

## Determinação experimental da variação dos coeficientes de arrasto em galhos de eucalipto (*Eucalyptus* sp)

*Experimental determination of the variation of the drag coefficients in eucalyptus branches (*Eucalyptus* sp.)*

Gilder Nader<sup>a\*</sup>, Gabriel Borelli Martins<sup>a</sup>, Paulo José Saiz Jabardo<sup>a</sup>, Raquel Dias de Aguiar Moraes Amaral<sup>b</sup>, Suelem Maurício Fontes Macena<sup>b</sup>, Takashi Yojo<sup>b</sup>

a Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A.,  
Centro de Metrologia de Fluidos,  
São Paulo-SP, Brasil.

\*E-mail: gnader@ipt.br

b Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A.,  
Centro de Tecnologia de Recursos Florestais. São Paulo-SP, Brasil.

### Palavras-chave:

árvores urbanas, plantio industrial, eucalipto, túnel de vento, coeficiente de arrasto.

### Keywords:

*Urban trees, industrial plantation, Eucalyptus, wind tunnel, drag coefficient.*

## Resumo

Eucaliptos são árvores altas, chegam a ultrapassar 40 m de altura, crescem rápido e são frequentemente encontradas em cidades e também em plantios homogêneos com objetivos industriais, como os da indústria de papel e celulose. Por conta do seu porte, necessitam de um monitoramento constante, pois árvores como essas apresentam queda natural dos galhos e, durante tempestades, podem ocorrer quedas das árvores e acidentes. O vento é um forte agente desses acidentes e, por isso, o IPT desenvolveu um software para análise e previsão de risco de queda de árvores. No entanto, os valores dos coeficientes de arrasto utilizados nesse software são baseados nos comportamentos lineares de barras. Mas, as árvores possuem comportamentos não lineares sob ação do vento, com suas copas alterando a área vélica em função da velocidade do vento. Os ensaios foram realizados em túnel de vento, utilizando galhos de eucalipto. Os resultados obtidos apresentaram um coeficiente de arrasto de aproximadamente 0,6 para velocidade do vento de 13,1 m/s. No entanto, as árvores perdem folhas durante uma tempestade e, com isso, o valor do coeficiente de arrasto diminui.

## Abstract

*Eucalyptus trees are tall, growing taller than 40 m. They grow fast and are often found in cities and also in single-species plantations, such as plantations for pulp and paper industry. These trees need constant monitoring to avoid accidents caused by the fall of branches or even the whole trunk, especially during storms. Wind is an important factor*

*when considering the risk concerning the fall of trees and IPT has developed the Arbio software to analyze and to predict this risk. However, the drag coefficients used in this software were obtained from literature and the change of geometry caused by the wind action is not considered. Tests were carried out in the wind tunnel with eucalyptus branches to improve the results of the acting aerodynamics parameters. A drag coefficient of 0.6 was obtained for a velocity of 13.1 m/s.*

## 1 Introdução

Eucaliptos (*Eucalyptus* sp.) são frequentemente encontrados nas cidades, principalmente em praças, parques e alguns condomínios. O Parque do Ibirapuera, mais visitado da América Latina, é um caso típico da presença de eucalipto plantado no começo do século passado. Os eucaliptos também foram utilizados na arborização urbana paulistana, graças ao seu rápido crescimento. São árvores extremamente altas, chegam a ultrapassar 40 m de altura, apresentam queda natural de seus galhos e podem possuir sistema radicular pouco profundo. Por conta dessas características, sem o devido monitoramento, são árvores inadequadas para áreas povoadas, pois apresentam histórico de ocorrências de queda e acidentes (**Figura 1**). Em plantações homogêneas com objetivos industriais para produção de papel e celulose, também têm ocasionado preocupações devido à queda de árvores e de galhos. Os relatórios das empresas demonstram que, nos últimos 5 anos, os danos causados pelo vento assumiram o posto de principal agente de estragos, em relação à proteção florestal na eucaliptocultura, chegando a causar danos em 3 % a 20 % das árvores, principalmente jovens, de cada talhão.

Atualmente, existem incertezas, limitações e carecem de critérios para análise dos riscos de queda das árvores nos espaços urbanos, o que dificulta a tomada de decisão sobre o manejo mais adequado. Essa situação coloca em risco as pessoas e seus bens materiais devido à possibilidade de queda de árvores, principalmente durante a ocorrência de chuvas ou fortes ventos. O IPT desenvolveu uma metodologia para a realização do diagnóstico (IPT, 2003) e aprimorou a análise de risco de queda, baseada na biomecânica das árvores (IPT, 2004; Brazolin, 2009). Essas informações fazem parte da Solução Tecnológica Arbio – *software* para gestão da arborização urbana (Virissimo et al., 2013), que também contém o modelo probabilístico e dinâmico, que simula a árvore em 12 diferentes velocidades de vento, indicando a probabilidade de ruptura da árvore no colo (transição da raiz com o tronco). No entanto, o coeficiente de arrasto utilizado nesse modelo é empírico, obtido a partir da norma de ação do vento em edificações ou de árvores que não traduzem a realidade do comportamento da ação do vento sobre os exemplares arbóreos urbanos e brasileiros. Nesses casos, assume-se um comportamento linear das árvores, como se fossem barras. No entanto, as árvores possuem comportamentos não-lineares sob ação do vento e, dessa forma, o estudo do comportamento das árvores em túnel de vento aumenta a precisão da análise de risco de queda e possibilita melhor gestão desses exemplares.

Os ensaios experimentais realizados em túnel de vento tiveram o objetivo de determinar os coeficientes de arrasto em eucaliptos e seus comportamentos frente à ação do vento, para trazer melhor compreensão dos fenômenos envolvidos e uma faixa menor de trabalho dos valores de coeficientes de arrasto, pois tipicamente a literatura informa que esses valores variam de 0,2 até 2,0 (Koizumi, 2016).

Figura 1 - Queda de árvore de eucalipto, no leito carroçável, no bairro do Morumbi, em São Paulo



Fonte: elaborado pelo autores

## 2 Metodologia – ensaios em túnel de vento

Os ensaios de galhos de eucalipto foram realizados em túnel de vento com regime de escoamento suave (intensidade de turbulência menor que 1 %) e de escoamento turbulento (intensidade de turbulência de 7 %), com velocidades variando de 3 m/s até 16 m/s. O ensaio com escoamento suave foi realizado com todas as paredes do túnel lisas, ou seja, sem qualquer elemento fixado em suas superfícies. Já o ensaio com escoamento turbulento foi realizado fixando uma grade no interior do túnel de vento.

Os cálculos dos coeficientes de arrasto ( $C_a$ ), ver **Equação (1)**, foram realizados considerando a área vélica medida em uma das amostras de eucalipto ensaiadas em túnel de vento, como mostrada na **Figura 2**. A modelagem do galho foi realizada no AutoCADTM e o valor determinado para área das folhas, sem considerar a permeabilidade, foi  $A = 0,4972 \text{ m}^2$ . Deve ser considerado que fotografias apresentam distorções e dependendo do ângulo em que se posiciona a câmera para obtenção da foto, essas distorções podem ser maiores ou menores. Se o objeto de interesse for tridimensional, o erro pode ser ainda maior.

As medições dos esforços devidos ao vento foram realizadas fixando os galhos de eucalipto em uma balança com seis graus de liberdade ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $M_x$ ,  $M_y$  e  $M_z$ ) do fabricante Ruag, modelo 196-6M, conectada aos módulos de aquisição de dados HBM, modelo Quantum X, conectados a um microcomputador por protocolo TCP/IP, no qual os dados eram adquiridos por software dedicado da HBM com taxa de aquisição de 300 Hz.

$$F_a = C_a \cdot \frac{\rho V^2}{2} \cdot A \quad (1)$$

onde:  $F_a$  é a força de arrasto (N);  $V$  é a velocidade do vento (m/s) e  $\rho$  é a densidade do ar ( $\text{kg/m}^3$ ).

Figura 2 – Galho de eucalipto, no laboratório e o modelado no AutoCadTM para determinação da área vélica



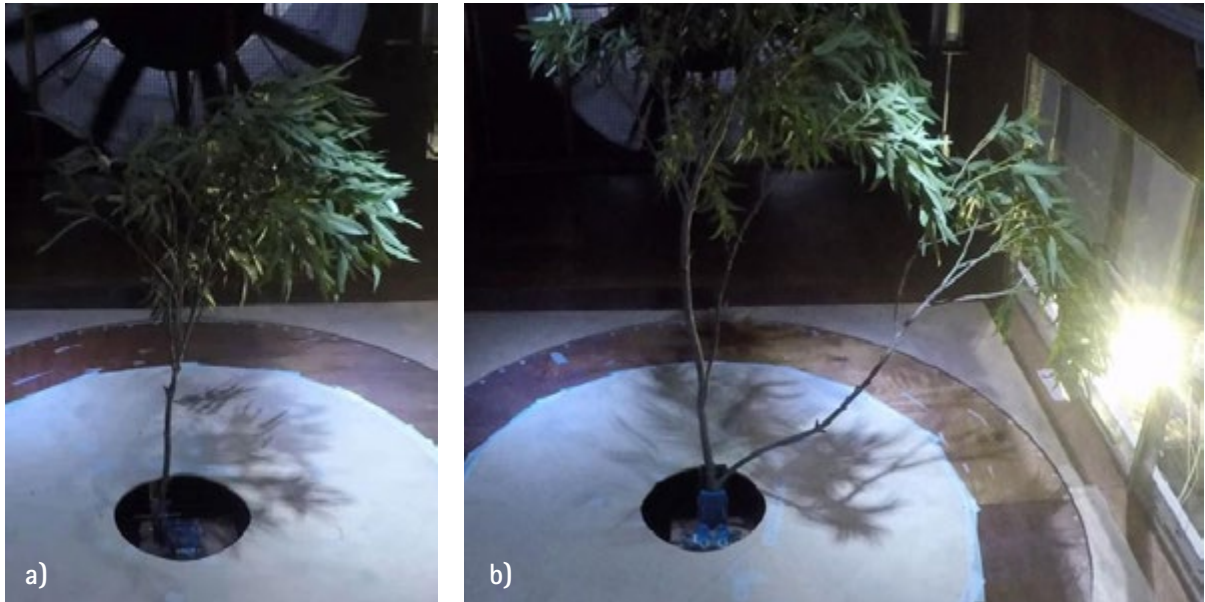
Fonte: elaborado pelo autores

Considerando-se o fato de o galho ser um elemento tridimensional e a lente da câmera fotográfica captar uma imagem distorcida e, portanto, apresentar uma área inevitavelmente com erro, tomou-se o cuidado de obter uma foto a partir do melhor posicionamento para reduzir esse erro. Dentro das possibilidades de espaço e distância do laboratório, a câmera fotográfica foi posicionada a certa distância, na posição de captação horizontal e a uma altura que possibilitasse o enquadramento de toda a área das folhas. Procurou-se, ainda, centralizar o foco no eixo de referência colocado aproximadamente no centro de gravidade do galho.

Os ensaios no túnel de vento do IPT foram realizados com os galhos de eucalipto a seguir: o isolado e o ramificado (duplo), mostrados na **Figura 3**. Dessa forma, foi avaliada a variação do coeficiente de arrasto em função da velocidade do vento e também da área projetada dos galhos e folhas.



Figura 3 – Galhos de eucalipto ensaiados no túnel de vento: a) galho isolado; e b) galho ramificado



Fonte: elaborado pelo autores

### 3 Resultados das medições dos coeficientes de arrasto

Foram realizados ensaios com escoamento em regime suave e regime turbulento. No segundo caso, a intensidade de turbulência era de 7 %. Os ensaios dos galhos isolados e dos galhos ramificados foram realizados no intervalo de velocidade de 3 m/s até 16 m/s para o ângulo de incidência do vento de 0°. Também foi verificada a alteração do coeficiente de arrasto nos galhos de eucalipto em função da variação do ângulo de incidência do vento. Nestes casos, o ensaio foi realizado à velocidade de 13,1 m/s, com escoamento em regime turbulento, nos ângulos de incidência do vento 90°, 180° e 270°, como mostrado na **Figura 4**.

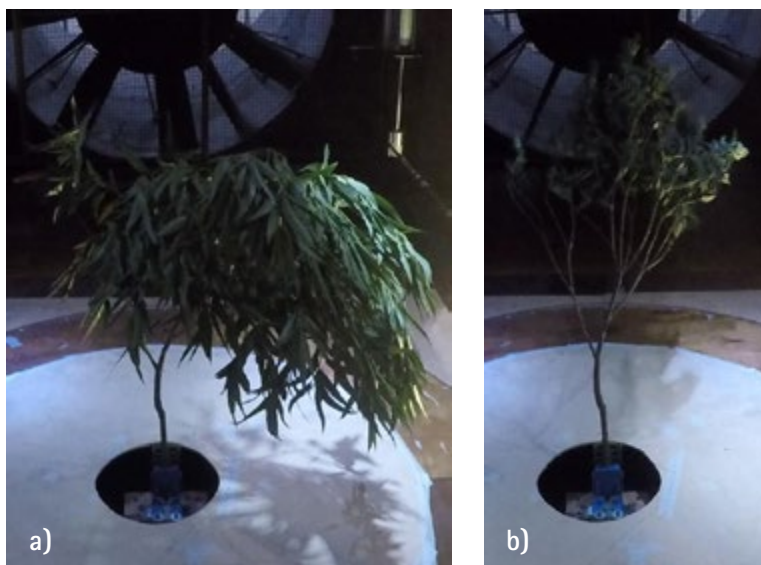
Figura 4 – Ilustração do formato dos galhos de eucalipto (a,b,c) isolado e (d,e,f) ramificado duplo para os ângulos de incidência do vento de 90°, 180° e 270°



Fonte: elaborado pelo autores

A área projetada considerada para os galhos simples foi de  $A = 0,4972 \text{ m}^2$  e, para o galho ramificado, optou-se por dobrar o valor dessa área. Essas áreas foram mantidas constantes nos cálculos, mesmo quando as folhas estavam sob ação do vento e, por isso, havia uma significativa mudança de área vélica, como pode ser observado na **Figura 5**.

Figura 5 – Comparação das áreas vélicas do galho de eucalipto numa situação (a) sem vento e (b) com vento de 13,1 m/s

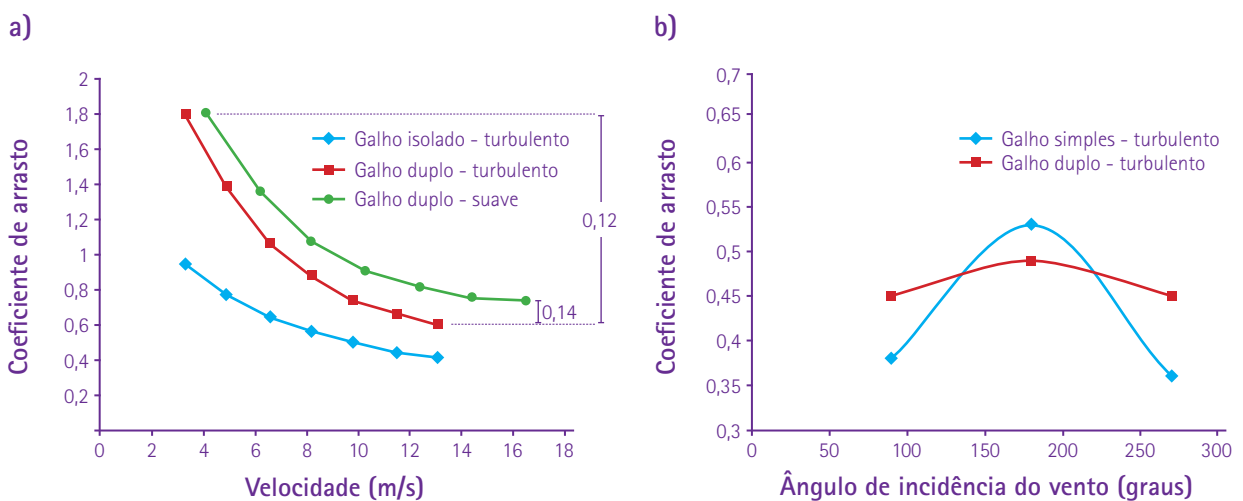


Fonte: elaborado pelo autores

Os valores dos coeficientes de arrasto obtidos para o ângulo de incidência do vento 0°, numa faixa entre 3 m/s e 16 m/s estão mostrados na **Figura 6a**. Na **Figura 6b**, são mostrados os resultados dos coeficientes de arrasto obtidos para as incidências do vento em 90°, 180° e 270°, para a velocidade do vento de 13,1 m/s.

É interessante notar que, os ensaios foram realizados com galhos isolados e ramificados duplos. Porém, os resultados obtidos com os galhos duplos de eucalipto, com escoamento em regime turbulento (**Figura 6a**), se assemelham com os resultados obtidos por Mayhead (1973) utilizando árvores de pinheiro-larício (*Pinus nigra*) com dimensões de 3 m até 4,5 m. Esta árvore tem aparência geométrica semelhante ao eucalipto (*Eucalyptus* sp.). Esses resultados iniciais indicam que o ensaio de galhos ramificados podem ser representativos para determinação dos coeficientes de arrasto. Cabe agora uma análise mais profunda, comparando também os módulos de elasticidade de ambas as madeiras.

**Figura 6 - Variação do coeficiente de arrasto em função de (a) velocidade do vento e (b) ângulo de incidência**



Fonte: elaborado pelo autores

Os resultados dos coeficientes de arrasto em função dos ângulos de incidência do vento em 90°, 180° e 270°, mostrados na **Figura 6b**, foram, em média, de 0,47. Esses valores são inferiores ao coeficiente de arrasto de 0,6, obtido para a mesma velocidade do vento, porém para a incidência em 0° (**Figura 6**). Isso possivelmente ocorreu porque o galho já havia perdido folhas, e conseqüentemente diminuído a sua área vélica.



## 4 Conclusões

Os resultados dos ensaios em túnel de vento indicaram que para velocidades do vento mais críticas, que podem derrubar árvores, ou seja, a partir de 50 km/h, o valor do coeficiente de arrasto está em torno de 0,6, valor coincidente com o obtido por Mayhead (1973) para essa velocidade do vento no ensaio do pinheiro-larício. Em seu trabalho, Mayhead (1973) conseguiu testar velocidade de 100 km/h com essas árvores, obtendo o coeficiente de arrasto em torno de 0,35. Essas informações obtidas nos ensaios em túnel de vento com os galhos de eucalipto e os obtidos por Mayhead (1973) com o pinheiro-larício servirão de base para realização de modelagem numérica do comportamento do eucalipto sob ação do vento e, com isso, melhorará a previsão de risco de queda dessas árvores.

Na sequência desse trabalho, serão analisados outros tipos de árvores, como a tipuana (*Tipuana tipu*), que é uma árvore que possui alto índice de queda na cidade de São Paulo – SP e também, determinados os módulos de elasticidade dessas árvores, será possível realizar comparações mais precisas com outras árvores analisadas em túnel de vento, por outros autores, e assim, ampliar o banco de dados sobre ação do vento em árvores.

## 5 Agradecimentos

Uma grande equipe multidisciplinar atua nessa pesquisa sobre ação do vento em árvores, todos contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho, como por exemplo, em medições dendrométricas, de propriedades físicas das madeiras, entre outras análises que não eram foco direto deste artigo. Os autores registram agradecimentos especiais a: Ana Paula de Souza Silva, Keila Karoline Magalhães Marques, Reinaldo Araújo de Lima, Cassiano Oliveira de Souza e Jordana Letícia Löw. Os autores também agradecem ao IPT por financiar e acreditar nesse projeto.

## 6 Referências

AMARAL, R. D. A. M. et al. **Metodologia para diagnóstico de cupins em árvores**. Patente: BR 00072, 22 fev. 2003.

BRAZOLIN, S. **Biodeterioração, anatomia do lenho e análise de risco de queda de árvores de tipuana, Tipuana tipu (Benth.) O. Kuntze, nos passeios públicos da cidade de São Paulo**. 2009. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

FOEKEL, C. O fenômeno de danos em árvores pela ação de ventos em florestas plantadas de eucalipto, **Eucalyptus Newsletter**, n. 46, p. 1-22, set. 2014.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Divisão de Produtos Florestais. **Comunicação Interna – Relatório Técnico apresentado à Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente**. São Paulo: IPT, 2004. v. 1, 45 p.

KOIZUMI, A.; SHIMIZU, M.; SASAKI, Y.; HIRAI, T. In situ drag coefficient measurements for rooftop trees. **Journal Wood Science**, v. 62, p. 363-369, 2016.

MAYHEAD, G. J. Some drag coefficients for british forest trees derived from wind tunnel studies, **Agricultural Meteorology**, v. 12, p. 123-130, 1973.

VIRÍSSIMO, D. B.; RUSSO, M. C.; MACHADO, M. C.; BRAZOLIN, S.; AMARAL, R. D. A. M.; YOJO, T. **Programa de Computador ARBIO**. Patente: BR512013001323-2. Data de registro: 02 dez. 2013.