200 toneladas de cada equipamento em direção ao batente e ao conseqüente desastre.

De modo a verificar a precisão das medidas de velocidade do vento acima referidas, foi providenciada a calibração do anemômetro, trabalho esse realizado pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da UFRGS, tendo-se concluído que o equipamento encontrava-se convenientemente calibrado.

Com o objetivo de levantar mais informações sobre o vento, foram utilizados registros da Base Aérea de Santa Cruz, situada em região próxima de Sepetiba, através de registros no padrão METAR (Meteorological Aerodrome Report). Nessa documentação encontramos três registros, entre 23:10 e 23:20 h, indicando velocidades do vento de 18 e 30 nós (33,3 e 55,6 km/h) e, mais importante, a direção registrada do vento, em todos os registros, foi de 270°. Isso significa vento soprando na direção oeste-leste, indicando que o vento incidiu na direção longitudinal do píer, conforme apresentado na planta de situação do TECAR, na Figura 9.

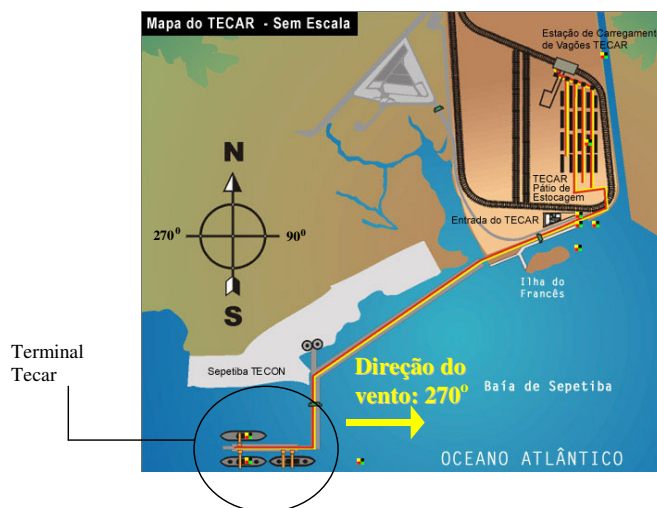


Figura 9: Planta de situação do píer do Tecar no Porto de Sepetiba.

ANÁLISE DAS FORÇAS DO VENTO

As forças do vento que atuaram sobre a estrutura do descarregador por ocasião do acidente foram estimadas com base nos registros do anemômetro da CPBS, apresentados anteriormente. No entanto, para a transformação dos dados de velocidade do vento em forças sobre a estrutura é necessária a adoção de coeficientes aerodinâmicos confiáveis, de modo a compor as diversas contribuições da ação do vento sobre os vários elementos da estrutura. Em primeira aproximação, foram adotados os coeficientes sugeridos pela norma brasileira para cálculo das forças de vento sobre estruturas, NBR 6123 (ABNT, 1988).

Os coeficientes aerodinâmicos prescritos pela NBR 6123 devem ser considerados de modo crítico no presente caso, especialmente com relação à situação da casa de máquinas dos descarregadores, cuja forma corresponde exatamente a um galpão do tipo industrial, porém não assente sobre o terreno. O fluxo de ar contorna esse volume por cima, pelos lados e por baixo, diferentemente de uma edificação convencional. Além disso, os efeitos das interferências entre as diversas peças, em interação com o fluido, podem conduzir a comportamento não previsto na norma brasileira. Esse ponto só pode ser completamente esclarecido através de uma análise experimental em túnel de vento, sendo essa avaliação adicional fortemente recomendada no caso presente.

Os coeficientes aerodinâmicos da norma brasileira devem ser aplicados em estrita concordância com as situações para as quais são previstos. Em casos especiais, de estruturas não convencionais, se aplicam todos os princípios de análise de forças de vento contidos naquela norma, com o cuidado adicional de se avaliar experimentalmente os coeficientes aerodinâmicos, conforme está explicitado no item 1.2 da NBR 6123:

“Esta Norma não se aplica a edificações de forma, dimensões ou localização fora do comum, casos estes em que estudos especiais devem ser feitos para determinação da forças atuantes do vento e seus efeitos. Resultados experimentais em túnel de vento, com simulação das principais características do vento natural, podem ser usados em substituição do recurso aos coeficientes constantes dessa norma” .

Forças do vento segundo a Norma brasileira NBR 6123

As forças do vento sobre a estrutura foram calculadas a partir dos registros de velocidade de vento, fornecidos pelo anemômetro da CPBS. Para isso, a variação da velocidade registrada no tempo, medida a 47 m de altura, $V_{47}(t)$, foi transformada em velocidade básica em função do tempo, $V_0(t)$, válida para a altura de referência de 10 metros, conforme a equação (1). O perfil da variação da velocidade do vento em função da altura z é dado pelo fator de amplificação $(z/10)^{0,06}$, válido para rajadas de 3 segundos de duração. Embora rajadas com duração superior a 3 segundos possam induzir a forças de vento superiores, essa diferença é pouco significativa, estando limitada, por exemplo, a cerca de 4% para rajada de 30 segundos a uma altura de 60 metros. Adotamos, portanto, rajadas de 3 segundos para os cálculos do perfil de variação da velocidade do vento em função da altura z .

$$V_0(t) = \frac{V_{47}(t)}{(47/10)^{0,06}} = \frac{V_{47}(t)}{1,097} \quad (1)$$

A Figura 10 apresenta o registro fornecido pela CPBS e os valores calculados da velocidade básica $V_0(t)$, a partir da equação (1). Esses resultados indicam o valor máximo da velocidade básica do vento igual a 95,6 km/h (26,6 m/s), cerca de 76% do valor máximo previsto pela norma brasileira para a região, igual a 35 m/s para vento cinquentenário.

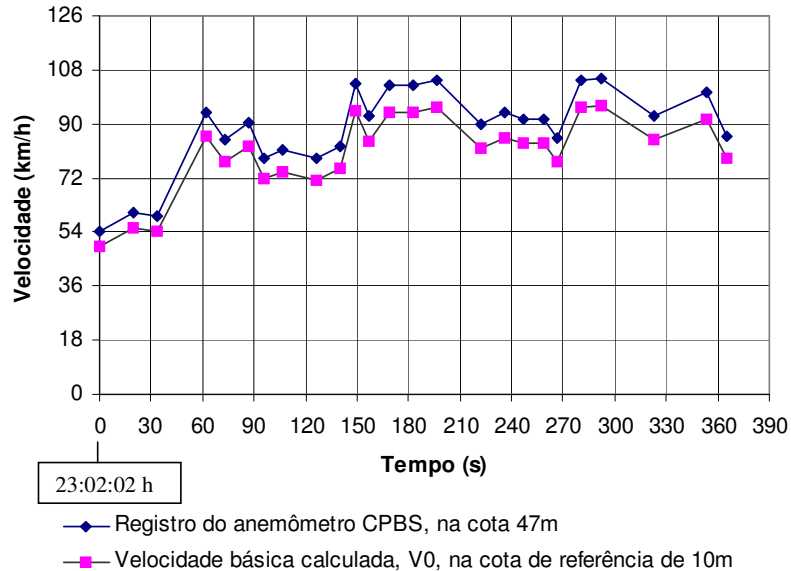


Figura 10: Velocidade do vento medida no anemômetro da Companhia Portuária Baía de Sepetiba (cota 47 m) e velocidade básica do vento calculada, V_0 (cota de referência 10 m).

A origem dos coeficientes aerodinâmicos de pressão e de arrasto adotados para o cálculo das forças de vento, fornecidos pela NBR 6123, estão indicados na Tabela 1.

Tabela 1: Coeficientes aerodinâmicos de pressão e de arrasto segundo a NBR 6123.

Tipo de elemento estrutural	Tabela na NBR6123
Barra de seção retangular	Tabela 12
Perfil I ou H	Tabela 12
Paredes	Tabela 4
Telhado	Tabela 5
Placas isoladas	Tabela 16

A força total máxima de arrasto da estrutura, calculada com base na NBR 6123, foi de 692 kN, válida para a velocidade básica V_0 igual a 95,6 km/h (26,6 m/s).

Análise experimental em túnel de vento

A análise experimental da ação do vento sobre o descarregador de minério foi realizada no Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann, do Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Para isso, foi construído um modelo reduzido do descarregador de minério, em escala 1:120. Foto do modelo reduzido está mostrada na Figura 11. Trata-se de um túnel de vento de camada limite de retorno fechado, projetado especificamente para ensaios estáticos e dinâmicos de modelos de construções civis. Este túnel permite a simulação das principais características de ventos naturais. Tem relação “comprimento / altura” da câmara de ensaios superior a 10. A velocidade máxima do escoamento de ar nesta câmara, com vento uniforme e sem modelos reduzidos instalados em seu interior, é de 42 m/s (150 km/h). A simulação correta das principais características do vento natural em túneis de vento é

requisito básico para aplicações em Engenharia Civil (Davenport e Isyumov, 1967) sem a qual os resultados obtidos podem se afastar consideravelmente da realidade.



Figura 11: Modelo reduzido do descarregador instalado para ensaios no túnel de vento (Prof. Joaquim Blessmann, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul).

Descrição detalhada da análise experimental do descarregador em túnel de vento está incluída no Relatório *Estudo da ação estática do vento sobre o pórtico da CSN* (Loredo-Souza e Rocha, 2003).

O vento foi simulado de acordo com as características do terreno em torno do local do acidente, o qual corresponde a terreno com rugosidade de Categoria I da NBR 6123 (superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente; por exemplo: mar calmo).

Para o cálculo dos coeficientes aerodinâmicos, a pressão dinâmica de referência, q , foi determinada a partir da velocidade média do vento a uma altura correspondente, em escala real, a 54 m acima da base do pórtico. Para a determinação da força de arrasto aerodinâmico sobre o modelo foi utilizada uma balança de força unidirecional horizontal, instalada na base do modelo e alinhada com o eixo do túnel.

Foram feitos registros das forças de arrasto médias e dos momentos fletores médios na base do modelo, para diferentes valores de velocidade do escoamento, de forma a se verificar uma eventual influência do número de Reynolds (Re). Os ensaios foram realizados com vento incidindo no modelo reduzido do descarregador entre 0° e 345° , com medidas a cada 15° . Os resultados obtidos para os coeficientes de arrasto C_a e de momento C_m estão apresentados na Figura 12, assim como a referência para o ângulo de incidência do vento.

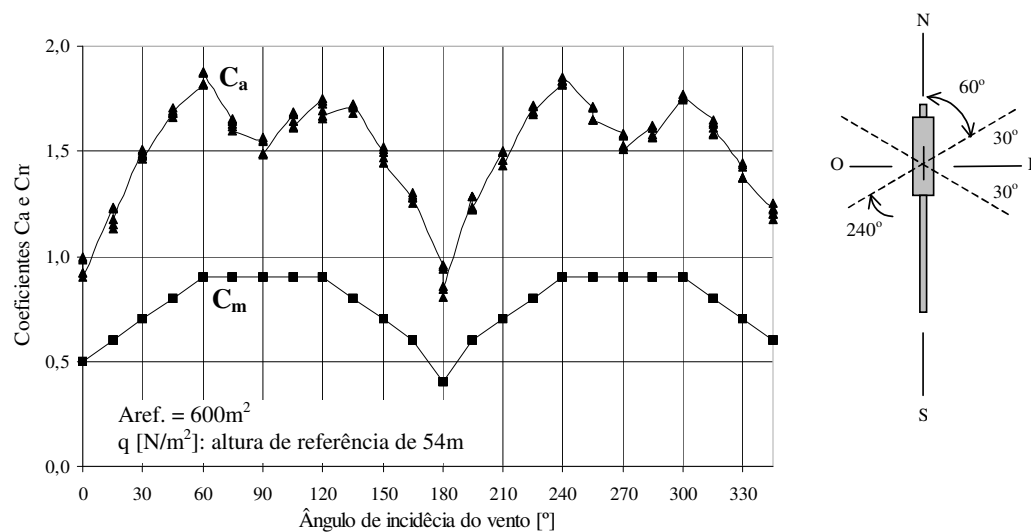


Figura 12: Coeficientes de arrasto e de momento, C_a e C_m , obtidos dos ensaios em túnel de vento.

A partir da análise dos resultados obtidos, percebe-se que os maiores valores de C_a foram atingidos para ângulos de incidência do vento em torno de 30° em relação a um eixo perpendicular à maior fachada do descarregador (direção longitudinal de translação sobre o píer). Nos ensaios estes ângulos correspondem a 60° e 240° . O valor máximo do coeficiente de arrasto é $C_a = 1,9$.

Para o cálculo das forças globais do vento sobre a estrutura, deve-se proceder conforme indicado nas equações (2) e (3), a primeira para a força global de arrasto F e a segunda para o momento global na base da estrutura M .

$$F = C_a q A_{ref} \quad (2)$$

$$M = C_m q A_{ref} H \quad (3)$$

onde C_a e C_m são os coeficientes experimentais de arrasto e de momento, q é a pressão dinâmica correspondente à velocidade média de referência, A_{ref} é a área de referência igual, nesse caso, a 600 m^2 , e H é a dimensão de referência, igual a 54 m .

A força máxima de arrasto foi calculada com o valor máximo de $C_a = 1,9$, obtendo-se $F = 604 \text{ kN}$. Esse valor corresponde a cerca de 87% do valor obtido dos cálculos com base na NBR 6123. O momento máximo foi igualmente calculado, com $C_m = 0,9$, obtendo-se $M = 15450 \text{ kNm}$.

ANÁLISE DO SISTEMA DE FRENAGEM

Sistema de frenagem análogo ao do descarregador acidentado foi testado no Porto de Sepetiba, posteriormente ao acidente, de modo a verificar sua eficiência real. O sistema de grampos de ancoragem (ver Figura 3(b)) foi testado para vários níveis de pressão hidráulica (de 80 a 125 bar), verificando-se a força de mordedura sobre os trilhos secos ou molhados. Verificou-se, ainda, a velocidade de acionamento completo (100% da pressão hidráulica) dos grampos, concluindo-se que esse sistema é eficiente para os intervalos de tempo de mudança brusca da velocidade do vento (efeito de rajadas) registrados durante a tormenta. Concluiu-se, desse modo, que os grampos de ancoragem podem ser considerados como ativos durante a ação dos ventos que atingiram o descarregador, constituindo um sistema adicional e auxiliar aos freios-motores principais.

O sistema elétrico-eletrônico de controle do descarregador, incluindo os controladores lógicos programáveis (CLP's), foram igualmente examinados, verificando-se que para velocidades de vento de 45 e 60 km/h o sistema realiza operações de segurança, com o desligamento de motores e acionamento automático da frenagem, inclusive dos grampos de ancoragem.

As forças de frenagem do descarregador sobre cada roda do sistema de translação foram calculadas para trilho seco e molhado, adotando-se os seguintes coeficientes de atrito: $\mu_{seco} = 0,16$ e $\mu_{molh} = 0,08$ (RUNGE, 2002). O cálculo dessas forças de frenagem desenvolvidas durante a simulação da tormenta levaram em conta as forças de reação das rodas sobre os trilhos, variáveis no tempo, sendo esses dados originados da análise estrutural descrita a seguir.

ANÁLISE ESTRUTURAL

Para a análise da estrutura foi adotado modelo em elementos finitos, com elementos de barra e de placa, esses últimos para modelar o fechamento da casa de máquinas e a tremonha, conforme apresentado na Figura 13. Esse modelo foi calibrado com auxílio de dados do comportamento dinâmico da estrutura dos descarregadores D1 e D2, utilizando resultados de medições experimentais realizadas anteriormente nos descarregadores (Battista e Roitman, 1993), com o objetivo de reparar danos de fadiga na estrutura principal dos mesmos.

Na Tabela 2 estão apresentados os valores das frequências naturais, obtidos experimentalmente e pela presente análise computacional. Observa-se a boa correlação entre esses valores, para os 4 primeiros modos globais de vibração, a saber: modo de torção (1° modo), modo de flexão longitudinal do descarregador (2° modo), modo de flexão transversal do descarregador (3° modo), modos de flexão vertical da lança móvel (4° e 5° modos), modo de flexão horizontal da lança (6° modo). Os demais resultados apresentados na tabela correspondem a modos de vibração de flexão global da estrutura.

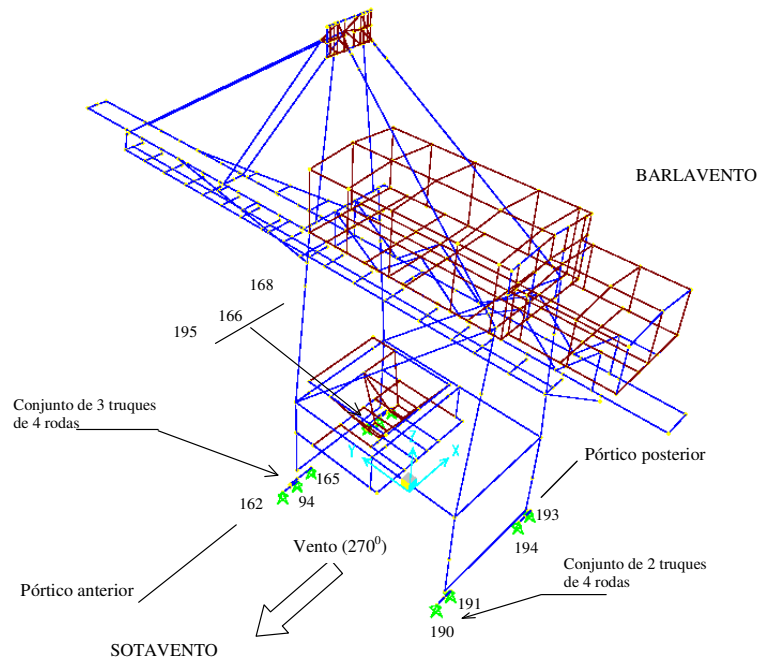


Figura 13: Modelo de barras em elementos finitos (excluídos os elementos de placa de fechamento da casa de máquinas) e nomenclatura dos nós nos apoios sobre os truques de rodas e direção do vento durante o acidente.

Tabela 2: Modos de vibração da estrutura do descarregador.

Modos de vibração	Resultados experimentais (Hz)	Resultados computacionais (Hz)
Primeiro	0,36	0,36
Segundo	0,48	0,50
Terceiro	0,92	0,93
Quarto	1,28	-
Quinto	1,48	1,48
Sexto	1,70	1,68
Sétimo	1,88	1,81
Oitavo	2,00	2,05

A partir das forças do vento previamente calculadas para os diversos componentes da estrutura, aplicou-se o carregamento variável no tempo, associado à variação da velocidade do vento originada dos registros do anemômetro da CPBS (Figuras 8 e 10). Nesse caso, o perfil de variação das forças com a altura da estrutura obedecem a equação (4):

$$F_v = F_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^{2p} \quad (4)$$

sendo as forças F_v função das forças obtidas para a altura de referência de 10 m, F_{10} . Destacamos ainda que, devido ao fato de dispormos dos registros do vento, não foi necessária a adoção do modelo de forças de vento sugerido na norma NBR6123, com a composição das parcelas média e flutuante do vento tomadas com base em um período de 10 minutos. Adicionalmente, considerou-se que os efeitos das rajadas de vento ocorreram simultaneamente sobre o conjunto da estrutura, sempre de acordo com o gráfico da Figura 10.

Finalmente, adotou-se no modelo de análise os valores das taxas de amortecimento previamente medidos experimentalmente (Battista e Roitman, 1993): 6% para o primeiro modo de torção (0,36 Hz) e 5,5% para o modo de flexão longitudinal (0,48 Hz). Para os demais modos de vibração adotou-se o valor de 1% para a taxa de amortecimento.

A título de exemplo, a Figura 14 apresenta os resultados da variação da força vertical aplicada no truque do pórtico anterior, conforme nomenclatura na Figura 13, e a Figura 15 mostra a variação da força total de arrasto F , ambas resultantes da análise computacional. A Figura 16 apresenta o esquema estrutural dos truques de rodas, referentes aos pórticos anterior e posterior.

Desse modo, foram determinadas todas as reações horizontais sobre os truques de rodas, assim como as reações verticais individuais sobre cada roda de suporte do descarregador, considerando a combinação de cargas de peso próprio da estrutura e equipamentos, e do vento, este último variando no tempo.

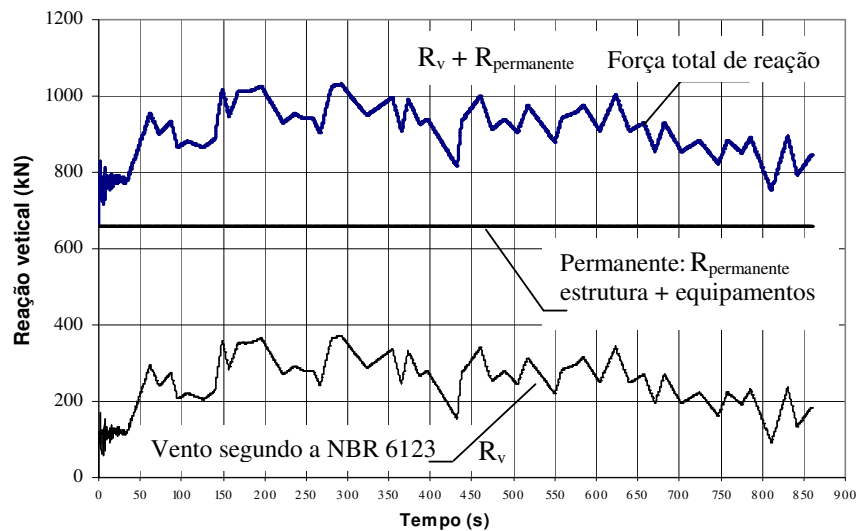


Figura 14: Variação da força de reação vertical sobre o truque do pórtico anterior a sotavento (nó 94 nas Figuras 13 e 16): R_v é a reação variável devida ao vento e $R_{\text{permanente}}$ é a reação devida às ações permanentes.

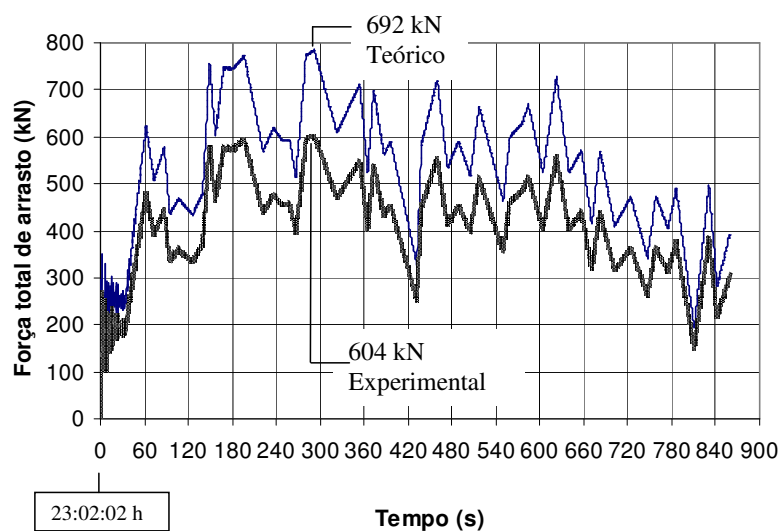
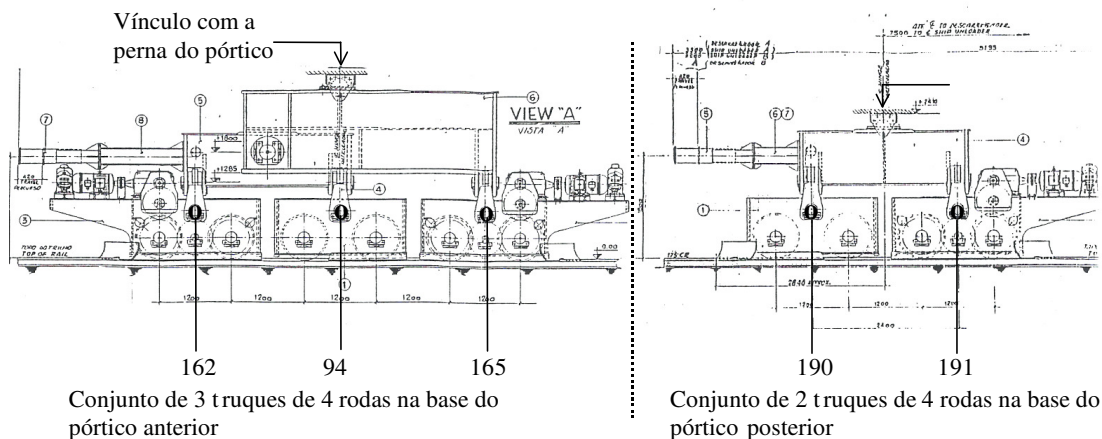


Figura 15: Variação da força total de arrasto: valores teóricos segundo a NBR 6123 e segundo os resultados experimentais do túnel de vento, com coeficiente de arrasto $C_a = 1,9$.



Figuras 16: Vista lateral dos truques de rodas dos pórticos anterior e posterior, na posição a sotavento. Correspondência com os nós do modelo estrutural indicados na Figura 13.

SIMULAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE FRENAGEM EM PRESENÇA DE DISTINTAS COMBINAÇÕES DE VELOCIDADE E DIREÇÃO DO VENTO

Para a avaliação da eficiência do sistema de frenagem do descarregador, em presença das várias combinações de direção e velocidade do vento, foram estabelecidas as seguintes hipóteses de cálculo: (a) determinação da velocidade crítica do vento, V_{cr} , para a qual as forças de arrasto (com base nos dados experimentais) igualam a capacidade de frenagem do equipamento, (b) o sistema de frenagem conta com a contribuição dos grampos de ancoragem operando a 80, 100 ou 125 bar (essa última a pressão de projeto), (c) resultados baseados na análise estrutural para distintas direções do vento, varrendo-se a cada 15° .

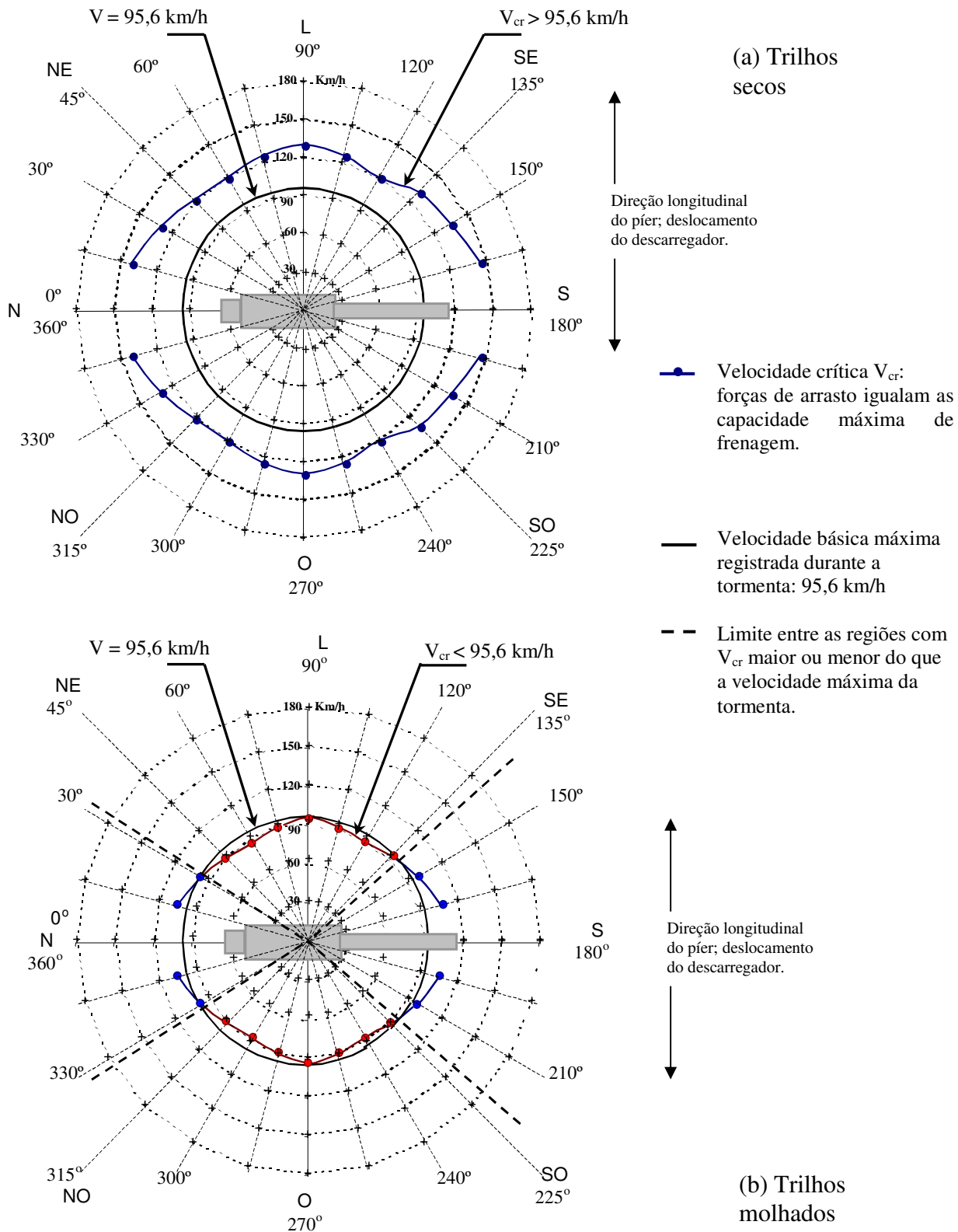
Os resultados obtidos estão apresentados nas Figuras 17(a) e (b), respectivamente para trilhos secos ou molhados. Esses gráficos apresentam a escala da velocidade básica do vento em km/h e as direções da rosa dos ventos. Estão representadas nessa figura a velocidade básica (V_0) máxima durante a tormenta, igual a 95,6 km/h, e as velocidades do vento correspondentes a forças de arrasto que igualam a força de frenagem mobilizada pelo equipamento, denominada de velocidade crítica V_{cr} , para o caso de contribuição máxima dos grampos de ancoragem, operando a 125 bar. Apresentam-se duas situações distintas: $V_{cr} > 95,6$ km/h e $V_{cr} < 95,6$ km/h. No primeiro caso a força de arrasto é insuficiente para movimentar o descarregador, enquanto o segundo caso reproduz a condição de acidente, com a força total de arrasto superando as forças de frenagem do equipamento.

O gráfico da Figura 17(a) indica que o sistema de frenagem seria eficiente para qualquer direção de vento durante a tormenta, desde que os trilhos estivessem secos. A Figura 17(b), por outro lado, indica que, para a velocidade do vento registrada durante a tormenta, soprando aproximadamente em direções entre 45° e 135° , ou entre 225° e 330° , o sistema de frenagem é incapaz de impedir o deslocamento do descarregador sobre os trilhos do píer. Vencida a força de atrito estático o equipamento inicia o deslocamento de cerca de 1200 t de massa, agravado pela sustentação das forças devidas ao vento, condição essa que só poderá ser estancada pelas estruturas fixas dos batentes localizados no final dos trilhos. Nesse caso, a única forma de manter os descarregadores estacionados é o acionamento de meios adicionais de ancoragem da estrutura sobre o píer, como é o caso do sistema de cabos de aço existente nos descarregadores D1 e D2.

Finalmente, ao observarmos os dados do vento durante a tormenta, fornecidos tanto pelo relatório METAR da Base Aérea de Santa Cruz, citado anteriormente do item de caracterização do vento, quanto pela Estação Auxiliar de Santa Cruz do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), verificamos que o vento incidiu em direção muito próxima de 270° , portanto dentro da faixa crítica acima indicada.

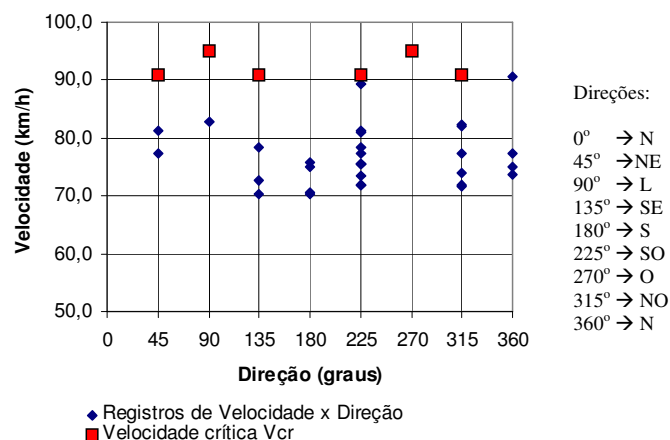
CONCLUSÕES

Várias conclusões podem ser obtidas do estudo desenvolvido, cujo objetivo fundamental era a identificação das causas do acidente. Essas conclusões revestem-se de importância fundamental, devido à interferência dos agentes seguradores no processo de ressarcimento dos prejuízos decorrentes do acidente.



Figuras 17: Resultados da comparação entre a velocidade crítica do vento V_{cr} , calculada a cada 15° e incluída a ação dos grampos de ancoragem com pressão hidráulica de 125 bar, e a velocidade máxima registrada do vento durante a tormenta, para condições de trilhos: (a) secos e (b) molhados.

- O acidente não foi, necessariamente, provocado por funcionamento inadequado do sistema de frenagem, devido a deficiência dos procedimentos de manutenção.
- O acidente não foi, necessariamente, provocado por mau funcionamento ou operação inadequada dos equipamentos eletro-eletrônicos de segurança dos descarregadores.
- Mesmo com a mobilização do sistema completo de frenagem, inclusive com os grampos operando em condições ideais (pressão máxima de 125 bar e sem desgastes), o acidente se produziria na noite do dia 10 de janeiro de 2003.
- Para a tormenta registrada, a única forma de evitar o acidente seria a ancoragem do descarregador ao píer com o sistema adicional de cabos aços.
- A análise dos registros de vento fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia, referentes à região de Santa Cruz (estação de medição mais próxima do Porto de Sepetiba) revelou que, não apenas os registros de frequência de velocidade do vento na região, mas, igualmente, os valores registrados de frequência da direção do vento são importantes para a avaliação da probabilidade de ocorrência de eventos com capacidade de provocar acidentes com os descarregadores de minério sobre o píer do Terminal de Carvão do Porto de Sepetiba. Essa conclusão está baseada na análise dos resultados dos registros fornecidos pelo INMET (Estação Climatológica Auxiliar de Santa Cruz, Rio de Janeiro), correspondentes a um período de 15 anos de registros dos ventos com velocidade acima de 70 km/h, conforme apresentado na Figura 18. Nessa figura se observa que os ventos máximos na região do acidente não se repetem, de forma sistemática, na faixa de direções mais desfavoráveis para os descarregadores. A hipótese comumente admitida, de que os ventos máximos na região costeira do Rio de Janeiro sopram na direção SO (vulgarmente denominado como “vento sudoeste”) não é confirmada pelos registros. Na Figura 19 apresenta-se a distribuição da frequência da direção do vento, para a mesma base de dados do INMET, verificando-se que o vento de sudoeste é, efetivamente, o mais freqüente, mas não exclusivo nessa região. Na Figura 18 observamos, ainda, que os ventos registrados durante o período de 15 anos (apenas ventos acima de 70 km/h, ou 19,4 m/s) apresentam dispersão considerável da direção e as velocidades máximas não estão concentradas em nenhuma direção preferencial.
- Na avaliação da probabilidade de ocorrência de vento com capacidade para provocar o deslocamento dos descarregadores no píer do TECAR, deve ser levada em conta a probabilidade do vento ocorrer em uma combinação de velocidade e direção, que provoque forças de arrasto suficientes para superar a capacidade de frenagem da estrutura estacionada.
- A combinação desses dois fatores, velocidade e direção, leva à conclusão de que a probabilidade de ocorrência de evento que conduza ao deslocamento da estrutura é mais rara do que a simples aplicação dos registros de velocidade nos cálculos.
- A probabilidade de ocorrência do “vento cinquentenário”, conforme prescrição da norma brasileira Forças devidas ao Vento em Edificações, NBR 6123 (ABNT, 1988), deveria ser associada à variável “direção do vento”, conduzindo, certamente, a um evento com período de recorrência maior do que cinquenta anos.
- Finalmente, voltando-se à Figura 18, verificamos que, para o período de registros, de 1983 a 1998, não encontramos nenhum evento que combine velocidade e direção, de modo a superar os valores da velocidade crítica calculada, V_{cr} , mesmo para a condição mais desfavorável de trilhos molhados.



Figuras 18: Resultado do cruzamento dos dados registrados pelo INMET (Estação Auxiliar de Santa Cruz, RJ), para Velocidade de Vento acima de 70 km/h versus Direção. Base de dados: de 1983 a 1998 (15 anos). As velocidades críticas calculadas estão igualmente indicadas.

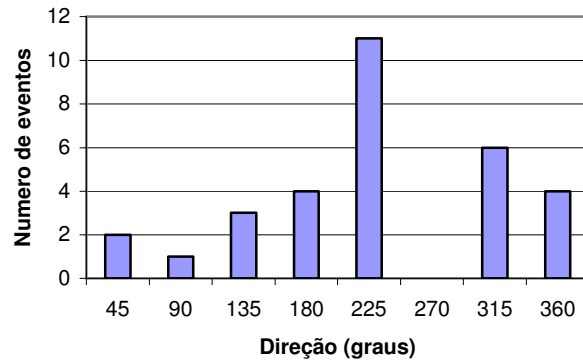


Figura 19: Frequência de ocorrência de ventos em função da direção, segundo registros do INMET (Estação Auxiliar de Santa Cruz, RJ), para velocidade de vento acima de 70 km/h. Base de dados: de 1983 a 1998 (15 anos).

Conclui-se, finalmente, que acidentes com equipamentos do tipo analisado devem ser evitados com auxílio de sistemas de ancoragem da estrutura do descarregador, adicionais aos sistemas de frenagem hidráulica. A Figura 20 apresenta um detalhe do cabo de ancoragem existente nos descarregadores de minério do Tecar, em Sepetiba. Para uso desses recursos, o sistema de controle da operação deve estar apto a não apenas acionar os freios mas, igualmente, acionar automaticamente ou emitir aviso de obrigatoriedade de ativação do sistema de ancoragem por cabos ou outros dispositivos mecânicos equivalentes.

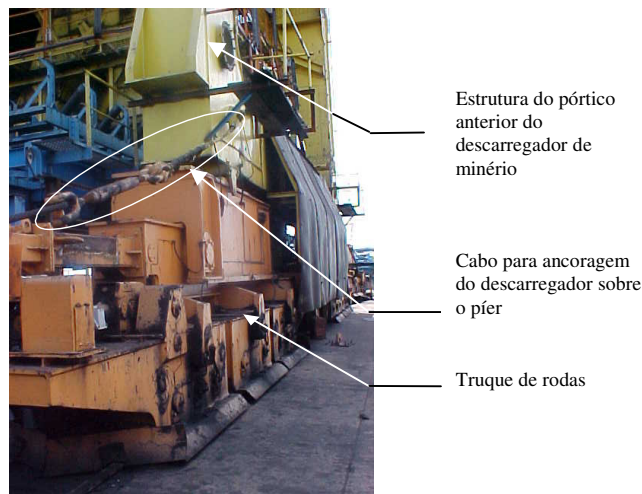


Figura 20: Detalhe do cabo de ancoragem sobre o píer de concreto armado do Terminal de Carvão do Porto de Sepetiba.

REFERÊNCIAS

- ABNT (1988). *NBR 6123 Forças devidas ao vento em edificações*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.
- Batista, E. de M. e Dutra, M. S. (2003). *Análise do acidente com os descarregadores de minério no Terminal de Carvão da CSN, no Porto de Sepetiba, RJ, Relatório PEC-4391 / PEM-4462*. Fundação COPPETEC, Rio de Janeiro, Brasil.
- Battista, R. C. e Roitman, N. (1993). *Análise estrutural dos descarregadores D1 e D2 do Porto de Sepetiba, Relatório ET-150543*. Fundação COPPETEC, Rio de Janeiro, Brasil.
- Battista, R. C. e Carvalho, E. M. L. (1998). "Structural repair and strengthening of the steel structures of ship unloaders". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Building*, Vol. 128, pp. 368-375.
- Blessmann, J. (2001). *Acidentes causados pelo vento, 4a edição*. Editora da Universidade, Porto Alegre, Brasil.

- Davenport, A. G. e Isyumov, N. (1967). "The application of the boundary layer wind tunnel to the prediction of wind loading". In: *Proceedings of the International Research Seminar: Wind Effects on Buildings and Structures*, Ottawa, Vol. 1, pp. 201-230.
- Loredou-Souza, A. M. e Rocha, M. M. (2003). *Estudo da ação estática do vento sobre o pórtico da CSN – Porto de Sepetiba, RJ*. Laboratório de Aerodinâmica das Construções, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- Runge, W. R. (2002). *Transporttechnologie II*, Fachhochschule Braunschweig, Wolfenbüttel, Braunschweig, Alemanha.