

# Simulação de Camada Limite Atmosférica em Túnel de Vento

Gustavo Rabello dos Anjos  
Departamento de Engenharia  
Mecânica / UERJ

# Motivação

A principal motivação desse trabalho está relacionada aos acontecimentos meteorológicos, tais quais:

- dispersão de poluentes;
- classificação da estabilidade atmosférica;
- análise de esforços exercidos por brisas e ventos em florestas.

# Objetivos

Este trabalho é um estudo sobre escoamentos turbulentos que se desenvolvem sobre terrenos planos que apresentam uma variação brusca nas condições superficiais.

- principal objetivo: validação dos dados experimentais;
- simulação experimental de camada limite atmosférica em floresta;
- interpretação do comportamento da camada limite turbulenta quando sujeita a variações abruptas nas condições de contorno superficiais;
- análise experimental e teórica do problema proposto.

# Aparato Experimental

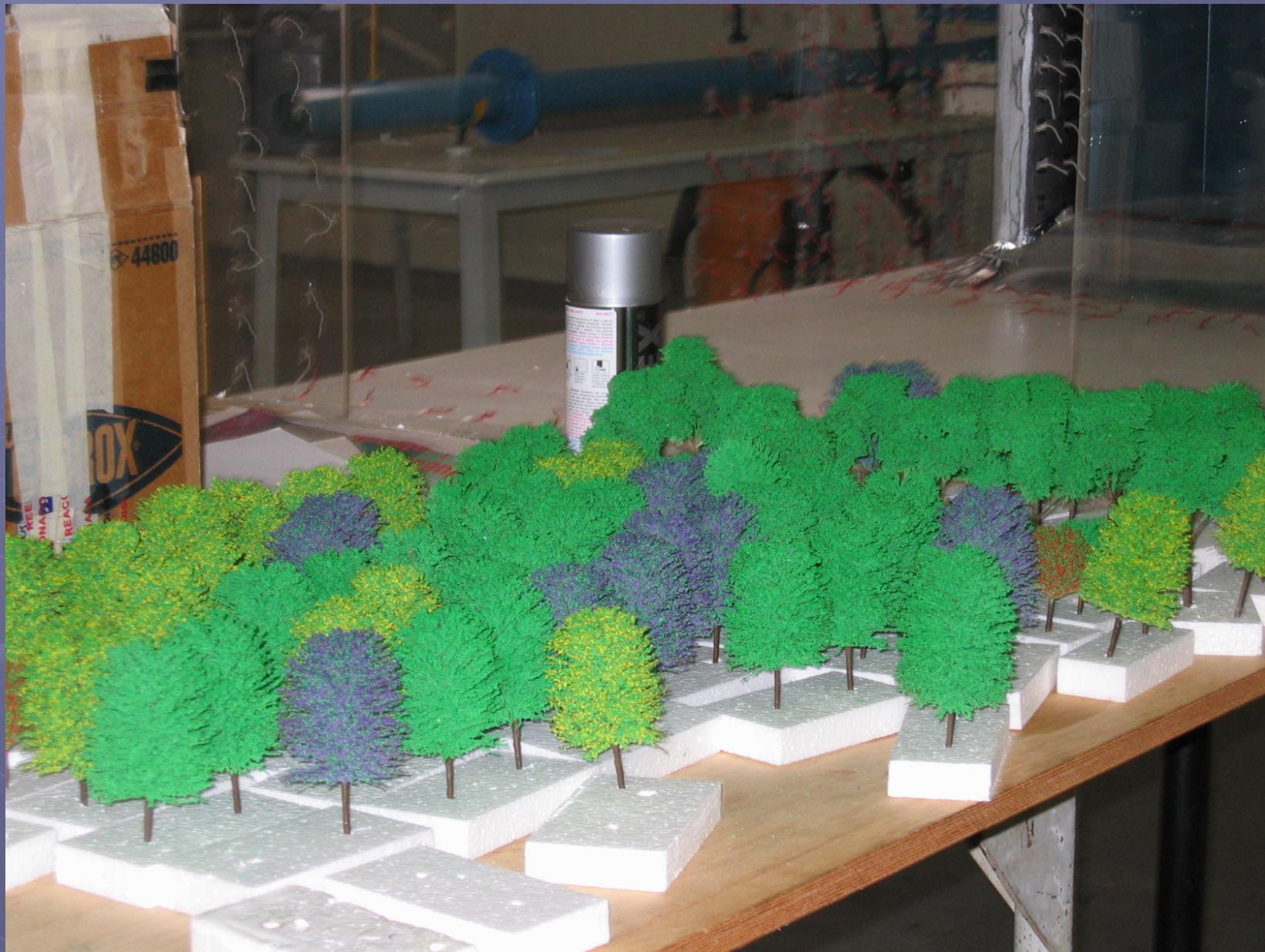
Os experimentos foram realizados em um túnel de vento com alta intensidade turbulenta, instalado no laboratório de Mecânica da Turbulência do INPE/ITA. O túnel é de circuito aberto com uma seção de testes de dimensões: 670 mm de largura, 670 mm de altura e 3000 mm de comprimento.

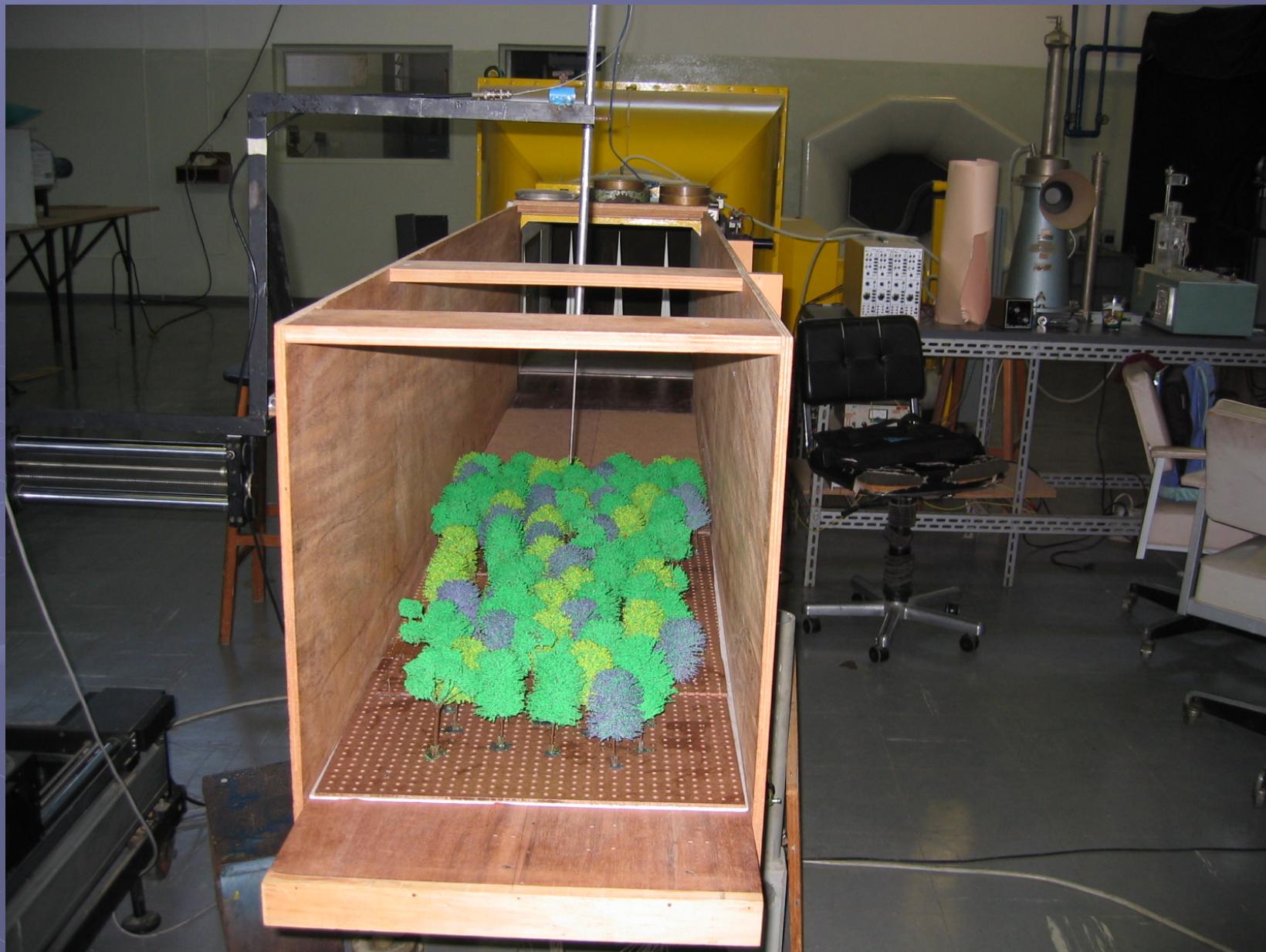


# Confecção

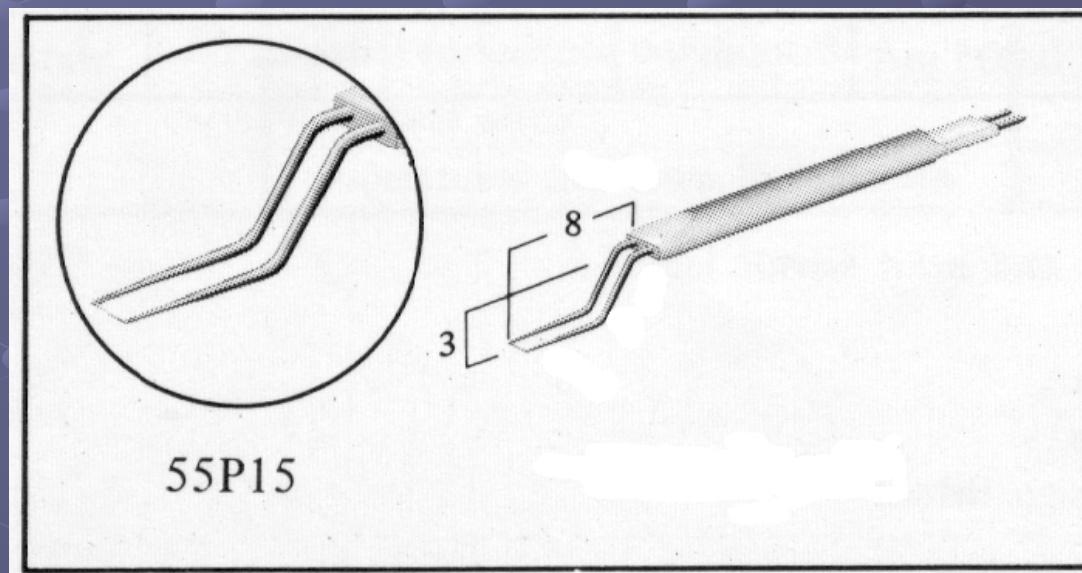








A velocidade de escoamento principal em que os experimentos foram conduzidos pode ser variada em um intervalo contínuo de 0 a 10 m/s. Para a medição da velocidade, foi utilizada a técnica de nemometria de fio quente. O sensor de camada limite foi fabricado pela DISA, modelo 55P15 horizontal com aproximadamente 1,25 mm de comprimento e 3  $\mu\text{m}$  de diâmetro de tungstênio.

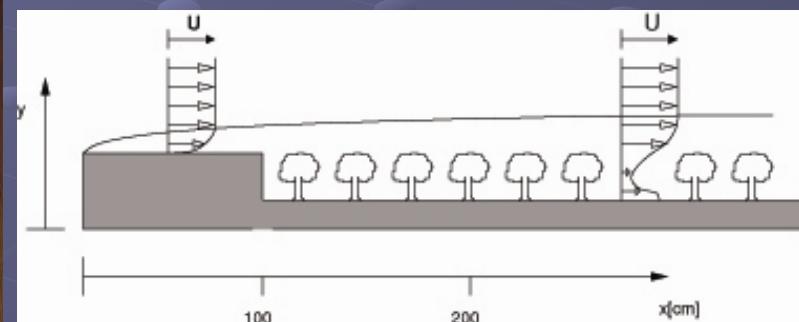


Os experimentos foram conduzidos pela análise de 4 superfícies distintas, são elas:

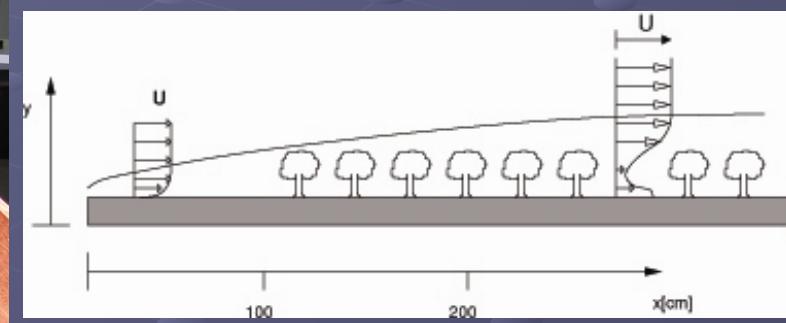
→ superfície lisa: composta por 2 placas de madeira, sendo seus respectivos comprimentos 1 m e 2 m. A largura das duas placas é igual à largura do túnel de vento, 670 mm, o que diminui os efeitos de tridimensionalidade.



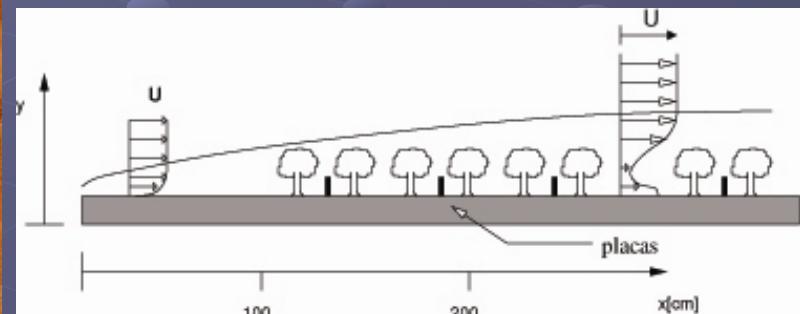
→ superfície com rugosidade I: disposição aleatória de árvores, onde o topo das árvores está nivelado com a superfície lisa.



→ Superfície com rugosidade II: disposição aleatória de árvores, onde a base das árvores está nivelada com a superfície lisa.



→ Superfície com rugosidade III: disposição aleatória de árvores, onde a base das árvores está nivelada com a superfície lisa e com a diferença da inclusão de placas de alumínio transversais ao túnel e eqüidistantes entre si.



# Equações de governo

Para a qualificação do escoamento, foram utilizados parâmetros globais de camada limite.

$$\Delta = \int_0^{\infty} \frac{U_{\infty} - u}{u_{\tau}} dy = \delta * \Lambda$$

(parâmetro de Clauser)

$$G = \frac{1}{\Delta} \int_0^{\infty} \left( \frac{U_{\infty} - u}{u_{\tau}} \right)^2 dy$$

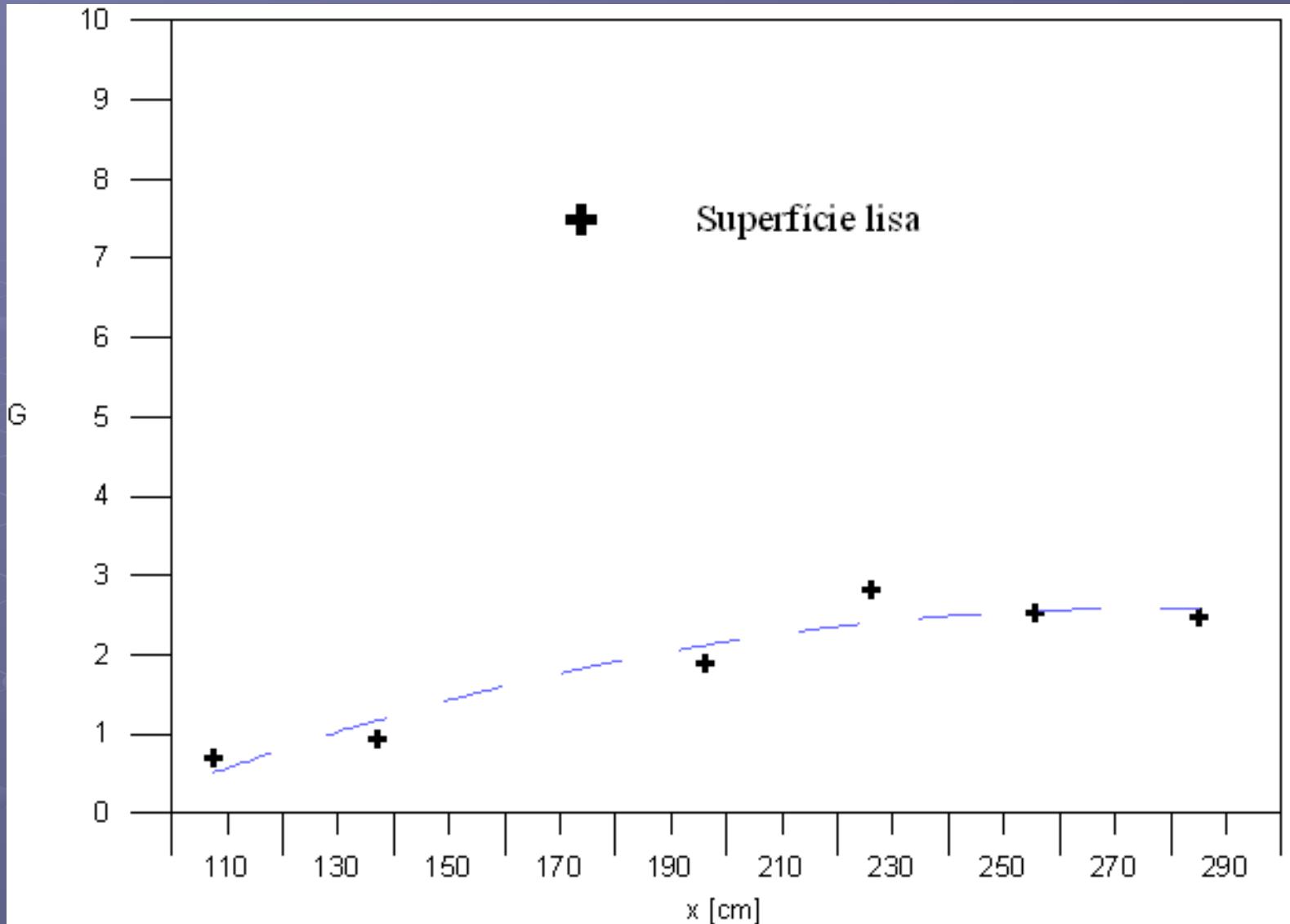
(parâmetro de deflexão de Clauser)

$$H = \frac{\delta^*}{\theta}$$

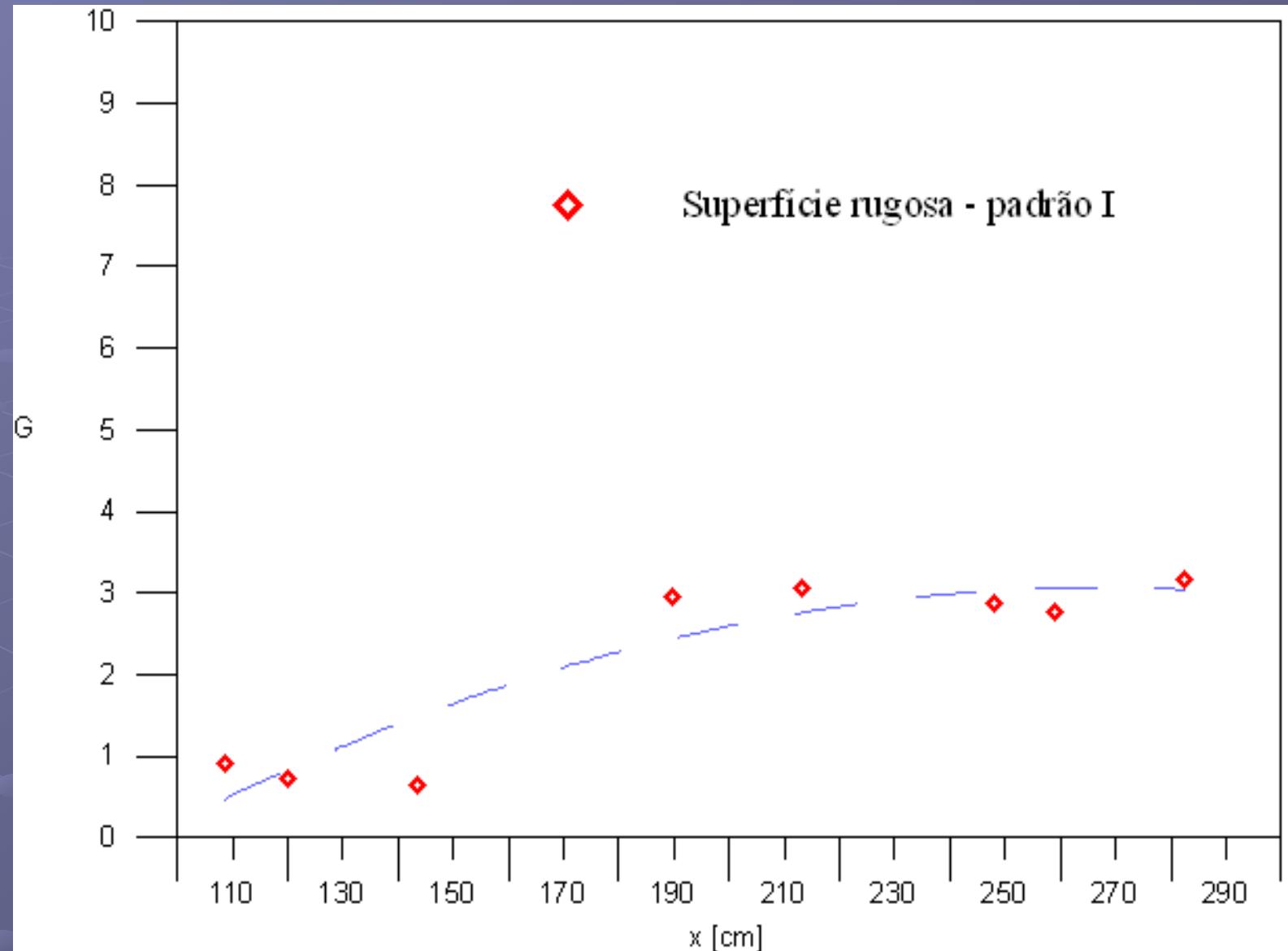
(fator de forma de von Kármán)

$$H = \left(1 - \frac{G}{\Delta}\right)^{-1}$$

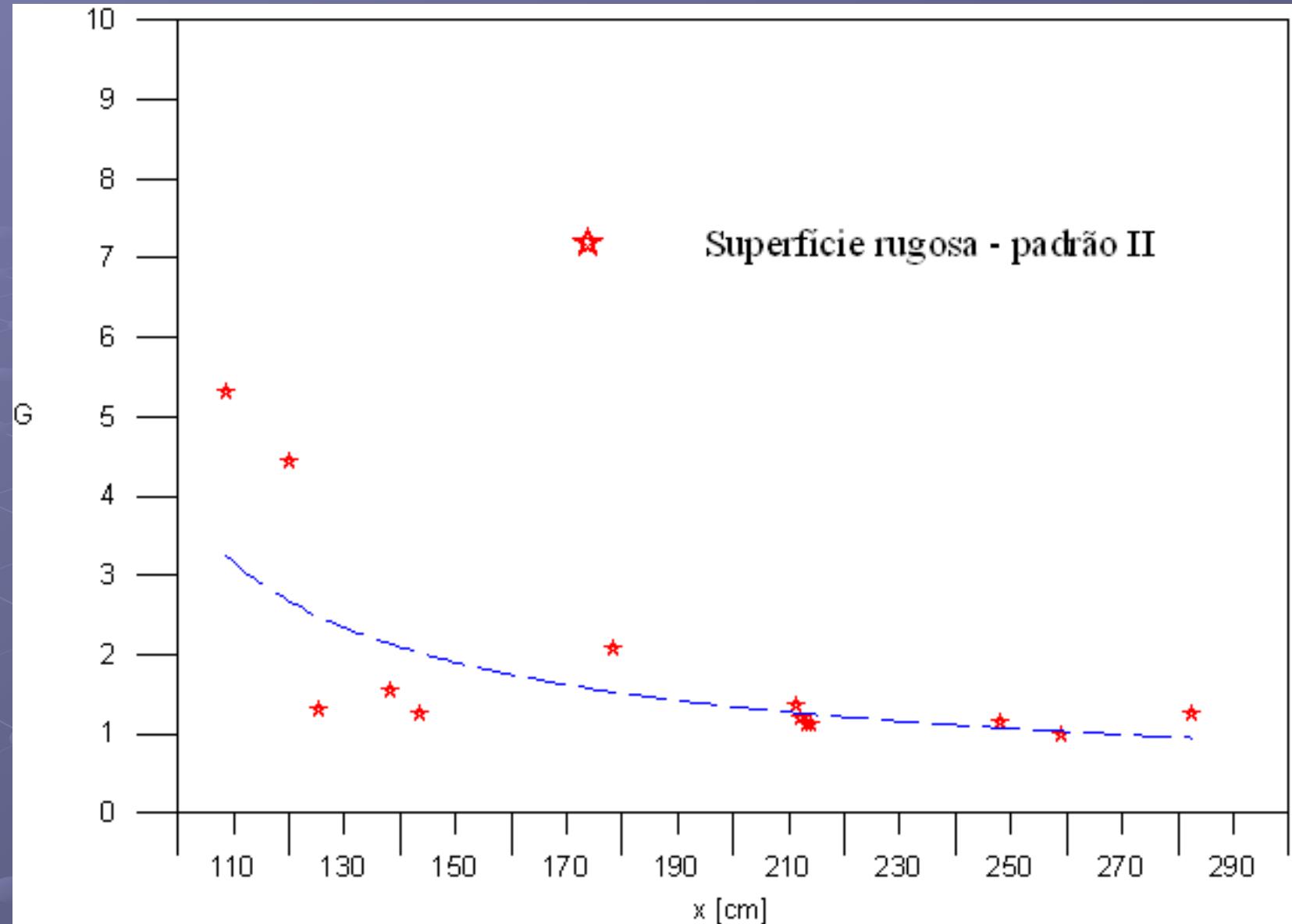
(relação do fator de forma de von Kármán  
com fator de Clauser)

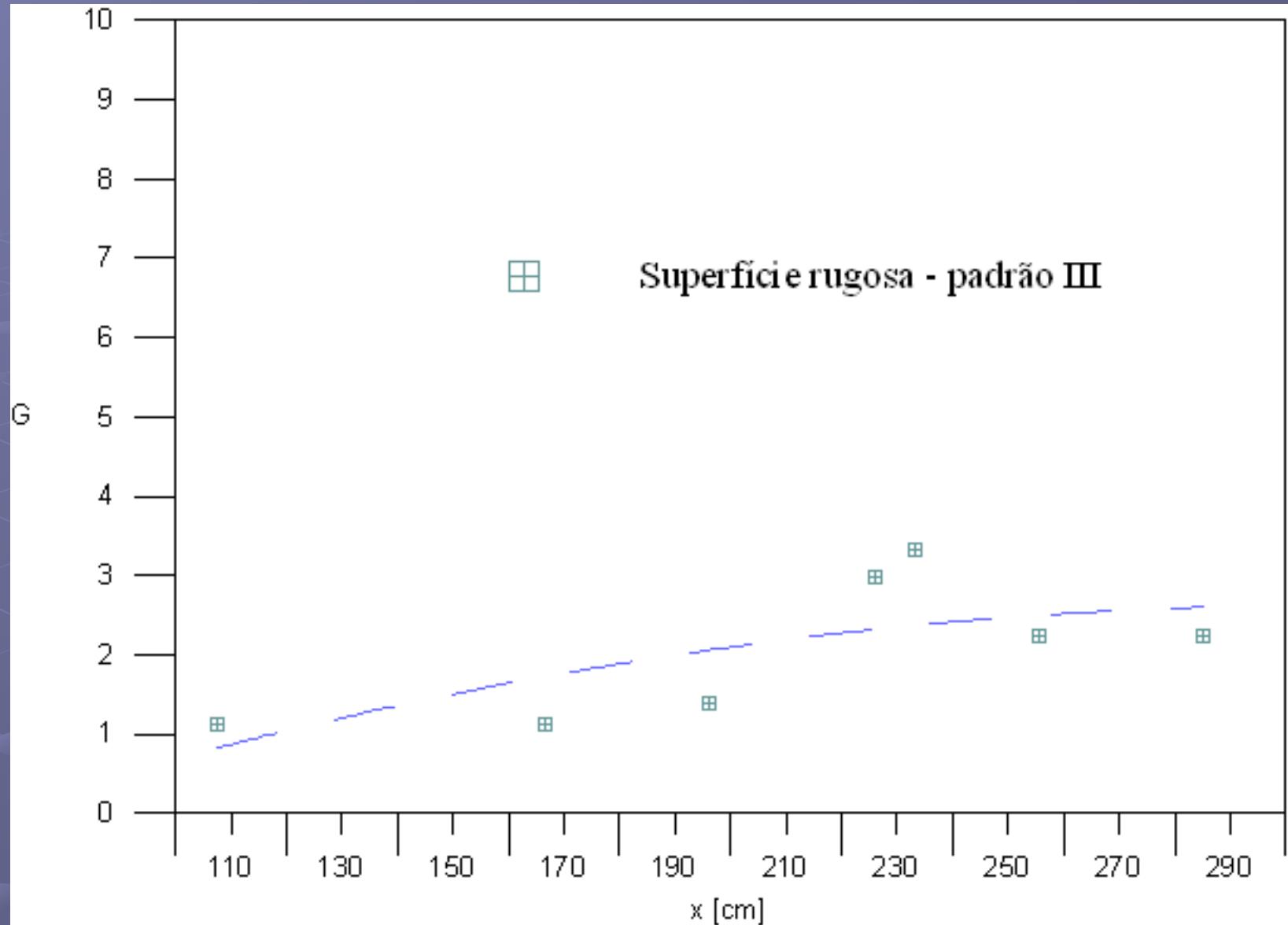


Distribuição do fator de Clauser para superfície lisa

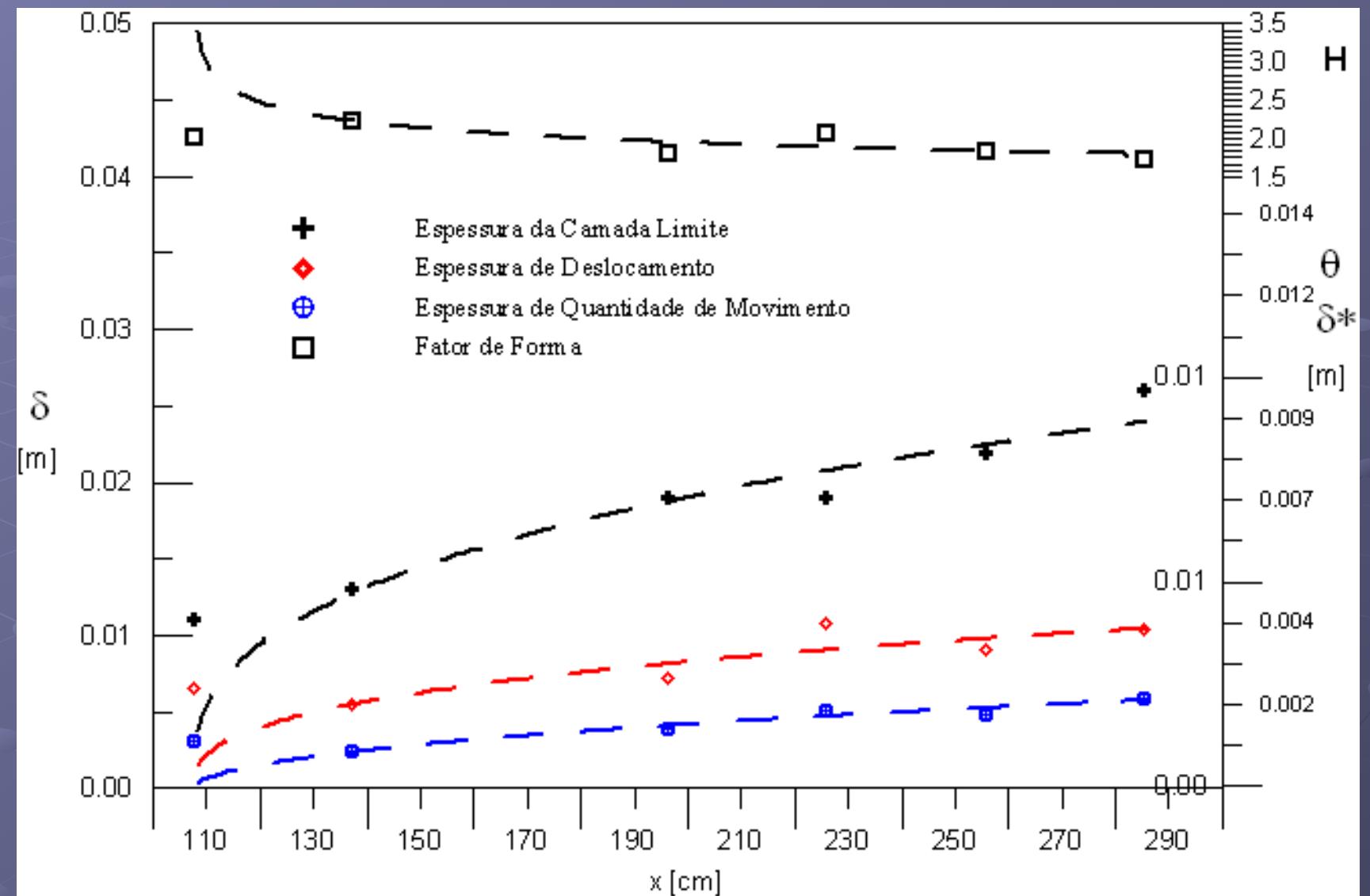


Distribuição do fator de Clauser para superfície rugosa tipo I

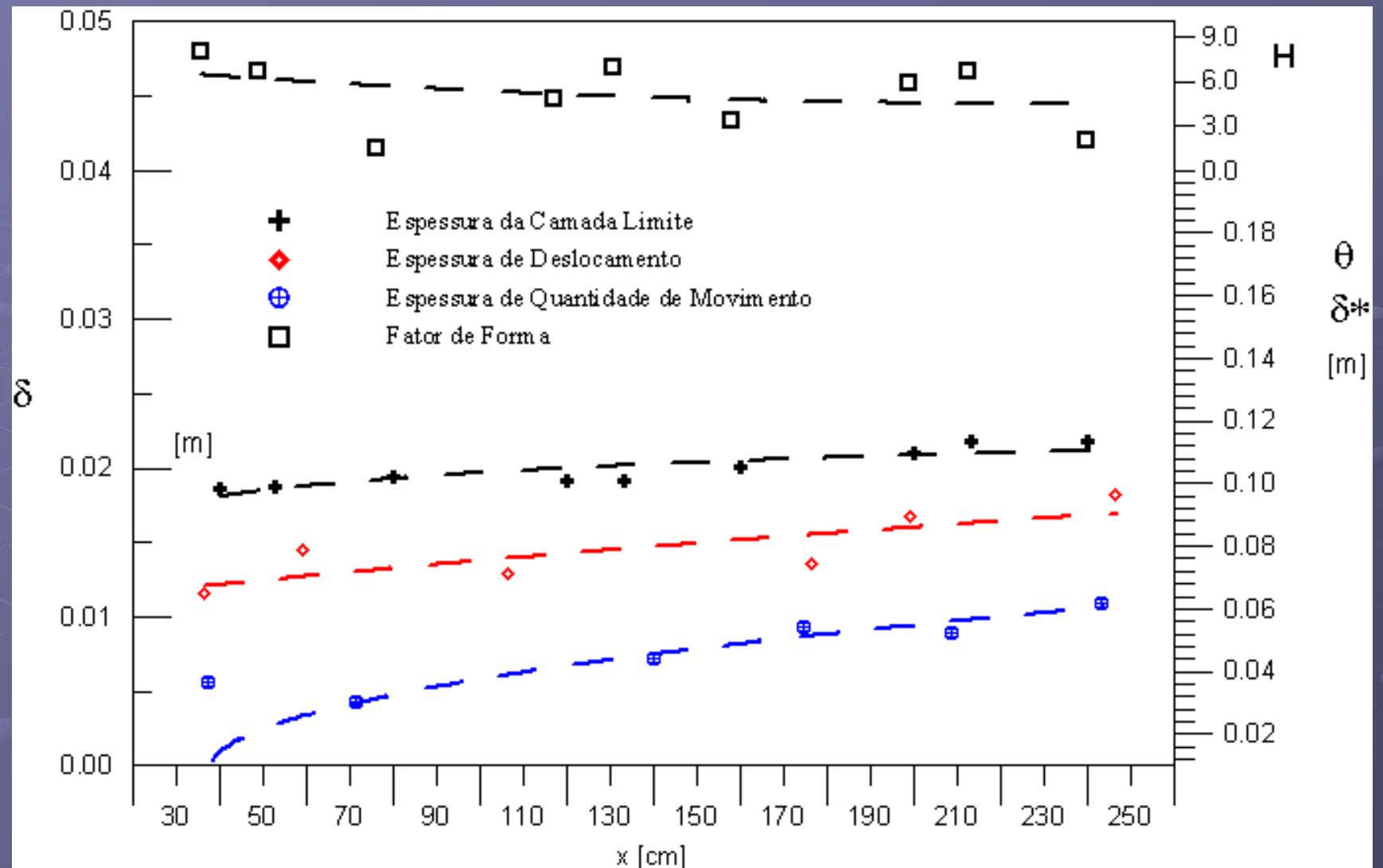




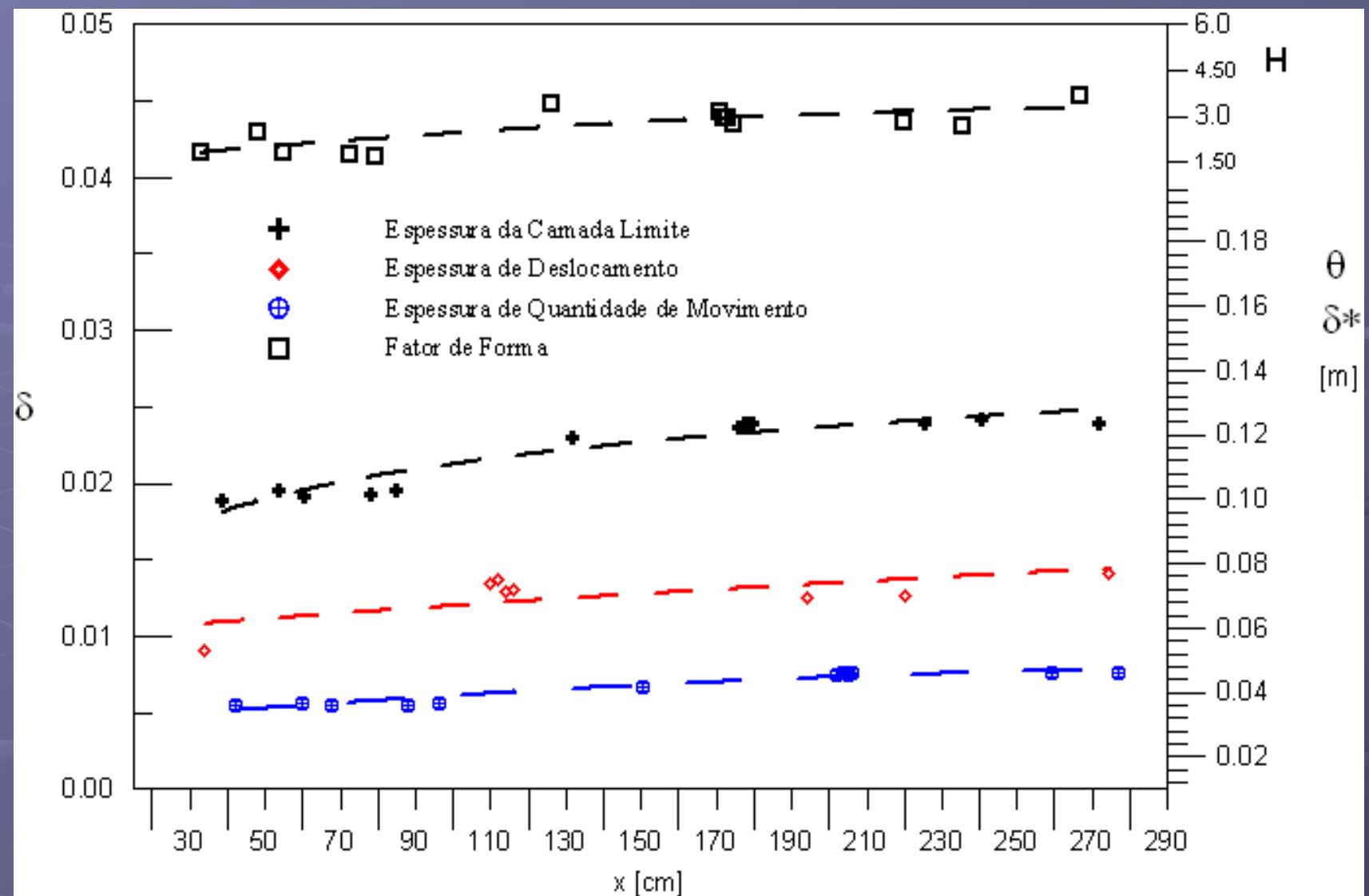
Distribuição do fator de Claeuser para superfície rugosa tipo III



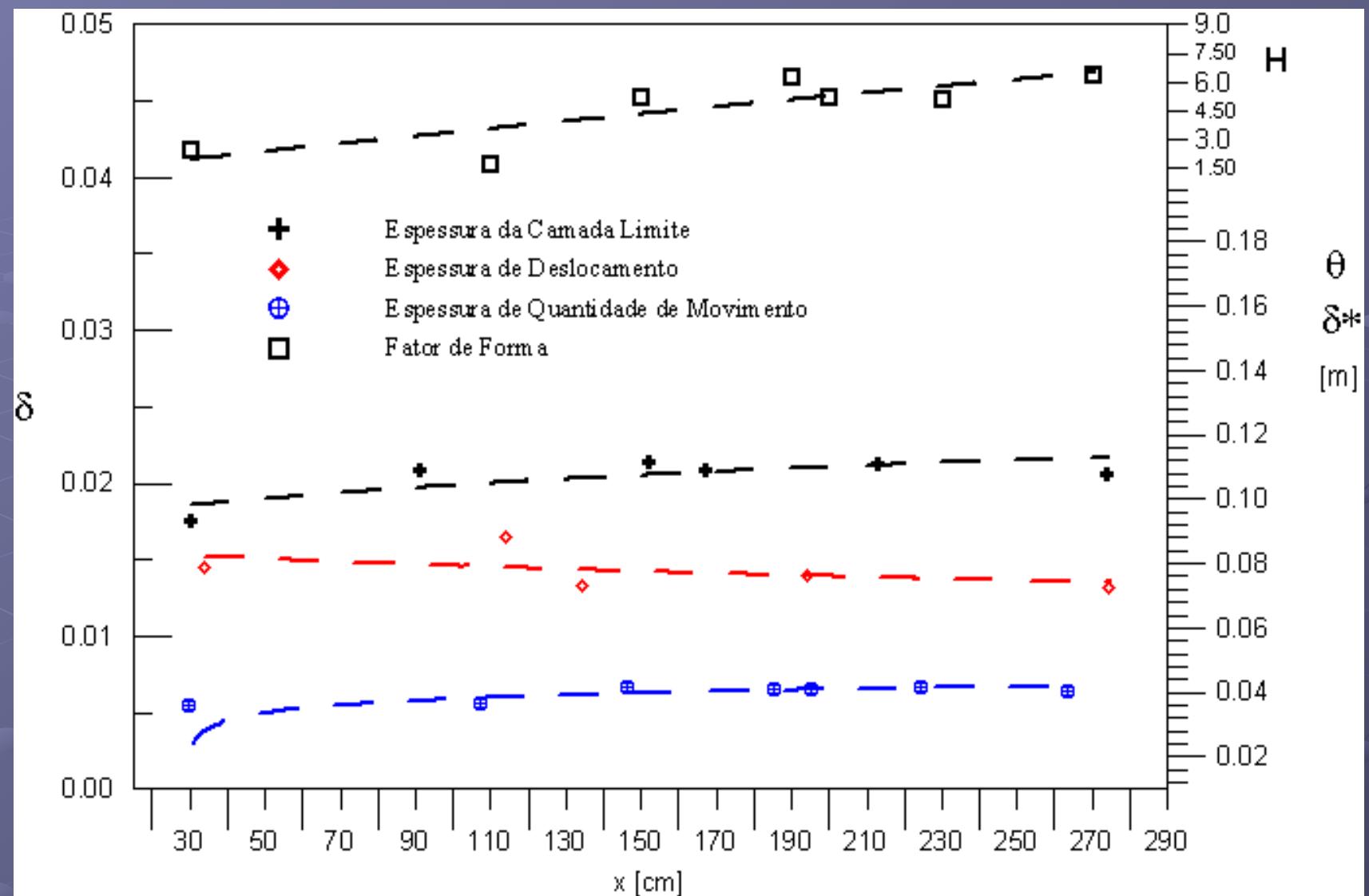
Distribuição das quantidades integrais do campo de velocidades para o escoamento sobre superfície lisa



Distribuição das quantidades integrais do campo de velocidades para o escoamento sobre superfície rugosa tipo I



Distribuição das quantidades integrais do campo de velocidades para o escoamento sobre superfície rugosa tipo II



Distribuição das quantidades integrais do campo de velocidades para o escoamento sobre superfície rugosa tipo III

# Equações de governo

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho_w}}$$

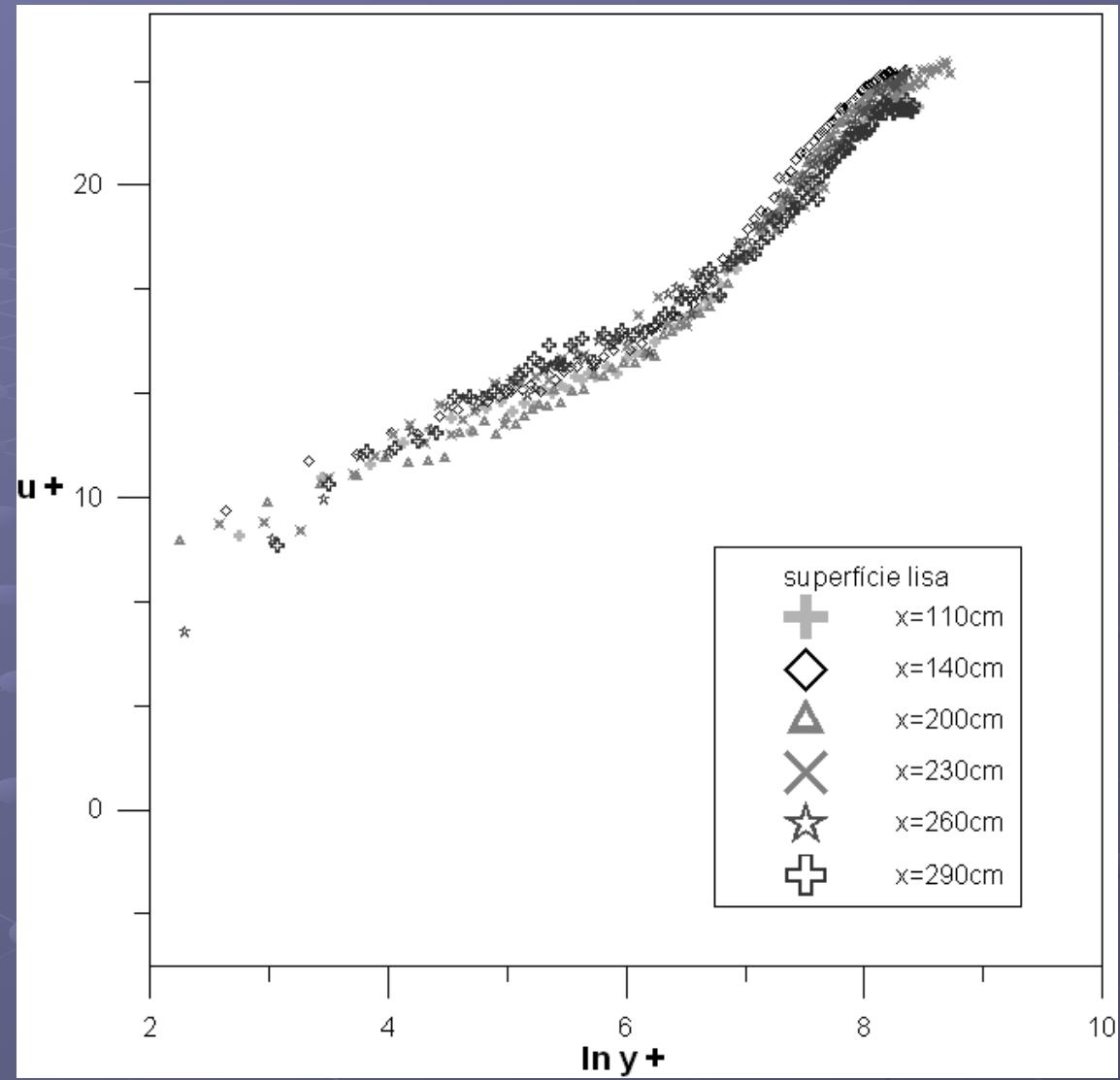
(velocidade de atrito)

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau}$$

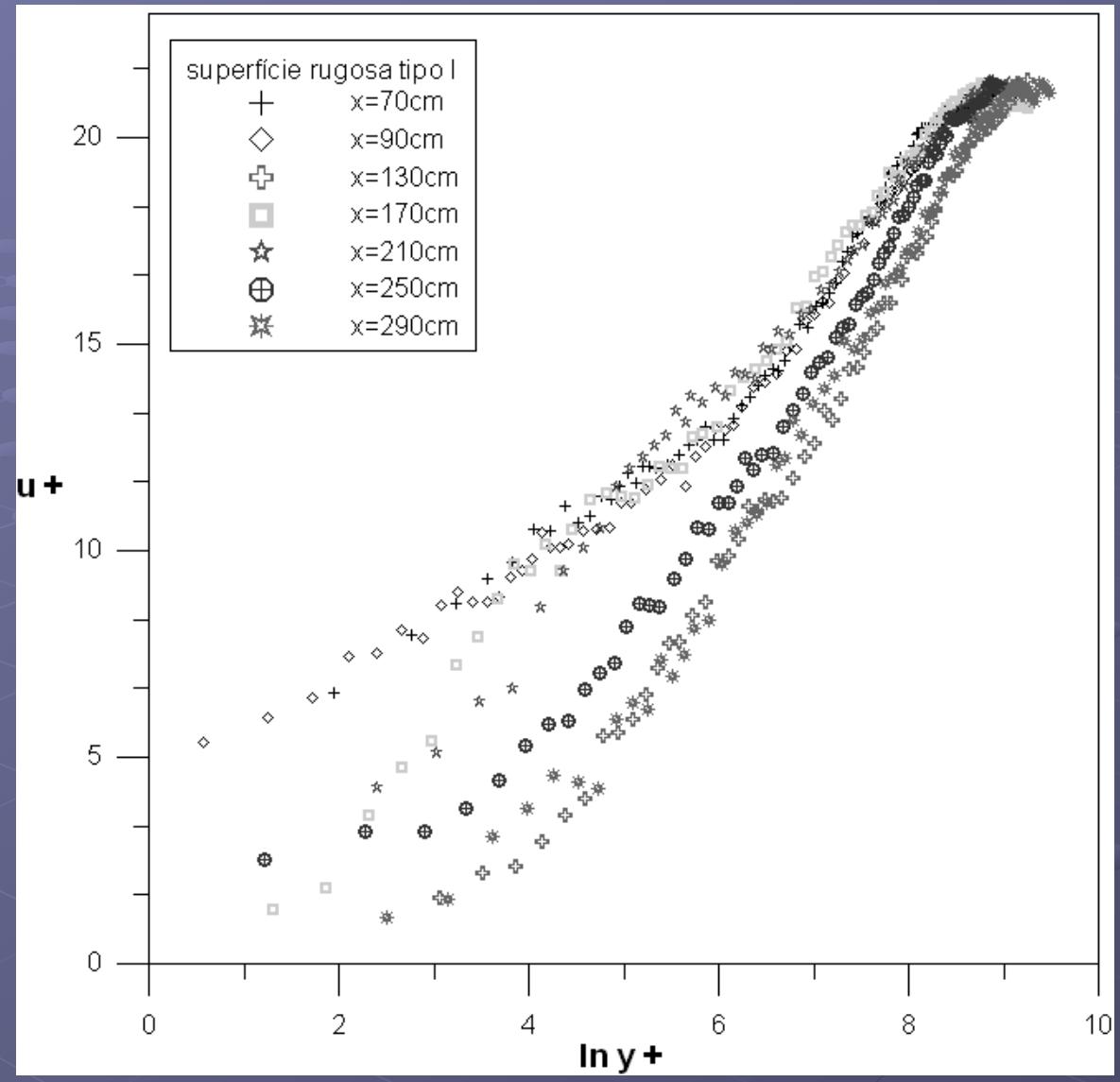
(parâmetro de adimensionalização)

$$y^+ = \frac{yu_\tau}{v}$$

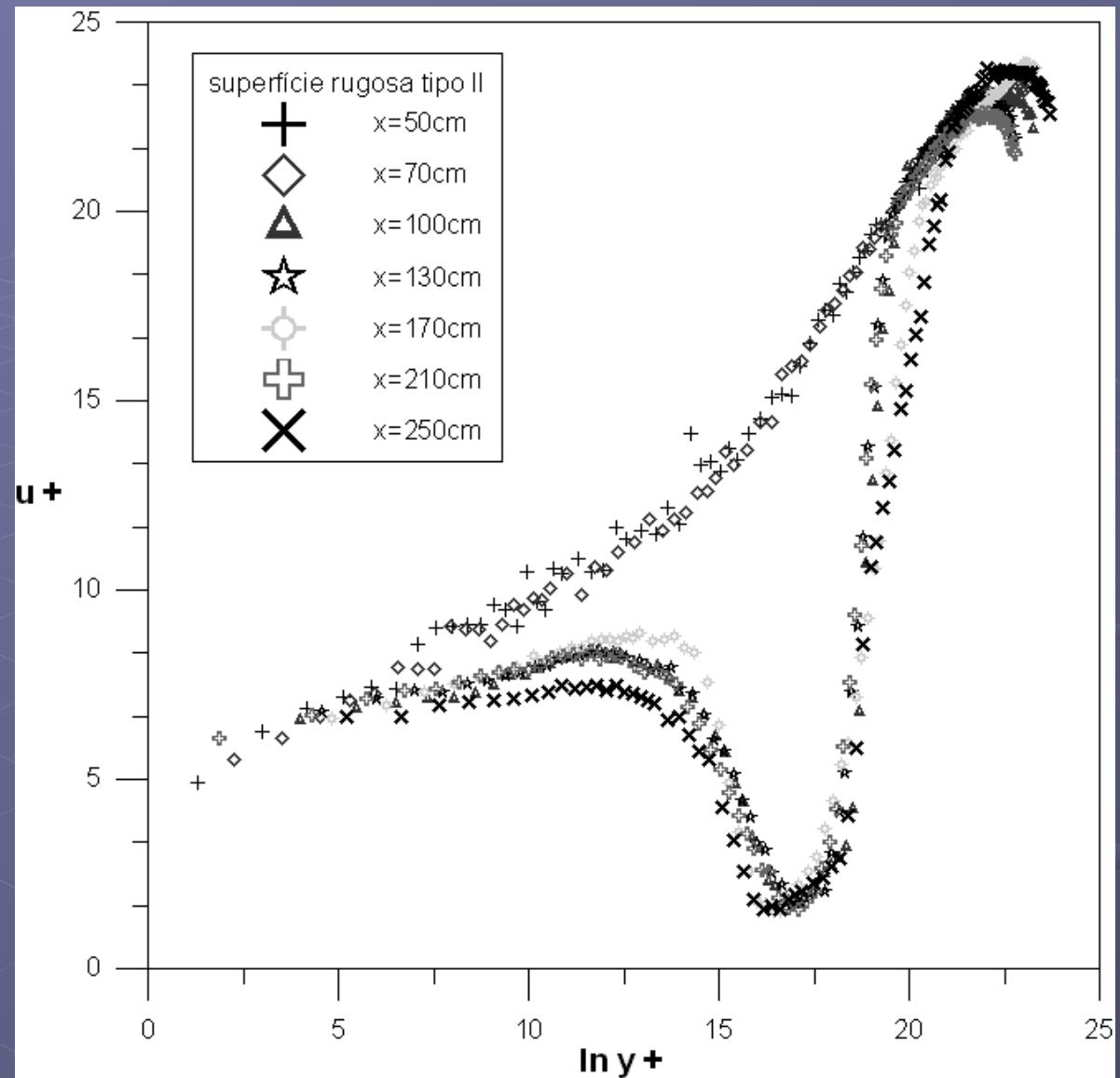
(parâmetro de adimensionalização)



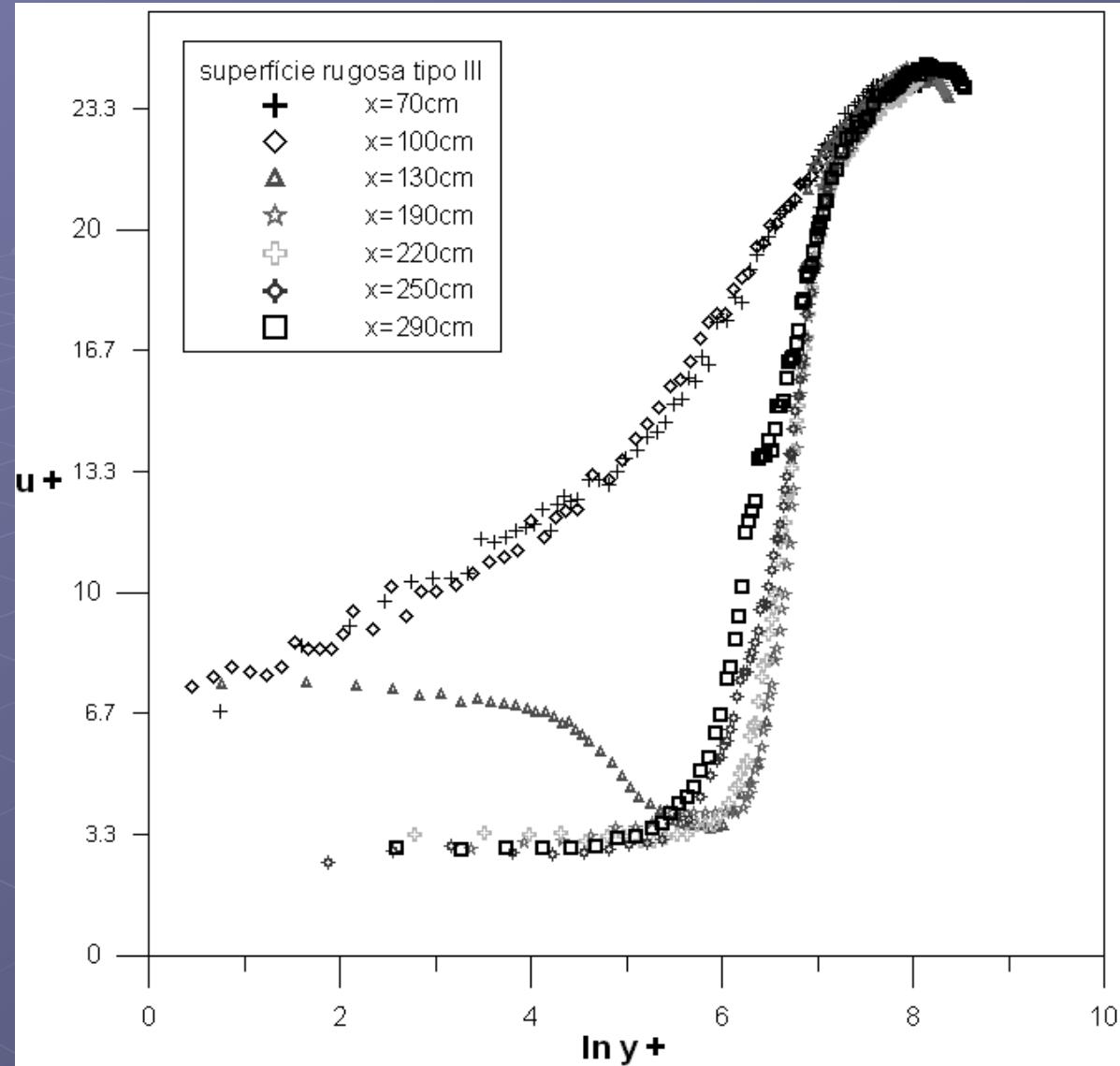
Função rugosidade para superfície lisa



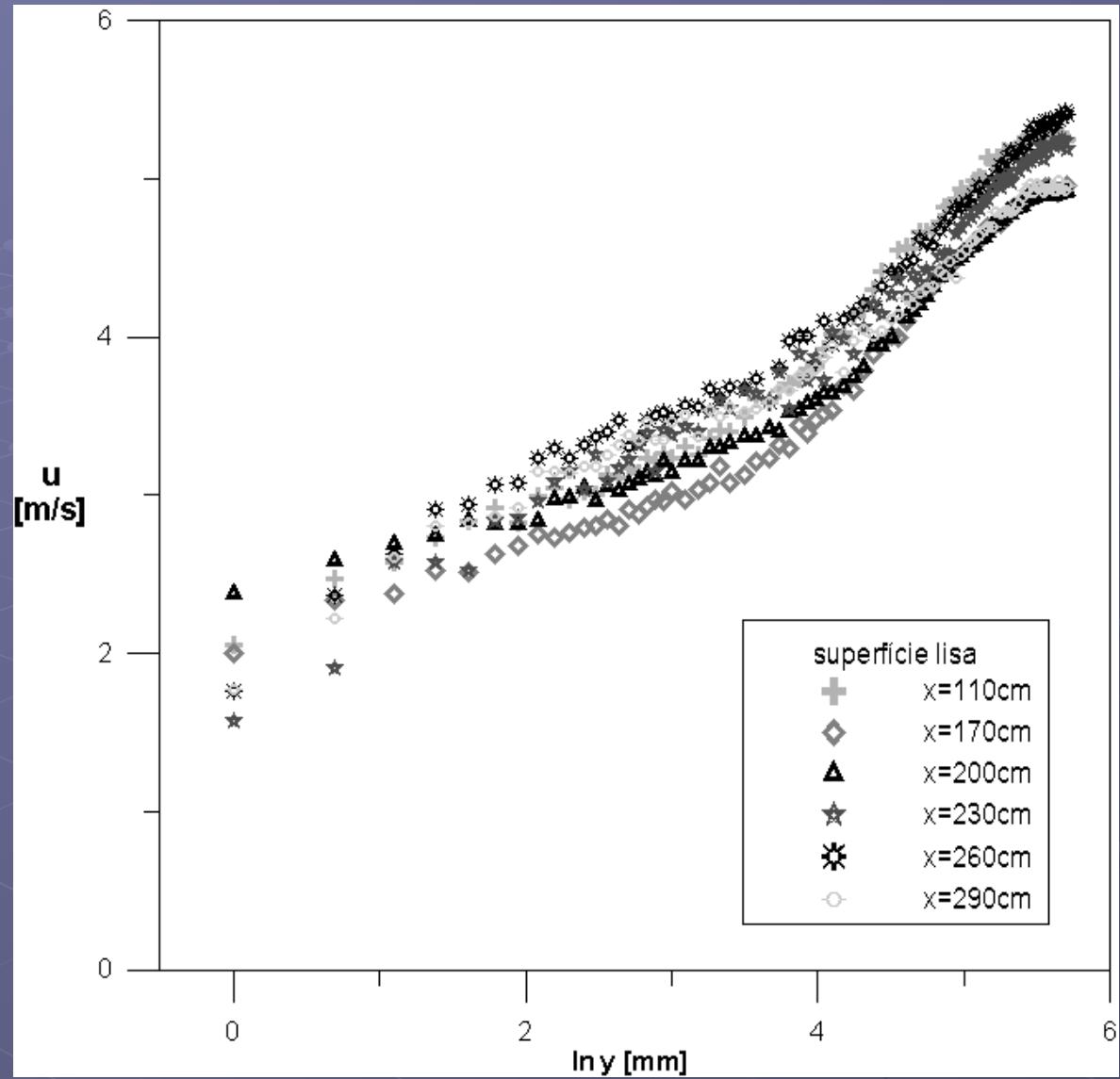
Função rugosidade para superfície rugosa tipo I



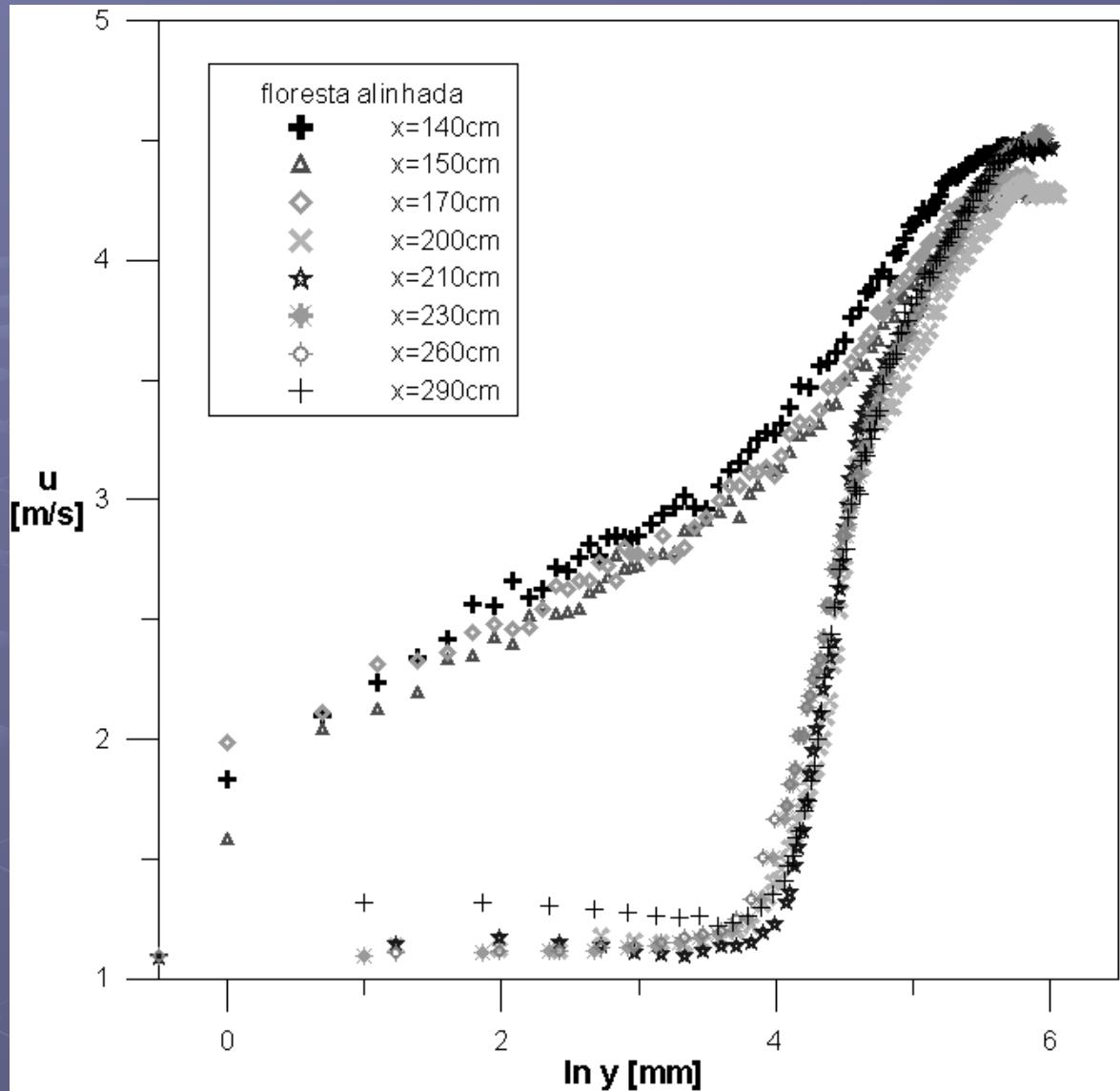
Função rugosidade para superfície rugosa tipo II



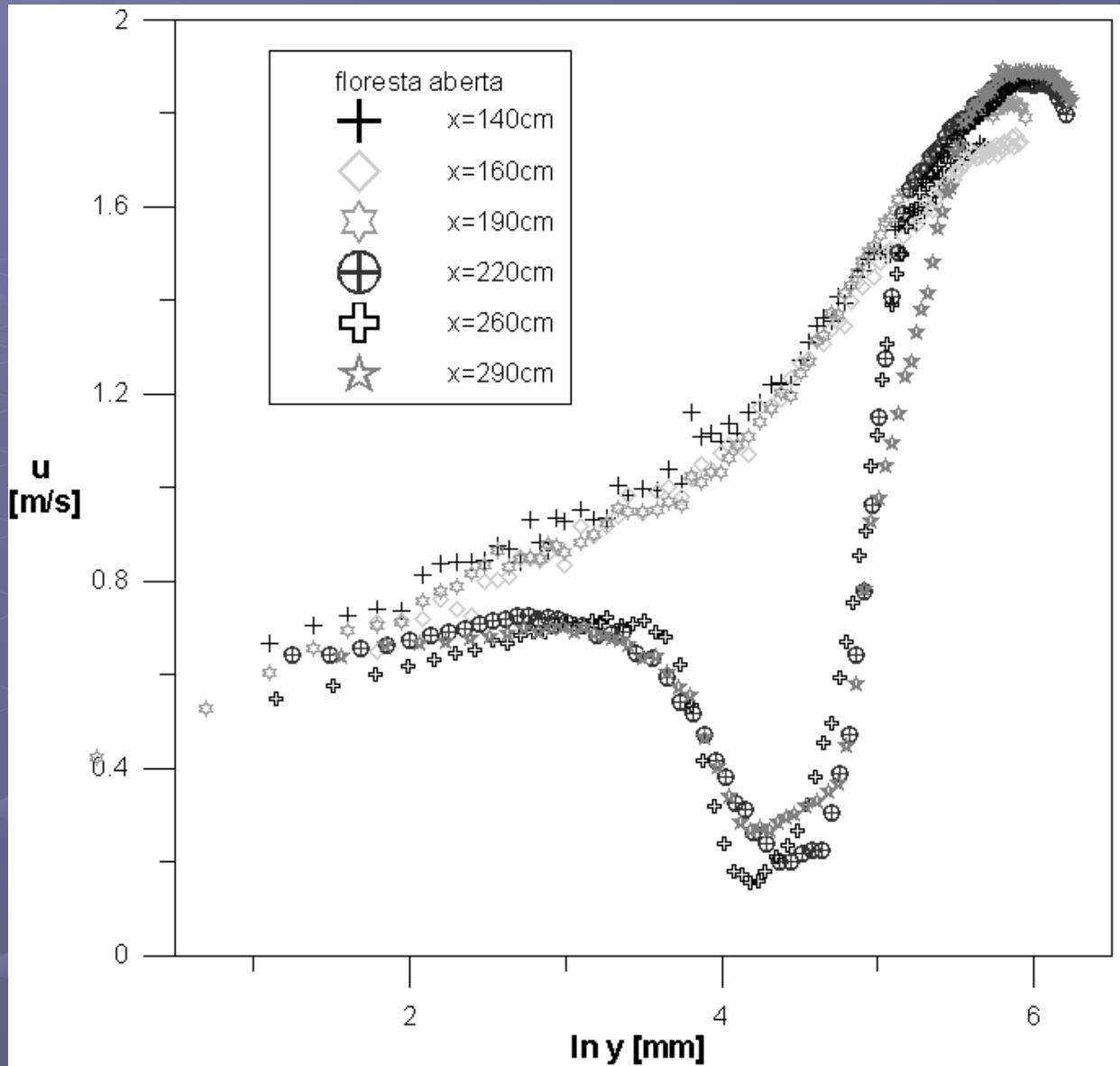
Função rugosidade para superfície rugosa tipo III



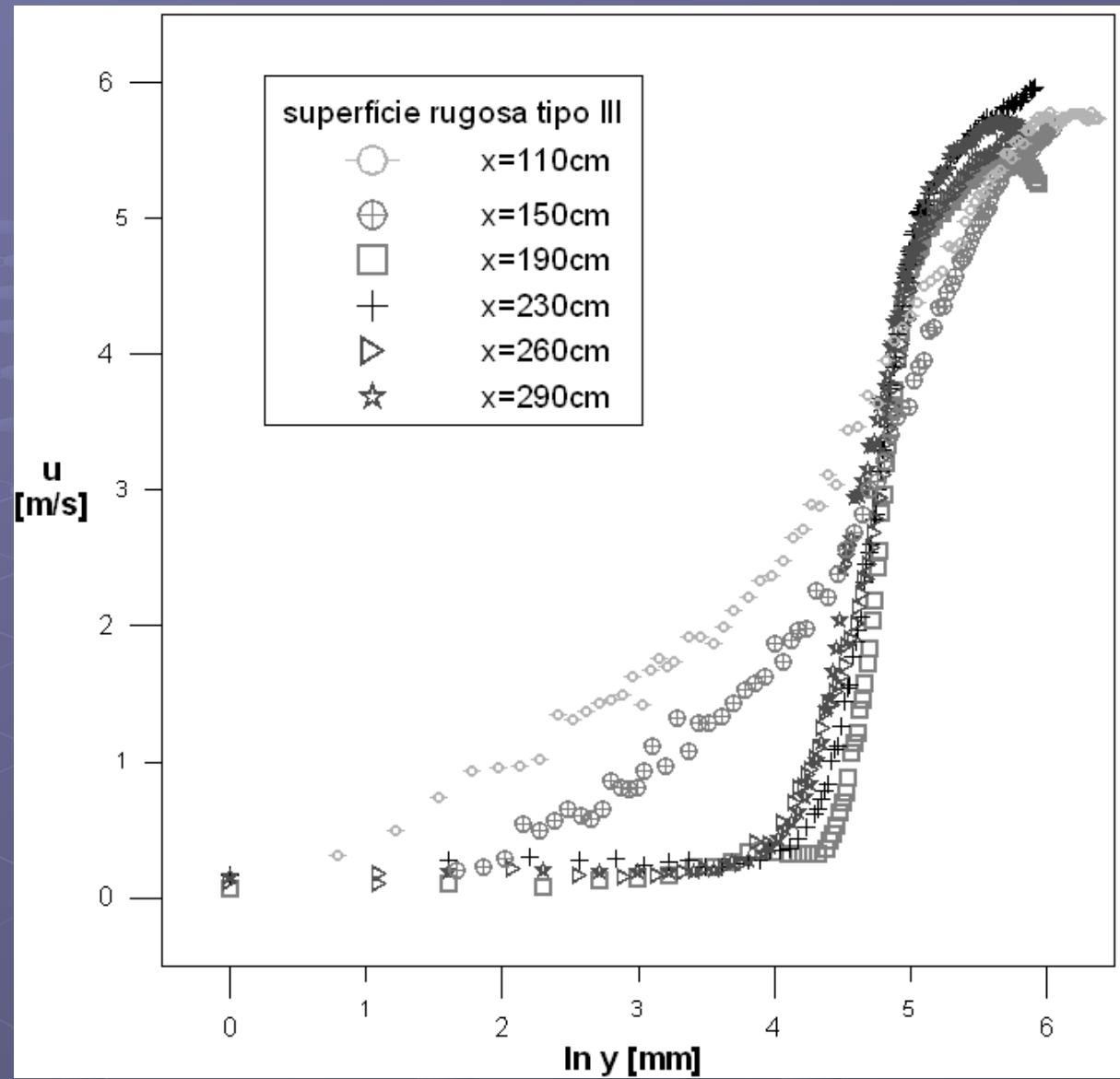
Perfil de velocidade média na forma semi-logarítmica para superfície lisa



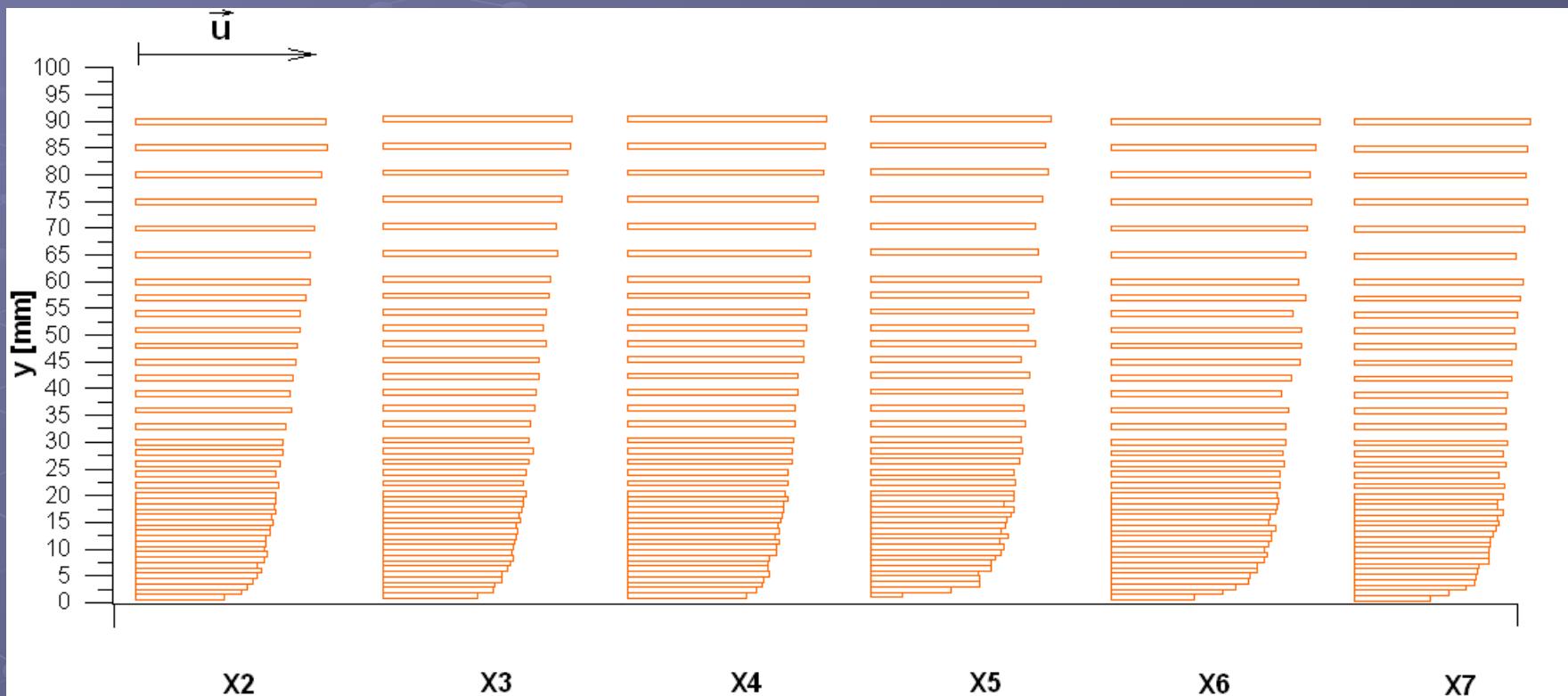
Perfil de velocidade média na forma semi-logarítmica para superfície rugosa tipo I



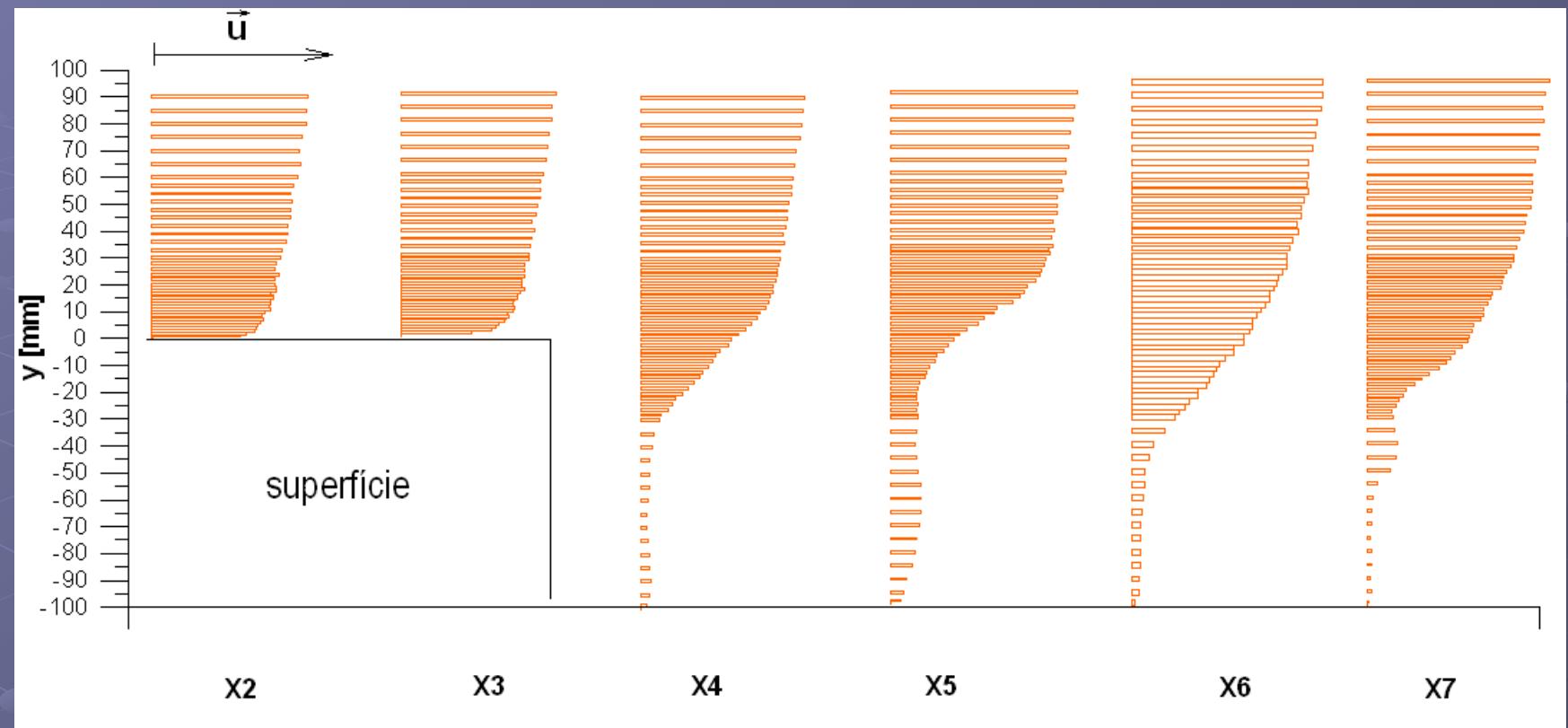
Perfil de velocidade média na forma semi-logarítmica para superfície rugosa tipo II



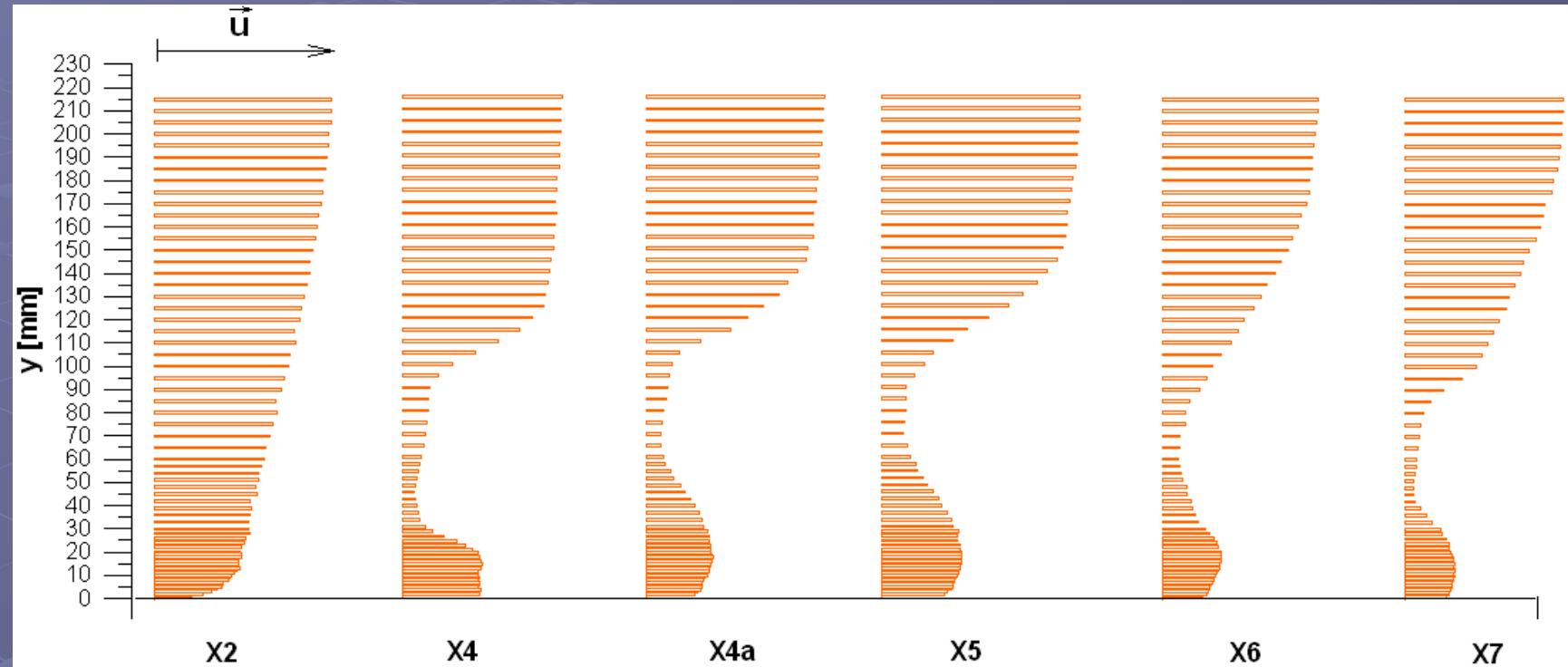
Perfil de velocidade média na forma semi-logarítmica para superfície rugosa tipo III



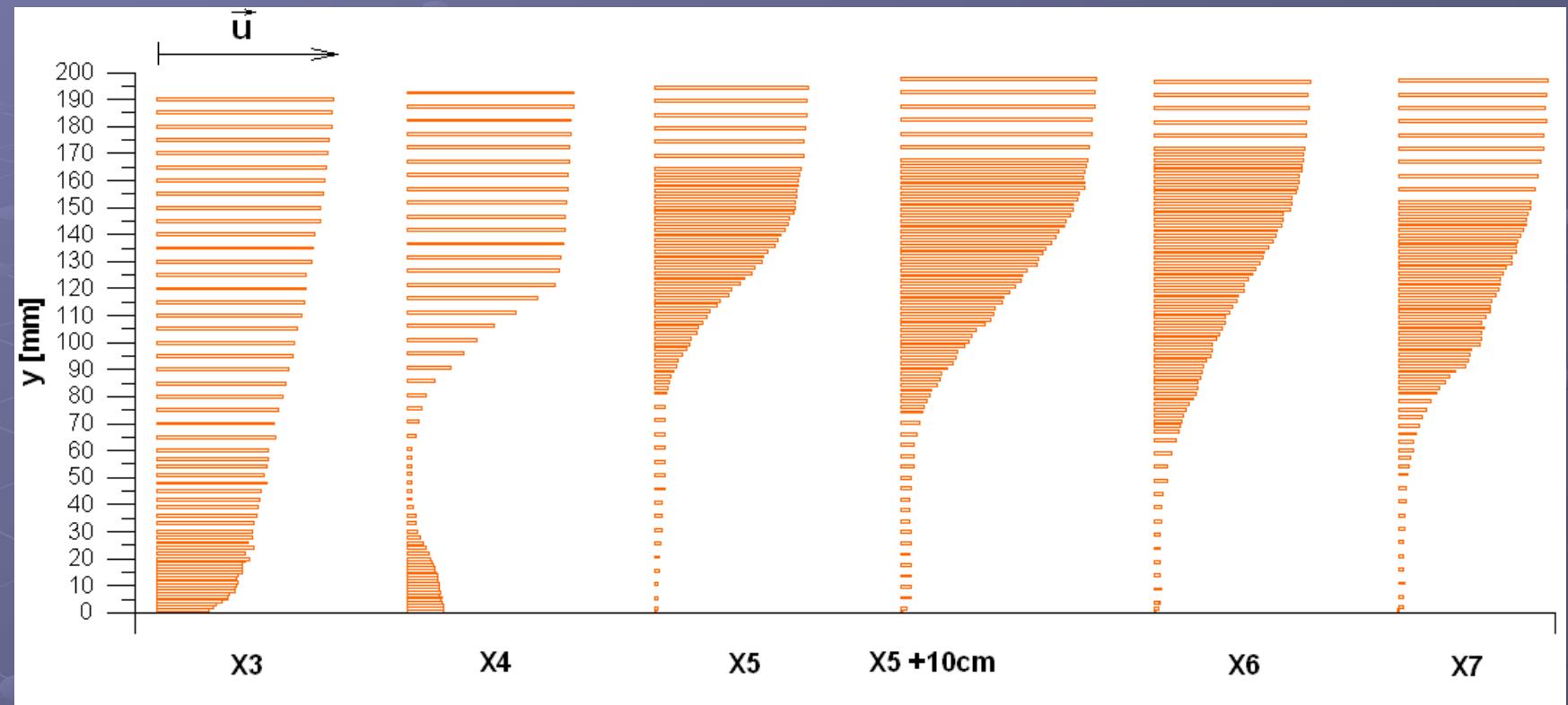
Comportamento do escoamento de camada limite turbulenta que se desenvolve sobre superfície lisa



Comportamento do escoamento de camada limite turbulenta que se desenvolve sobre superfície rugosa tipo I



Comportamento do escoamento de camada limite turbulenta que se desenvolve sobre superfície rugosa tipo II



Comportamento do escoamento de camada limite turbulenta que se desenvolve sobre superfície rugosa tipo III

# Equações de governo

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

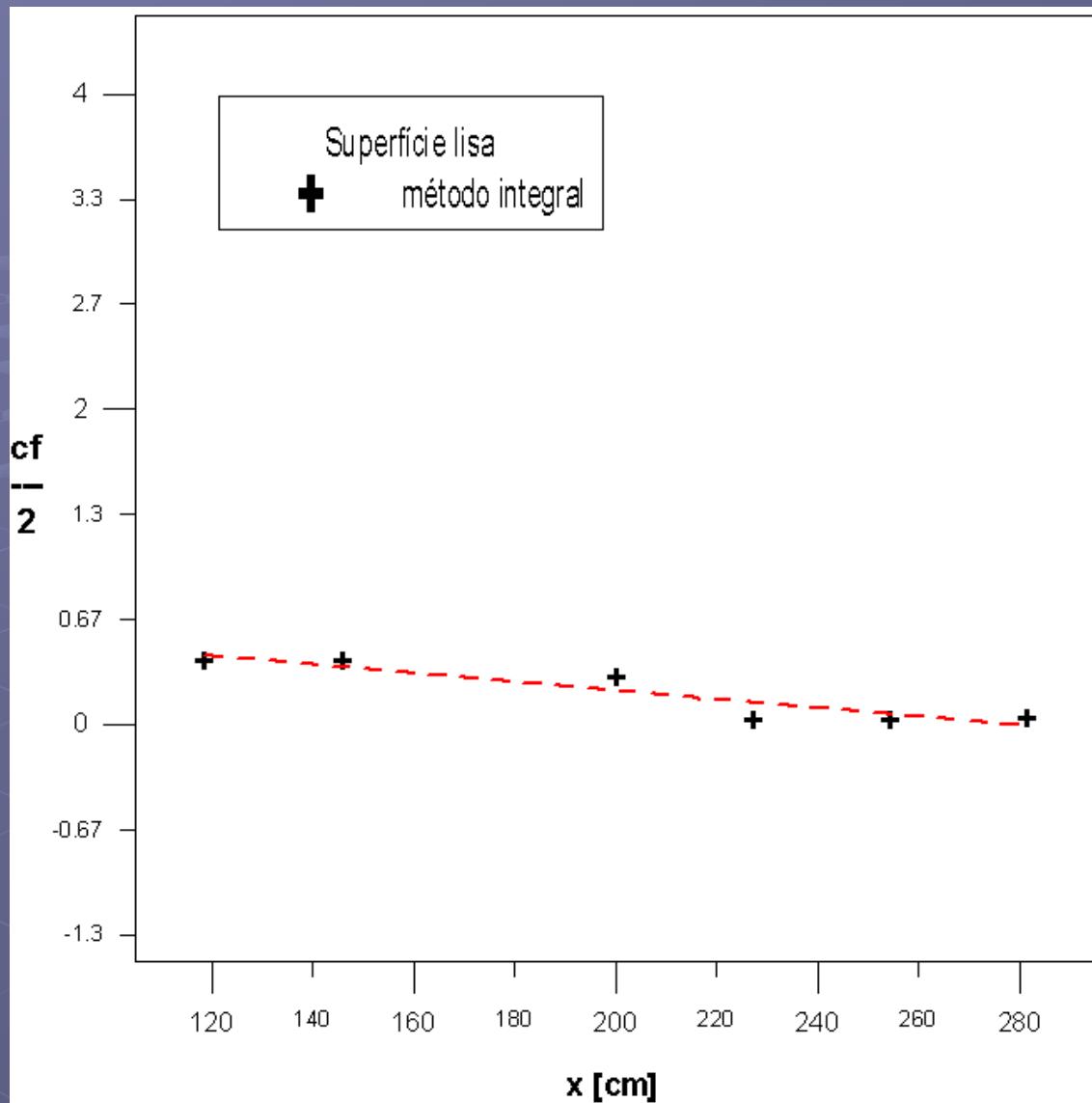
(tensão viscosa de Reynolds)

$$\frac{d\theta}{dx} + (2 + H) \frac{\theta}{U_\infty} \frac{dU_\infty}{dx} = \frac{\tau_w}{pU_\infty^2} = \frac{c_f}{2}$$

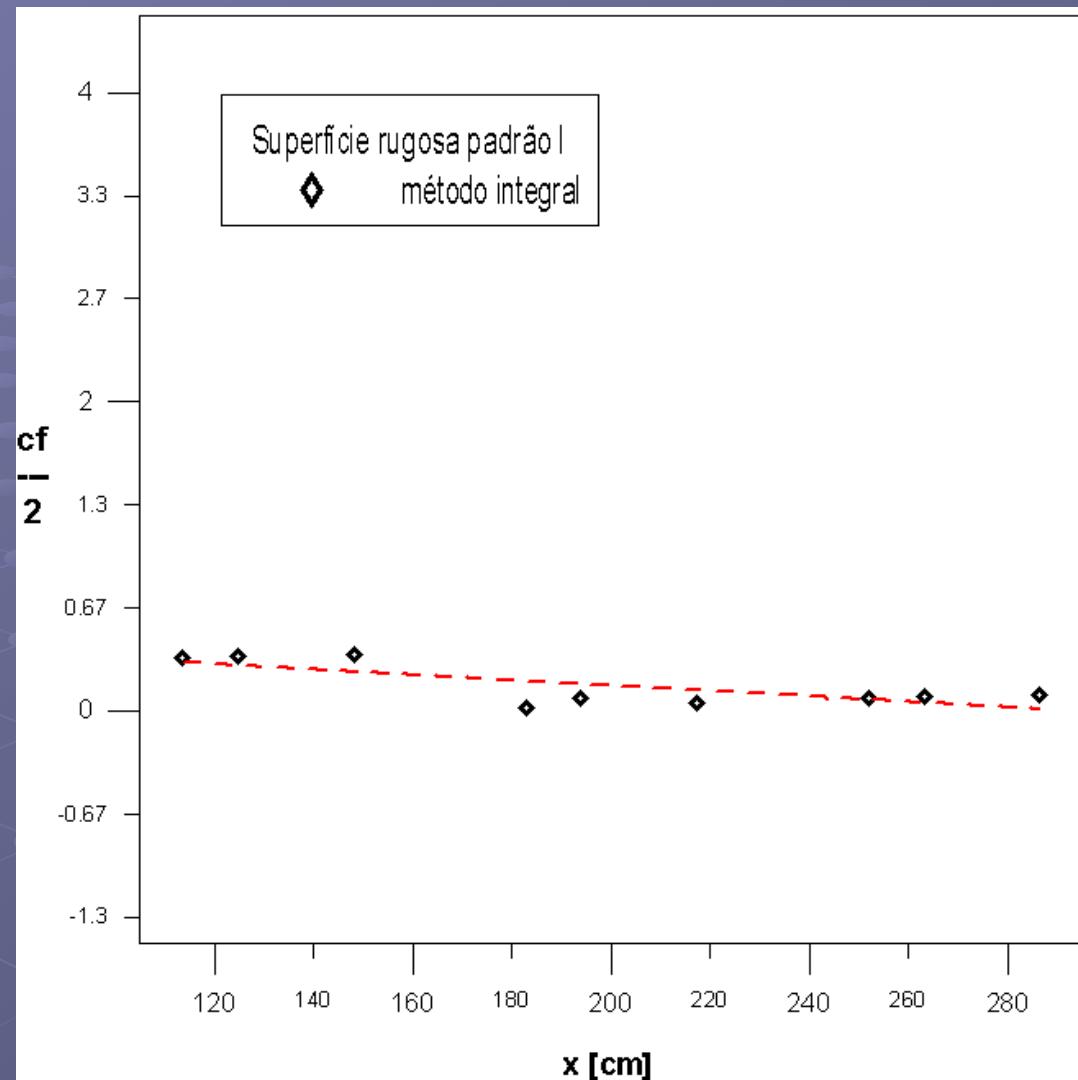
(equação integral da  
quantidade de  
movimento)

$$\lambda = \sqrt{\frac{2}{c_f}} = \sqrt{2} \frac{U_\infty}{u_\tau}$$

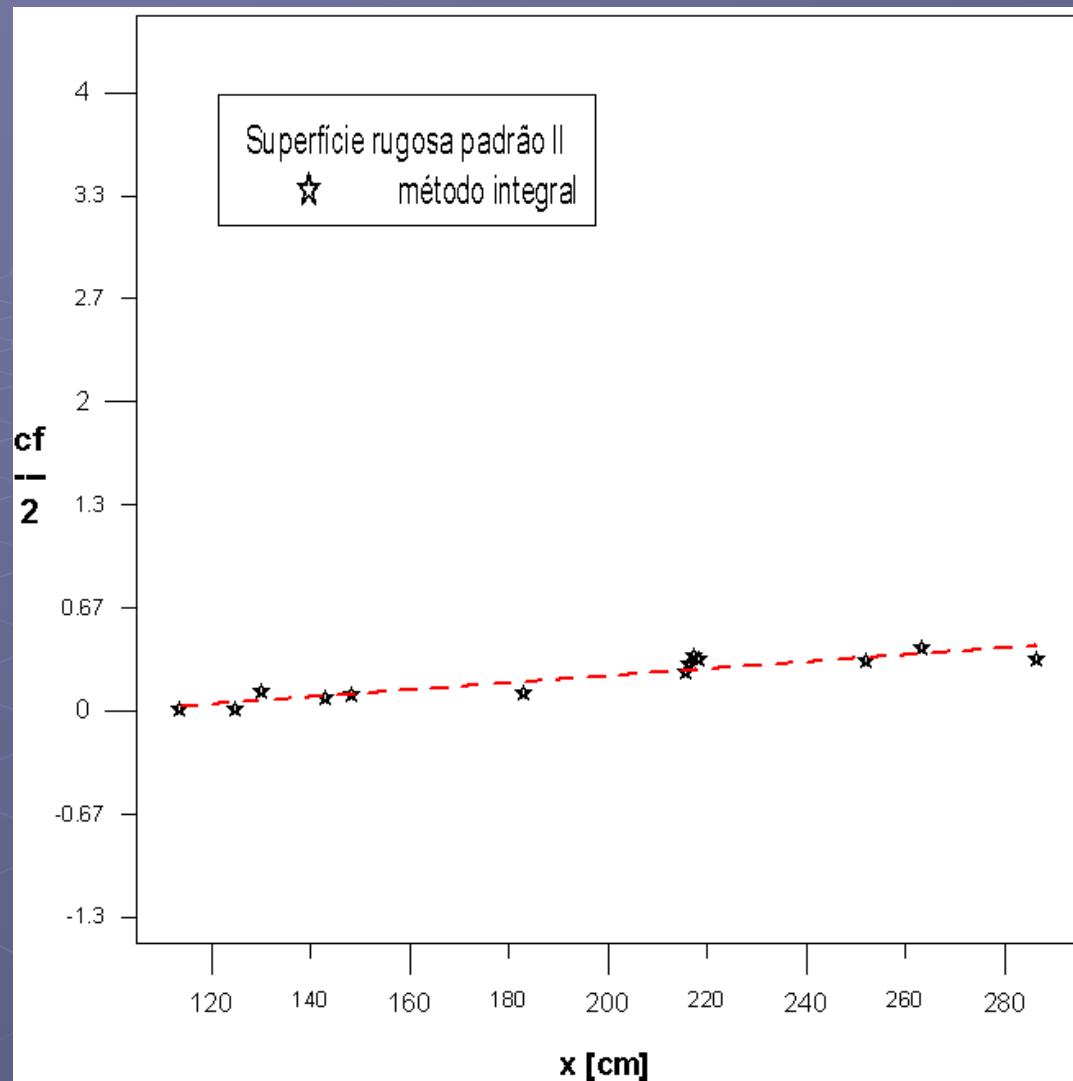
(coeficiente de atrito local)



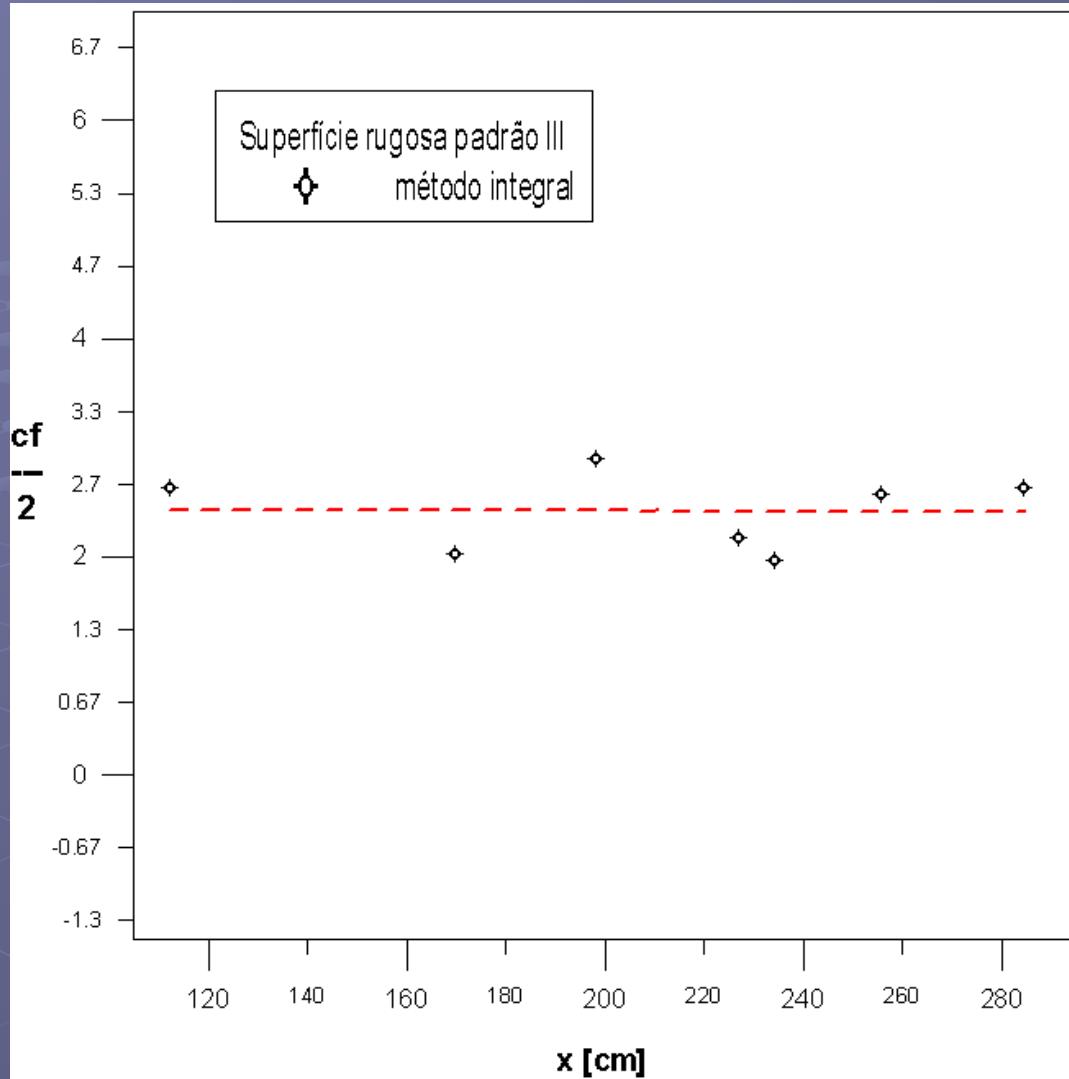
Comportamento do coeficiente de atrito para superfície lisa



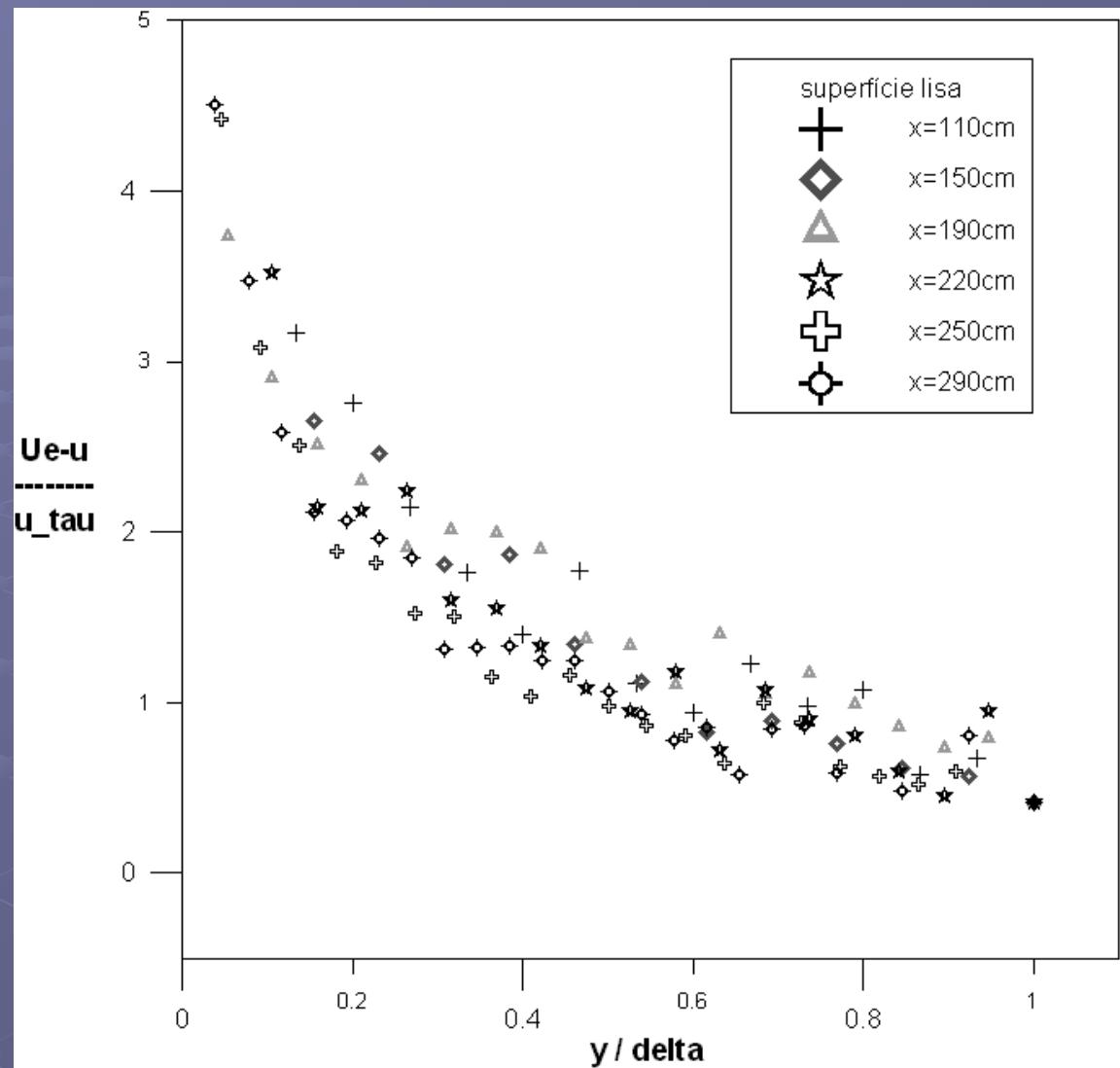
Comportamento do coeficiente de atrito para superfície rugosa tipo I



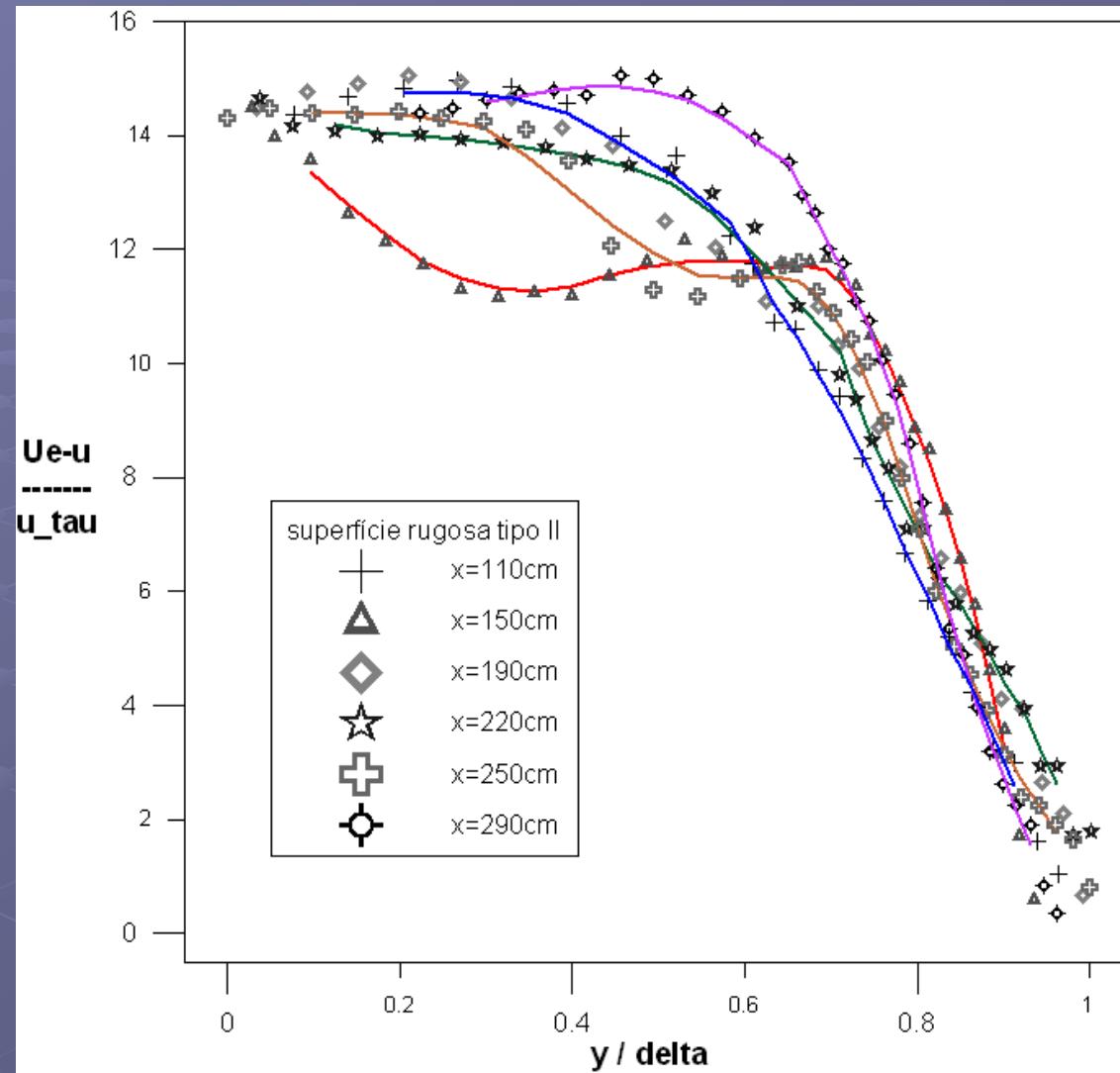
Comportamento do coeficiente de atrito para superfície rugosa tipo II



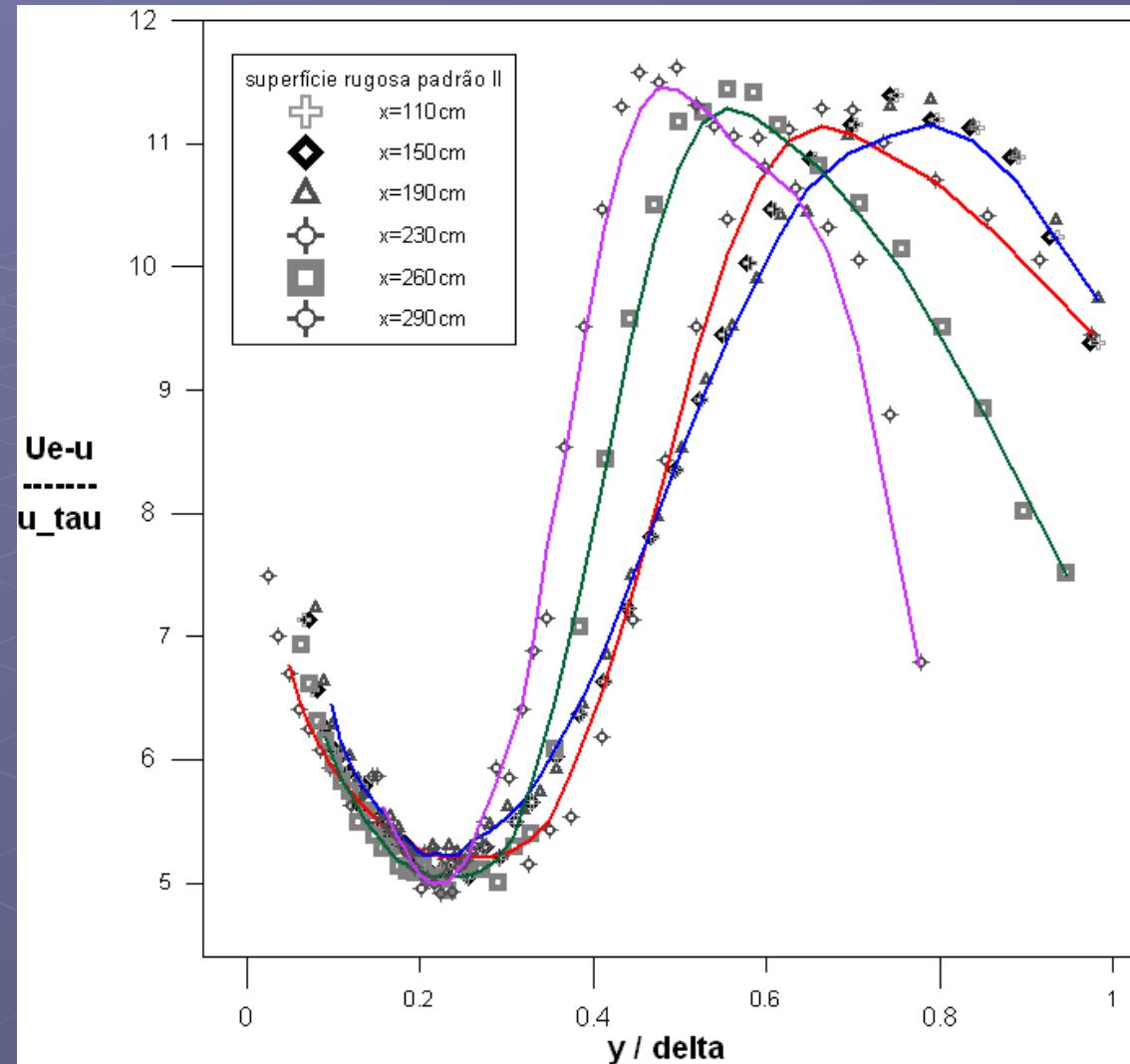
Comportamento do coeficiente de atrito para superfície rugosa tipo III



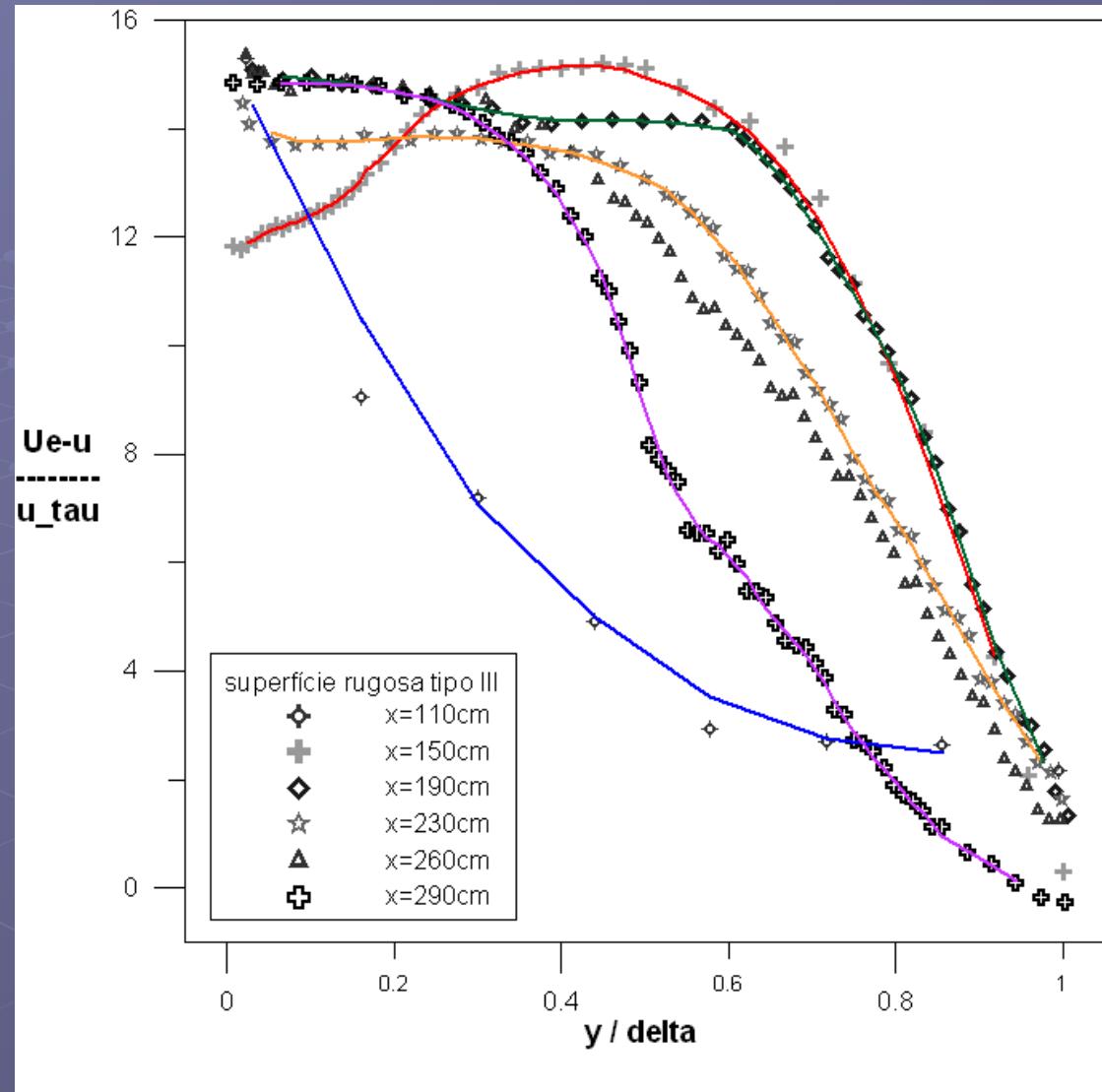
Perfis de velocidade média adimensionais com variáveis  
externas para o escoamento sobre superfície lisa



Perfis de velocidade média adimensionais com variáveis externas para o escoamento sobre superfície rugosa tipo I



Perfis de velocidade média adimensionais com variáveis externas para o escoamento sobre superfície rugosa tipo II



Perfis de velocidade média adimensionais com variáveis externas para o escoamento sobre superfície rugosa tipo III

# Conclusão

- foram realizadas medições de propriedade das camadas limite, foi possível interpretar o comportamento do escoamento quando sujeito às variações abruptas das condições de contorno superficiais;
- os dados apresentados nas figuras anteriores são de natureza experimental, estes dados são extremamente difíceis de se obter, pois as medições diretas são muito sensíveis a pequenas variações nas condições do escoamento e precisam ser obtidas com um posicionador de sensores extremamente sensível para o posicionamento do sensor de fio quente;
- ao elaborar os gráficos apresentados aqui, todas as dificuldades foram fortemente sentidas. Os resultados, entretanto, foram tomados com excessivo cuidado, apresentando assim, uma descrição correta do fenômeno;
- os resultados experimentais apresentados confirmam muitas das características dos escoamentos indicados na literatura por outros autores;
- as quatro geometrias estudadas aqui fornecem informações muito ricas do escoamento de uma camada limite turbulenta sobre superfícies rugosas que apresentam variação brusca de rugosidade e podem ser usadas em futuras formulações da física deste problema.

# Trabalhos futuros

- simulação numérica para o problema proposto;
- análise do deslocamento na origem;
- analogia com outros trabalhos publicados de mesmo tema.



Muito obrigado