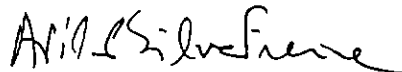


**TÉCNICAS DE ESPESSAMENTO ARTIFICIAL DE CAMADAS LIMITE
HIDRODINÂMICAS PARA A SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTOS
ATMOSFÉRICOS EM TÚNEIS DE VENTO**

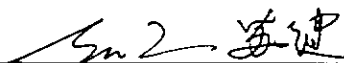
Pedro Henrique de Almeida Barbosa

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA MECÂNICA

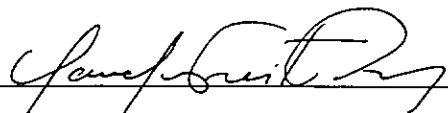
Aprovada por:



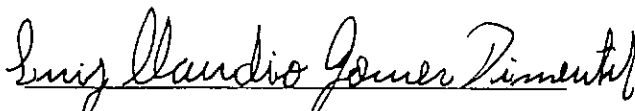
Prof. Atila P. Silva Freire, Ph.D.



Prof. Su Jian, D.Sc.



Prof. Claudio Freitas Neves, Ph.D.



Prof. Luiz Cláudio G. Pimentel, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

DEZEMBRO DE 2000

BARBOSA, PEDRO HENRIQUE DE ALMEIDA

Técnicas de Espessamento Artificial de
Camadas Limite Hidrodinâmicas para a
Simulação de Escoamentos Atmosféricos
em Túneis de Vento[Rio de Janeiro] 2000.

VIII, 102 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Mecânica, 2000)

Tese – Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Turbulência
2. Camada Limite
3. Túnel de Vento
4. Anemometria de Fio-quente

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

A todos que, de alguma forma,
contribuíram para a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais pelo apoio e pela paciência sempre presentes em nosso convívio, sendo estes fatores fundamentais para o meu sucesso. Agradeço à minha família também pelo incentivo e pela confiança demonstrados ao longo de toda minha trajetória.

Ao Professor Atila P. Silva Freire, meu orientador neste trabalho, cujos conhecimento e espírito empreendedor estimularam e permitiram sua execução.

A todos os amigos que sempre desejaram meu sucesso, em especial aos amigos Carlos Eugênio C. Provenzano, Leonardo B. Ribeiro, Marcos T. Tavares e Rafael Mandarino.

A Ricardo Balian, técnico e desenhista industrial do Laboratório, que ampliou meu horizonte cultural com seu vasto conhecimento técnico e viabilizou a construção de todo o aparato experimental deste trabalho com suas idéias criativas.

Aos colegas do Laboratório de Mecânica da Turbulência pelo saudável ambiente de trabalho proporcionado. Em particular, ao colega de mestrado Marcio Cataldi por sua contribuição científica ao longo deste trabalho e pelo seu companheirismo, revelando-se também um grande amigo.

À Brunela T. Toniazzo Martins por sua amizade e compreensão em todos os momentos.

À CAPES pelos recursos alocados no desenvolvimento desta pesquisa.

Finalmente, agradeço a Deus por permitir a superação de mais esta etapa.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

**TÉCNICAS DE ESPESSAMENTO ARTIFICIAL DE CAMADAS LIMITE
HIDRODINÂMICAS PARA A SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTOS
ATMOSFÉRICOS EM TÚNEIS DE VENTO**

Pedro Henrique de Almeida Barbosa

Dezembro/2000

Orientador: Atila P. Silva Freire

Programa: Engenharia Mecânica

Este trabalho reporta um estudo sobre o desenvolvimento de técnicas de espessamento artificial de camadas limite de velocidade em túneis de vento para a modelagem física de escoamentos atmosféricos. Três tipos de aparatos de espessamento foram analisados: telas, geradores de vórtices elípticos e florestas de barras circulares. A validação dos dados obtidos com estes três dispositivos foi conduzida considerando-se seus parâmetros locais e globais, lei da parede e lei da esteira. A flutuação da componente longitudinal da velocidade do escoamento também é apresentada através de seu espectro de energia cinética turbulenta. Os resultados obtidos foram comparados com dados experimentais de outros autores, parâmetros atmosféricos e com a teoria de camadas limite naturalmente desenvolvidas sobre placas planas encontrada na literatura. A técnica de anemometria de fio-quente de um canal foi utilizada para a aquisição dos dados. Este trabalho ainda descreve em detalhes todo o procedimento experimental do túnel de vento e da instrumentação utilizados bem como a geometria dos geradores de vórtices testados.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

**ARTIFICIAL THICKENING HYDRODYNAMIC BOUNDARY LAYER
TECHNIQUES FOR WIND TUNNEL SIMULATION OF ATMOSPHERIC
FLOWS**

Pedro Henrique de Almeida Barbosa

December/2000

Advisor: Atila P. Silva Freire

Department: Mechanical Engineering

The present work reports an experimental study of techniques that can provide artificially thickened turbulent boundary layers for physical modelling of atmospheric flows. Three different types of thickening devices were analyzed: screens, elliptic wedge generators and arrays of cylindrical bars. The assessment of the data was carried out considering the local and integral properties of the flow, law of the wall and law of the wake. Longitudinal velocity fluctuations are also presented through the turbulent kinetic energy spectrum. The results were compared to experimental data published by others authors, atmospheric parameters and naturally developed turbulent boundary layer theory found in the literature. The single hot-wire anemometry technique was used to acquire the data. The details of the wind tunnel experimental procedure and its instrumentation as well as the arrangement of the vortex generators are also included.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
	2.1 – Turbulência e Camada Limite Turbulenta (CLT)	7
	2.2 – Teoria da Estrutura da Camada Limite Atmosférica (CLA)	9
	2.3 – Técnicas de Engrossamento Artificial de CLT em Túneis de Vento	11
	2.4 – Considerações para a Simulação de CLA em Túneis de Vento	14
	2.5 – Aplicações da Modelagem Física de CLA	16
3	METODOLOGIA	18
	3.1 – Descrição Experimental	18
	3.2 – Aparatos de Engrossamento da CLT	26
	3.2.1 – Telas	26
	3.2.2 – Geradores de Vórtices Elípticos	28
	3.2.3 – Florestas de Barras Cilíndricas	34
	3.3 – Visualização do Escoamento	36
	3.4 – Condições de Equilíbrio da Camada Limite	37
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	43
	4.1 – Resultados com as Telas	45
	4.2 – Resultados com os Geradores de Vórtices Elípticos	57
	4.3 – Resultados com as Florestas de Barras Circulares de 80 mm	63
	4.4 – Resultados com as Florestas de Barras Circulares de 160 mm	69
	4.5 – Resultados da Visualização do Escoamento	84
5	VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL	86
6	CONCLUSÕES	91
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

A	VALORES TÍPICOS DE Y_0	100
B	DESENHOS DO CONJUNTO BUCHA-MANDRIL	101

1. INTRODUÇÃO

Há décadas a simulação de escoamentos atmosféricos em túneis de vento tem sido objeto de constantes trabalhos experimentais (HUNT e FERNHOLZ, 1975), devido principalmente à dificuldade na manipulação dos dados coletados em medições na natureza e à inerente complexidade matemática das equações de Navier-Stokes que regem seu movimento. De fato, a concepção de camadas limites atmosféricas em laboratório assume um papel fundamental na compreensão de vários fenômenos e sua aplicabilidade é vasta, tanto para a engenharia quanto para a micrometeorologia (PLATE, 1971). Consequentemente, faz-se necessário um bom conhecimento dos perfis de velocidade média, de intensidade turbulenta e dos campos de temperatura para que, por exemplo, estimativas de cargas aerodinâmicas em estruturas e predições da dispersão de poluentes na atmosfera possam ser realizadas com razoável precisão (CERMAK, 1971).

Além disso, existem ao menos três outros fatores que estimulam a prática da modelagem física para o tratamento de problemas relacionados à análise meteorológica de escoamentos atmosféricos (GRAINGER e MERONEY, 1994). Primeiramente, a modelagem de escoamentos em túneis de vento possibilita informações realísticas sobre o comportamento do escoamento próximo à superfície, fenômenos de separação e sobre as interações tridimensionais do escoamento. Em segundo lugar, a modelagem física dos fluidos lida com fluidos reais e não com modelos de fluidos, ou seja, o domínio da modelagem física é contínuo (analógico) ao contrário do que ocorre na modelagem numérica onde o domínio analisado é limitado pela capacidade de discretização computacional (digital). E finalmente, a modelagem física de fluidos em túneis de vento preenche uma lacuna importante entre a modelagem analítica e numérica de escoamentos turbulentos e suas aplicações, pois possibilita recursos de visualização indispensáveis na compreensão de alguns temas ligados à mecânica dos fluidos.

Motivados por essa necessidade científico-tecnológica, muitos autores dedicaram grande parte de seus trabalhos a esse tema (DAVENPORT, 1963). Entretanto, para que os modelos físicos estudados (maquetes de prédios, topografias de cidades, colinas, etc.) fossem representativos em escala da realidade e construtivamente viáveis, a espessura das camadas limite geradas nos túneis de vento deveria ser a maior

possível. Em decorrência desse fato, os túneis de vento utilizados para estudos atmosféricos apresentavam grandes comprimentos de suas seções de testes. CERMAK (1981) sugere que túneis de vento meteorológicos devam ter seção de testes entre 15 e 30 metros de comprimento se é desejável a simulação de camadas limite atmosféricas em várias condições (estáveis, instáveis e neutras). Já para a simulação de camadas limite atmosféricas neutras, seções de teste com comprimentos entre 12 e 20 metros são recomendadas.

O engrossamento artificial de camadas limite em túneis de vento é uma maneira eficiente de se reduzir o comprimento da seção de testes necessário para a simulação de camadas limite atmosféricas, pois aumenta a faixa útil de operação do túnel para um determinado comprimento (GUIMARÃES et al., 1999). Portanto, a adoção dessa estratégia implica em uma grande redução dos custos de projetos de novos túneis de vento para fins atmosféricos e permite que pequenos túneis já existentes tenham sua faixa de utilização ampliada. Deve-se considerar também que a escolha desta tática reflete numa versatilidade do equipamento no que se refere à sua aplicabilidade operacional pois possibilita que seu uso seja feito para o estudo de diversas aplicações meteorológicas.

Várias técnicas de engrossamento artificial de camadas limites em túneis de vento foram estudadas ao longo dessas últimas décadas na tentativa de se minimizar os custos provenientes da construção de grandes túneis. O artigo de HUNT e FERNHOLZ (1975) enumera dez diferentes métodos de engrossamento artificial para a simulação de camadas limite atmosféricas neutras (sem estratificação) e cinco diferentes métodos de engrossamento para a simulação de camadas limite atmosféricas estratificadas. Estes métodos variam enormemente em seus graus de sofisticação e em seus princípios de funcionamento e, por isso, sua total compreensão e sua aplicabilidade ainda não foram por completo desvendadas (BARBOSA et al., 2000b).

As técnicas para o engrossamento artificial de camadas limite podem ser comparadas considerando-se o tipo de perturbação provocada no escoamento proveniente do aparato de engrossamento (LIGRANI et al., 1983). Segundo o modelo de duas camadas proposto por TOWNSEND (1957) para camadas cisalhantes turbulentas próximas à parede, tais técnicas podem ser divididas em três categorias diferentes:

Na primeira categoria, a mais simples de todas, o engrossamento artificial da camada limite é feito modificando-se as condições da superfície do túnel com o

propósito de se aumentar o cisalhamento (acelerando-se assim o crescimento da camada limite turbulenta já existente) ou produzindo algum outro tipo de perda de quantidade de movimento na região interna da camada limite. Este efeito pode ser obtido aumentando-se a rugosidade superficial na parede do túnel ou colocando-se barras de seções retangulares “strips” transversais ao escoamento.

Numa segunda categoria, o engrossamento da camada limite é feito alterando-se as características tanto da região interna quanto da região externa da camada limite. A utilização de múltiplos jatos de ar posicionados no chão do túnel na entrada da seção de testes exemplifica esta categoria.

Finalmente, na terceira categoria a camada limite é artificialmente engrossada através de um déficit de quantidade de movimento proveniente da região do escoamento externo (potencial), previamente irrotacional. Para isso, empregam-se diversos tipos de geradores de vórtices que, quando imersos no escoamento, geram esteiras que se combinam (a jusante do aparato de engrossamento) com a camada limite turbulenta já existente, resultando em estruturas que em alguns casos representam a estrutura de uma camada limite turbulenta espessa.

Diante ao que foi apresentado, este trabalho tem por objetivo gerar em túnel de vento camadas limite turbulentas de velocidade engrossadas artificialmente que apresentem características similares à camada limite neutra atmosférica. Além disso, este trabalho almeja desenvolver e criar uma técnica simples de engrossamento artificial, capaz de reproduzir camadas limites espessas em pequenos túneis de vento. A versatilidade e facilidade construtivas, o custo de fabricação e o tempo de execução do aparato de engrossamento serão fatores determinantes na otimização e na concepção desta técnica. Deve-se ressaltar ainda que, apesar deste trabalho possibilitar futuramente o estudo de camadas limite turbulentas com gradientes térmicos e a conseqüente simulação de escoamentos atmosféricos estratificados (estáveis e instáveis), seu enfoque será baseado apenas na simulação de camadas limite atmosféricas neutras (sem gradientes de temperatura). Portanto, o desenvolvimento de métodos de estratificação de escoamentos e a simulação de camadas limite de temperatura em túneis de vento servirão somente como ferramentas de conhecimento para o objeto de estudo deste trabalho.

As principais contribuições científicas deste trabalho foram a concepção, o desenvolvimento e o refinamento de uma técnica de engrossamento artificial de camadas limite que fosse construtiva e economicamente mais viável do que as

apresentadas por outros autores e envolvesse menos tempo para sua fabricação. Como consequência de seus resultados e para que seu objetivo fosse mantido, durante os experimentos foi constatada também a necessidade de se aumentar a seção de testes do túnel utilizado.

O túnel de vento empregado para os experimentos situa-se no Laboratório de Mecânica da Turbulência/COPPE na Universidade Federal do Rio de Janeiro. É um túnel de circuito aberto de alta intensidade turbulenta (2%). As dimensões de sua seção de testes são: 670 x 670 x 3000 (em milímetros). Os principais equipamentos utilizados para a medição da velocidade do escoamento foram um tubo de Pitot, um anemômetro de temperatura constante (KAURI) e um sensor de fio-quente de um canal. O sinal era enviado para uma placa de aquisição de dados (DATA TRANSLATION) e processado num software específico de tratamento de dados (HOT2812) desenvolvido no próprio laboratório.

Para se alcançar o objetivo proposto, foram testados três diferentes métodos de engrossamento artificial: telas, geradores de vórtices elípticos e florestas de barras cilíndricas "rods".

Nos três métodos avaliados, várias configurações foram testadas arranjando-se barras de alumínio de seções retangulares "strips" na superfície inferior do túnel, transversais ao escoamento. As strips eram colocadas em diversas posições, modificando-se basicamente a quantidade de "strips", sua posição em relação ao aparato de engrossamento (a montante "leading strip" ou a jusante "trailing strip") e o espaçamento entre elas.

A proposta inicial deste trabalho era utilizar telas para gerar camadas limite espessas. Diversos experimentos foram feitos com esse tipo de aparato de engrossamento artificial, utilizando primeiramente uma única tela de 30 centímetros de altura posicionada na entrada da seção de testes do túnel. Os dados obtidos com essa configuração nos levavam a crer que as esteiras formadas pelos arames da tela pouco se misturavam com a camada limite turbulenta já existente. Os experimentos então passaram a ser realizados com duas telas de 30 cm, defasadas entre si de meia malha na horizontal. Com isso, esperava-se que as esteiras geradas pelos arames das telas se misturassem mais facilmente com a camada limite existente ao longo da seção de testes do túnel e, assim sendo, o objetivo de se obter um perfil similar ao de uma camada limite espessa fosse alcançado. Entretanto, os dados obtidos ainda revelaram uma perda considerável de quantidade de movimento na região externa do escoamento, decorrência

provável da descontinuidade física existente entre a região das esteiras formadas pelos arames da tela e a região do escoamento potencial e, como consequência do fracasso desta tentativa, este método foi abandonado.

A proposta seguinte baseava-se em utilizar geradores de vórtices elípticos para promover o engrossamento artificial da camada limite eliminando assim a suposta descontinuidade de quantidade de movimento encontrada no método anterior. O procedimento seguido foi similar ao descrito por COUNIHAN (1969). Para a manufatura dos geradores foi necessária a confecção de um modelo estrutural em alumínio e poliuretano revestido com massa sintética. Com base no modelo já pronto, um molde de silicone industrial foi confeccionado e os geradores foram então “vazados” no molde, num processo similar ao processo de fundição. O material injetado no molde para a confecção dos geradores foi uma mistura percentual de resina incolor e talco industrial. Os geradores tinham 20 centímetros de altura e foram posicionados lado a lado, na entrada da seção de testes do túnel (maiores detalhes da manufatura dos geradores e das técnicas de engrossamento utilizados neste trabalho serão abordados no Capítulo 3).

Esperava-se que após este procedimento esta técnica de engrossamento atendesse à nossa expectativa de obtenção da camada limite espessada. Entretanto, contrariamente aos resultados obtidos por COUNIHAN (1969), nossos experimentos não apresentaram o resultado esperado. Os primeiros experimentos com esse método de engrossamento foram feitos com apenas quatro geradores, com espaçamento constante entre eles. Foi verificado que, para essa configuração, os dados obtidos não pareciam apresentar nenhum efeito de engrossamento da camada limite, ou seja, a espessura da camada limite encontrada nessa configuração demonstrou não sofrer nenhum acréscimo em relação à espessura da camada limite naturalmente desenvolvida para aquele mesmo comprimento da seção de testes do túnel. Os experimentos passaram então a ser feitos com sete geradores de vórtices com espaçamento constante porém menor entre eles. Verificou-se que o perfil obtido não correspondia a um perfil desejado de camada limite, nos levando a desistir deste método.

O último método de engrossamento testado baseou-se nos resultados obtidos por GUIMARÃES et al. (1999). Partindo-se inicialmente da geometria descrita em seu artigo, várias configurações foram testadas com as florestas de barras cilíndricas, modificando-se basicamente a altura da floresta, o espaçamento entre as barras, a posição das “strips” em relação à floresta e a quantidade de “strips”. Foram conseguidas

com esta técnica de engrossamento camadas limite bem qualificadas de até 14 centímetros de espessura com a seção de testes disponível inicialmente e camadas limite de 27 centímetros de espessura após a ampliação da seção de testes do túnel.

Os experimentos realizados com esses três métodos apresentaram bons resultados somente para as florestas de barras cilíndricas, conseguindo em algumas de suas configurações, camadas limite até quatro vezes mais espessas que a camada limite naturalmente desenvolvida para o mesmo comprimento de túnel.

Para a validação da camada limite artificialmente espessada, uma rotina matemática foi implementada no software *Mathematica 3.0* onde sua formação, crescimento e estrutura foram avaliados e comparados com as teorias encontradas na literatura para camadas limite naturalmente desenvolvidas, com dados experimentais de outros autores que simularam camadas limite atmosféricas em túneis de vento e com dados colhidos na própria natureza. Os dados adquiridos foram avaliados segundo seus parâmetros locais e globais, lei da parede, lei da esteira e através da análise de seu espectro de energia unidimensional.

No que se refere à estrutura deste trabalho, o capítulo seguinte abordará os principais desenvolvimentos referentes à simulação de camadas limite atmosféricas em túneis de vento bem como as principais técnicas de engrossamento artificial de camadas limite utilizadas ao longo destas últimas décadas.

Já o Capítulo 3 detalhará a descrição completa de todos os métodos teóricos e experimentais empregados neste trabalho e a especificação dos equipamentos utilizados para o seu desenvolvimento. Alguns resultados também serão apresentados neste capítulo.

A análise dos resultados obtidos com as configurações testadas neste trabalho através de sua comparação com a teoria de placas planas lisas bem como a validação dos dados com perfis coletados na atmosfera serão apresentadas nos Capítulos 4 e 5. O espectro unidimensional de energia cinética turbulenta de todas as configurações também será comparado com a teoria de decaimento espectral proposta por KOLMOGOROV (1941).

Finalmente, o Capítulo 6 será dedicado à uma breve avaliação dos experimentos realizados ao longo deste estudo, destacando seus principais resultados e relacionando-os com os objetivos propostos no início deste trabalho. A continuidade deste tema também será discutida para sua possível implementação em trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo relatará os principais avanços científicos ocorridos nas últimas décadas referentes ao estudo dos métodos de engrossamento artificial de camadas limite para a simulação de escoamentos atmosféricos em túneis de vento bem como os demais temas relacionados a este assunto. Embora estes temas estejam intimamente ligados ao objeto de estudo deste trabalho, sua multidisciplinaridade fez com que este capítulo fosse subdividido em algumas seções temáticas. Assim sendo, os eventos abordados em cada seção deste capítulo serão reportados, sempre que possível, em sua ordem cronológica.

2.1 – Turbulência e Camada Limite Turbulenta (CLT)

O conceito de camada limite foi inicialmente proposto por PRANDTL (1904) ao formular a hipótese que, independente de quão pequena seja a viscosidade de um fluido, as forças viscosas sempre devem ser consideradas em regiões próximas a contornos sólidos, sobre os quais deve ser satisfeita a condição de não-deslizamento ou aderência.

Até meados da década de 40, as teorias fenomenológicas e semi-empíricas eram os métodos teóricos mais viáveis para a compreensão de fenômenos não-lineares como a mecânica dos fluidos. Em particular, a teoria estatística da turbulência introduzida por TAYLOR (1935) e aprimorada por Kármán, Howarth e Dryden desempenhava um papel fundamental para o estudo desse tema.

Entretanto, a partir da década de 50, a modelagem física de escoamentos passou a ser encarada como uma ferramenta indispensável para a compreensão da maioria dos processos turbulentos e para a formulação de novas teorias. KLEBANOFF (1955), por exemplo, utilizou-se das técnicas de anemometria de fio-quente disponíveis daquela época para a caracterização de alguns parâmetros da turbulência em camadas limite com gradiente nulo de pressão. Em seu trabalho experimental, Klebanoff confirmou o comportamento intermitente da camada limite turbulenta revelado primeiramente por CORRSIN (1943) e deduziu uma expressão para o fator de intermitência da camada limite turbulenta, comparando esta expressão com dados medidos em seus experimentos. O espectro unidimensional de energia cinética turbulenta do escoamento

também foi medido por Klebanoff, mostrando boa acurácia quando comparado com a clássica lei dos $k^{-5/3}$ proposta por KOLMOGOROV (1941).

Apesar da grande contribuição científica ocorrida na primeira metade do século, somente no final da década de 60 a estrutura da camada limite turbulenta passou a ser melhor compreendida. O artigo publicado por KLINE et al. (1967) revela a importância da região próxima à parede para a formação de toda a estrutura da camada limite através da distribuição da taxa de produção por unidade de volume de energia cinética turbulenta. Utilizando os dados colhidos por KLEBANOFF (1955), o grupo de Kline demonstrou que existe um pico de produção de energia cinética turbulenta numa região bem próxima à parede (logo após o término da subcamada laminar). Também foi observado que a região da esteira da camada limite turbulenta contribui com apenas 20% da produção total de energia no escoamento. Estas observações parecem estar em acordo, pelo menos qualitativamente, com os resultados obtidos por LAUFER (1954) para escoamentos no interior de tubos. Kline et al. utilizaram recursos de visualização para demonstrar a estrutura da camada limite turbulenta com gradientes de pressão adversos, favoráveis e nulo. Como conclusões de seu trabalho, verificaram que a subcamada laminar não é bidimensional nem permanente como trabalhos anteriores sugeriam e que a produção de energia cinética turbulenta próxima à parede é dada por uma ejeção violenta de fluido oriundo de regiões ainda mais próximas à parede, num processo típico dos mecanismos de instabilidade. Tal processo sugere que a ejeção de fluido da parede é o mecanismo responsável pela transferência de energia das regiões internas para as regiões externas da camada limite.

A influência da região interna da camada limite turbulenta passou então a ser estudada variando-se basicamente as propriedades da superfície do escoamento. Em particular, elementos rugosos eram empregados para que os dados obtidos com essas configurações fossem comparados com os dados obtidos em placas planas. GARTSHORE e CROOS (1977) estudaram o efeito da geometria de elementos rugosos sobre o perfil de velocidades médio e sobre o valor da velocidade de atrito (u_τ). Utilizando um método semi-empírico de cálculo, seu trabalho relata como se comportam camadas limite em exato equilíbrio de acordo com as variações no espaçamento e na geometria dos elementos rugosos. Além disso, seus resultados são comparados com dados experimentais de outros autores demonstrando boa concordância.

Os trabalhos de LIGRANI e MOFFAT (1986) e de KROGSTAD e ANTONIA (1994) também relatam estes tipos de experimentos. No primeiro, por exemplo, diversos experimentos foram realizados com um conjunto de pequenas esferas. Em contraste com a metodologia utilizada por GRASS (1971) que alterava os valores de Re_k (*Número de Reynolds* de superfícies rugosas) modificando o diâmetro das esferas, Ligrani e Moffat alcançaram este efeito variando a velocidade potencial do escoamento e com isso, conseguiram analisar camadas limite turbulentas parcialmente e completamente rugosas. Já no trabalho de KROGSTAD e ANTONIA (1994), uma tela pousada sobre a superfície do túnel promoveu a rugosidade desejada. Neste caso, o efeito da rugosidade foi a redução do amortecimento dos componentes de flutuação da velocidade normais ao escoamento, aumentando assim a vorticidade do escoamento.

A considerável quantidade de trabalhos dedicados ao estudo da turbulência e, em especial de CLT, pode ser avaliada observando-se os trabalhos de FERNHOLZ e FINLEY (1996) e de SILVA FREIRE et al. (1997). No primeiro, uma abordagem específica de CLT com gradientes nulos de pressão é apresentada para uma ampla faixa de *Números de Reynolds* ($0,4 < Re_{\delta_2} \times 10^{-3} < 211$), demonstrando haver uma correlação universal (independente de Re) somente para perfis de velocidade média. Já em SILVA FREIRE et al. (1997), o estado da arte da modelagem da turbulência é apresentado através de dados recentes coletados por pesquisadores brasileiros.

2.2 - Teoria da Estrutura da Camada Limite Atmosférica (CLA)

A camada limite atmosférica (CLA) ou planetária (CLP) – como normalmente é chamada, é a porção da troposfera que é diretamente influenciada pela presença da superfície terrestre (STULL, 1988). Entretanto, não há como mensurar um valor exato para sua espessura já que na atmosfera não existe uma velocidade potencial bem definida, mas sim velocidades características de referência calculadas para o escoamento (*vento geostrófico*, por exemplo). Além disso, a espessura da CLA depende sensivelmente do regime do escoamento (estável, instável ou neutro), da rugosidade do terreno e das forças externas e condições de contorno que compõem o ambiente a que está submetida (LEMES e MOURA, 1998), podendo compreender desde algumas centenas de metros até dois quilômetros de altura.

Diversas são as denominações encontradas na literatura para as subcamadas da CLA. WYNGAARD (1992), por exemplo, considera que a CLA é subdividida em quatro regiões bem distintas: uma subcamada molecular (da ordem de alguns centímetros) onde predominam os efeitos viscosos e de difusão molecular; uma subcamada superficial (que compreende aproximadamente 10% da espessura total da CLA) onde os fluxos turbulentos são pouco modificados de seus valores na superfície; uma subcamada de mistura onde há a maior parte das trocas convectivas e uma subcamada interfacial ao final das CLA (apenas para CLA estratificadas) delimitada pelos pontos onde o fluxo de calor é nulo.

Em um dos trabalhos mais importantes para a compreensão da estrutura da camada limite atmosférica, MONIN e OBUKHOV (1954) propuseram relações de similaridade para CLA, principalmente para a região da subcamada superficial. Através da utilização de grupos adimensionais, seu trabalho relata, entre outras contribuições, correlações entre perfis de velocidade verticais em função da altura adimensionalizada y/L acima da superfície (onde L é o comprimento de Monin-Obukhov). Deste modo, seu trabalho contribuiu enormemente para a posterior determinação empírica dos perfis de velocidade da CLA.

Para se estimar a velocidade média de escoamentos neutros em função da altura y , acima da superfície, a seguinte relação pode ser empregada (STULL, 1988)

$$\frac{u}{u_\tau} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{y}{y_0} \right) \quad (2.1)$$

onde: $k \cong 0,4$ (Constante de *Von Karman*) e y_0 representa o *comprimento de rugosidade aerodinâmico* que é uma função apenas da rugosidade do terreno.

Valores típicos de y_0 são listados no *Anexo A* deste trabalho (GARRATT, 1977; HICKS et al., 1975; KONDO e YAMAZAWA, 1986; NAPPO, 1977; SMEDMAN-HÖGSTRÖM e HÖGSTRÖM, 1978 e THOMPSON, 1978).

LETTAU (1969) sugere um método para se estimar o comprimento de rugosidade aerodinâmico (y_0) baseado na altura média dos elementos rugosos (h^*), na área transversal ao escoamento de cada elemento rugoso (S_s) e no tamanho do terreno por elemento rugoso ($S_L = \text{área superficial total} / \text{número de elementos rugosos}$).

$$y_0 = 0,5 h^* \left(\frac{S_s}{S_L} \right) \quad (2.2)$$

Esta relação só é válida quando os elementos rugosos são espaçados igualmente uns dos outros e apresentam formas e alturas similares.

Recentemente, um estudo detalhado sobre o comportamento do espectro de energia cinética turbulenta de escoamentos atmosféricos foi realizado por LINDBORG (1999). Em seu artigo é argumentada a possibilidade do estudo da teoria espectral atmosférica utilizando modelos bidimensionais de turbulência. Após coletar dados de diversos vôos com fins meteorológicos, Lindborg verificou que o espectro de energia cinética turbulenta atmosférico poderia ser dividido em dois diferentes comportamentos de decaimento. O primeiro, nas maiores escalas, é verificado em seu trabalho como uma função do tipo k^{-3} e o segundo, em escalas menores de turbulência, como uma função do tipo $k^{-5/3}$. Como uma das principais conclusões de seu trabalho, Lindborg relata que a modelagem bidimensional da turbulência não é eficaz na tentativa de explicar o comportamento nas menores escalas da turbulência, ou seja, quando o decaimento espectral é do tipo $k^{-5/3}$. Entretanto, nas maiores escalas, Lindborg afirma que é possível estudar o espectro de energia cinética turbulenta utilizando esta modelagem.

2.3 - Técnicas de Engrossamento Artificial de CLT em Túneis de Vento

As primeiras tentativas de engrossamento artificial de camadas limite turbulentas em túneis de vento datam da década de 50 (KLEBANOFF e DIEHL, 1952). Entretanto, somente a partir do final dos anos sessenta este tema foi abordado com maior frequência. Uma das principais razões para a abordagem mais intensa deste assunto deve-se ao fato do proeminente desenvolvimento da indústria aerodinâmica da época. Impulsionada pela crescente necessidade de se reduzir os custos desnecessários na pesquisa e otimização de protótipos provenientes da operação de grandes túneis meteorológicos, a modelagem física de camadas limite atmosféricas neutras em pequenos túneis de vento tornou-se uma técnica interessante na viabilização destas tarefas.

Dentre as contribuições mais importantes para o bom entendimento deste assunto, os trabalhos inovadores de COUNIHAN (1968, 1969) representam um capítulo

a parte na história desta ciência. Em um de seus trabalhos experimentais, COUNIHAN (1969) testou quatro diferentes tipos de geradores de vórtices para simular camadas limites atmosféricas neutras através do engrossamento artificial da CLT em túneis de vento: geradores de vórtices triangulares, quadriláteros, plano-elípticos e elípticos. Devido ao comportamento similar do escoamento observado nos três primeiros tipos de geradores citados acima, Counihan decidiu comparar mais detalhadamente somente as características dos geradores de vórtices elípticos e triangulares. Os resultados obtidos utilizando os geradores de vórtices triangulares indicaram perdas excessivas de quantidade de movimento na região interna da camada limite e perdas insuficientes de quantidade de movimento na região externa da CLT. Assim, Counihan optou por utilizar geradores elípticos para eliminar este efeito indesejável, sendo este um método eficiente de redistribuição de área em relação aos geradores triangulares.

Ainda em seu trabalho, foram propostas várias configurações envolvendo os geradores de vórtices elípticos e uma barra transversal, castelizada, a montante dos geradores para promover a simulação da CLA. Parâmetros como o espaçamento entre os geradores, a altura da barra empregada e a distância entre a barra e os geradores foram otimizados ao longo dos experimentos. Counihan ainda sugere a utilização de geradores de vórtices elípticos que apresentem semi-ângulos de cunha entre 5° e 6° para que a simulação da CLA seja alcançada com esta técnica de engrossamento.

Inúmeros métodos alternativos para o engrossamento artificial de CLT em laboratório surgiram já na primeira metade da década de 70. O artigo de NEE et al. (1973), por exemplo, sugere como técnica de engrossamento a utilização de múltiplos jatos de ar horizontais com pressões variáveis, posicionados uns contra os outros nas paredes laterais do túnel. De acordo com suas observações, modificando-se a pressão de cada jato, a intensidade turbulenta e as tensões cisalhantes variam de forma a gerar uma camada limite espessa. Em seus experimentos, camadas limite de até 70 cm foram obtidas em uma seção de testes de 7 metros de comprimento.

NAGIB et al. (1974) e SLUMAN et al. (1980) também utilizaram jatos de ar para promover o engrossamento da CLT. Todavia, estes geralmente eram empregados de uma maneira diferente da proposta por NEE et al. (1973). Em ambos estudos, os jatos de ar eram direcionados verticalmente e posicionados na superfície inferior do túnel produzindo um aumento na espessura da camada limite e provocando oscilações de baixa frequência no escoamento. Essas oscilações eram desejáveis já que representavam bem os grandes turbilhões observados na atmosfera. Em especial, no

trabalho de SLUMAN et al. (1980), várias configurações de rugosidades foram testadas a jusante dos jatos de ar na superfície inferior do túnel. As diversas geometrias rugosas eram determinadas através de arranjos de peças plásticas de LEGO para simular diversos perfis de camadas limite atmosféricas rurais e urbanas.

Alguns autores também propuseram a combinação de mais de uma técnica de engrossamento da CLT para reproduzir escoamentos atmosféricos em laboratório. Para simular o primeiro terço de uma CLA adiabática em túnel de vento, o artigo de COOK (1973) por exemplo, relata como método de engrossamento artificial a combinação de uma rede (com malha de 0,3 m), uma cerca e diversos elementos rugosos. Seus resultados foram comparados com dados obtidos em escala real, demonstrando haver boa acurácia quando comparados com outros dados meteorológicos. Já em ROBINS (1975), a camada limite atmosférica é obtida através da combinação de geradores de vórtices (conforme os propostos por COUNIHAN (1969)), uma cerca e elementos rugosos posicionados na superfície do túnel. Segundo os resultados obtidos em seus experimentos, Robins concluiu que é necessário um comprimento da seção de testes sete vezes e meia maior que a espessura da camada limite obtida, para que as condições de equilíbrio sejam satisfeitas.

Seguindo a técnica de engrossamento de CLT desenvolvida por Counihan, ARIE et al. (1981) alternaram cilindros circulares entre geradores de vórtices triangulares para promover a simulação de CLA em seu túnel de vento. Barras retangulares, transversais ao escoamento, também foram posicionadas a jusante do conjunto de engrossamento. Diferentes combinações de espaçamento entre as barras foram testadas para promover um ajuste fino do perfil desejado. Os perfis de velocidade obtidos apresentaram um comportamento bem próximo ao estado de equilíbrio encontrado na natureza e suas propriedades foram similares às propriedades encontradas em CLA.

A utilização de geradores de vórtices coneidais (spires) também já foi experimentada, conforme relata o trabalho de LIGRANI e MOFFAT (1979). Apesar de seus resultados serem bastante satisfatórios quando comparados com resultados experimentais de perfis naturalmente desenvolvidos, esta técnica requer o emprego de procedimentos de fabricação mecânica sofisticados para a confecção dos geradores, tornando-se quase sempre, uma prática economicamente inviável.

Baseado no sucesso obtido por Ligrani e Moffat, o artigo de GUIMARÃES et al. (1999) descreve como algumas combinações de barras retangulares transversais ao escoamento e uma floresta de barras circulares posicionadas na entrada da seção de

testes do túnel podem ser utilizadas para gerar uma camada limite espessa. São relatadas em seu artigo camadas limite artificialmente espessadas de 8 e de 13 centímetros de espessura. Entretanto, nenhum dado referente ao comportamento da turbulência do escoamento é apresentado. Em seu trabalho, as propriedades das camadas limite artificialmente geradas são avaliadas através de parâmetros globais e locais, lei da parede e lei da esteira, demonstrando resultados bem qualificados somente para algumas configurações de 8 cm.

2.4 - Considerações para a Simulação de CLA em Túneis de Vento

De acordo com CERMAK (1971), para que a simulação de CLA em túneis de vento seja completamente análoga à sua ocorrência na natureza, alguns critérios básicos de similaridade devem ser considerados. São eles: similaridade geométrica, cinemática, dinâmica, térmica e similaridade das condições de contorno. Entretanto, alguns desses critérios podem ser relaxados dependendo do tipo de CLA desejada (neutra ou estratificada) e de suas aplicações.

Os critérios de similaridade geométrica podem ser satisfeitos se for preservada uma razão de escala constante para todas as dimensões do modelo, bem como sua proporcionalidade com a espessura da camada limite gerada. Em outras palavras, haverá similaridade geométrica toda a vez que a equação de conservação de massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2.3)$$

permanecer invariável quando adimensionalizada.

Segundo Cermak, a similaridade cinemática é automaticamente alcançada, quando os demais critérios de similaridade são assegurados.

Os critérios de similaridade dinâmica são obtidos através da equação de conservação da quantidade de movimento

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + 2\varepsilon_{ijk} \Omega_j \bar{U}_k = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} - \frac{\Delta \bar{T}}{\bar{T}_0} g \delta_{i3} + \nu_0 \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_k \partial x_k} + \frac{\partial \langle -u'_j u'_i \rangle}{\partial x_j} \quad (2.4)$$

Rescrevendo a Equação (2.4) em sua forma adimensional, a similaridade dinâmica entre dois escoamentos pode ser obtida comparando-se os seguintes grupos adimensionais formados após esta operação

$$\text{Número de Reynolds:} \quad Re = \frac{U_0 L_0}{\nu_0} \quad (2.5)$$

$$\text{Número de Richardson:} \quad Ri = \left[\frac{\Delta \bar{T}_0}{\bar{T}_0} \right] \left[\frac{L_0}{U_0^2} \right] g_0 \quad (2.6)$$

$$\text{Número de Rossby:} \quad Ro = \frac{U_0}{L_0 \Omega_0} \quad (2.7)$$

A razão entre os *Números de Reynolds* de escoamentos dentro do túnel de vento e de escoamentos atmosféricos varia de acordo com o fator de escala empregado. Para um fator de escala de 1/1000, por exemplo, a razão supracitada vale 10^{-3} . Felizmente, as parâmetros relevantes de adimensionalização de camadas limite neutras sobre superfícies rugosas tornam-se independentes do *Número de Reynolds* para distâncias longitudinais razoavelmente pequenas (SCHLICHTING, 1968). Através de uma seleção adequada do comprimento da seção de testes, da faixa de velocidades utilizada e das rugosidades superficiais empregadas é possível se simular CLA com altos *Números de Reynolds* (CERMAK, 1981).

Para escoamentos em túneis de vento sem gradientes térmicos ($\Delta \bar{T}_0 = 0$), temos que $Ri=0$. Logo, para a simulação de CLA neutras (sem estratificação térmica) a hipótese de similaridade do *Número de Richardson* é automaticamente satisfeita. Já o *Número de Rossby* representa o efeito da aceleração de Coriolis planetária sobre os escoamentos atmosféricos. Sem rotação do túnel de vento em relação a um eixo vertical, os *Números de Rossby* para o escoamento no túnel são, dependendo do fator de escala adotado, aproximadamente 10^3 vezes maiores que os *Números de Rossby* encontrados para escoamentos atmosféricos. Todavia, para a maioria dos estudos relacionados aos efeitos da CLA em aplicações de microescala (dispersão de poluentes, inversão térmica, escoamentos sobre cidades e colinas, etc.) este efeito normalmente é desprezado, devido principalmente aos altos custos associados à implementação de dispositivos que

possibilitam a similaridade deste critério e a pouca influência deste parâmetro nestas aplicações (uma discussão mais detalhada é encontrada em CERMAK (1971, 1981)).

Os requisitos para que haja similaridade térmica entre dois escoamentos podem ser obtidos através da adimensionalização da equação de conservação de energia abaixo

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{U}_i \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} = \left[\frac{k_0}{\rho_0 C_{p0}} \right] \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x_k \partial x_k} + \frac{\partial \langle -\theta' u_i' \rangle}{\partial x_i} + \frac{\phi}{\rho_0 C_{p0}} \quad (2.8)$$

onde ϕ é a função de dissipação. Com isso, dois novos parâmetros adimensionais de similaridade são introduzidos

$$\text{Número de Prandtl:} \quad Pr = \frac{v_0 \rho_0 C_{p0}}{k_0} \quad (2.9)$$

$$\text{Número de Eckert:} \quad Ec = \frac{U_0^2}{C_{p0} (\Delta \bar{T})_0} \quad (2.10)$$

Como o ar é o fluido utilizado para a simulação de CLA em túneis de vento, automaticamente os *Números de Prandtl* de ambos os sistemas são iguais. A influência do *Número de Eckert* só é expressiva quando a velocidade do escoamento se aproxima da velocidade do som. Por isso, este requisito pode ser relaxado.

Finalmente, os critérios de similaridade de condições de contorno são satisfeitos, segundo CERMAK (1971), quando é guardada semelhança na rugosidade superficial da área de interesse, quando o gradiente de pressão longitudinal for o mesmo para os dois escoamentos (no caso de simulação de CLA em túneis de vento é necessário que $\partial \bar{P} / \partial x \cong 0$) e quando as distribuições de temperatura e de velocidade verticais forem preservadas iguais em ambos os sistemas. Para haver um controle manual dos gradientes de pressão longitudinais normalmente são empregados túneis de vento que apresentam a parede superior independente das demais, com ângulo de abertura variado através de parafusos reguladores. O artigo de KANKAINEN et al. (1994) reporta a construção de um túnel de vento na Universidade de Waterloo - Canadá com as paredes inferior e superior ajustadas como descrito.

2.5 – Aplicações da Modelagem Física de CLA

As atividades humanas sempre tiveram uma forte influência dos escoamentos atmosféricos, principalmente em atividades voltadas à engenharia e à meteorologia. Contudo, a partir da década de 70 este assunto passou a ser estudado mais detalhadamente devido à emergente preocupação de alguns países industrializados com questões ambientais, principalmente aquelas voltadas ao estudo da dispersão de poluentes na atmosfera.

O trabalho de CERMAK (1975) faz uma breve revisão de diversas aplicações da modelagem física de CLA em túneis de vento na tentativa de, por exemplo, minimizar os danos a propriedades causados por tornados, projetar estruturas para usinas nucleares e estudar o comportamento de poluentes em diversas condições de estabilidade atmosférica. Em seu trabalho, Cermak ainda enfatiza que a simulação de escoamentos atmosféricos em túneis de vento é uma fonte de dados confiável para a engenharia pois, em conjunto com dados medidos na natureza, possibilita uma confirmação continuada da similaridade dos dados obtidos em laboratório com os dados atmosféricos.

Uma outra aplicação para a simulação de CLA em laboratório refere-se ao estudo da otimização aerodinâmica de estruturas submetidas a escoamentos atmosféricos. Em COUNIHAN et al. (1974), uma teoria analítica foi deduzida para a determinação dos perfis de velocidade média atrás de obstáculos bidimensionais, dividindo-se a esteira formada pelo obstáculo em três regiões distintas. Além de prever o comportamento de escoamentos atrás de obstáculos, o trabalho de COUNIHAN et al. (1974) sugere que o déficit de velocidade é afetado pela rugosidade do terreno (definida através do comprimento de rugosidade aerodinâmico, y_o) através de uma função do tipo $\ln(h/y_o)$. Resultados experimentais também sugerem este tipo de comportamento.

3. METODOLOGIA

Este capítulo será dedicado à descrição e à especificação de todos os procedimentos experimentais e teóricos que foram utilizados para o desenvolvimento deste trabalho. Em sua primeira parte, será dado enfoque especial à toda estrutura experimental utilizada e aos componentes desenvolvidos ao longo desta pesquisa. A teoria de aquisição de dados utilizando anemometria de fio-quente também será brevemente discutida. Já em sua parte final, serão apresentadas as relações teóricas que foram empregadas para o tratamento e comparação dos dados experimentais obtidos.

3.1 – Descrição Experimental

O túnel de vento utilizado para os experimentos situa-se *no Laboratório de Mecânica da Turbulência (COPPE/UFRJ)*. É um túnel de circuito aberto (não há recirculação do ar) e de alta intensidade turbulenta (2%). Inicialmente, as dimensões de sua seção de testes eram de 670 mm x 670 mm x 3000 mm, mas com o decorrer dos experimentos foi constatada a necessidade de se aumentar para 5 m o seu comprimento. Os últimos 2 m da parede inferior de sua seção de testes são equipados com chapas de aço inoxidável que podem ser aquecidas variando-se a resistência de dois potenciômetros ligados à rede elétrica local, entretanto este aquecimento não foi utilizado neste trabalho. O ângulo de abertura da parede superior (ou “teto”) do túnel pode ser ajustado através de parafusos tipo borboleta para permitir pequenos ajustes no gradiente longitudinal de pressão do escoamento. Estes parafusos são presos a pequenas cantoneiras de alumínio localizadas nos flanges estruturais do túnel, sendo também responsáveis pela suportação do teto do túnel. O gradiente longitudinal de pressão é medido através de oito pequenos orifícios, igualmente espaçados, localizados no teto do túnel e distribuídos por toda a sua extensão. Para isso, utilizou-se um manômetro multi-tubo Elven com 7° de inclinação e $\pm 0,1$ mm de coluna de álcool. Para que a interferência da rugosidade da madeira do túnel sobre o escoamento fosse eliminada, chapas de vidro foram adicionadas ao longo da superfície interna da parede inferior do túnel. As Figuras (3.1) e (3.2) mostram o túnel, respectivamente, antes e depois da inclusão dos dois metros de seção de testes.



Figura 3.1 – Túnel de Vento da COPPE/UFRJ com seção de testes de 3 metros de comprimento. Em primeiro plano, o compartimento do ventilador.

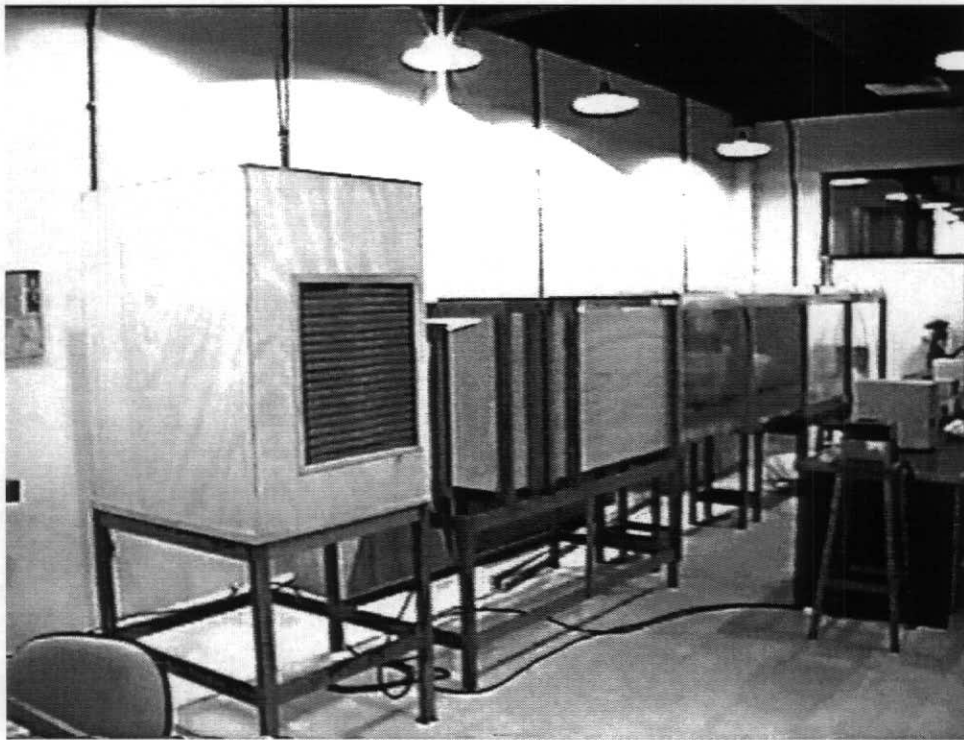


Figura 3.2 – Túnel de Vento da COPPE/UFRJ após a inclusão dos dois metros adicionais. Seção de testes de 5 metros de comprimento.

O ventilador do túnel é equipado com um inversor de frequências SIEMENS *MicroMaster mod.: 6SE3121-0CC40* que elimina os efeitos de oscilação da tensão da rede elétrica sobre a rotação do ventilador. Além disso, este equipamento possibilita um controle refinado da velocidade do fluxo de ar na entrada do túnel já que esta é diretamente proporcional à frequência de rotação do ventilador. As faixas de operação destes equipamentos possibilitam velocidades do escoamento de até 6 m/s. Os experimentos entretanto foram conduzidos utilizando velocidades potenciais de aproximadamente 3 m/s. Deve-se ressaltar ainda que, ao longo dos experimentos, foi detectada uma influência considerável da temperatura ambiente sobre a velocidade do escoamento, levando a pequenas distorções na determinação da velocidade potencial dos escoamentos. A temperatura da sala passou então a ser monitorada para que suas oscilações fossem de ordem igual ou inferior a 1°C.

A técnica de anemometria de fio-quente foi utilizada para a aquisição dos dados de velocidade do escoamento. Esta técnica baseia-se na transferência de calor de um elemento termo-resistivo aquecido (no caso um pequeno fio metálico) com um fluido que escoar ao seu redor. Nesta técnica, dependendo dos parâmetros do escoamento e das propriedades do fluido, pode-se estabelecer uma relação entre a velocidade do fluido e a taxa de transferência de calor do fio. Essa relação conduz a uma lei que rege o comportamento térmico do fio de acordo com a velocidade do escoamento e foi primeiramente demonstrada para um fio cilíndrico infinitamente longo por KING (1914) através da seguinte relação entre o *Número de Nusselt* e o *Número de Reynolds*

$$Nu = A + BRe^{1/2} \quad (3.1)$$

onde A e B são constantes empíricas de calibração. Posteriormente, KRAMERS (1946) analisou dados experimentais para fios imersos em escoamentos de ar, água e óleo e definiu uma lei que cobre uma grande faixa de *Números de Reynolds* e de *Prandtl*: $0,1 < Re < 10000$ e $0,71 < Pr < 1000$

$$Nu = 0,42Pr^{0,2} + 0,57Pr^{0,33} Re^{0,5} \quad (3.2)$$

Substituindo-se a Equação (3.2) na equação de balanço térmico para uma porção de fio pode-se deduzir a seguinte expressão (maiores detalhes são encontrados em

BRUNN (1995) e MENUT (1998))

$$E^2 = A + BU^{0,5} \quad (3.3)$$

onde E é a tensão de saída do anemômetro. Como as perdas por condução de calor nas extremidades do sensor devem ser levadas em consideração pois o fio apresenta um comprimento finito, é utilizado um coeficiente n na Equação (3.3). A equação resultante é conhecida como a *Lei de King*

$$E^2 = A + BU^n \quad (3.4)$$

Existem dois modos básicos de funcionamento de um anemômetro: o modo CC (corrente constante) e o modo TC (temperatura constante). A diferença básica entre estes modos consiste no circuito eletrônico empregado. De um modo geral, os anemômetros CC são mais recomendados para medições de temperatura pois a resposta térmica do fio neste modo geralmente é grande quando comparada com o tempo característico de escoamentos turbulentos. Em ambos os modos, o fio é parte de um circuito elétrico auto-compensador e funciona como uma das resistências elétricas de uma ponte de Wheatstone. Entretanto, no modo TC qualquer mudança nas condições do escoamento é automaticamente percebida pelo circuito como uma tensão de desequilíbrio, sendo compensada por um amplificador na saída do circuito integrado. Assim, a inércia térmica do fio é automaticamente ajustada se as condições do escoamento variam, tornando esta a principal vantagem deste modo de funcionamento em relação ao modo CC.

Para que o anemômetro de fio-quente seja altamente sensível a variações de velocidade e pouco sensível a variações de temperatura, recomenda-se que a temperatura de operação do fio seja muito maior que a temperatura do escoamento (MENUT, 1998). Para isso, um coeficiente de superaquecimento entre 0,8 e 1 deve ser selecionado regulando-se uma das resistências do circuito, lembrando-se contudo, que a temperatura de oxidação do fio não deve ser alcançada. Após a análise das resistências envolvidas (cabos e agulhas do fio), foi adotado um coeficiente de superaquecimento de 0,8 ao longo dos experimentos.

A teoria desenvolvida por KING (1914) adotou em sua lei original $n = 0,5$.

Entretanto, COLLIS e WILLIAMS (1959) mostraram que para $n = 0,45$ a Equação (3.4) apresenta melhores resultados para uma faixa bastante ampla de *Números de Reynolds* ($0,02 < Re < 44$), o que representa, para um fio de 5 μm de diâmetro no ar (como o fio DISA 55P11 utilizado), uma faixa de velocidades desde 6 cm/s até 132 m/s. De qualquer forma, a solução mais precisa ainda consiste na otimização de n durante a calibração; todavia, deve-se avaliar a viabilidade dessa solução. O programa empregado para a aquisição dos dados adota $n = 0,45$ em sua subrotina de calibração.

Outras leis de calibração também já foram experimentadas. Os desvios padrão encontrados nestes métodos, entretanto, mostraram que as leis deduzidas da *Lei de King* ainda oferecem melhores precisões (entre 0,1% e 0,15%) conforme relata o artigo de BRUNN et al. (1988) para uma faixa de velocidades entre 5 m/s e 50 m/s.

As constantes A e B da *Lei de King* foram determinadas através de um procedimento de calibração do anemômetro de fio-quente. Sua curva de calibração foi obtida através da medição de uma velocidade de referência (U_r) e da respectiva tensão fornecida pelo anemômetro (E_r). Procurou-se então uma tensão calculada $E_c = F(U_r)$ que melhor ajustasse a função F aos pares de pontos (U_r, E_r).

Para cada par ordenado (U_r, E_r), as constantes de calibração foram ajustadas através do *Método de Mínimos Quadrados* procurando-se minimizar o desvio padrão normalizado através da relação

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{U_r}{U_c} \right)^2} \quad (3.5)$$

onde N denota a dimensão (ou o número de pontos) da amostra de calibração e $U_c = F^{-1}(E_r)$. A calibração de todos os experimentos apresentados neste trabalho foi conduzida variando-se, para cada ponto da amostra, a velocidade do escoamento. Foram considerados $N = 16$ pontos para cada calibração e a faixa de velocidades utilizada neste processo foi de 1,5 m/s a 4 m/s, aproximadamente (lembrando-se que a velocidade utilizada nos experimentos foi $\cong 3$ m/s).

Nos experimentos aqui analisados, a velocidade de referência (U_r) foi obtida através de um instrumento de medição absoluto, um tubo de Pitot, imerso ao escoamento e alinhado com a direção longitudinal do túnel. Cuidados foram tomados para que as esteiras formadas pelo tubo de Pitot não interferissem na aquisição da tensão

de referência (E_r) coletada do sensor. Além disso, tanto o fio-quente quanto o tubo de Pitot foram posicionados numa região do escoamento de baixa intensidade turbulenta e fora da camada limite (no escoamento potencial) durante o procedimento de calibração. O tubo de Pitot se conectava a um transdutor de pressão (*COLE-PARMER*). O *COLE-PARMER* é responsável pela conversão da pressão manométrica adquirida pelo tubo de Pitot em um sinal proporcional de tensão. Após a conversão, o sinal de tensão era lido num multímetro digital convencional. A principal vantagem deste método de leitura da velocidade de referência refere-se à sua boa precisão quando comparado com outros métodos convencionais que utilizam manômetros manuais ou multi-tubos. Para evitar que os erros provenientes da calibração do *COLE-PARMER* mascarassem o valor das velocidades lidas pelo tubo de Pitot, uma tensão inicial E_0 era inserida como um dado de entrada do programa. Essa tensão era lida enquanto o túnel estava desligado.

A tensão de referência (E_r) era lida diretamente do anemômetro numa placa de aquisição de dados de 12 bits DATA TRANSLATION *mod.: DT2812* e processada num programa de aquisição de dados (*HOT2812*) desenvolvido no próprio laboratório (cujo código foi implementado em *QBASIC*). A placa de aquisição utilizada opera numa faixa de 0 – 10 V e o número máximo de amostras suportado pela placa é em torno de 27000 amostras, ou seja, para cada ponto amostral coletado, o programa gera um vetor de no máximo 27000 posições e retorna valores de A e B que minimizam o seu desvio padrão.

O sensor de fio-quente utilizado foi do tipo *DISA mod.: 55P11*, com apenas um fio reto comum, preso às extremidades de duas agulhas delgadas que se incorporam a estrutura isolante do corpo do sensor. O sensor se fixava a um suporte através de uma conexão do tipo macho/fêmea na extremidade oposta ao fio. A Figura (3.3) ilustra o sensor utilizado nos experimentos.

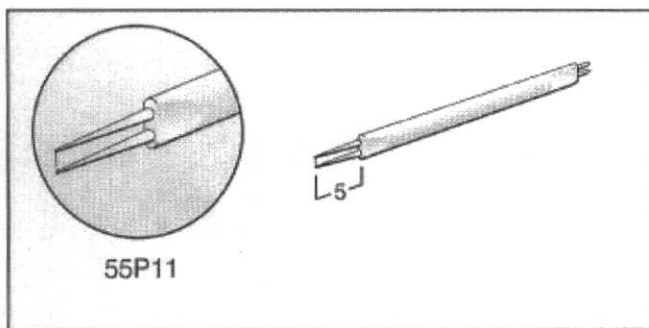
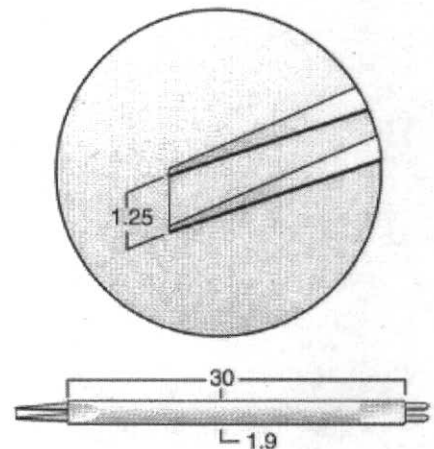


Figura 3.3 – Detalhes do sensor DISA 55P11.
Todas as dimensões em milímetros.



Após o procedimento diário de calibração, o sensor era deslocado verticalmente até tocar o vidro sobre a superfície inferior do túnel através de um *posicionador 2-D digital* desenvolvido no próprio laboratório. Este posicionador era controlado através de um programa de controle (elaborado em *Delphi*) que se comunicava com uma fonte de tensão CC por meio de uma porta serial. Essa fonte enviava o sinal de tensão ao motor do posicionador que por sua vez deslocava verticalmente o carrinho no qual se fixava a haste do sensor. O carrinho deslizava sobre duas guias verticais presas a uma estrutura fixa e era acionado através de um fuso acoplado ao motor conforme ilustra a Figura (3.4). O seu deslocamento era determinado diretamente pelo programa através da rotação do motor e do passo do fuso.

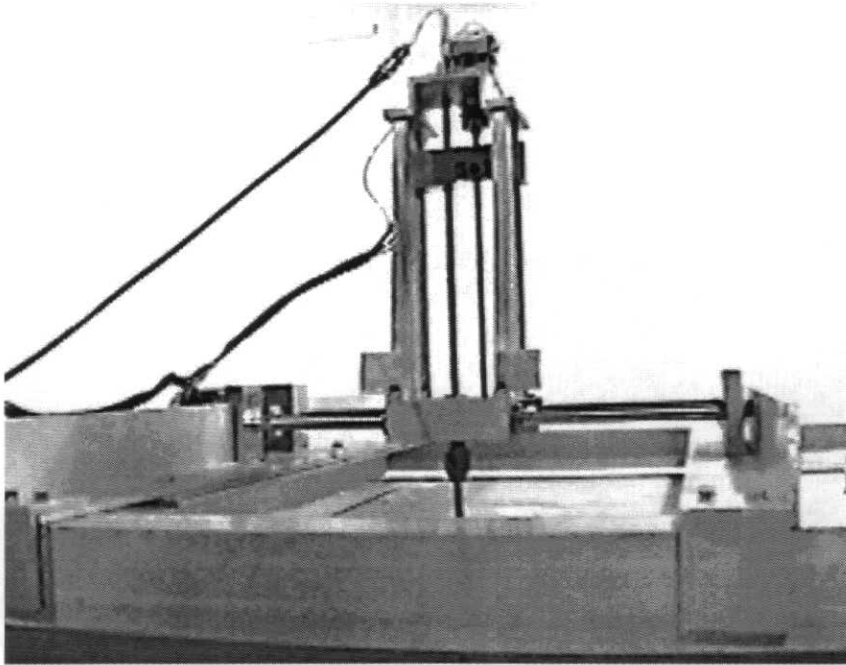


Figura 3.4 – Posicionador 2-D digital utilizado nos experimentos.

A precisão no deslocamento do sensor é da ordem de 0,1 mm e o seu curso máximo vertical é de 180 mm. Como os experimentos demandavam deslocamentos verticais maiores que o seu curso máximo, houve a necessidade de se desenvolver um mecanismo que fosse capaz de manter fixa a posição da haste do sensor em relação ao escoamento enquanto o carrinho se deslocava para atender a uma nova demanda de curso. Uma primeira tentativa de solucionar este problema foi feita adicionando-se um parafuso tipo Allen à base estrutural do posicionador. Com isso, ao atingir o final de seu curso, a haste do sensor era presa à base fixa do posicionador através deste parafuso e somente o carrinho descia para efetuar um novo deslocamento. Após este processo, a haste era novamente presa ao carrinho e liberava-se o parafuso que a fixava à base.

Posteriormente, verificou-se que esta solução permitia pequenas rotações da haste, o que comprometia o valor das medidas. Pensando em eliminar este efeito, uma segunda solução foi elaborada projetando-se uma peça usinada que tivesse a mesma função do parafuso acima descrito. A peça consistia de uma bucha de latão montada (com interferência) sobre a base do posicionador e pela qual passava a haste do sensor. A parte final da bucha era rosqueada. Rasgos longitudinais diametralmente opostos foram abertos nessa área rosqueada para que esta parte da peça servisse como uma espécie de pinça e assim, quando comprimida radialmente, bloqueasse a haste do sensor e impedisse o seu movimento. A compressão era feita por uma outra peça de latão independente que apresentava rosqueado interno cônico em um processo de fixação idêntico ao utilizado em mandris de furadeiras. Como o esforço de compressão da haste passou a ser uniformemente distribuído na direção radial, o efeito de rotação da haste durante sua compressão foi eliminado. O Anexo B deste trabalho traz os desenhos técnicos destas peças.

O distanciamento vertical (ou grid) entre dois pontos quaisquer de tomada de medidas foi refinado ao longo dos experimentos para que a quantidade de informações relevantes fosse otimizada. A tabela abaixo ilustra um grid padronizado neste trabalho para camadas limite de até 130 mm de espessura. O primeiro ponto do grid ($y=2,2$ mm) representa a altura vertical mínima do fio imposta pela geometria do sensor empregado.

y [mm]	U [m/s]	u' [m/s]	y [mm]	U [m/s]	u' [m/s]	y [mm]	U [m/s]	u' [m/s]
2,2			12			60		
2,5			14			65		
3,0			16			70		
3,5			18			75		
4,0			20			80		
4,5			25			85		
5			30			90		
6			35			95		
7			40			100		
8			45			110		
9			50			120		
10			55			130		

Tabela 3.1 – Exemplo de um grid de 130 mm utilizado nos experimentos.

Um segundo multímetro digital foi empregado na leitura da tensão de saída do anemômetro (proporcional à velocidade do escoamento). Por fim, um osciloscópio apresentava em tempo real o comportamento da turbulência na região do escoamento onde o fio estava imerso.

Para cada configuração testada levantou-se primeiramente um único perfil de velocidades que era analisado graficamente e comparado com um perfil logarítmico típico de camada limite. Outros perfis eram adquiridos somente para as configurações que apresentavam resultados satisfatórios, deslocando-se a estação de aquisição dos dados na direção longitudinal do túnel. Ao todo, para cada uma destas configurações eram levantados quatro perfis em quatro estações igualmente distanciadas de 100 mm. Tomando-se como origem ($x = 0$) o início da seção de testes do túnel, a tabela a seguir reporta a localização longitudinal das estações de tomada de medidas onde ocorreram os experimentos.

<i>ESTAÇÕES</i>	<i>GEOMETRIA INICIAL DA SEÇÃO DE TESTES (3m)</i>	<i>GEOMETRIA FINAL DA SEÇÃO DE TESTES (5m)</i>
<i>ESTAÇÃO 1</i>	$x = 2100 \text{ mm}$	$x = 4100 \text{ mm}$
<i>ESTAÇÃO 2</i>	$x = 2200 \text{ mm}$	$x = 4200 \text{ mm}$
<i>ESTAÇÃO 3</i>	$x = 2300 \text{ mm}$	$x = 4300 \text{ mm}$
<i>ESTAÇÃO 4</i>	$x = 2400 \text{ mm}$	$x = 4400 \text{ mm}$

Tabela 3.2 – Disposição longitudinal das estações de tomada de medidas antes e depois da inclusão dos 2 metros adicionais da seção de testes do túnel.

3.2 – Aparatos de Engrossamento da CLT

Conforme foi apresentado no Capítulo 1, alguns aparatos de engrossamento artificial da CLT foram utilizados neste trabalho até que uma configuração final fosse alcançada. Esta seção apresentará detalhadamente estes dispositivos e descreverá os procedimentos de sua fabricação (quando for o caso).

3.2.1 – Telas

O primeiro método de engrossamento empregado baseou-se numa tela de 30 cm de altura localizada na entrada da seção de testes do túnel. Essa tela era formada de arames de aço de 1/8" de espessura, entrelaçados, formando malhas quadradas de 3/8".

Para fixar a tela no interior do túnel foram confeccionados quatro suportes de madeira transversais em forma de cunha, aparafusados nas paredes laterais do túnel. A interferência dos suportes sobre o escoamento era desprezível já que as camadas limite formadas nas paredes laterais do túnel eram pequenas e o sensor se localizava na linha de centro do túnel, ou seja, o afastamento transversal entre os suportes e o sensor era da ordem de 300 cm. A Figura (3.5) mostra a tela vista de dentro do túnel.

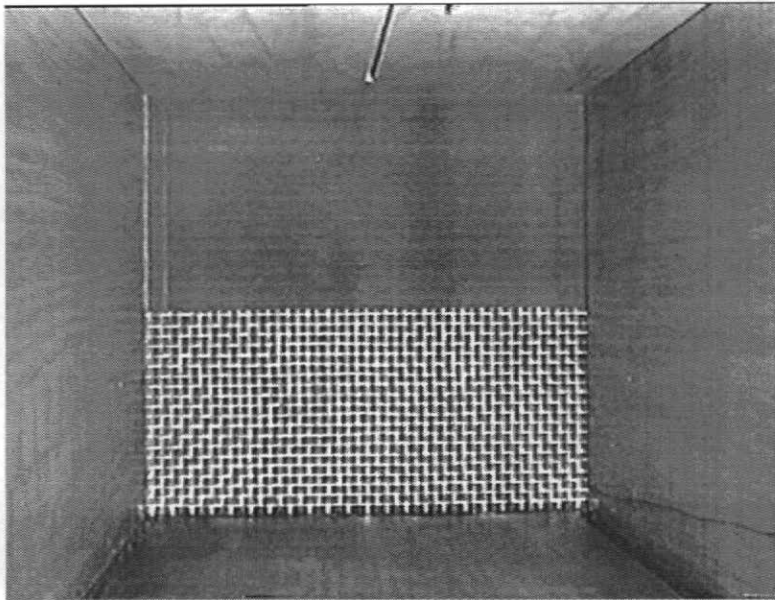


Figura 3.5 – Vista interna ao túnel da tela de 30 cm utilizada nos experimentos.

Uma barra circular de latão de 1/8'' de espessura, transversal ao escoamento, foi posicionada na parede inferior do túnel funcionando como um arame da tela próximo à superfície da camada limite. A utilização desta barra é relevante já que as características do escoamento resultante são fortemente influenciadas por variações das propriedades na região interna da CLT, conforme é relatado no Capítulo 2.

Barras de alumínio de seções retangulares de 5 mm x 15 mm (strips), transversais ao escoamento, foram empregadas em diversos arranjos geométricos para promover um controle do atrito local na parede. Estas eram posicionadas sobre o vidro a montante (leading strip) e/ou a jusante (trailing strip) da tela. Para os arranjos que empregavam leading strips, apenas uma barra localizada 80 mm a montante da tela (leading strip) era utilizada. Já para os arranjos que empregavam trailing strips, cada barra era posicionada 80 mm a jusante do obstáculo imediatamente anterior (tela ou strip).

Uma segunda tentativa foi feita com este método de engrossamento utilizando-se duas telas, idênticas à da Figura (3.5), superpostas e defasadas entre si de meia malha

horizontal. Com isso a malha efetiva do conjunto foi reduzida à metade, passando para 3/8" x 3/16".

Como poderá ser observado no Capítulo 4, alguns perfis extraídos com este método de engrossamento foram analisados mas seus resultados não foram proveitosos. Assim sendo, este método de engrossamento foi abandonado, partindo-se então para uma outra tentativa com um novo aparato.

3.2.2 – Geradores de Vórtices Elípticos

O outro método escolhido baseou-se num método de engrossamento sugerido por COUNIHAN (1969) e consistia em utilizar geradores de vórtices elípticos para promover o engrossamento da camada limite. Inicialmente, este método tinha como objetivo gerar camadas limite de até 20 cm de espessura e, se os resultados com estes dispositivos fossem satisfatórios, passaria-se então para geradores de vórtices maiores, que gerassem camadas limite da ordem de 50 cm.

A exemplo do que foi feito com as telas, diferentes combinações de barras retangulares foram testadas para que o perfil alcançado apresentasse características semelhantes a um perfil de camada limite espessa.

Os geradores foram concebidos através de um molde de silicone industrial obtido mediante um modelo estrutural de alumínio e poliuretano. O modelo foi confeccionado soldando-se chapas 18 de alumínio (1,24 mm de espessura) com solda TIG. Com isso, a estrutura de alumínio do modelo foi preenchida com poliuretano e lixada até ganhar a forma desejada. Após este processo, uma fina camada de massa plástica à base de resina de poliéster (a mesma utilizada no reparo de carrocerias de automóveis) garantiu a forma elíptica requerida. Por fim, foi aplicada uma camada de massa rápida automotiva para que sua rugosidade não interferisse na forma final do gerador. Lixas d'água finalizaram o acabamento do modelo.

Com o modelo já construído, uma caixa de madeira bipartida com fundo falso e argila para modelar serviram de base para que o silicone industrial fosse vazado. Numa primeira etapa, uma das metades da caixa foi preenchida com argila e o modelo foi depositado. A outra metade da caixa foi então montada sobre a primeira e o silicone líquido foi despejado. Um canal de alimentação e um canal de respiro foram previstos nesta etapa. Com a primeira metade do molde já pronta, a segunda etapa do processo consistiu em virar a caixa e retirar toda a argila da primeira metade. Seguiu-se então o preenchimento da segunda parte do molde com o silicone líquido repetindo-se o mesmo

processo. Pinos tipo macho/fêmea também foram previstos para garantir o alinhamento das duas metades do molde após sua confecção.

Os geradores propriamente ditos foram construídos a partir deste molde, injetando-se uma mistura proporcional de resina incolor, talco industrial e solvente (monômero de estireno) no interior do molde já fechado, num processo similar ao processo de fundição. O tempo de cura (ou secagem) variava de 3 a 4 horas por peça. Após este processo, os geradores ainda passavam por algumas etapas de lixamento, partindo-se das lixas mais grossas até as mais finas.

Os geradores eram quartos de elipses cujo eixo maior (altura do gerador) era o dobro do eixo menor. Tinham 20 cm de altura e semi-ângulos de cunha de $5,7^\circ$. Ao todo, sete geradores foram construídos. No começo, quatro geradores eram alinhados transversalmente ao escoamento a uma distância de 150 mm da entrada da seção de testes do túnel ($x=150$ mm). Observou-se que este arranjo geométrico não proporcionava o engrossamento esperado uma vez que as esteiras provenientes de dois geradores adjacentes não convergiam a jusante do aparato de engrossamento devido ao excessivo distanciamento de 134 mm entre eles. Considerou-se então a possibilidade de se reduzir o espaçamento transversal entre eles aumentando-se o número de geradores utilizados. Assim, os experimentos passaram a ser efetuados com sete geradores espaçados entre si de 67 mm. Tal configuração é apresentada na Figura (3.6) abaixo.

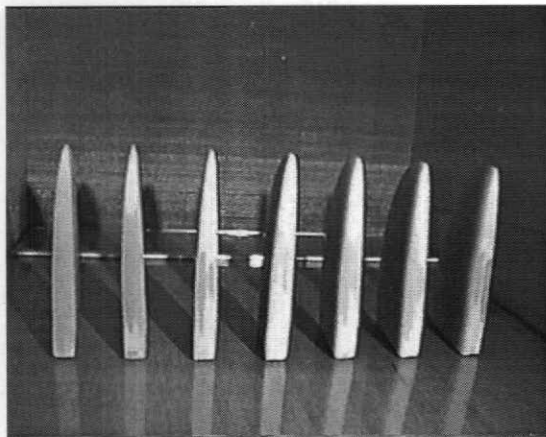


Figura 3.6 – Geradores de vórtices posicionados na entrada da seção de testes do túnel. Ao fundo, 1 leading strip.

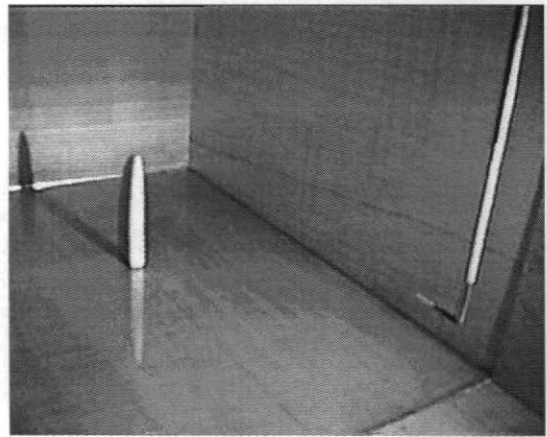


Figura 3.7 – Gerador de vórtices posicionado sobre a linha de centro do túnel. Em primeiro plano, sensor e haste.

Os arranjos geométricos das barras retangulares (strips) foram similares aos utilizados com as telas à exceção do distanciamento entre a leading strip e o aparato de engrossamento que, no caso dos geradores de vórtices, passou a ser de 220 mm.

Como foi ressaltado anteriormente, este método de engrossamento baseou-se num método desenvolvido por COUNIHAN (1969). Contudo, algumas modificações foram implementadas por conveniência neste trabalho. A barra retangular a montante do aparato (leading strip) utilizada nos nossos experimentos foi adaptada de uma barra retangular castelizada desenvolvida por Counihan. Além disso, a distância na qual ocorreram as medições foi três vezes e meia maior que a distância sugerida por Counihan em seus experimentos. Infelizmente, estas modificações conduziram a resultados que pouco lembravam um perfil de camada limite turbulento. A adaptação da barra castelizada de Counihan decorreu de uma simplificação construtiva do aparato e a estação de medidas distante foi conseqüência de uma falsa expectativa de que quanto maior fosse a distância longitudinal de acomodação do escoamento melhor seria o perfil gerado. Posteriormente, os resultados dos experimentos não verificaram estas hipóteses.

Apesar dos maus resultados obtidos com este método de engrossamento, um estudo mais detalhado foi feito na tentativa de se compreender melhor o efeito da hipótese de bidimensionalidade na turbulência do escoamento. Para isso, um único gerador foi posicionado de tal forma que, sua linha de centro coincidissem com a linha de centro do túnel e conseqüentemente com a linha de centro do sensor, conforme é mostrado na Figura (3.7). A estação de medidas foi fixada 600 mm a jusante da face anterior do gerador e assim um perfil foi tomado. Deslocou-se então o gerador 25 mm na direção transversal e um novo perfil foi tomado. Novamente, o gerador foi deslocado 25 mm transversalmente e um novo perfil da turbulência do escoamento foi adquirido. Este processo foi repetido até que a distância entre a linha de centro do gerador e a linha de centro do sensor fosse de 100 mm. No total, cinco perfis foram levantados para esta análise. Os dados desses experimentos foram tratados no *Mathematica 3.0* onde uma função de interpolação *Spline* cúbica foi gerada para a apresentação dos resultados em forma de curvas de nível de intensidade turbulenta constante (Figura (3.8)).

A otimização do distanciamento transversal entre dois geradores adjacentes também foi estudada com este método de engrossamento. Mediante o estudo de dois geradores, igualmente espaçados da linha de centro do sensor, foram levantados outros cinco perfis variando-se o distanciamento transversal entre eles respectivamente de 90 mm, 100 mm, 110 mm, 120 mm e 130 mm. O procedimento de aquisição foi idêntico ao descrito anteriormente. A estação de tomada de medidas foi mantida 600 mm a jusante das faces anteriores dos geradores e o método de interpolação baseou-se numa função *Spline* tipo *Bezier* para apresentar os resultados conforme é apresentado na Figura (3.9).

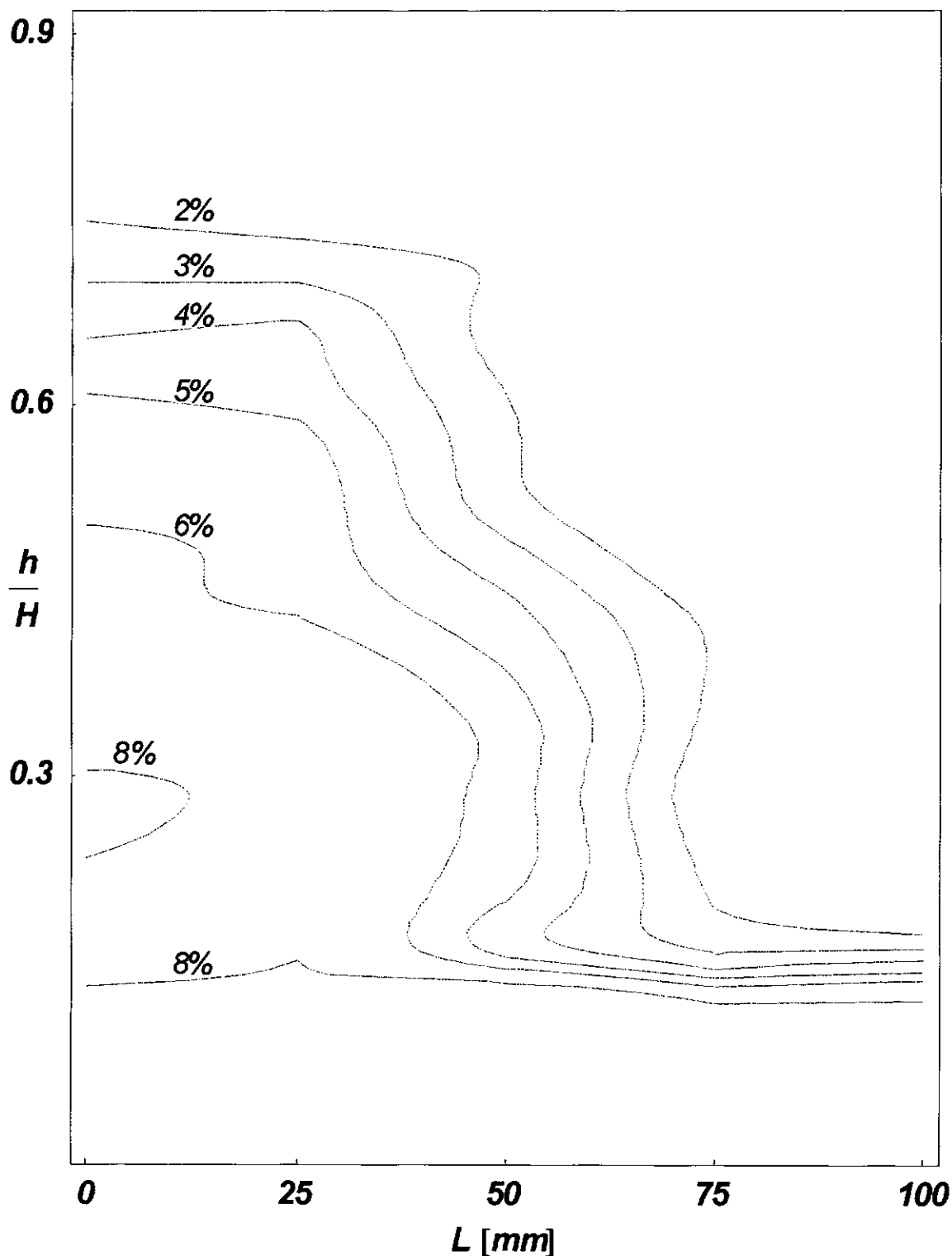
Contornos de $IT(\%)$ Longitudinal Constante

Figura 3.8 – Linhas de intensidade turbulenta longitudinal (IT) constante em função da altura normalizada do sensor (h/H) e do distanciamento transversal (L) entre a linha de centro do gerador e a linha de centro do sensor. H denota a altura do gerador (no caso dos geradores empregados nos experimentos $H = 200$ mm).

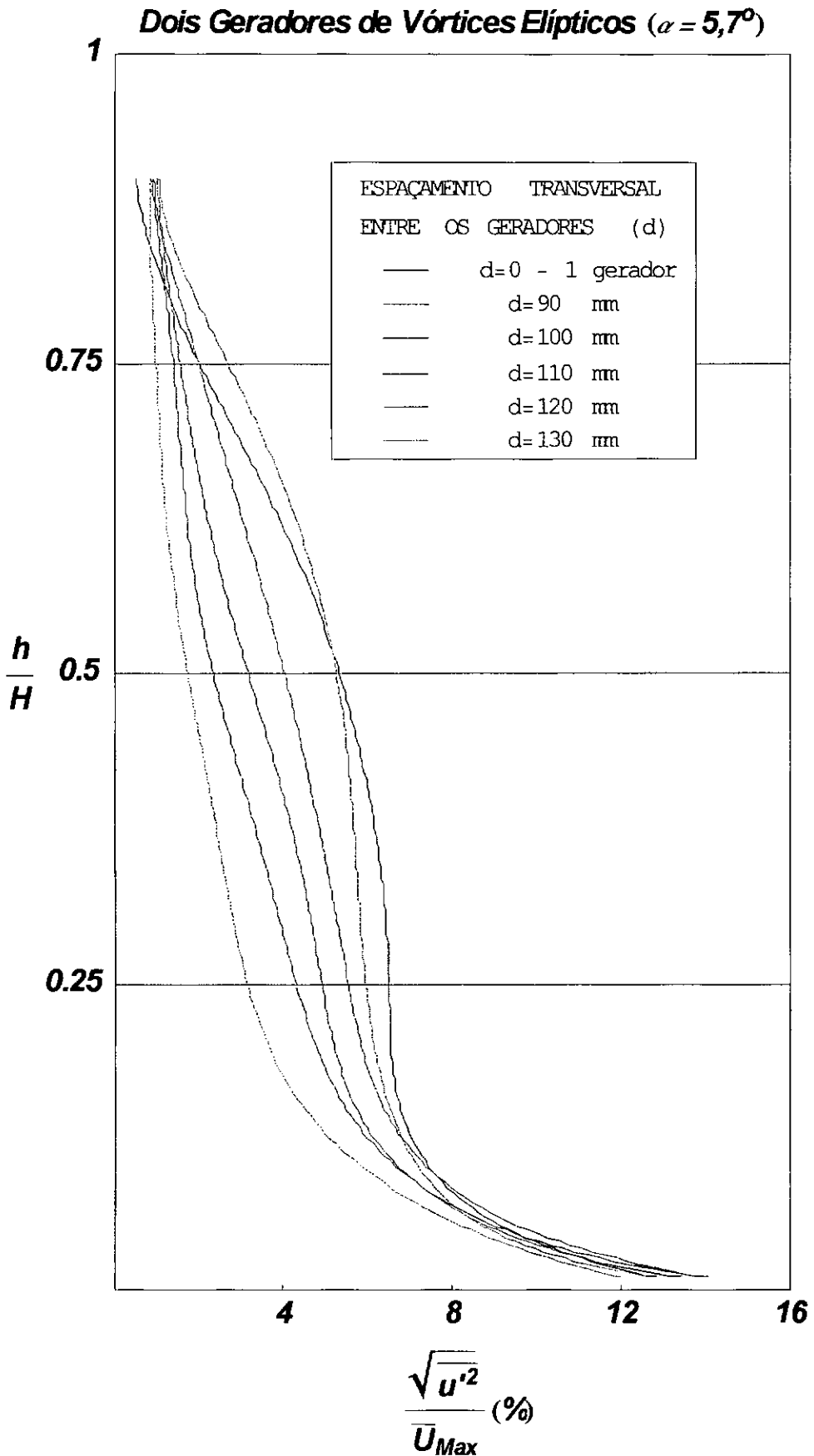


Figura 3.9 – Efeito da variação do espaçamento transversal (d) entre dois geradores adjacentes sobre o perfil da turbulência do escoamento.

Como pode ser observado na Figura (3.8), a turbulência longitudinal provocada pelos geradores de vórtices elípticos atinge valores mais altos nas regiões mais próximas ao gerador, ou seja, quando L é pequeno, como era esperado. Além disso, a geometria elíptica do gerador faz com que haja uma perda maior de quantidade de movimento do fluido à medida em que o sensor se aproxima da superfície inferior do túnel, aumentando assim a turbulência do escoamento nesta região.

A característica mais relevante deste tipo de aparato de engrossamento refere-se à manutenção de valores constantes de intensidade turbulenta para uma faixa considerável de espaçamentos transversais ($0 < L < 32 \text{ mm}$) ou ($0 < L < 4/25 H$). Segundo COUNIHAN (1969) este comportamento é diretamente influenciado pelo semi-ângulo de cunha do gerador (em seu trabalho geradores elípticos com semi-ângulos de cunha de 5° e 6° foram testados). Para $L > 75 \text{ mm}$ (ou $L > 3/8 H$), o decaimento da intensidade turbulenta longitudinal é praticamente todo atingido, com valores da ordem de 1% para $h/H > 0,3$. A Figura (3.8) está de acordo, pelo menos qualitativamente, com os resultados obtidos por Counihan para um gerador de vórtices elíptico com semi-ângulo de cunha de 6° .

O efeito do espaçamento entre dois geradores adjacentes (d) sobre a turbulência do escoamento é observado na Figura (3.9). A curva em preto representa o perfil da turbulência longitudinal de um único gerador ($d = 0$) numa estação de tomada de medidas localizada 600 mm a jusante da face anterior do gerador (ou seja, a uma distância de $3H$ do gerador) e sobre a sua linha de centro. Note que a curva em azul claro ($d = 90 \text{ mm}$) é a que mais se aproxima ao comportamento de decaimento da curva para $d = 0$. Como era de se esperar, conforme d aumenta, os valores da turbulência longitudinal para uma mesma altura h/H decrescem. Da mesma forma, a turbulência em cada curva apresentada diminui com um aumento de h/H .

Como L representa uma distância transversal entre as linhas de centro do sensor e de um único gerador e d representa o espaçamento entre linhas de centro de dois geradores, é uma boa aproximação supor $d \cong 2L$. Assim, através de uma prévia avaliação de L na Figura (3.8), podemos encontrar um espaçamento ideal entre dois geradores adjacentes tal que, a partir de uma determinada distância a jusante do aparato, a combinação de suas esteiras produza uma variação transversal pequena nas características turbulentas do escoamento. Com base na análise destas figuras e na geometria da seção de testes disponível para os experimentos, este trabalho optou por utilizar sete geradores elípticos para promover o engrossamento esperado ($d = 67 \text{ mm}$).

Mesmo com especial atenção na determinação de um espaçamento ótimo entre os geradores, os perfis de velocidade média resultantes não apresentaram sequer um comportamento que se assemelhasse a um perfil típico de camada limite, conforme foi relatado anteriormente. Entretanto, os bons resultados obtidos com este método de engrossamento por COUNIHAN (1969) e a confirmação de alguns destes resultados ao longo deste trabalho sugerem que uma investigação muito mais detalhada deva ser feita futuramente para que este tipo de aparato forneça resultados mais promissores.

3.2.3 – Florestas de Barras Cilíndricas

O último aparato de engrossamento testado neste trabalho utilizou barras de latão de seção circular com $\phi = 1/8''$. As barras eram colocadas na entrada da seção de testes do túnel formando um conjunto (floresta) que se estendia por toda a sua largura, transversalmente ao escoamento.

Conforme mencionado anteriormente, este método de engrossamento foi desenvolvido primeiramente em GUIMARÃES et al. (1999) que, por sua vez, se baseou no prévio sucesso obtido por LIGRANI e MOFFAT (1979) ao simular uma CLA utilizando geradores de vórtices coneidais. A simplificação construtiva de se utilizar geradores de vórtices de seção constante (no caso barras circulares) é a principal vantagem deste método quando comparado com outros métodos de simulação de camadas limite espessas. Em contrapartida, uma atenção especial deve ser tomada no controle dos níveis de intensidade turbulenta quando se utiliza geradores de vórtices de seção constante (barras circulares, por exemplo), pois este tipo de gerador propicia perdas excessivas de quantidade de movimento nas regiões externas da CLT quando camadas limite muito espessas são geradas.

A limitação imposta por este compromisso *qualidade x espessura* da CLT foi estendida neste trabalho por meio de um estudo sistemático de diversos parâmetros e configurações geométricas. A exemplo do que foi feito nos demais métodos testados neste trabalho, vários arranjos de barras de alumínio de seções retangulares (strips) foram combinados com a floresta de barras circulares. Barras circulares de 80 mm e de 160 mm de altura foram experimentadas. As barras foram concebidas serrando-se varas de latão de 1/8'' de diâmetro e 3 metros de comprimento de forma a permitir pequenos excessos em seus comprimentos finais. O excesso de material das barras foi esmerilhado até que todas apresentassem rigorosamente o mesmo comprimento. Ao todo, foram feitas 66 barras de 80 mm e 95 barras de 160 mm.

As barras circulares de 80 mm foram fixadas na superfície de vidro da seção de testes do túnel através de um adesivo plástico (*SuperBonder*) e a posição de cada barra sobre o vidro foi determinada com o auxílio de um pincel atômico. O espaçamento transversal entre linhas de centro de duas barras adjacentes foi de 10 mm. Quando utilizadas, as barras retangulares de alumínio (strips) eram posicionadas 50 mm a montante (leading strip) ou a jusante (trailing strip) da floresta ou da strip subjacente (no caso de trailing strips). A Figura (3.10) ilustra a floresta de barras circulares com 80 mm de altura e uma leading strip utilizada nos experimentos.

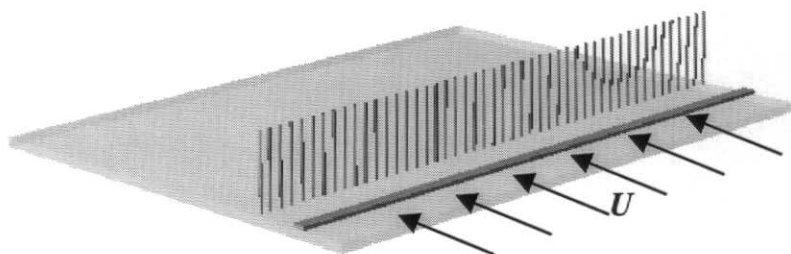


Figura 3.10 – Floresta de barras circulares de 80 mm e 1 leading strip.

Já as barras de 160 mm foram fixadas no vidro do túnel através de suportes de madeira em forma de cunha, transversais ao escoamento. Os suportes, por sua vez, eram colados ao vidro com fita adesiva dupla face. A presença destes acessórios foi relevante no comportamento do escoamento resultante apesar de sua forma delgada. Seguindo o procedimento descrito para a floresta de 80 mm, o espaçamento inicial entre linhas de centro de duas barras adjacentes foi de 10 mm, porém com o decorrer dos experimentos este espaçamento foi reduzido para 7 mm. Alguns arranjos desta configuração empregaram uma barra circular de latão colocada horizontalmente no topo da floresta, transversal ao escoamento. Um exemplo desta configuração é ilustrado na Figura (3.11).

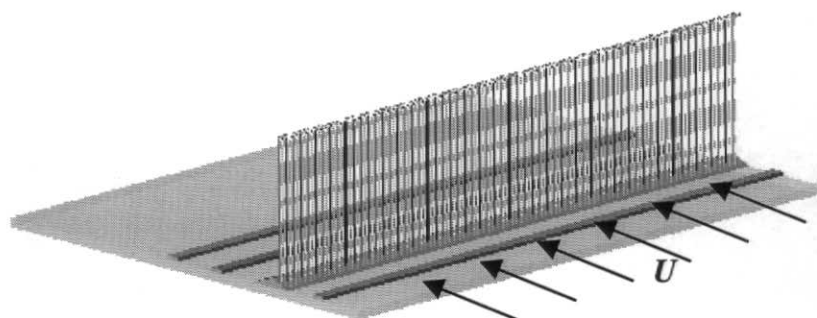


Figura 3.11 – Floresta de barras circulares de 160 mm, 1 leading strip e 2 trailing strips. No topo, uma barra circular transversal ao escoamento.

Em ambas as figuras, a floresta foi posicionada à uma distância de 150 mm da entrada da seção de testes do túnel. Para a fixação da barra circular no topo da floresta foram abertos dois furos nas paredes laterais do túnel. Em alguns arranjos com a floresta de 160 mm, uma outra barra circular de 670 mm de comprimento, idêntica à da Figura (3.10), também foi posicionada horizontalmente à 80 mm de altura (no meio da floresta). A posição de cada strip na floresta de 160 mm foi determinada através dos mesmos parâmetros de distanciamento testados na floresta de 80 mm.

3.3 – Visualização do Escoamento

A visualização do escoamento foi feita somente para a configuração que empregava a floresta de barras circulares de 160 mm. Para tal, foi introduzido no escoamento um fluido que permitia contraste entre região das esteiras do aparato e o escoamento potencial. O fluido utilizado foi vapor de glicerina. A glicerina à temperatura ambiente e pressão atmosférica é líquida, e por isso, foi necessário seu aquecimento.

Um mecanismo de aquecimento denominado *gerador de fumaça* era responsável pela evaporação da glicerina. O gerador de fumaça compreendia duas serpentinas de cobre com $\phi = 3/16''$, concêntricas, perpassadas por uma resistência elétrica e confinadas numa carcaça de aço selada e isolada termicamente com lã de vidro em sua parte interna. A glicerina era forçada a passar pela serpentina interna através de uma pressurização de seu reservatório com ar comprimido, sendo assim aquecida e evaporada pela resistência elétrica. A parte superior da carcaça do gerador recebia o vapor de glicerina oriundo da serpentina interna e o ar comprimido proveniente da serpentina externa. O fluido resultante era injetado no escoamento mediante um fino tubo de aço inserido num rasgo longitudinal de instrumentação no teto do túnel.

A aquisição das imagens era feita utilizando-se uma câmera de vídeo digital conectada a um microcomputador. O contraste do vapor de glicerina no escoamento só era observado quando uma fonte de luz colimada (um projetor de slides) projetava a imagem da fumaça num fundo opaco preto e a luz ambiente era eliminada.

A proposta inicial da visualização do escoamento neste trabalho residia numa constatação ótica do fenômeno induzido de engrossamento da CLT. Entretanto, a falta de um prévio desenvolvimento experimental desta técnica fez com que este trabalho se

detesse apenas à observação da estrutura formada pela junção das esteiras das barras circulares e pela camada limite naturalmente desenvolvida já existente, na região imediatamente após o aparato de engrossamento. Além disso, como o vapor de glicerina foi injetado numa única altura do túnel, a visualização completa do escoamento numa dada estação ficou comprometida (apesar da tentativa de se variar a altura de injeção da glicerina durante a visualização).

3.4 – Condições de Equilíbrio da Camada Limite

Esta seção faz uma breve abordagem teórica dos parâmetros considerados neste trabalho para que haja similaridade das condições de contorno entre as camadas limite geradas e a CLA neutra, conforme detalhado no Capítulo 2. Ao final, alguns resultados experimentais concernentes a estes parâmetros já serão adiantados para as configurações que propiciaram os melhores perfis.

Ao tentar estender o conceito de similaridade externa para CLT sujeitas a gradientes adversos de pressão, CLAUSER (1954) obteve um esplendoroso sucesso experimental, conseguindo criar em seu trabalho camadas limite com gradientes adversos de pressão que apresentavam similaridade em sua região externa exatamente como no caso de CLT sem gradientes de pressão. Assim sendo, Clauser denominou toda a camada limite que apresenta similaridade em sua região externa como “camada limite em equilíbrio” e introduziu um parâmetro de caracterização de equilíbrio definido por

$$\Delta = \int_0^{\infty} \frac{U_{\infty} - \bar{U}}{u_{\tau}} dy \quad (3.6)$$

Clauser também propôs em seu extensivo trabalho experimental a descrição da forma do campo de velocidades médias do escoamento através do *Fator de Forma de Clauser* (G) definido abaixo

$$G = \frac{1}{\Delta} \int_0^{\infty} \left(\frac{U_{\infty} - \bar{U}}{u_{\tau}} \right)^2 dy \quad (3.7)$$

De acordo com a sua teoria, o Fator de Forma de Clauser (G) para uma camada limite em equilíbrio deve ser constante ao longo da direção principal do escoamento. Valores típicos da ordem de $G \approx 7,0$ são encontrados na literatura para camadas limite com gradientes nulos de pressão (valores maiores são verificados quando camadas limite com gradientes de pressão adversos são investigadas).

Clauser ainda afirma que uma camada limite estará em equilíbrio sempre que a razão entre a força de atrito na parede e a força de pressão for constante. Matematicamente, esta condição implica em

$$\beta = \frac{\delta_l}{\tau_w} \frac{dp}{dx} = \text{const.} \quad (3.8)$$

onde

$$\delta_l = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{\bar{U}}{U_{\infty}} \right) dy \quad (3.9)$$

é a espessura de deslocamento da camada limite, dp/dx é o gradiente de pressão longitudinal ao escoamento e τ_w é a tensão de cisalhamento na parede. A validade desta hipótese pode ser verificada como se segue.

Conforme é afirmado em ANDERSEN et al. (1972) e ORLANDO et al. (1974), as regiões mais externas de uma camada limite turbulenta (que compreendem 90% de sua espessura) reagem muito mais lentamente a mudanças contínuas nas condições de contorno do escoamento do que os 10% restantes de sua porção mais interna. De fato, a região da parede de uma CLT sempre pode ser considerada em equilíbrio, pois nesta região somente o gradiente local de pressão é importante. Contrariamente, nas regiões externas de uma camada limite turbulenta, um pronunciado efeito de memória é encontrado quando são provocadas variações contínuas nas condições de contorno do escoamento. Já em camadas limite com gradientes constantes de pressão, as similaridades da região interna e externa da CLT têm sido verificadas há décadas, sendo conhecidas, respectivamente, como “lei da parede” e “lei de defeito (ou deflexão) do perfil de velocidades”.

Vários são os métodos de caracterização das condições de equilíbrio de escoamentos que empregam relações entre as espessuras características da camada limite (AVELINO, 2000). O *Fator de Forma de von Kármán* é uma relação útil na

determinação deste comportamento, definido através da razão entre as espessuras de deslocamento (δ_1) e de quantidade de movimento (δ_2) da camada limite como

$$H = \frac{\delta_1}{\delta_2} \quad (3.10)$$

onde

$$\delta_2 = \int_0^{\infty} \frac{\bar{U}}{U_{\infty}} \left(1 - \frac{\bar{U}}{U_{\infty}} \right) dy \quad (3.11)$$

Assim como acontece com o Fator de Forma de Clauser (G), o Fator de Forma de von Kármán (H) deve assumir valores constantes em camadas limite que já tenham atingido o estado de equilíbrio já que, neste estágio de crescimento, suas espessuras características aumentam quase linearmente com o respectivo aumento da distância longitudinal de seu desenvolvimento (x).

A prévia determinação da velocidade de atrito u_{τ} foi necessária para o cálculo do parâmetro G de cada perfil analisado. Para tal fim, o valor experimental de u_{τ} foi estimado mediante a resolução da expressão do perfil médio de velocidades proposto por COLES (1956)

$$\frac{\bar{U}}{u_{\tau}} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{y u_{\tau}}{\nu} \right) + A + \frac{\Pi}{k} W(\eta) \quad (3.12)$$

onde: $k = 0,4$ é a constante de von Kármán, $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $A = 5,0$ e $\eta = y/\delta$. A Função $W(\eta)$ foi definida como a Lei da Esteira de Coles, sendo uma função positiva e de caráter universal. Sua apresentação foi dada por Coles em forma tabular, mas a interpolação destes pontos permite traçar uma curva que pode ser aproximada por

$$W(\eta) = 1 - \cos(\pi\eta) \quad (3.13)$$

O parâmetro Π foi considerado por Coles independente de x . Entretanto, uma análise mais profunda dos dados experimentais revela que Π é constante (e igual a 0,55) somente para $Re_{\delta_2} > 5600$ (maiores detalhes em SILVA FREIRE e CRUZ (1998)).

A determinação de u_τ foi efetuada entrando-se com o par conhecido (δ, U_∞) na Equação (3.12), reduzindo-a assim à seguinte equação transcendental

$$\frac{U_\infty}{u_\tau} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{\delta u_\tau}{\nu} \right) + A + \frac{2\Pi}{k} \quad (3.14)$$

Um método gráfico de determinação de u_τ também foi empregado passando-se uma reta sobre os pontos da região completamente turbulenta do perfil de velocidades logarítmico. Seu coeficiente angular multiplicado por 0,4 (constante de *von Kármán*) determinava u_τ . Posteriormente, a validade deste método de cálculo de u_τ foi verificada.

Os valores do *Fator de Forma de Clauser* para as configurações que apresentaram os melhores resultados estão apresentados nas Figuras (3.12) e (3.13). Os valores de G para duas configurações distintas com a floresta 80 mm aparecem na Figura (3.12). Para estas configurações, os valores de G estão na faixa de 7,6 a 8,5, o que parece razoável quando comparados com valores de G em torno de 7,0 obtidos por outros autores para CLT naturalmente desenvolvidas. As retas ajustadas por estes pontos também apresentam comportamentos constantes sugerindo que as camadas limite obtidas atingiram seus estados de equilíbrio nas estações de medidas observadas. Uma leve inclinação é encontrada em ambas as retas da Figura (3.13), apesar dos altos valores de G (entre 9,5 e 10,4) para estas configurações. Valores similares para G também foram verificados recentemente em AVELINO (2000) para CLT naturalmente desenvolvidas sobre superfície lisa com gradientes nulos de pressão.

Os resultados do *Fator de Forma de von Kármán* são apresentados nas Figuras (3.14) e (3.15). O estado de equilíbrio das camadas limite analisadas também é observado com este critério de auto preservação para todas as configurações destacadas. Como pode ser observado na Figura (3.14), os valores de H para as configurações dotadas da floresta barras circulares de 80 mm estão compreendidos entre 1,44 e 1,51 e suas retas de ajuste mantêm comportamentos constantes. Uma leve inclinação das retas de ajuste também é observada nas configurações com a floresta de 160 mm (Figura (3.15)), onde H assume valores entre 1,55 e 1,64. Por fim, de maneira análoga à observada para o Fator de Forma de Clauser, os valores de H encontrados para as florestas de 160 mm estão de acordo com os valores observados em AVELINO (2000) para camadas limite naturalmente desenvolvidas sobre superfície lisa.

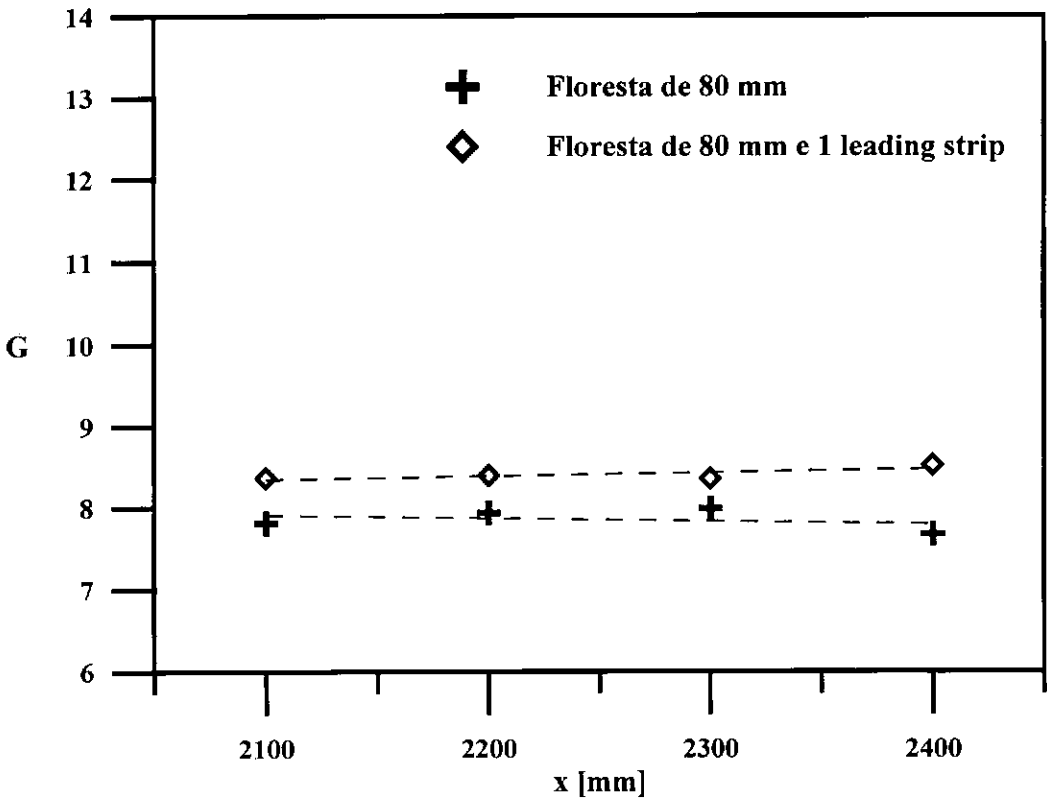


Figura 3.12 – Fator de Forma de Clauser (G) para duas configurações com a floresta de barras circulares de 80 mm.

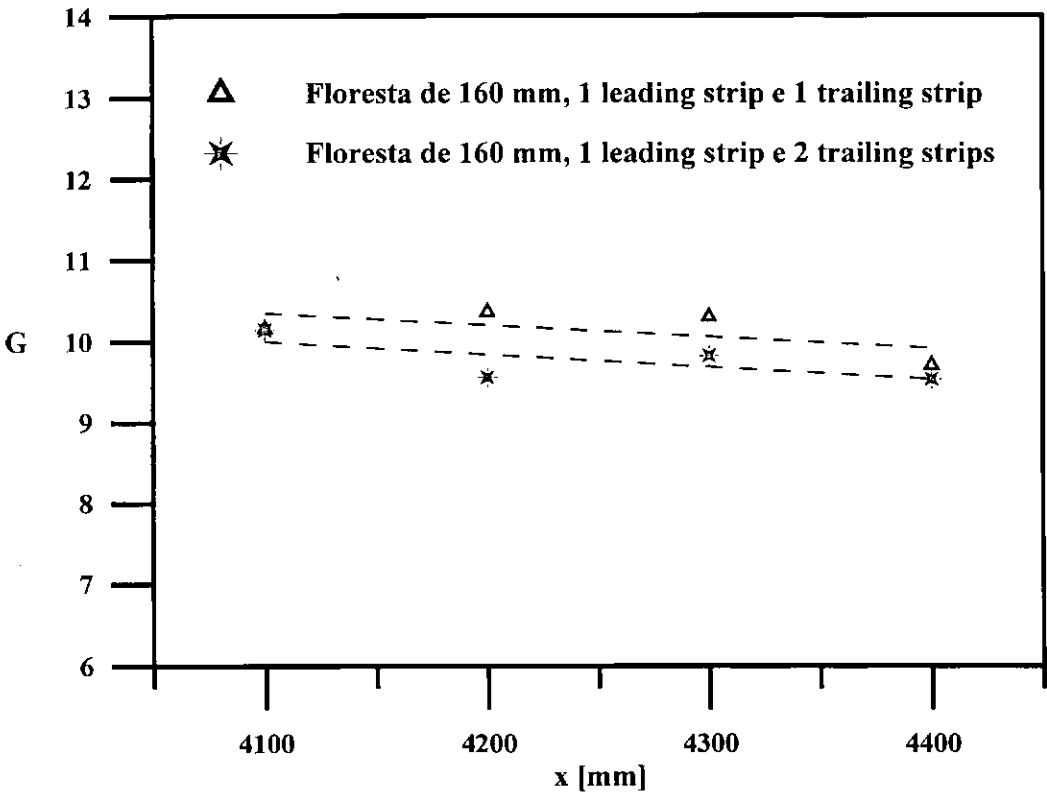


Figura 3.13 – Fator de Forma de Clauser (G) para duas configurações com a floresta de barras circulares de 160 mm.

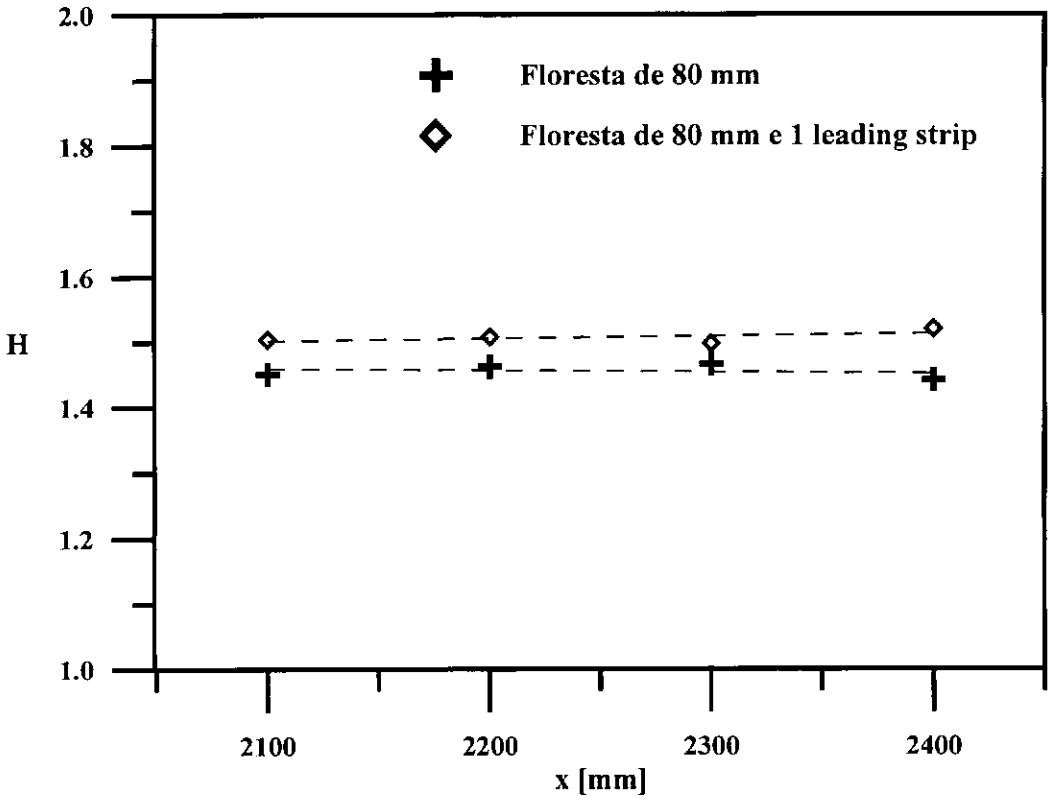


Figura 3.14 – Fator de Forma de von Kármán (H) para duas configurações com a floresta de barras circulares de 80 mm.

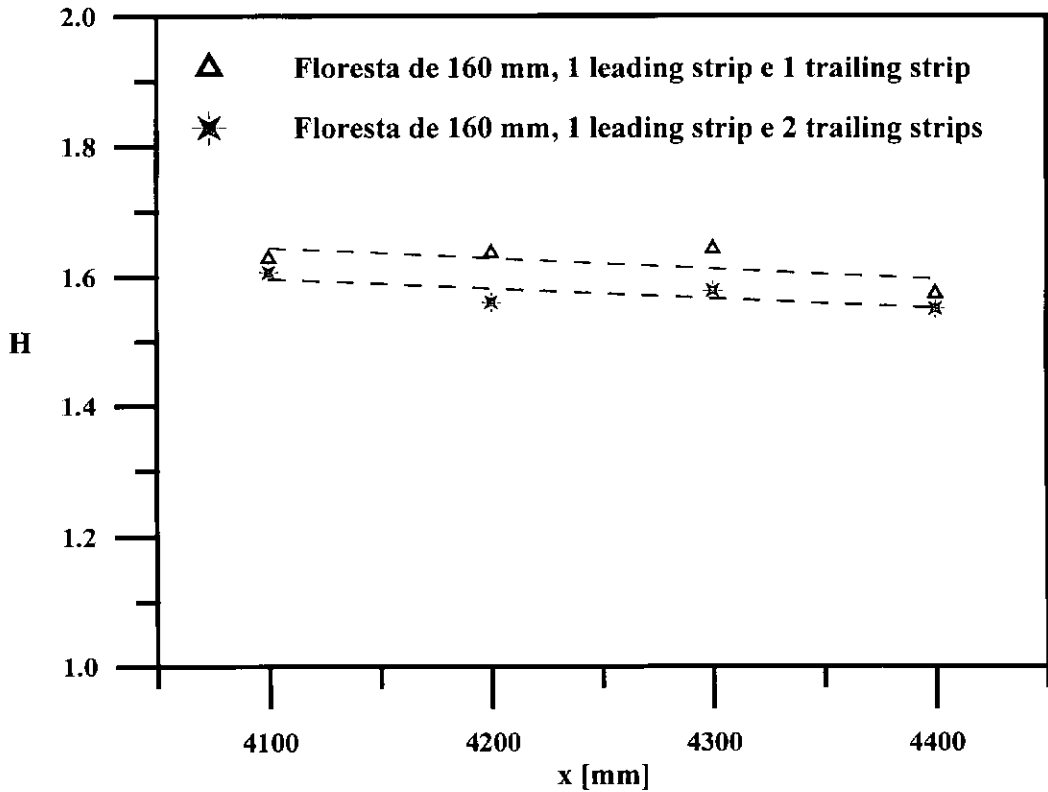


Figura 3.15 – Fator de Forma de von Kármán (H) para duas configurações com a floresta de barras circulares de 160 mm.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A caracterização dos perfis de velocidade obtidos para cada configuração testada neste trabalho foi feita a partir da análise dos gráficos de velocidade média, conforme é relatado no Capítulo 3. Deste modo, um único perfil era coletado primeiramente para cada arranjo testado, fixando-se a estação medidas. Assim, somente as configurações que apresentavam resultados satisfatórios nessa primeira etapa de validação tinham uma avaliação completa, através do levantamento dos perfis restantes nas demais estações. Este filtro na coleta dos dados permitiu que o tempo gasto nos arranjos geométricos das piores configurações fosse reduzido, acelerando o processo de otimização do aparato de espessamento.

A proposta deste capítulo reside em apresentar a evolução de todo o processo de refinamento dos perfis de velocidade à medida em que se introduziam variações geométricas na composição dos aparatos testados. Uma visão holística e cronológica do desenvolvimento deste processo também será permitida ao leitor, desde as primeiras configurações com as telas até os arranjos que empregaram as florestas de barras circulares. Os perfis serão apresentados em variáveis dimensionais e adimensionais em coordenadas internas e externas. A expressão clássica da lei da parede será empregada para a qualificação dos perfis em coordenadas internas

$$u^+ = 2,5 \ln y^+ + 5 \quad (4.1)$$

onde $u^+ = \frac{\bar{U}}{u_\tau}$ e $y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu}$.

Os perfis apresentados em coordenadas externas serão comparados com os perfis de velocidade propostos por HAMA (1954) e por COLES (1956), expressos respectivamente pelas Equações (4.2) e (4.3) como

$$\frac{U_\infty - \bar{U}}{u_\tau} = 9,6 \left(1 - \frac{y}{\delta} \right)^2 \quad (4.2)$$

para $\frac{y}{\delta} \geq 0,15$ e

$$\frac{U_{\infty} - \bar{U}}{u_{\tau}} = -\frac{1}{k} \ln\left(\frac{y}{\delta}\right) + \frac{\Pi}{k} \left[1 + \cos\left(\frac{\pi y}{\delta}\right) \right] \quad (4.3)$$

onde k e Π guardam os mesmos valores definidos anteriormente. Note que a Equação (4.2) proposta por HAMA (1954) só tem validade no domínio $0,15 \leq y/\delta \leq 1,0$.

Os campos de velocidade média ainda serão comparados com expressões baseadas em leis de potência do tipo

$$\bar{U}(y) = a y^n \quad (4.4)$$

Uma interpolação numérica dos dados permitirá a determinação da melhor curva de ajuste do perfil em questão (somente para as florestas de barras circulares). O conhecimento do parâmetro n da Equação (4.4) é fundamental para a descrição do tipo de CLA gerada (rural ou urbana) pois este parâmetro é fortemente influenciado pela rugosidade do terreno. Trabalhos experimentais mostram que o valor de n é diretamente proporcional ao comprimento de rugosidade aerodinâmico (y_o) que, na natureza, indica se o escoamento está se desenvolvendo sobre uma região rural (y_o pequeno) ou sobre uma região urbana (y_o grande). A literatura reporta valores de n na atmosfera que variam desde $n = 0,2$ (CLA rural) a $n = 0,4$ (CLA urbana).

Para camadas limite turbulentas naturalmente desenvolvidas sobre placas planas lisas, SCHLICHTING (1968) propõe a seguinte relação

$$\frac{\bar{U}}{U_{\infty}} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/7} \quad (4.5)$$

Note que a Equação (4.5) utiliza $n = 1/7$ ($\approx 0,14$), indicando que camadas limite naturalmente desenvolvidas que escoam sobre superfícies lisas não representam bem a maioria dos perfis de velocidade atmosféricos. Entretanto, valores de n próximos a $0,14$ são encontrados em CLA oceânicas ($n \approx 0,16$).

O *Coefficiente de Atrito Local na Parede* ($C_f/2$) também será apresentado e comparado com sua expressão clássica para camadas limite em placas planas lisas

$$\frac{C_f}{2} = 0,0128 Re_{\delta_2}^{-0,25} \quad (4.6)$$

As vantagens do engrossamento artificial da CLT serão comprovadas através da determinação da *origem virtual* (x_o), que representa a distância de crescimento que uma camada limite naturalmente desenvolvida necessitaria para alcançar as mesmas propriedades da camada limite artificialmente espessada. Este parâmetro foi calculado para cada perfil obtido com as florestas de barras circulares mediante a seguinte relação

$$\delta_2 = 0,036 x_o \left(\frac{U_\infty x_o}{\nu} \right)^{-1/5} \quad (4.7)$$

onde δ_2 é determinado experimentalmente pela Equação (3.11).

O espectro unidimensional de energia cinética turbulenta do escoamento também será apresentado para todos os experimentos e comparado com a lei dos $k^{-5/3}$ de Kolmogorov. Para o seu cálculo empregou-se a seguinte relação normalizada

$$\int_0^\infty \frac{F_u(k)}{y} d(yk) = 1 \quad (4.8)$$

onde $F_u(k)$ é a transformada discreta de Fourier do campo de flutuações de velocidades.

Por fim, a visualização do escoamento será apresentada somente para as configurações que envolveram a floresta de barras circulares de 160 mm.

4.1 – Resultados com as Telas

Os perfis de velocidade adquiridos com as telas são apresentados a seguir. As figuras de cada parte desta seção reportam tanto os resultados obtidos com a adoção de uma única tela como os resultados para as configurações que envolveram as duas telas combinadas com barras retangulares de alumínio (strips) e com uma barra circular de latão. Para ambas configurações, a geometria de cada elemento e o distanciamento entre eles seguem o mesmo procedimento descrito no Capítulo 3.

As Figuras (4.1) e (4.2) ilustram, respectivamente, os campos de velocidade média para as configurações que envolveram uma e duas telas. Um comportamento similar à lei da parede é encontrado nas regiões internas para todas as curvas da Figura (4.1), demonstrando haver uma boa concordância entre os dados experimentais e a previsão teórica com este critério de validação. É observada, entretanto, uma queda substancial na velocidade do escoamento em todas as curvas desta figura para $y^+ > 500$, o que não caracteriza a região externa da camada limite. Essa perda de quantidade de movimento é confirmada pelo alto grau de colapsamento de todas as curvas desta figura. Apesar da sensível redução deste déficit nas curvas apresentadas na Figura (4.2), o distanciamento observado entre a lei da parede e a região interna dos perfis levantados bem como o pequeno grau de colapsamento entre estas curvas nesta região indicam que as configurações que empregaram duas telas obtiveram perfis menos qualificados que as configurações que utilizaram uma única tela (pelo menos nas regiões internas do escoamento), o que é comprovado quando as Figuras (4.3) e (4.4) são apresentadas. Nota-se ainda nestas duas figuras que, para todas as configurações testadas, as regiões mais externas do escoamento ($y/\delta > 0,2$) não concordam com a lei da esteira de Coles e com o perfil de velocidades proposto por Hama.

Os perfis lineares de velocidade são apresentados nas Figuras (4.5) e (4.6) e comparados com a lei de potência proposta para camadas limite naturalmente desenvolvidas sobre placas planas lisas (Equação (4.5)). O comportamento dos dados de todas as configurações com este critério de validação demonstra não haver uma lei de potência que ajuste os perfis, o que reafirma a inadequação deste tipo de aparato para a simulação de camadas limite atmosféricas.

O coeficiente de atrito local na parede é mostrado nas Figuras (4.7) e (4.8). Para todas as configurações com uma e duas telas, os valores experimentais de $C_f/2$ foram maiores do que os valores obtidos com sua expressão teórica para camadas limite sobre placas planas lisas.

Finalmente, as informações relativas às flutuações espaciais da velocidade do escoamento são apresentadas nas Figuras (4.9) e (4.10) através do perfil espectral de turbulência longitudinal. Para todas as configurações testadas, a região de decaimento da energia cinética turbulenta parece estar de acordo, pelo menos qualitativamente, com a lei de decaimento dos $k^{-5/3}$ de Kolmogorov.

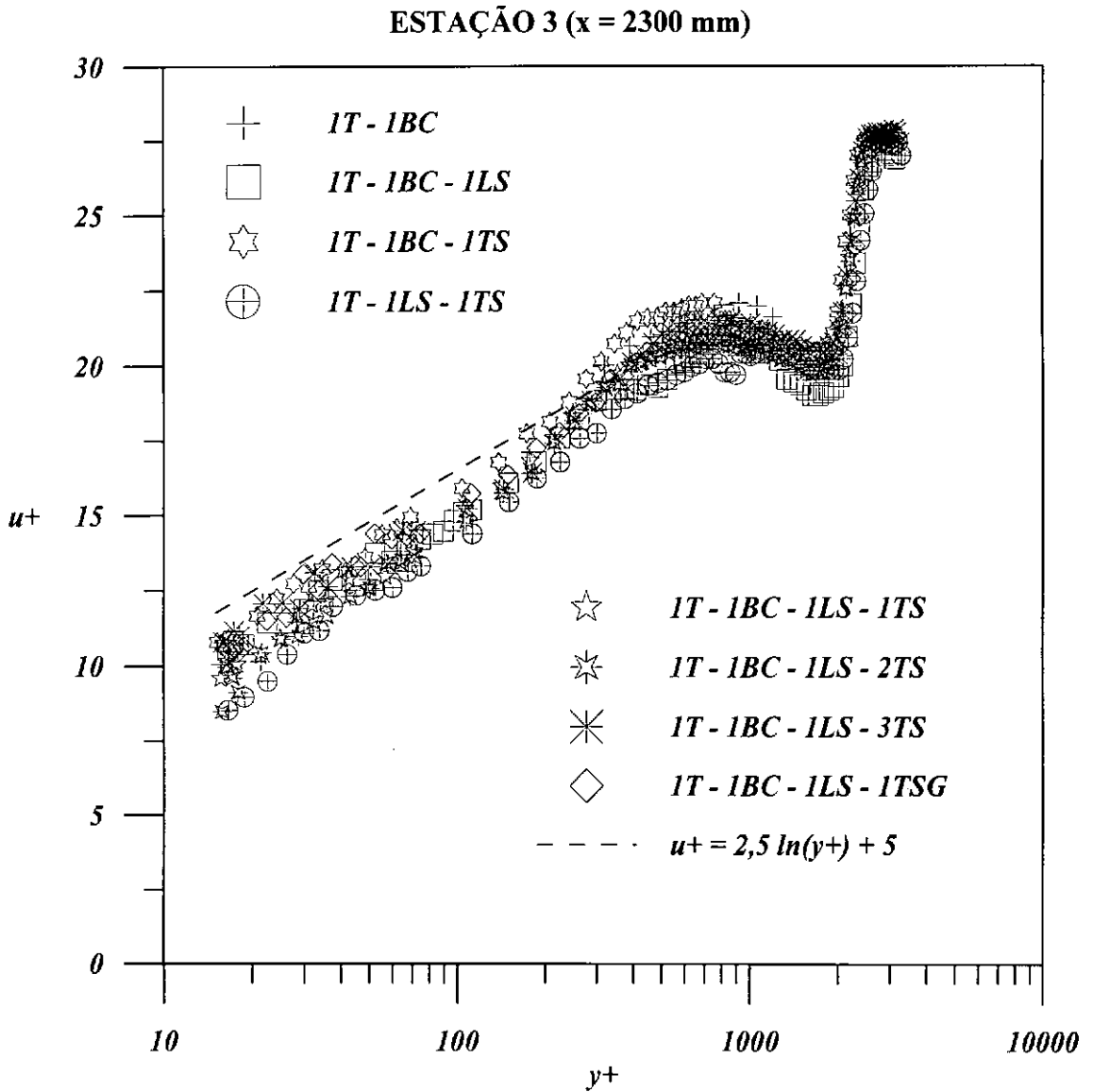


Figura 4.1 – Perfis de velocidade média expressos em coordenadas internas para diversos arranjos envolvendo uma tela (*T*), uma barra circular (*BC*) e barras retangulares transversais ao escoamento a montante (*leading strip - LS*) e a jusante (*trailing strip - TS*) da tela. *TSG* denota uma combinação de 4 barras retangulares aglomeradas a jusante da tela.

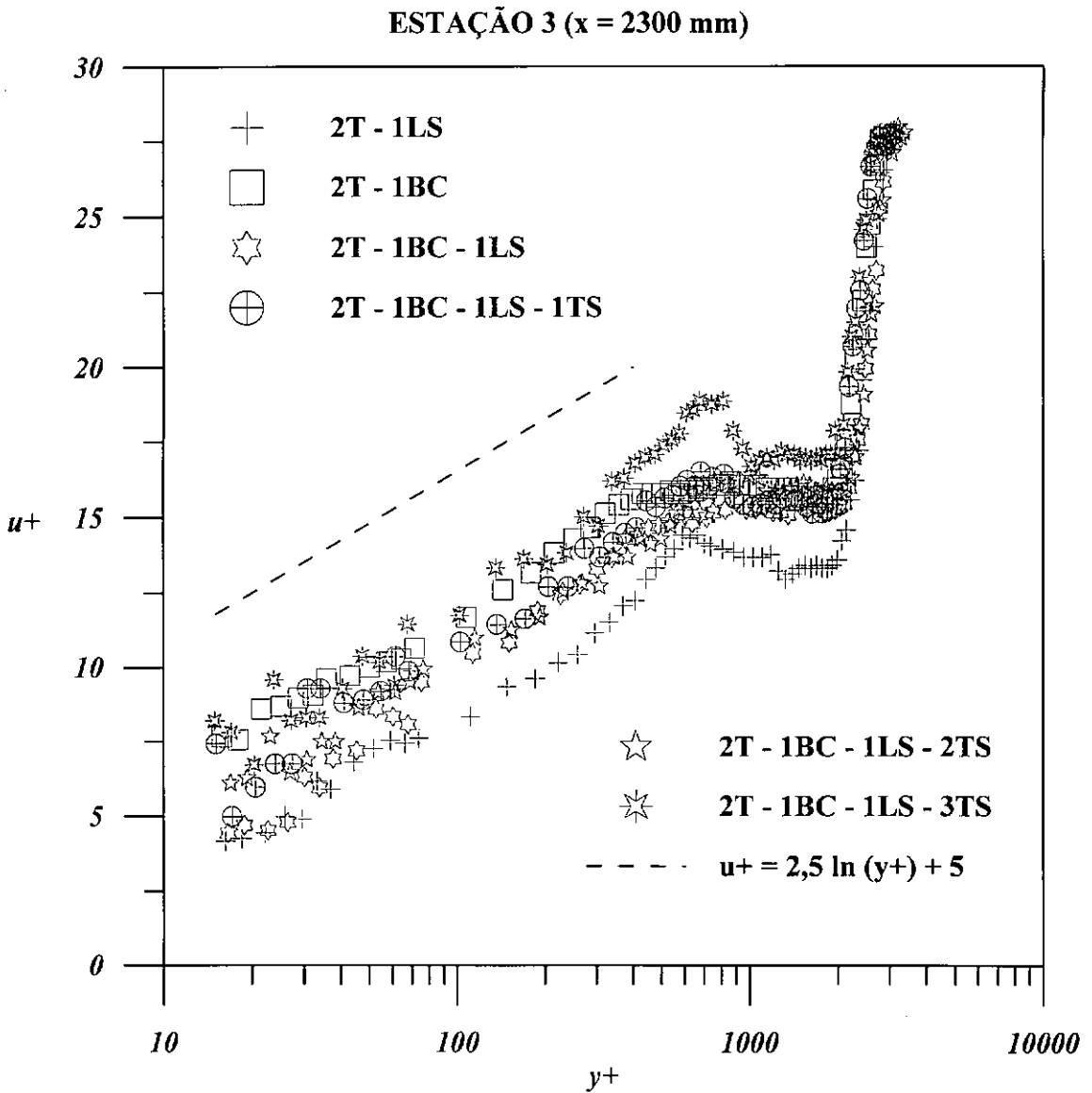


Figura 4.2 – Perfis de velocidade média expressos em coordenadas internas para diversos arranjos envolvendo duas telas (T), uma barra circular (BC) e barras retangulares transversais ao escoamento a montante (*leading strip* - LS) e a jusante (*trailing strip* - TS) das telas.

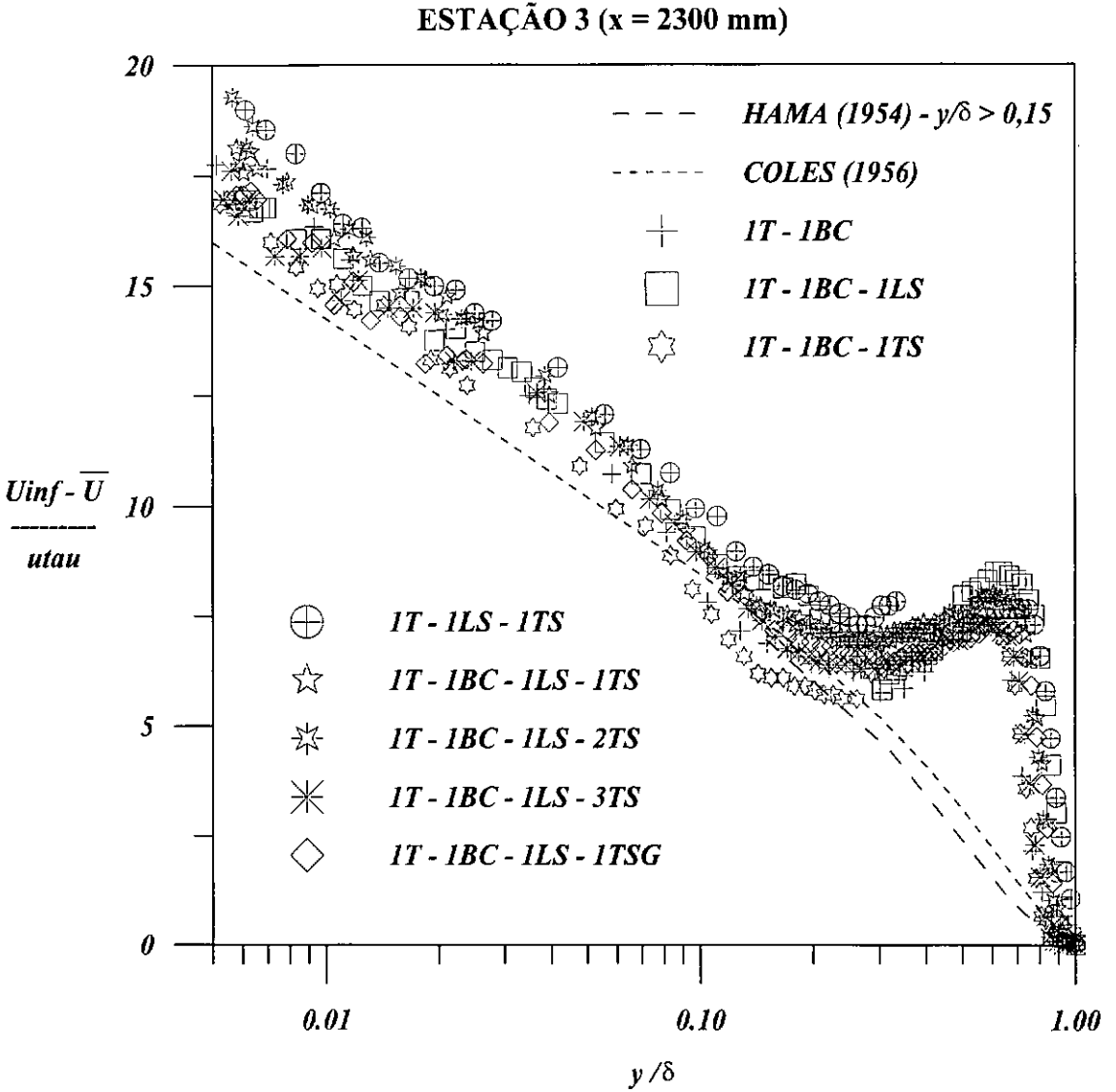


Figura 4.3 – Perfis de velocidade média expressos em coordenadas externas para as configurações que envolveram somente uma tela. T – tela; BC – barra circular; LS – barra retangular transversal ao escoamento posicionada a montante da tela (leading strip); TS – barra retangular a jusante da tela (trailing strip) e TSG – conjunto de barras retangulares aglomeradas a jusante da tela.

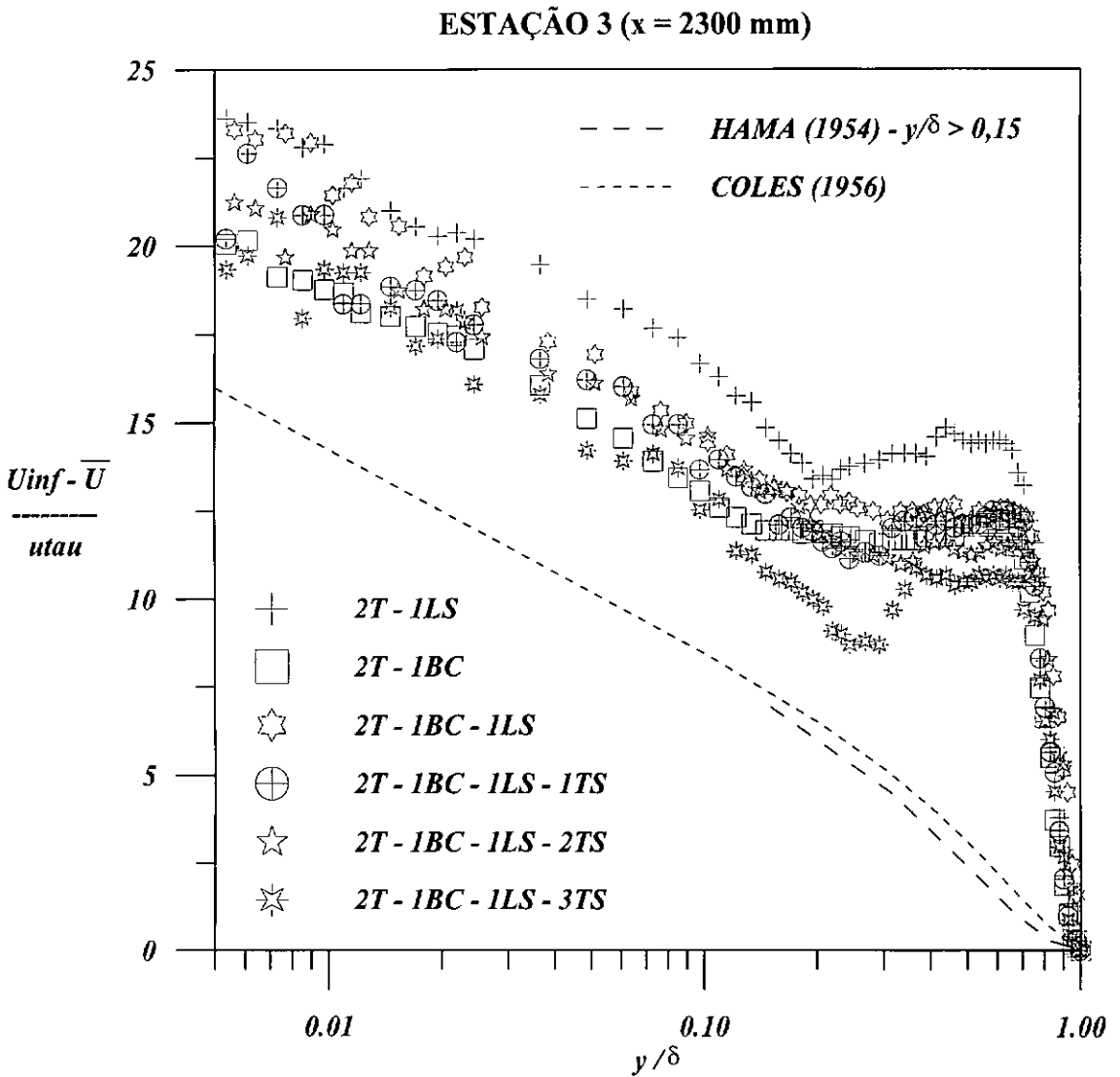


Figura 4.4 – Perfis de velocidade média expressos em coordenadas externas para as configurações que envolveram duas telas. T – tela; BC – barra circular; LS – barra retangular transversal ao escoamento posicionada a montante das telas (leading strip); TS – barra retangular a jusante das telas (trailing strip).

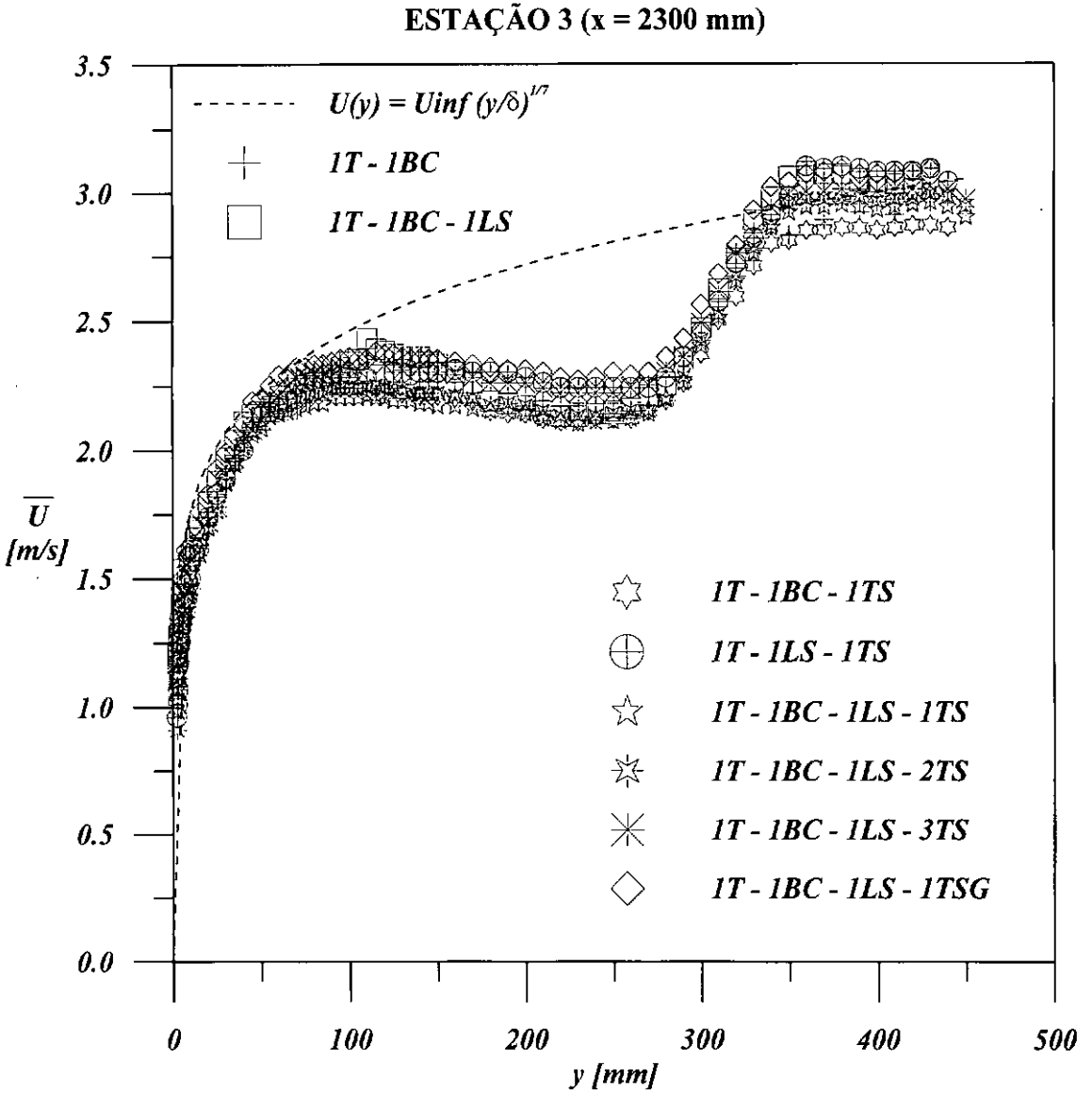


Figura 4.5 – Perfis lineares de velocidade média para as configurações que envolveram uma tela. T – tela; BC – barra circular; LS – leading strip; TS – trailing strip e TSG – barras retangulares aglomeradas a jusante da tela.

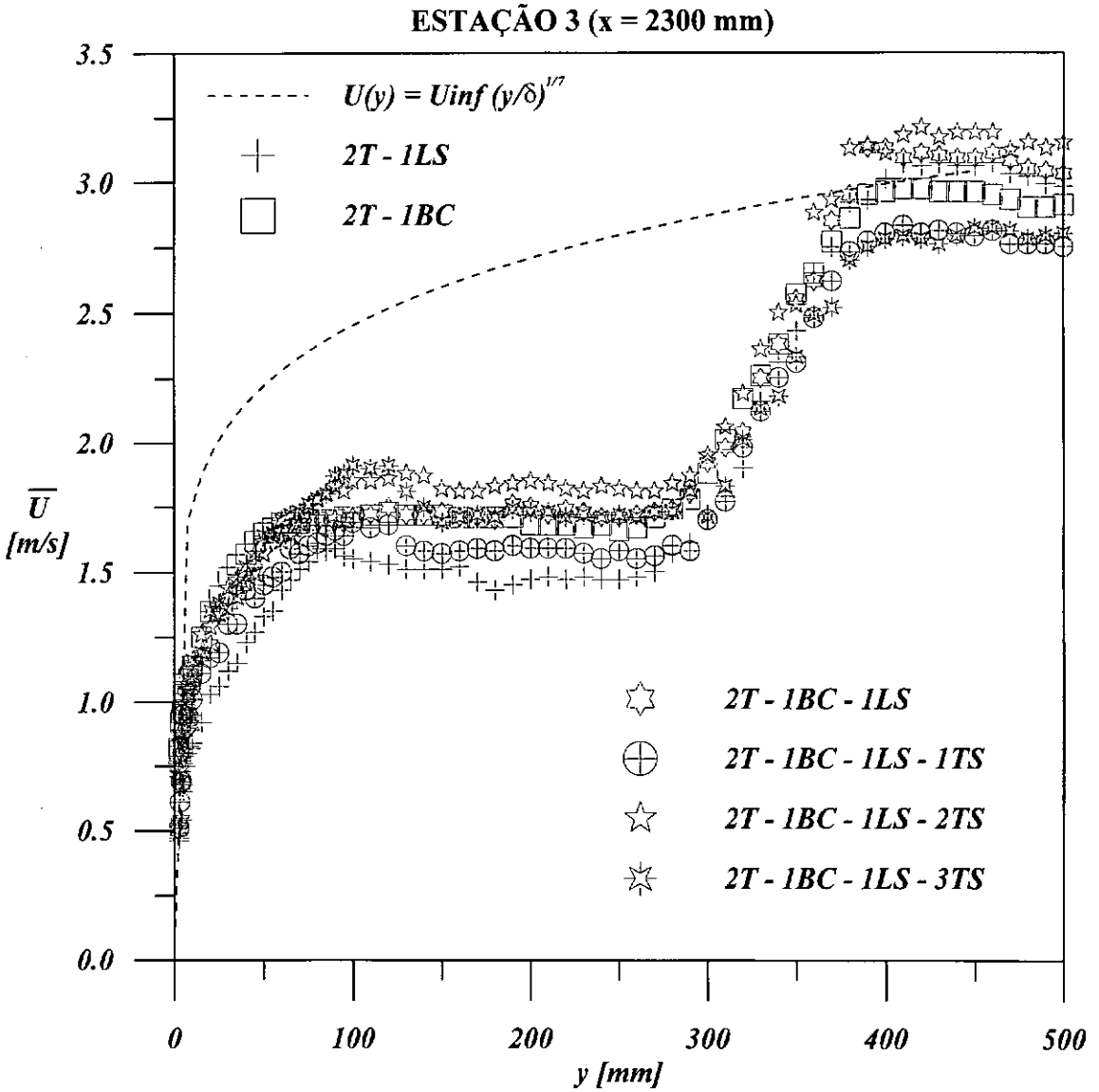


Figura 4.6 – Perfis lineares de velocidade média para as configurações que envolveram duas telas. T – tela; BC – barra circular; LS – leading strip e TS – trailing strip.

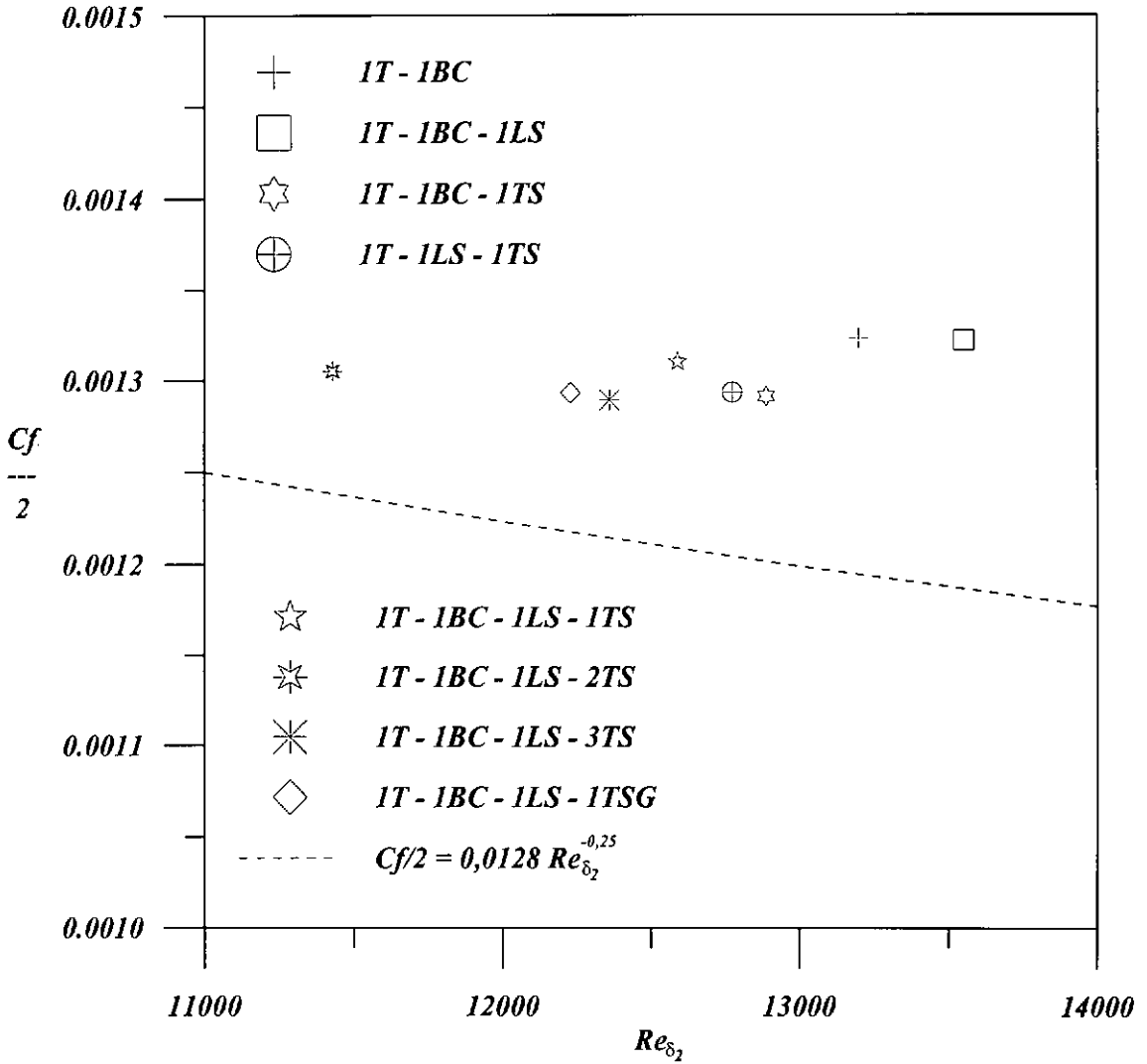


Figura 4.7 – Valores do coeficiente de atrito local na parede ($C_f/2$) para as configurações que empregaram uma única tela ($11 < Re_{\delta_2} \times 10^{-3} < 14$). Estação 3 ($x=2300$ mm).

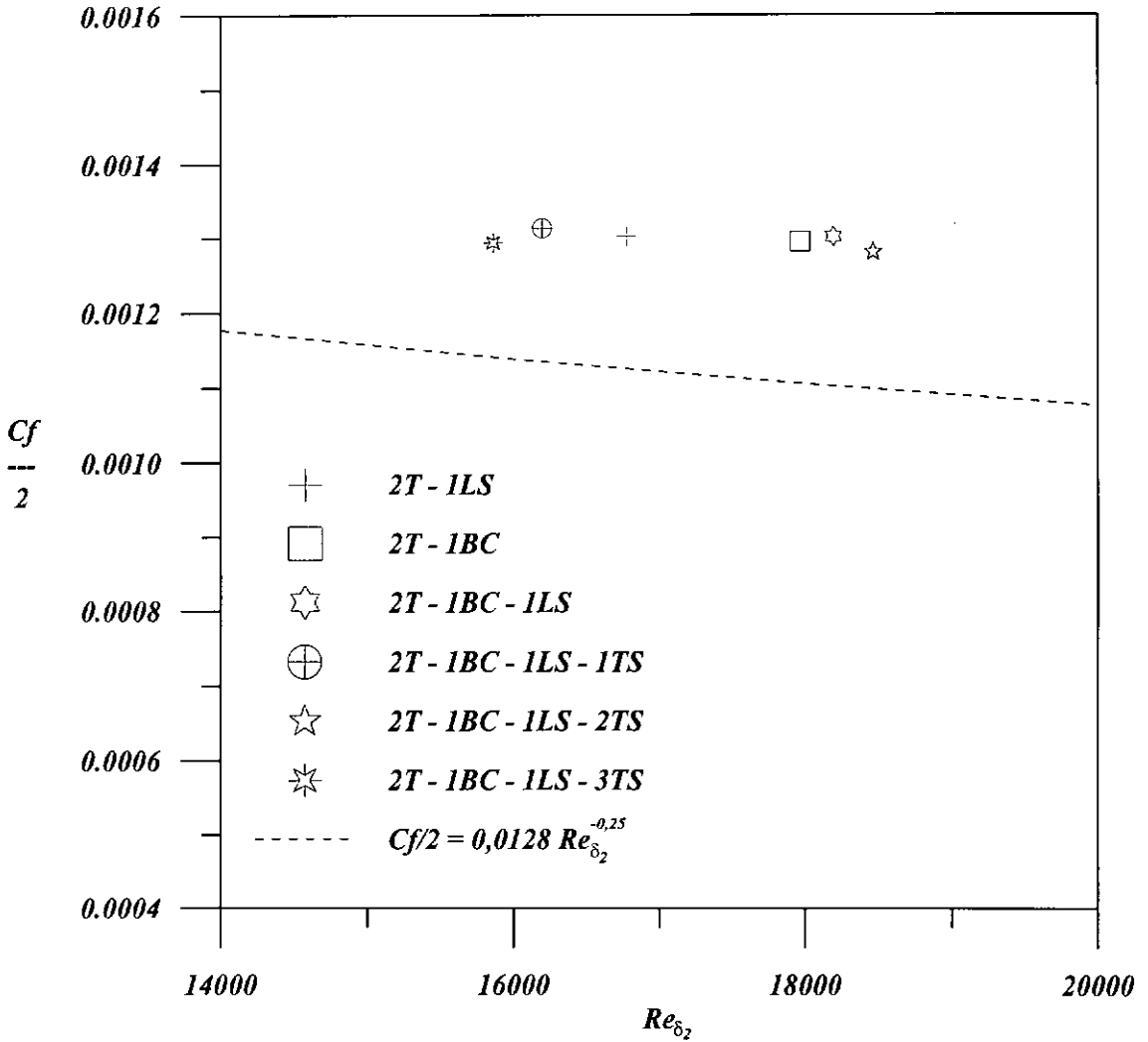


Figura 4.8 – Valores do coeficiente de atrito local na parede ($C_f/2$) para as configurações que empregaram duas telas ($14 < Re_{\delta_2} \times 10^{-3} < 20$). Estação 3 ($x=2300$ mm).

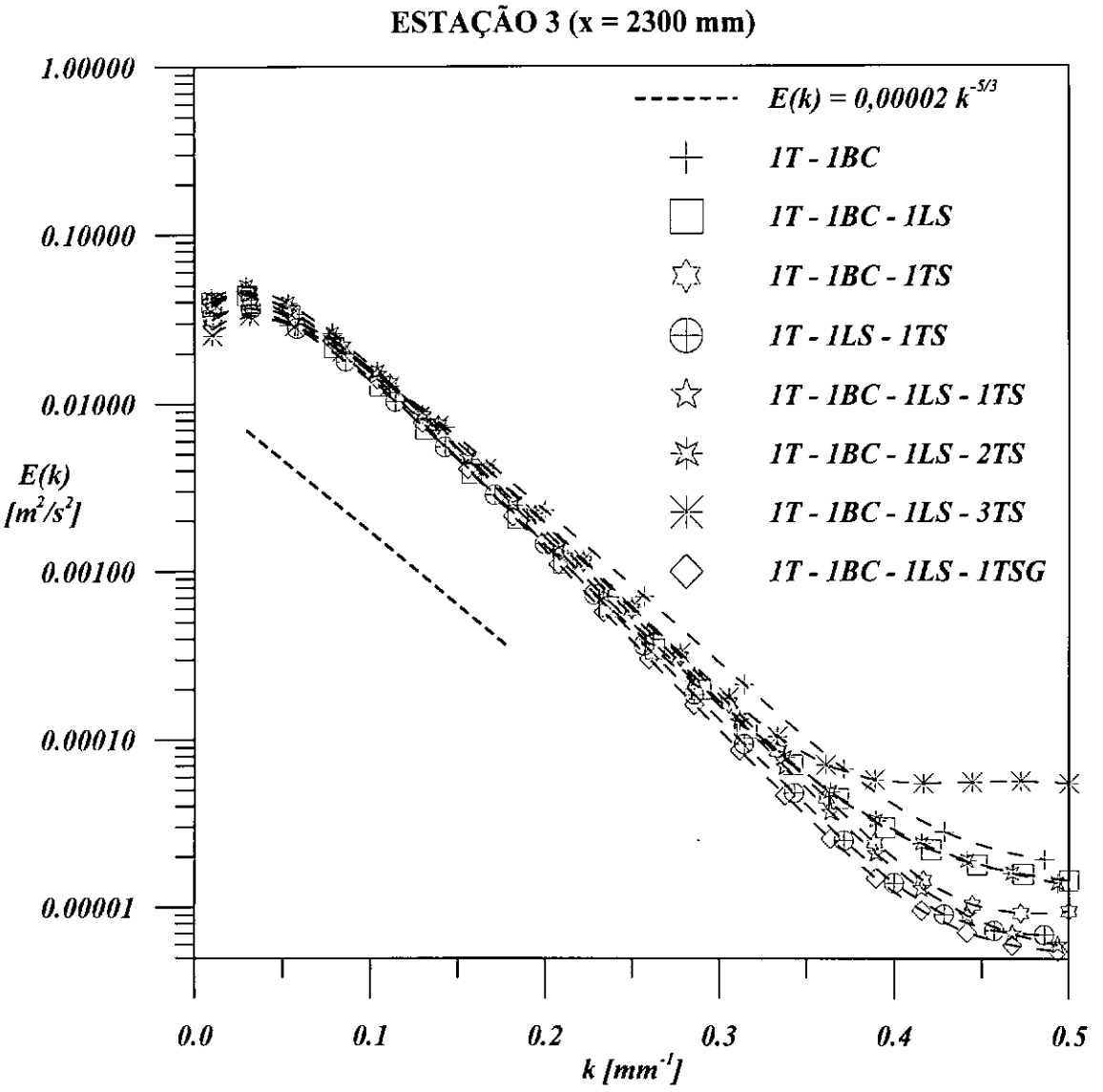


Figura 4.9 – Espectro longitudinal da turbulência para os experimentos que envolveram uma única tela.

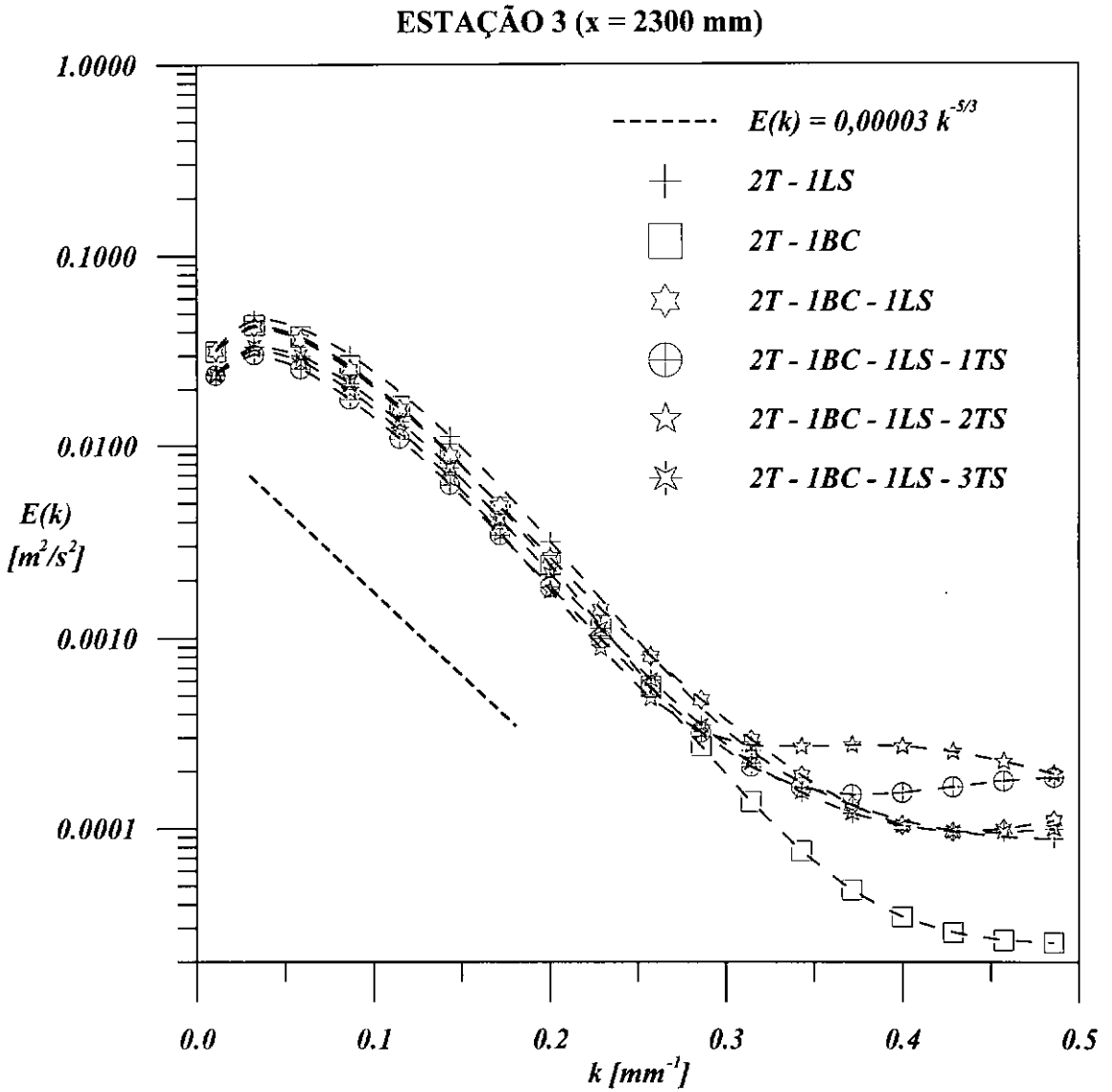


Figura 4.10 – Espectro longitudinal da turbulência para os experimentos que empregaram duas telas.

4.2 – Resultados com os Geradores de Vórtices Elípticos

Os perfis de velocidade média escritos em coordenadas internas da camada limite para quatro configurações distintas envolvendo os geradores de vórtices são apresentados na Figura (4.11) e comparados com a lei da parede. Para todos os perfis apresentados, uma grande discordância entre pontos consecutivos é encontrada, descaracterizando assim as regiões das subcamadas turbulenta e de inércia (esteira) da camada limite. A superposição da lei da parede sobre este gráfico também demonstra que este tipo de aparato gerou perfis que apresentaram coeficientes angulares maiores que o valor previsto por esta teoria, indicando uma taxa de crescimento da velocidade exagerada para $20 < y^+ < 300$.

Os perfis obtidos com os geradores de vórtices elípticos também não apresentaram resultados satisfatórios quando comparados com a lei da esteira de Coles e com o perfil de velocidades proposto por HAMA (1954), conforme ilustra a Figura (4.12). A disposição dos perfis testados ao longo de quase toda a região interna do domínio levantado ($0,04 < \eta < 0,5$) demonstra um excessivo desvio dos dados com relação às curvas teóricas, o que invalida os perfis analisados na representação de um perfil típico de camada limite.

Os perfis lineares de velocidade são apresentados na Figura (4.13). Esta figura mostra claramente a diferença morfológica entre os campos de velocidade média obtidos com quatro e com sete geradores de vórtices. Os dados experimentais também revelam que o escoamento potencial foi atingido em $y \approx 60 \text{ mm}$ (para a configuração que empregou quatro geradores) e em $y \approx 190 \text{ mm}$ para as configurações que empregaram sete geradores, sugerindo que espaçamentos transversais demasiados entre os geradores não são percebidos pelo escoamento resultante como causadores de um aumento na espessura de sua camada limite.

Ao contrário do que foi observado para as telas, os valores de $C_f/2$ para todas as configurações foram menores que os valores estimados pela sua curva teórica para CLT sobre placas planas lisas (Figura (4.14)). Já o espectro longitudinal da turbulência dos escoamentos testados mostrou-se de acordo com a teoria espectral dos $k^{-5/3}$ de Kolmogorov, conforme ilustra a Figura (4.15). Ainda segundo esta figura, a introdução de novos obstáculos no escoamento provocou um aumento no pico de energia cinética

do fluido nas maiores escalas da turbulência, induzindo à uma possível correlação empírica entre estes dois parâmetros.

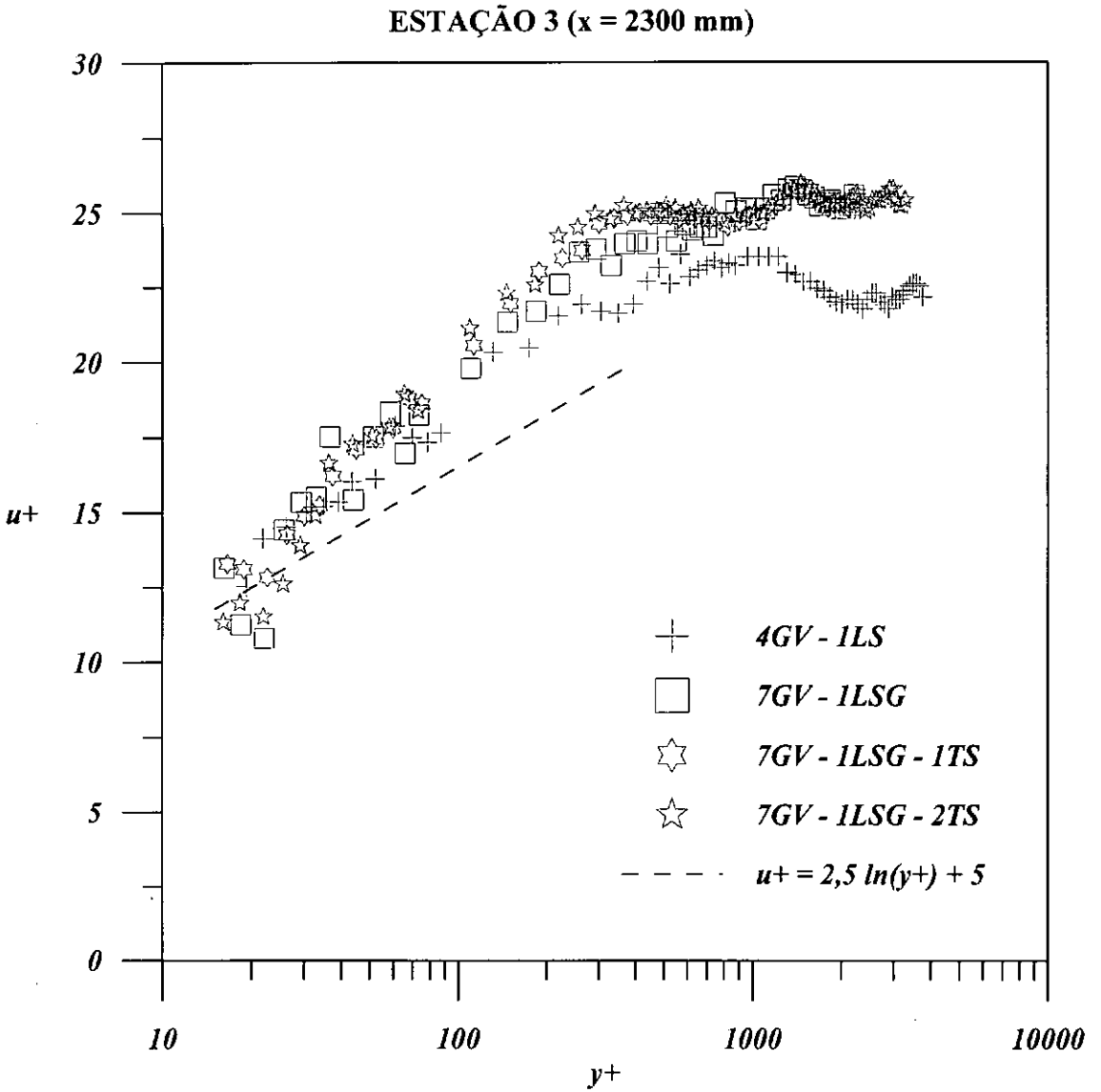


Figura 4.11 – Perfis de velocidade média apresentados em coordenadas internas para quatro arranjos geométricos distintos envolvendo geradores de vórtices (GV) e barras retangulares transversais ao escoamento a montante (*leading strip* – LS) e a jusante (*trailing strip* – TS) dos geradores. LSG denota uma combinação de duas barras retangulares aglomeradas a montante dos geradores.

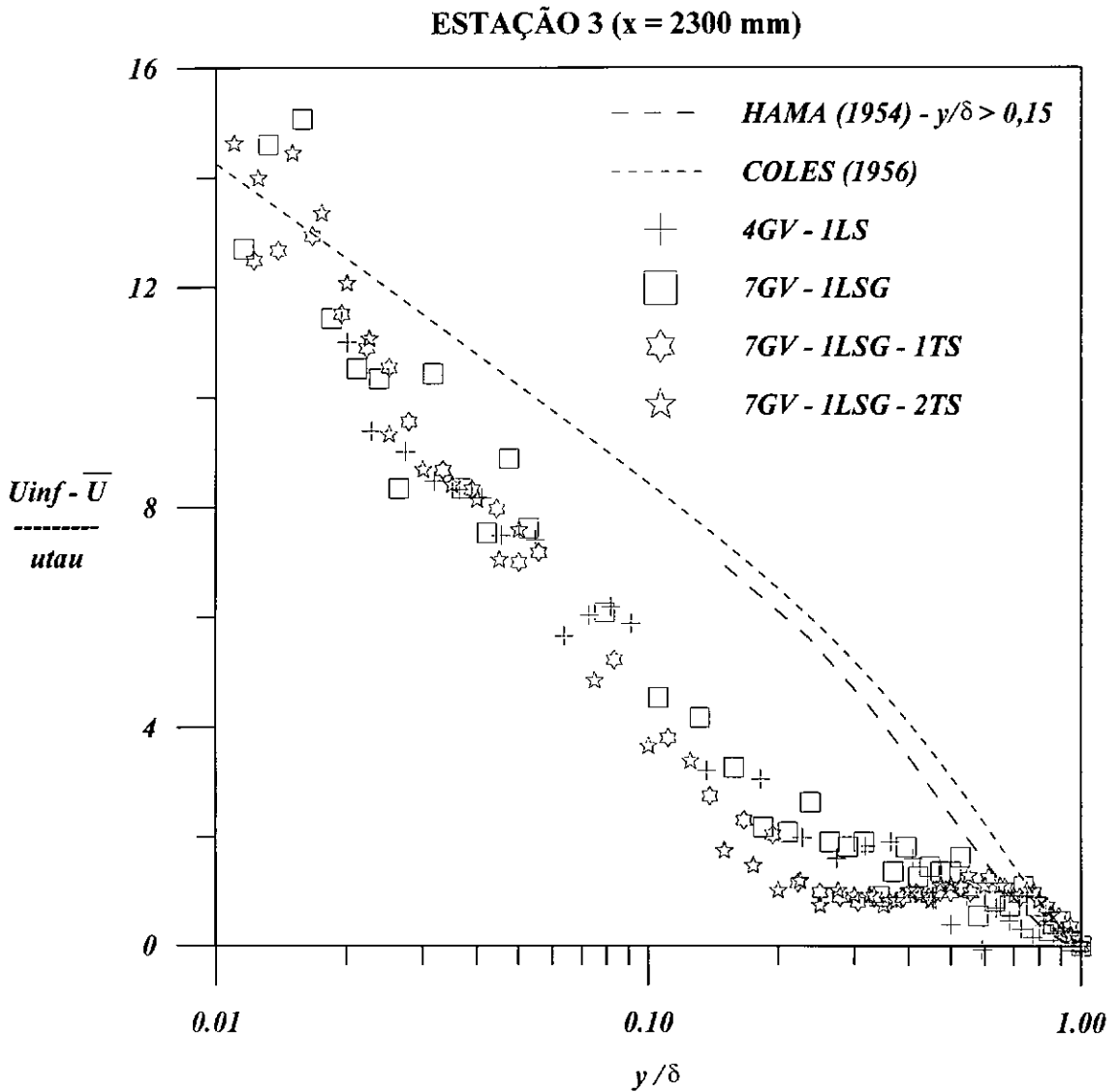


Figura 4.12 – Perfis de velocidade média apresentados em coordenadas externas para quatro arranjos geométricos distintos envolvendo geradores de vórtices (GV) e barras retangulares transversais ao escoamento a montante (*leading strip* – LS) e a jusante (*trailing strip* – TS) dos geradores. LSG denota uma combinação de duas barras retangulares aglomeradas a montante dos geradores.

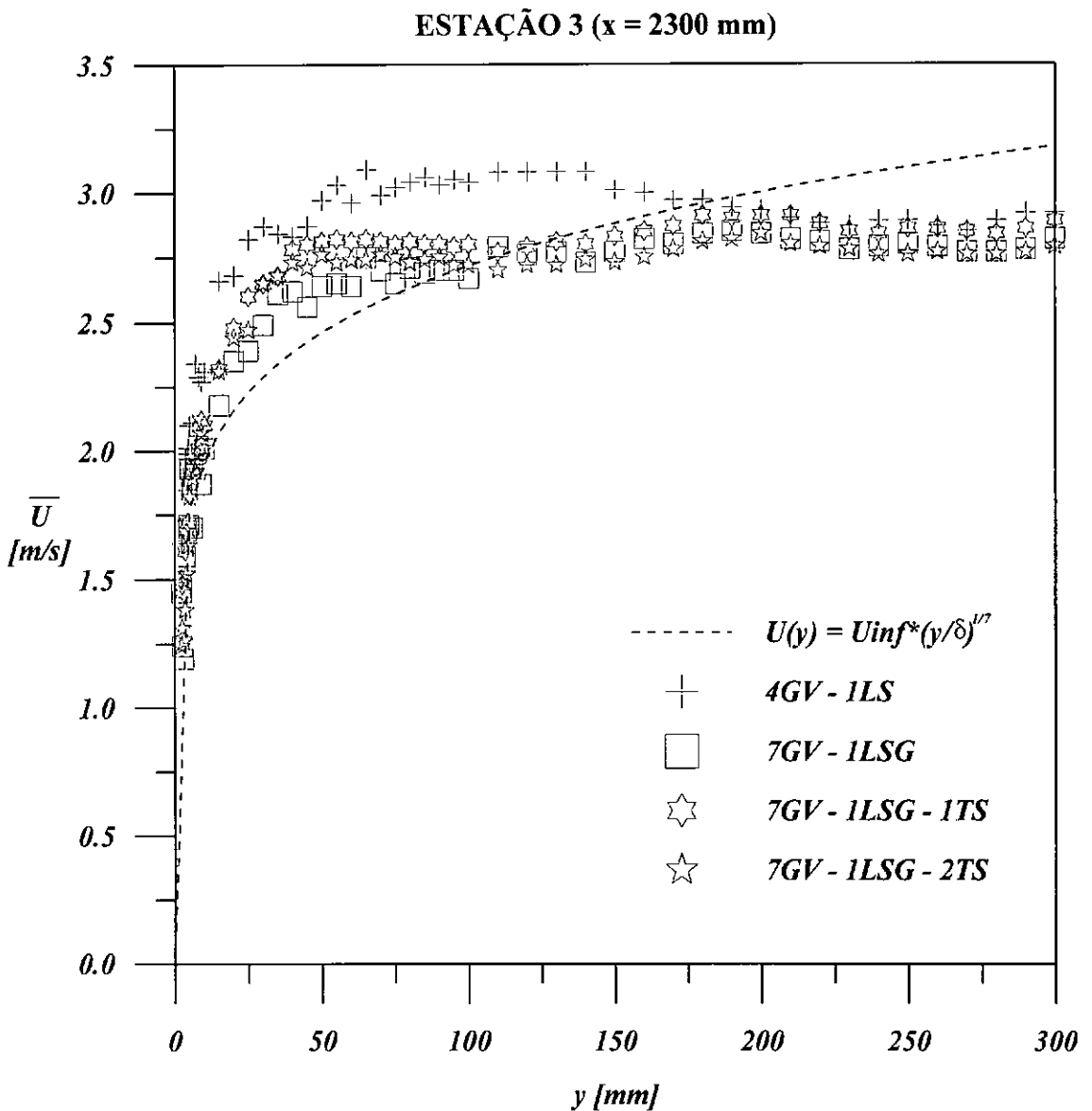


Figura 4.13 – Perfis lineares de velocidade média para as configurações que empregaram geradores de vórtices. *GV* – gerador de vórtices; *LS* – leading strip; *TS* – trailing strip e *LSG* – duas barras retangulares aglomeradas a montante dos geradores.

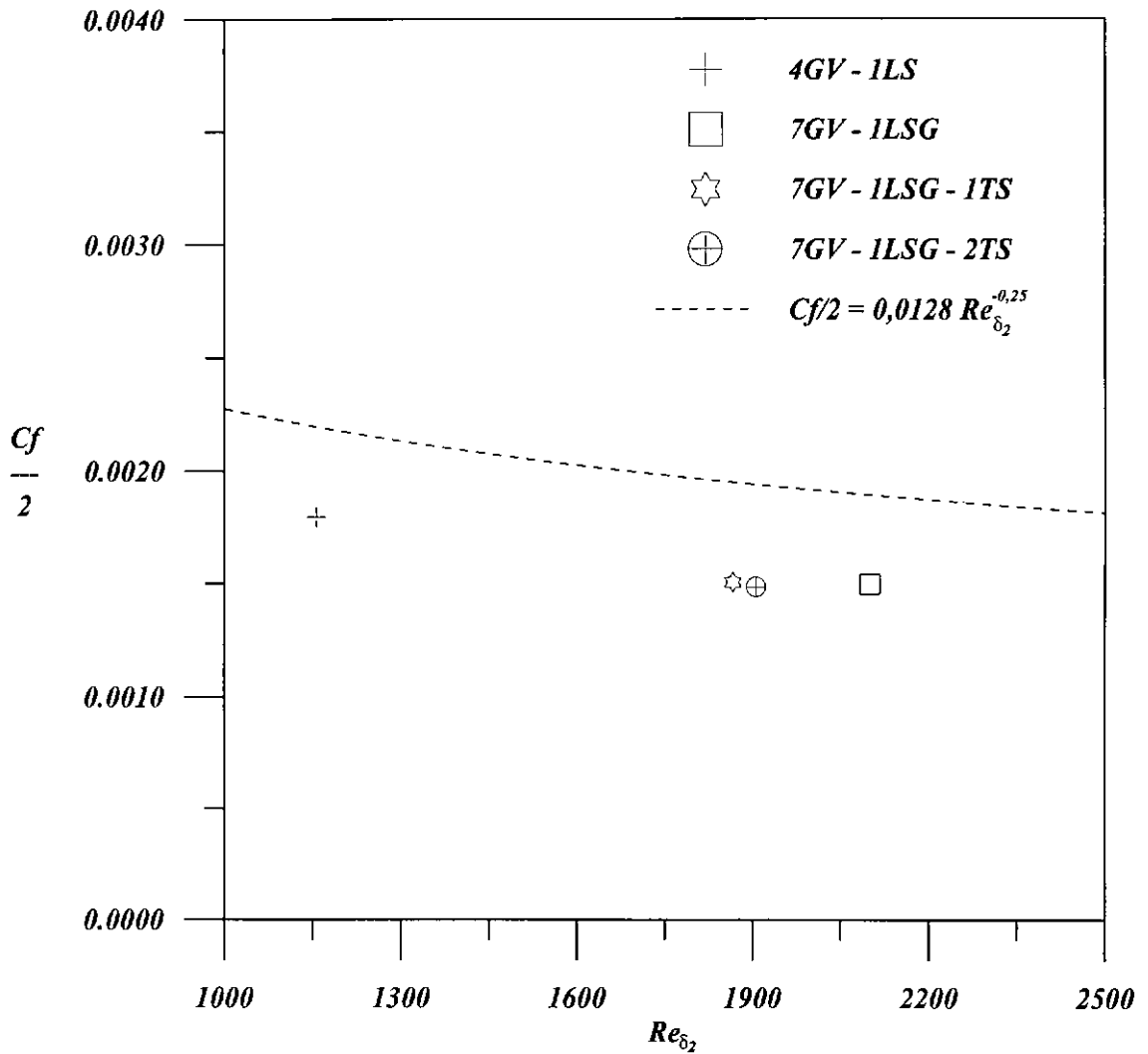


Figura 4.14 – Valores do coeficiente de atrito local na parede ($C_f/2$) para os experimentos que envolveram geradores de vórtices ($1,1 < Re_{\delta_2} \times 10^{-3} < 2,2$). Estação 3 ($x=2300 \text{ mm}$).

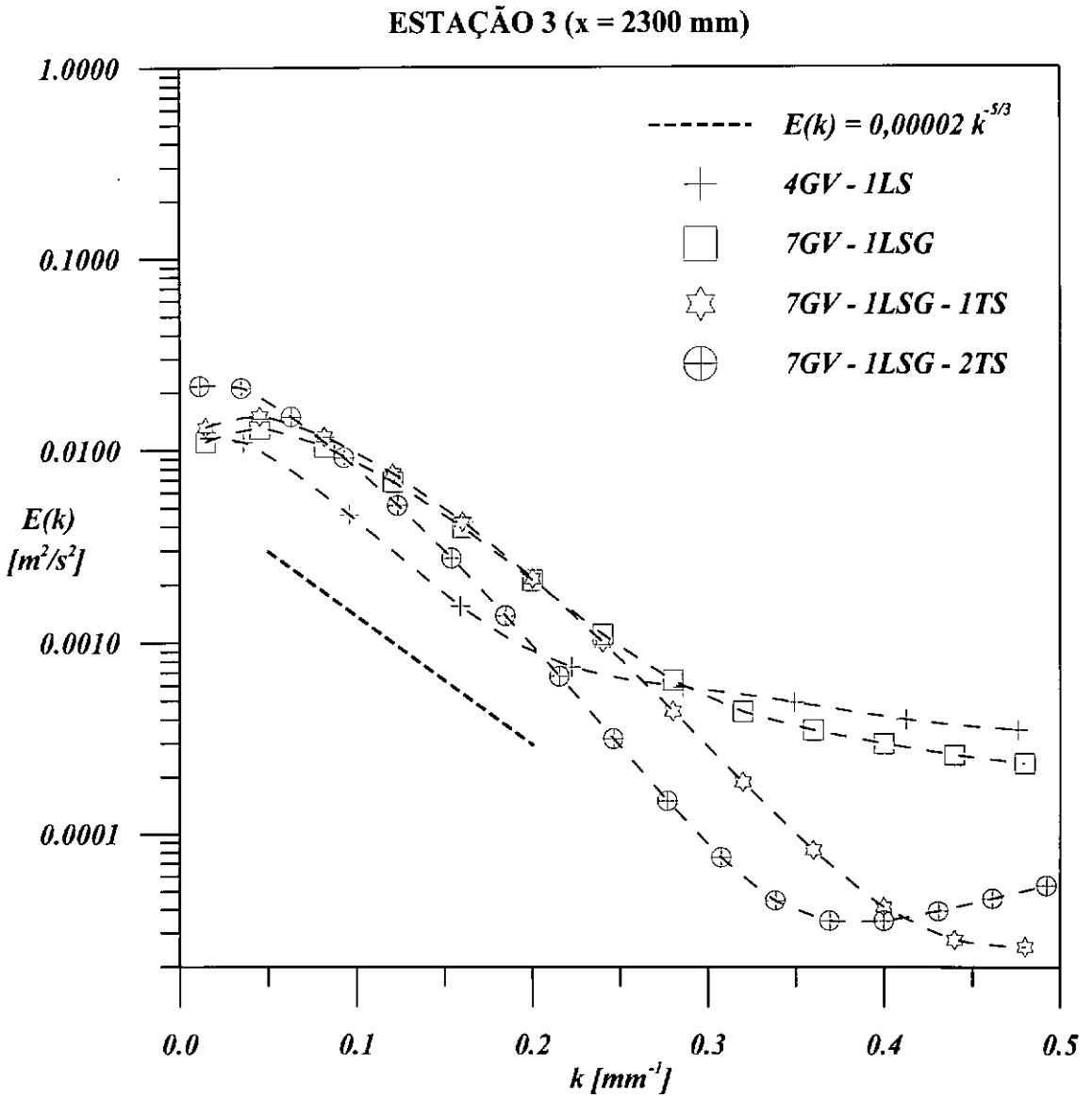


Figura 4.15 – Espectro longitudinal da turbulência dos perfis adquiridos com os geradores de vórtices elípticos.

4.3 – Resultados com a Floresta de Barras Circulares de 80 mm

Os perfis de velocidade média escritos em coordenadas internas da camada limite para as configurações que empregaram a floresta de barras circulares de 80 mm são apresentados na Figura (4.16). Além do alto grau de colapsamento dos perfis, a superposição da lei da parede para placas planas lisas sobre esta figura revela uma pequena diferença entre os coeficientes lineares das retas que ajustam os dados obtidos com este tipo de aparato e o coeficiente linear proposto por esta teoria. Todavia, a discordância entre os dados e este critério de validação não representa, necessariamente, uma desqualificação dos perfis em questão, já que a lei da parede é válida somente para camadas limite desenvolvidas sobre placas planas lisas, o que não é verificado na natureza. Uma discussão mais detalhada sobre este tema será feita no capítulo seguinte.

Um desvio dos dados com relação às curvas teóricas também é observado quando os perfis de velocidade média são expressos em coordenadas externas da camada limite (Figura (4.17)). Uma análise mais cuidadosa dos perfis desta figura mostra que um valor de $\Pi \approx 1,2$ ajusta a Equação (4.2) aos dados.

Os perfis lineares de velocidade média são apresentados na Figura (4.18). De acordo com estas curvas, camadas limite entre 13 cm e 14 cm são produzidas com este aparato de espessamento. Similarmente ao que foi observado nas Figuras (4.16) e (4.17), a aproximação proposta pela teoria de camadas limite sobre placas planas lisas não representa bem os campos de velocidade média para esta situação. Conforme pode ser verificado, um melhor ajuste dos dados é obtido quando $n \approx 0,28$ (Equação (4.4)), indicando a qualificação dos perfis adquiridos como perfis atmosféricos com este critério de validação.

Segundo a Figura (4.19), os valores de $C_f/2$ ao contrário do que acontece nos casos anteriores, demonstram boa concordância com a sua clássica previsão teórica para o domínio $3300 < Re_{\delta_2} < 4000$.

A exemplo do que acontece com as telas e com os geradores de vórtices, a teoria espectral de Kolmogorov é reafirmada em todos os experimentos (Figura (4.20)). Observe que a progressiva introdução de obstáculos provoca, ao contrário do que acontece com os geradores de vórtices, uma diminuição no pico de energia cinética turbulenta do escoamento, o que sugere uma correlação entre estes parâmetros.

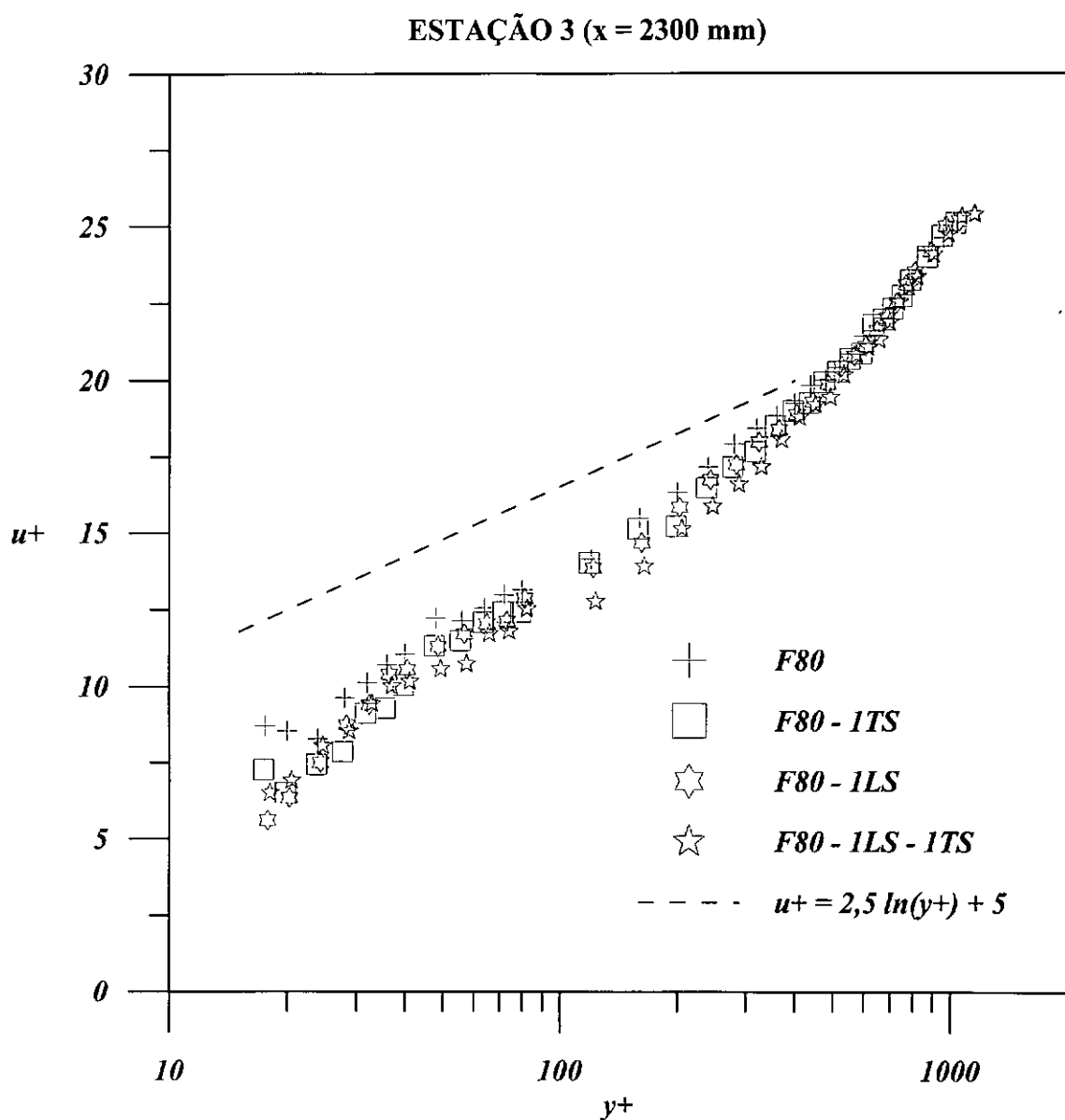


Figura 4.16 – Perfis de velocidade média em coordenadas internas para quatro arranjos geométricos envolvendo a floresta de barras circulares de 80 mm (*F80*) e barras retangulares transversais ao escoamento a montante (*leading strip* – *LS*) e a jusante (*trailing strip* – *TS*) da floresta.

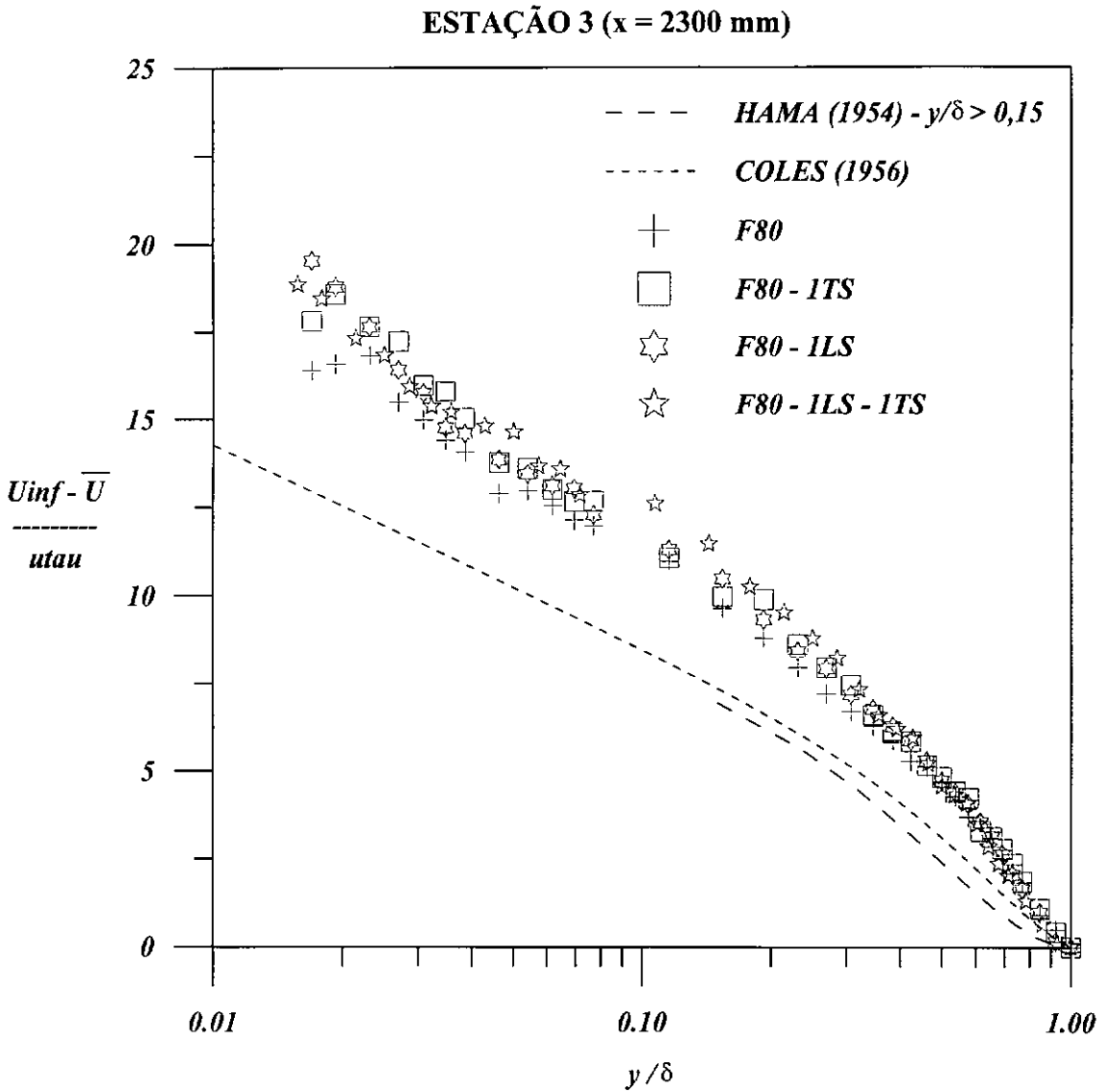


Figura 4.17 – Perfis de velocidade média expressos em coordenadas externas para quatro configurações envolvendo a floresta de barras circulares de 80 mm (F80) e barras retangulares transversais ao escoamento a montante (*leading strip* – LS) e a jusante (*trailing strip* – TS) da floresta.

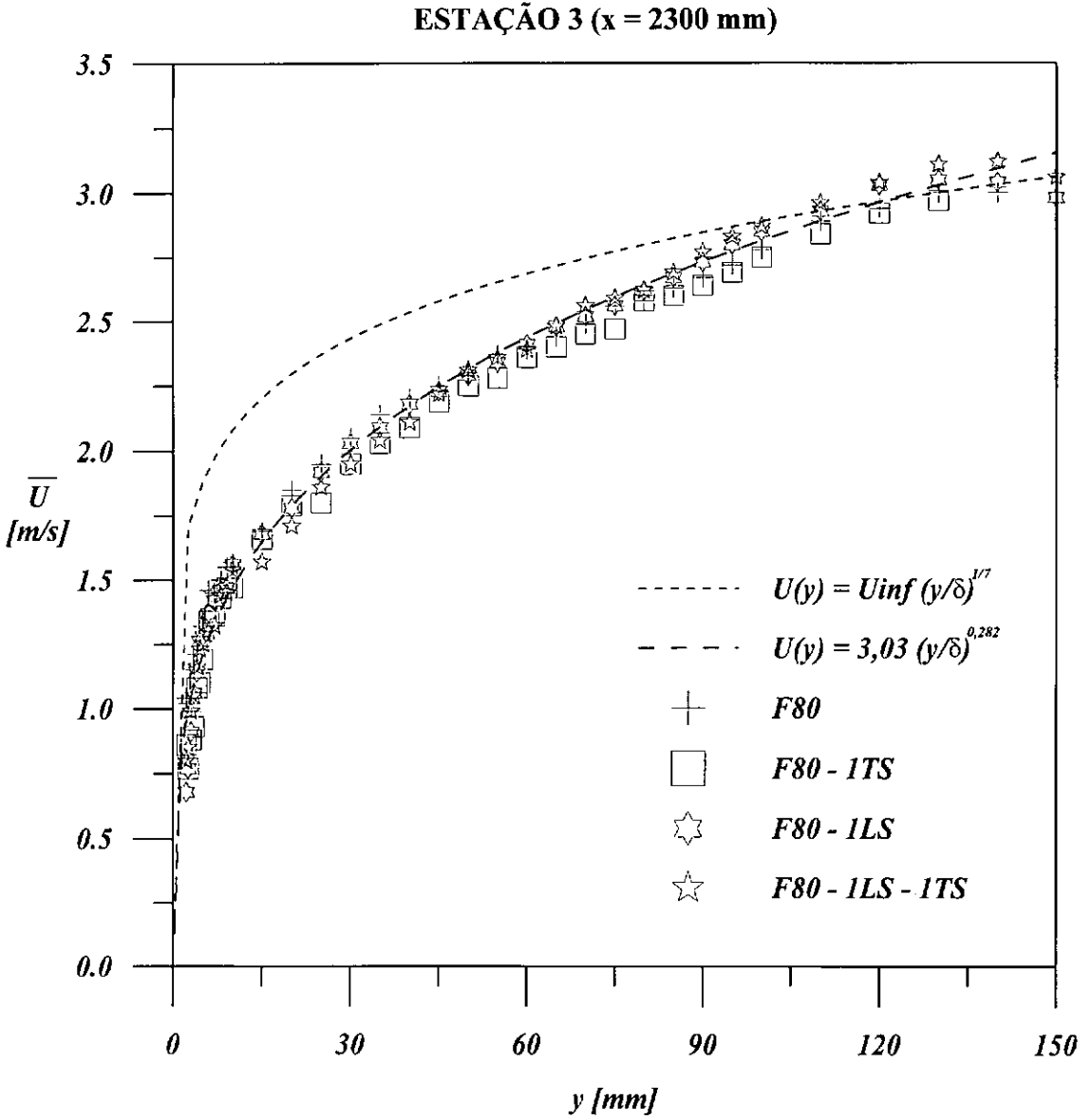


Figura 4.18 – Perfis lineares de velocidade média para as configurações que empregaram florestas de barras circulares de 80 mm. F80 – floresta de 80 mm; LS – leading strip e TS – trailing strip.

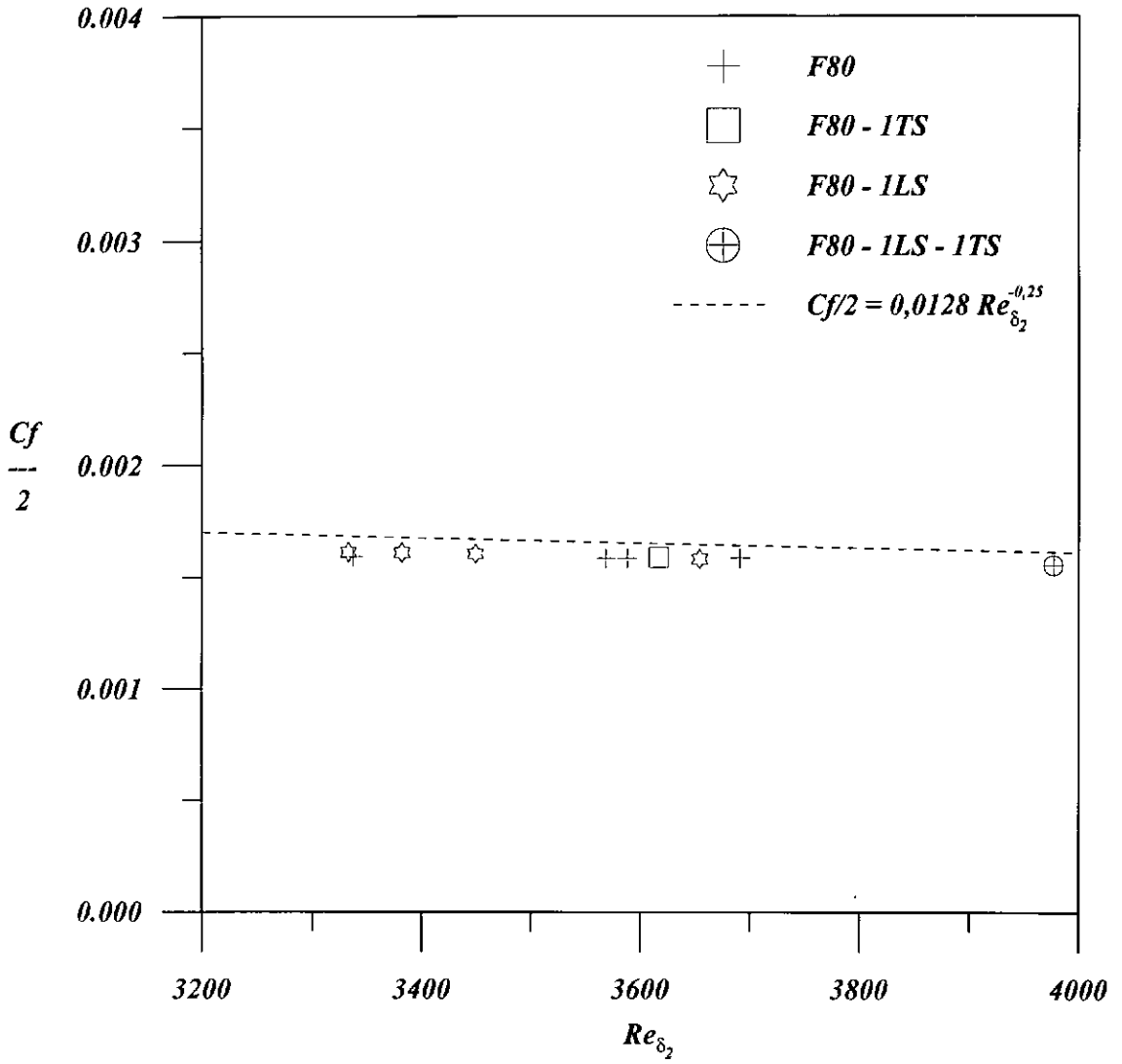


Figura 4.19 – Valores do coeficiente de atrito local na parede ($C_f/2$) para todos os experimentos que envolveram a floresta de barras circulares de 80 mm ($3,3 < Re_{\delta_2} \times 10^{-3} < 4$).

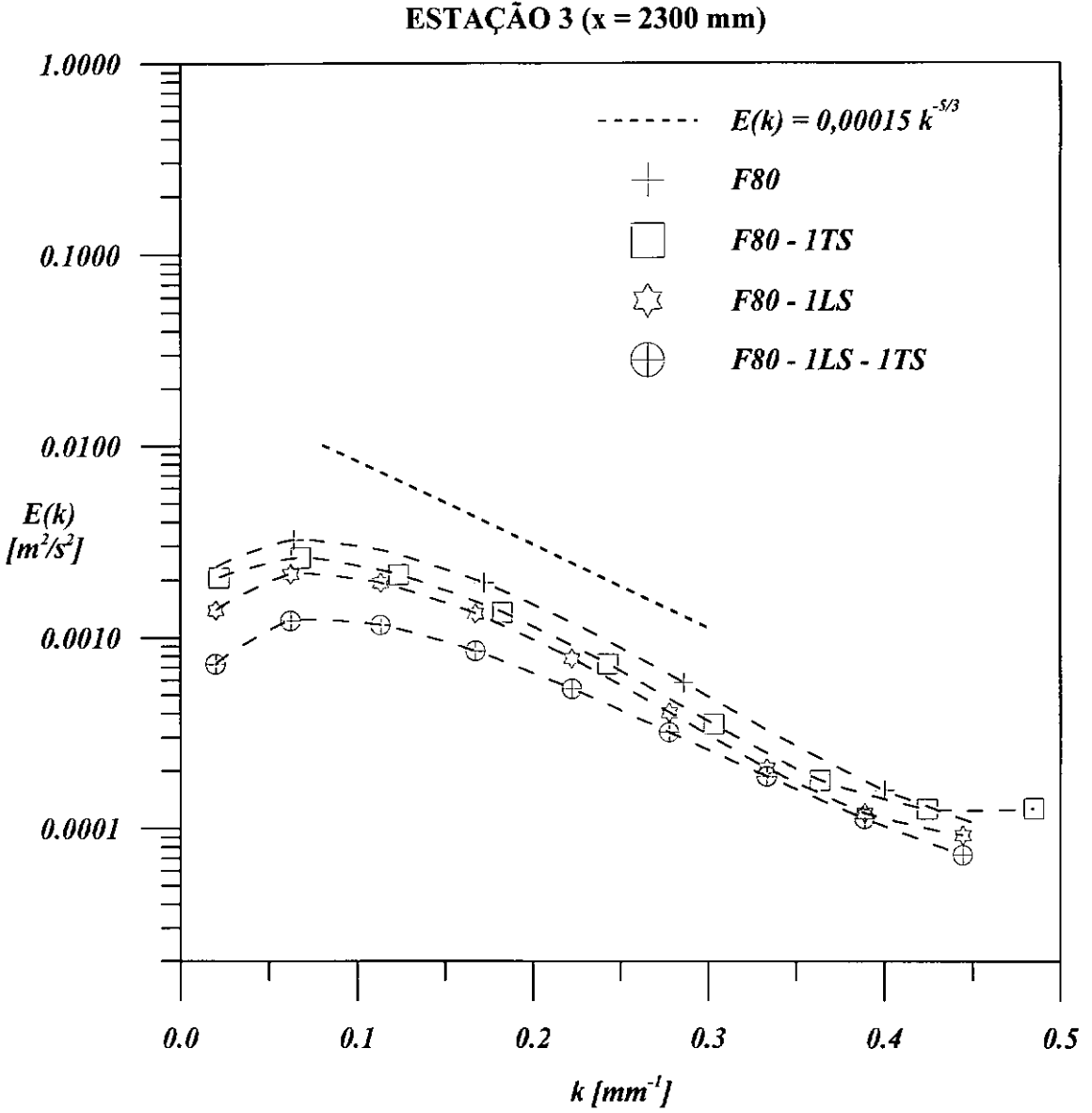


Figura 4.20 – Espectro longitudinal da turbulência dos perfis obtidos com a floresta de barras circulares com 80 mm.

Os resultados do cálculo da origem virtual (x_o) das camadas limite geradas com este dispositivo de espessamento são apresentados a seguir.

Configuração	F80	F80 – ITS	F80 – ILS	F80 – ITS – ILS
x_o [m]	8,79	9,03	8,91	9,68

Tabela 4.1 – Valores da origem virtual (x_o) para os experimentos que envolveram a floresta de barras circulares de 80 mm. Estação 3 ($x = 2300$ mm). F80 – floresta de barras circulares de 80 mm; LS – *leading strip* e TS – *trailing strip*.

Em linhas gerais, a Tabela (4.1) mostra que seria necessário um túnel de vento com aproximadamente 9 metros de seção de testes para que fossem produzidas camadas limite naturalmente desenvolvidas com espessuras equivalentes às obtidas com este aparato de engrossamento artificial.

4.4 – Resultados com a Floresta de Barras Circulares de 160 mm

Os resultados obtidos com a floresta de barras circulares de 80 mm impulsionaram a adoção desta técnica na tentativa de se gerar camadas limite ainda mais espessas. Neste sentido, já com a altura da floresta duplicada, os experimentos foram realizados utilizando os mesmos parâmetros testados anteriormente (em especial, espaçamento transversal de 10 mm entre barras consecutivas e estação de tomada de medidas 2300 mm a jusante da floresta). Como poderá ser observado, este arranjo geométrico gerou escoamentos que apresentavam uma pequena (porém considerável) discordância morfológica quando comparados com os perfis esperados.

Posteriormente, o espaçamento transversal entre as barras foi reduzido para 7 mm mantendo-se fixa a estação de tomada de medidas. Uma discordância análoga também fez com que este arranjo geométrico não promovesse perfis qualificados.

Por último, os experimentos foram feitos após a inclusão de dois metros adicionais de seção de testes, passando-se a estação de tomada de medidas para 4300 mm a jusante da floresta.

A seguir, para cada critério de validação utilizado são apresentadas três figuras referentes, respectivamente, aos três diferentes tipos de arranjos geométricos citados. Para uma melhor interpretação das figuras, os experimentos que empregaram

distanciamento transversal de 10 mm entre as barras são denotados pela legenda *F160(10)*. Da mesma forma, denotou-se por *F160(7)* os experimentos que empregaram distanciamento transversal de 7 mm entre as barras.

Os perfis de velocidade média escritos em coordenadas internas da camada limite para as configurações que empregaram a floresta de barras circulares de 160 mm são apresentados nas Figuras (4.21) a (4.23). Apesar da maior proximidade entre a região completamente turbulenta e a lei da parede para os perfis da Figura (4.21), uma pequena queda na taxa de crescimento dos valores da velocidade média é encontrada nesta figura para $700 \leq y^+ \leq 1000$, o que não ocorre nos perfis das Figuras (4.22) e (4.23). Deste modo, as configurações geométricas que geraram os dados da Figura (4.21) não proporcionaram perfis tão qualificados quanto as demais configurações analisadas com este critério de validação.

O mesmo comportamento é reafirmado quando os dados são apresentados escritos em variáveis externas da camada limite (Figuras (4.24) a (4.26)), sugerindo a desqualificação dos dados extraídos com a floresta de 160 mm com espaçamento de 10 mm entre barras (Figura (4.24)).

Diferentemente do que foi feito nas demais seções deste capítulo, os perfis lineares de velocidade média são apresentados adimensionalizados, conforme pode-se observar nas Figuras (4.27) a (4.29). A adimensionalização neste caso foi necessária pois as grandes diferenças existentes entre as velocidades de corrente livre (potenciais) de cada perfil dificultavam a apresentação de uma única curva de interpolação dos dados. Com este critério de validação, fica evidente a desqualificação dos dados produzidos com as configurações que envolveram a floresta de 160 mm com espaçamento transversal de 10 mm entre as barras (Figura (4.27)) e as configurações com espaçamento transversal de 7 mm antes da inclusão dos dois metros adicionais da seção de testes do túnel (Figura (4.28)), devido à distorções dos dados quando comparados com leis de potência ajustadas em ambas as figuras. Ainda segundo este critério de qualificação, os perfis obtidos com o espaçamento transversal de 7 mm entre as barras da floresta de 160 mm (após a inclusão dos dois metros de seção do túnel) revelaram uma boa concordância dos dados com uma lei de potência quando $n = 0,31$.

Segundo a Figura (4.30), todos os valores de $C_f/2$ obtidos com a floresta de 160 mm com espaçamento transversal de 7 mm entre barras (já com o comprimento da

seção de testes do túnel estendido) demonstraram excelente concordância com a sua clássica previsão teórica para o domínio $6500 < Re_{\delta_2} < 9000$.

O decaimento do espectro unidimensional de energia cinética turbulenta do escoamento também é observado em todos os experimentos (Figura (4.31) a (4.33)) como uma função do tipo $k^{-5/3}$ em seus subintervalos inerciais. Entretanto, nenhuma correlação explícita entre a introdução sucessiva de obstáculos no escoamento e o respectivo aumento (ou diminuição) no pico de energia cinética é observada, o que não permite a inferência de uma possível relação entre estes parâmetros.

Os valores da origem virtual (x_o) para as configurações da floresta de 160 mm que empregaram espaçamento transversal de 7 mm entre barras (após a inclusão dos dois metros adicionais da seção de testes) são apresentados na tabela a seguir:

<i>Configuração</i>	<i>F160 – 1LS – 4TS</i>	<i>F160 – 1LS – 1TS – 1BC(H)</i>	<i>F160 – 1LS – 2TS – 1BC(H)</i>
x_o [m]	25,09	22,54	25,09
<i>Configuração</i>	<i>F160 – 1LS – 3TS – 1BC(H)</i>	<i>F160 – 1LS – 4TS – 1BC(H)</i>	<i>F160 – 1LS – 5TS – 1BC(H)</i>
x_o [m]	23,14	23,71	24,66

Tabela 4.2 – Valores da origem virtual (x_o) para os experimentos que envolveram a floresta de barras circulares de 160 mm. Estação 3 ($x = 4300$ mm). *F160* – floresta de barras circulares de 160 mm; *LS* – *leading strip*; *TS* – *trailing strip* e *BC(H)* – barra circular no topo da floresta.

Os valores de x_o encontrados na Tabela (4.2) indicam que seriam necessárias seções de testes entre 22 e 25 metros de comprimento (cinco vezes maiores que a utilizada nos experimentos) para que fossem geradas camadas limite naturalmente desenvolvidas de espessuras equivalentes às camadas limite artificialmente espessadas produzidas neste trabalho.

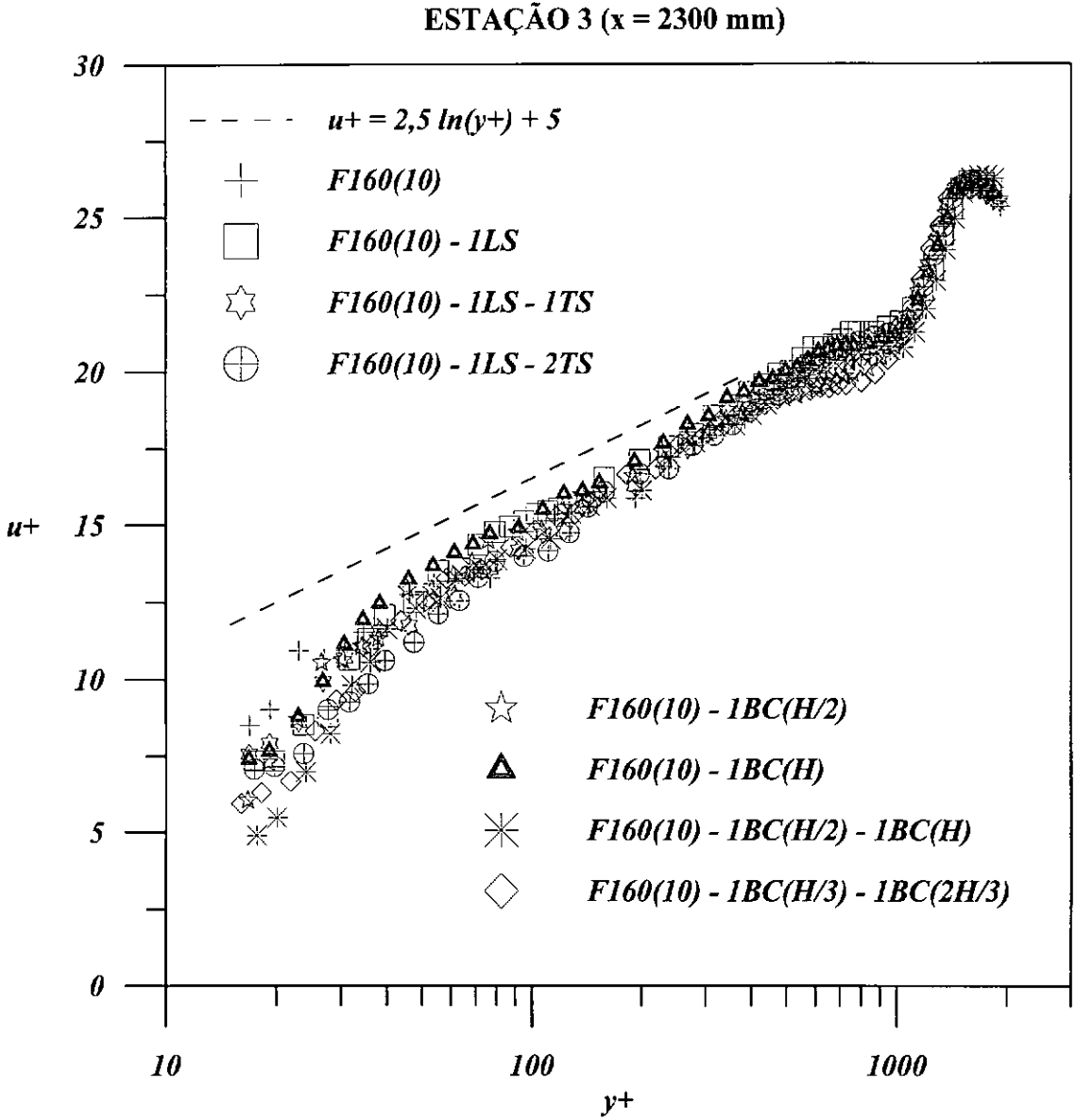


Figura 4.21 – Perfis de velocidade média em coordenadas internas para os arranjos geométricos envolvendo a floresta de barras circulares de 160 mm com espaçamento transversal de 10 mm entre as barras (*F160(10)*), barras circulares transversais ao escoamento *BC*) e barras retangulares transversais ao escoamento a montante (*leading strip – LS*) e a jusante (*trailing strip – TS*) da floresta. A cota de cada *BC* em relação à altura da floresta ($H=160\text{ mm}$) é denotada pela expressão entre parênteses.

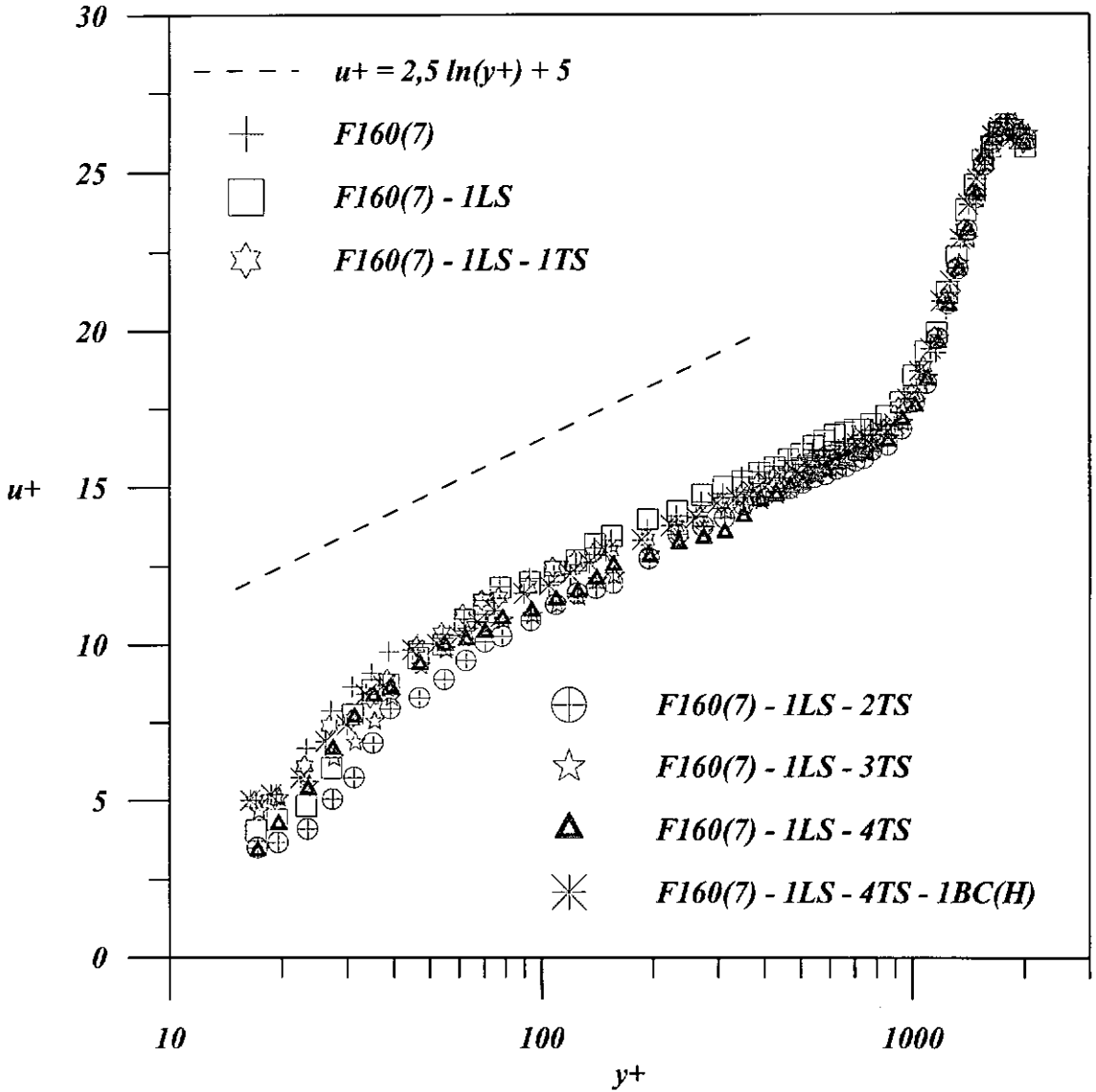
ESTAÇÃO 3 ($x = 2300$ mm)

Figura 4.22 – Perfis de velocidade média expressos em coordenadas internas para os arranjos geométricos envolvendo a floresta de barras circulares de 160 mm com espaçamento transversal de 7 mm entre as barras ($F160(7)$), uma barra circular transversal ao escoamento no topo da floresta ($BC(H)$) e barras retangulares transversais ao escoamento a montante (*leading strip* – LS) e a jusante (*trailing strip* – TS) da floresta. Comprimento da seção de testes do túnel: 3 m.

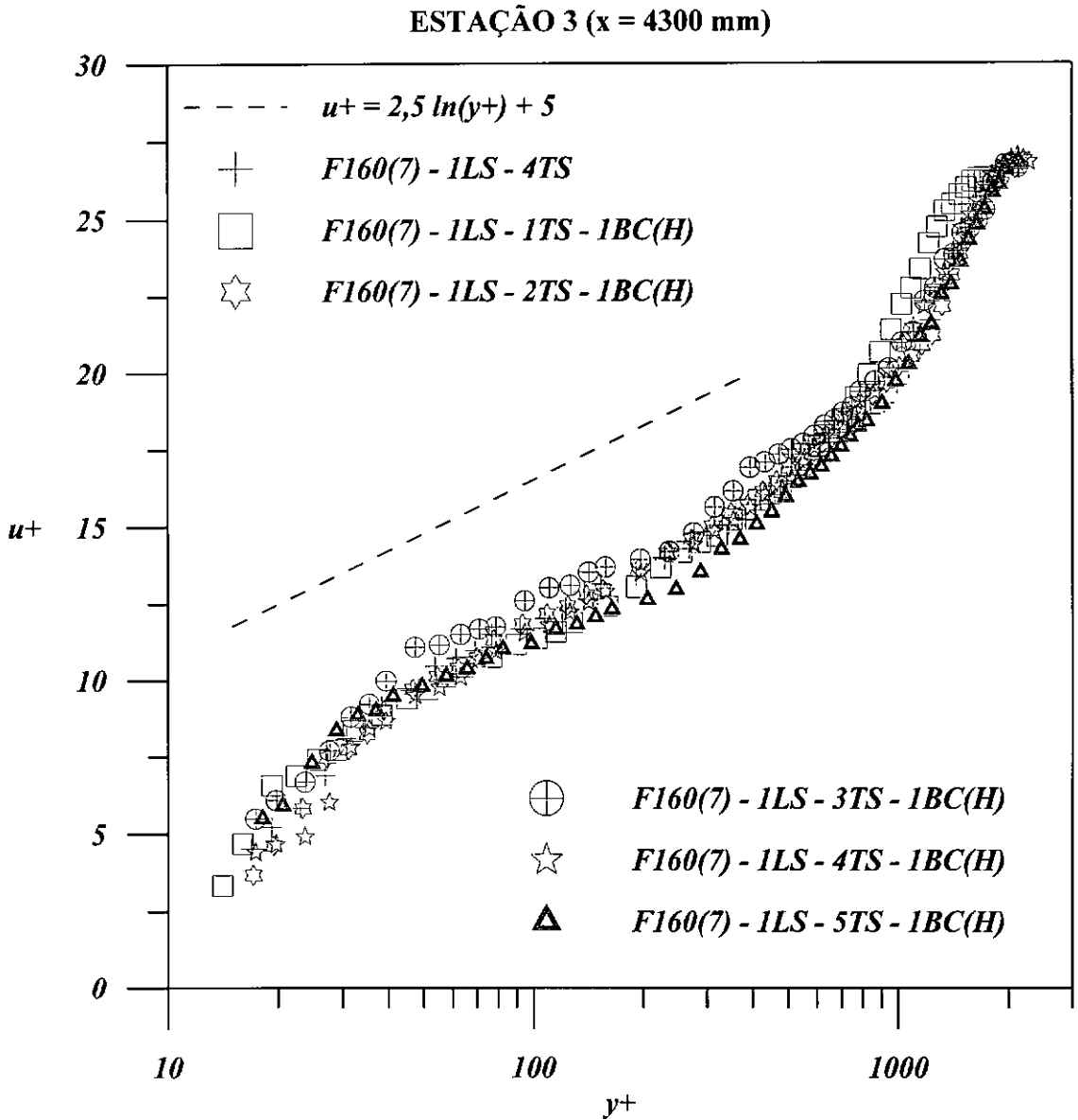


Figura 4.23 – Perfis de velocidade média apresentados em coordenadas internas para os experimentos que empregaram a floresta de barras circulares de 160 mm com espaçamento transversal de 7 mm entre as barras (*F160(7)*). *BC(H)* – barra circular transversal ao escoamento no topo da floresta, *LS* – *leading strip* e *TS* – *trailing strip*. Comprimento da seção de testes do túnel: 5 m.

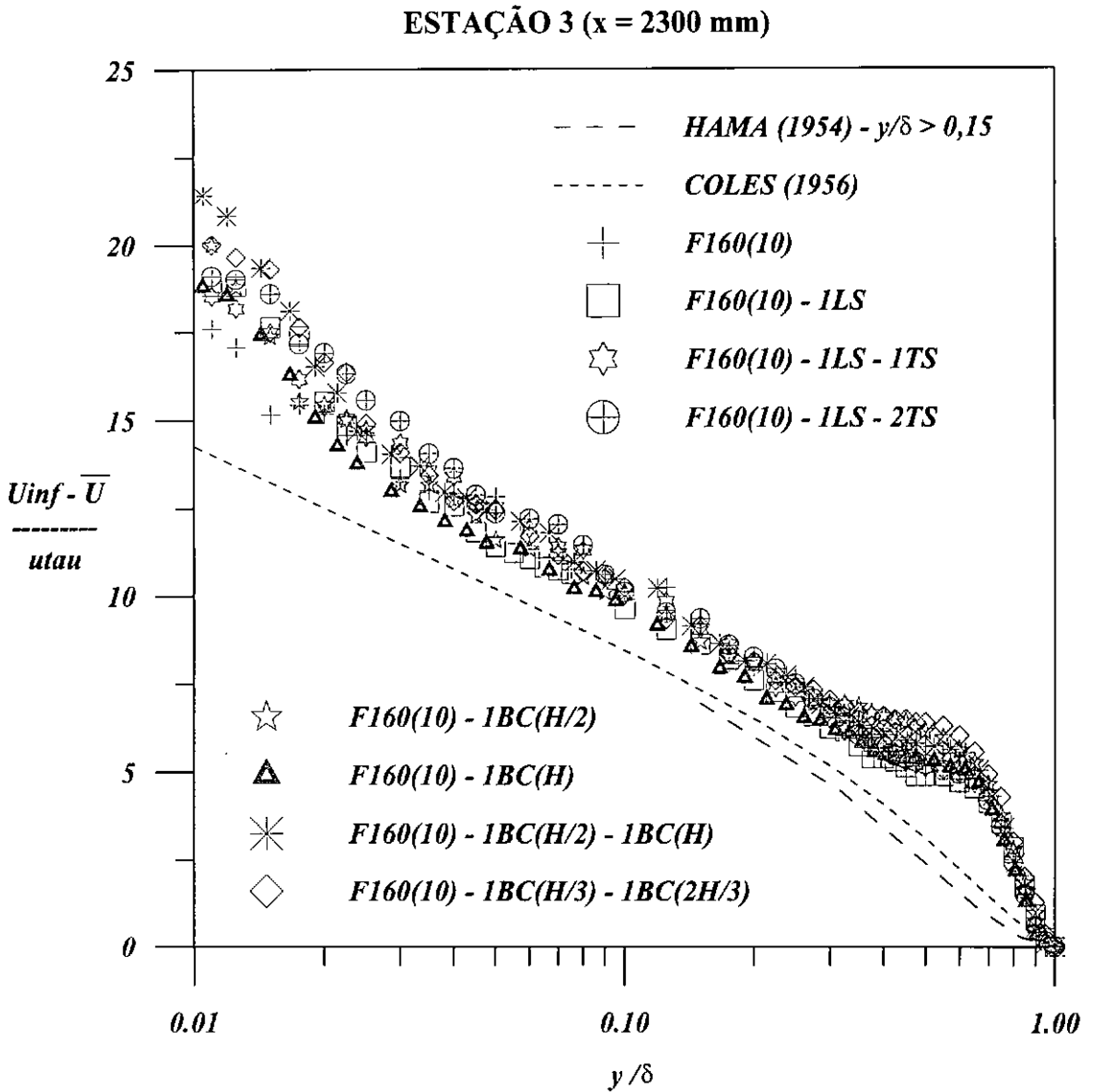


Figura 4.24 – Perfis de velocidade média apresentados em coordenadas externas para as configurações que envolveram a floresta de barras circulares de 160 mm com espaçamento transversal de 10 mm entre as barras (F160(10)). BC – barras circulares transversais ao escoamento, LS – leading strip e TS – trailing strip. $H=160$ mm.

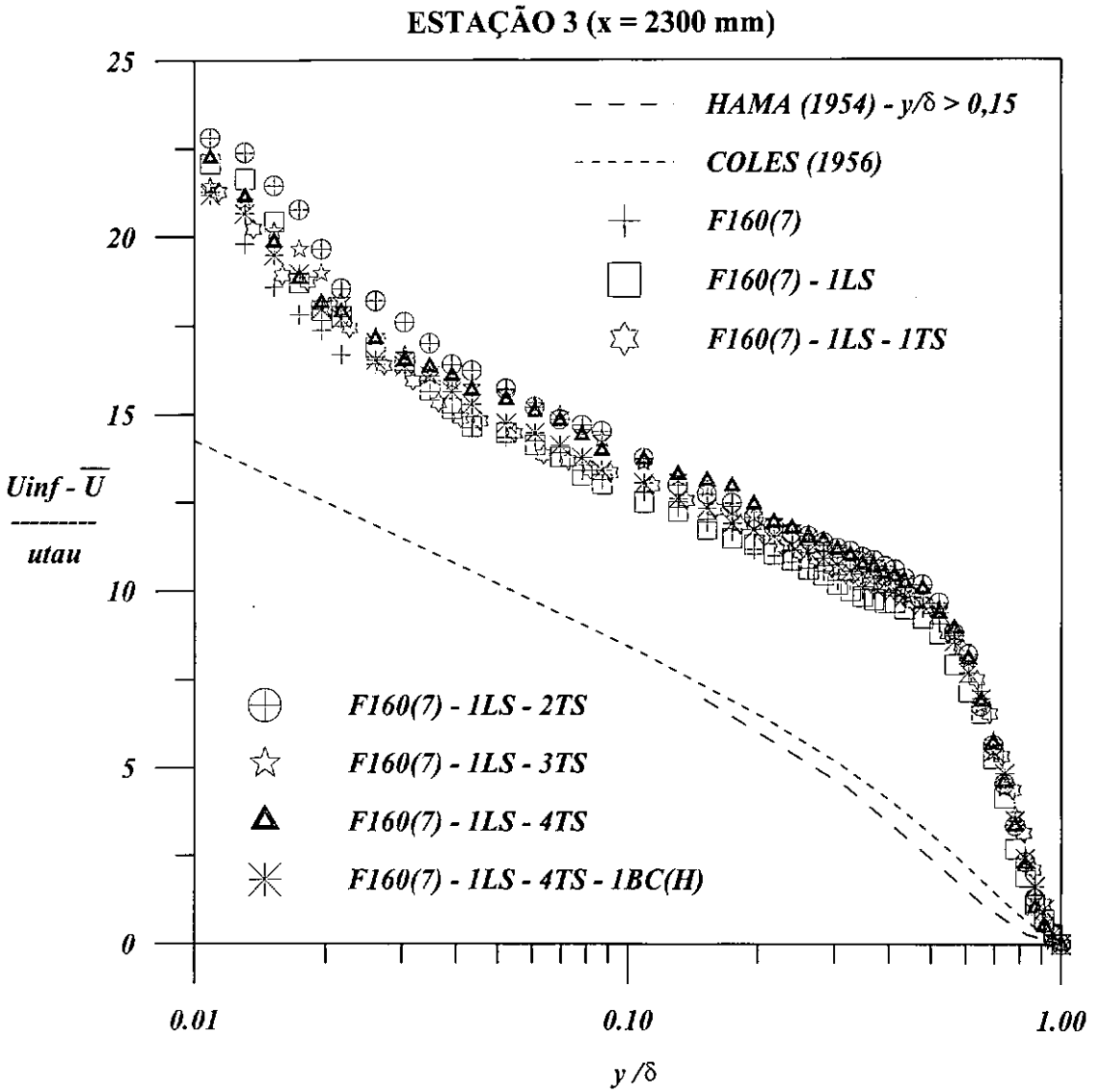


Figura 4.25 – Perfis de velocidade apresentados em coordenadas externas para as configurações que envolveram a floresta de barras circulares de 160 mm com espaçamento transversal de 7 mm entre as barras (F160(7)). BC(H) – barra circular transversal ao escoamento no topo da floresta, LS – leading strip e TS – trailing strip. Comprimento da seção de testes: 3 m.

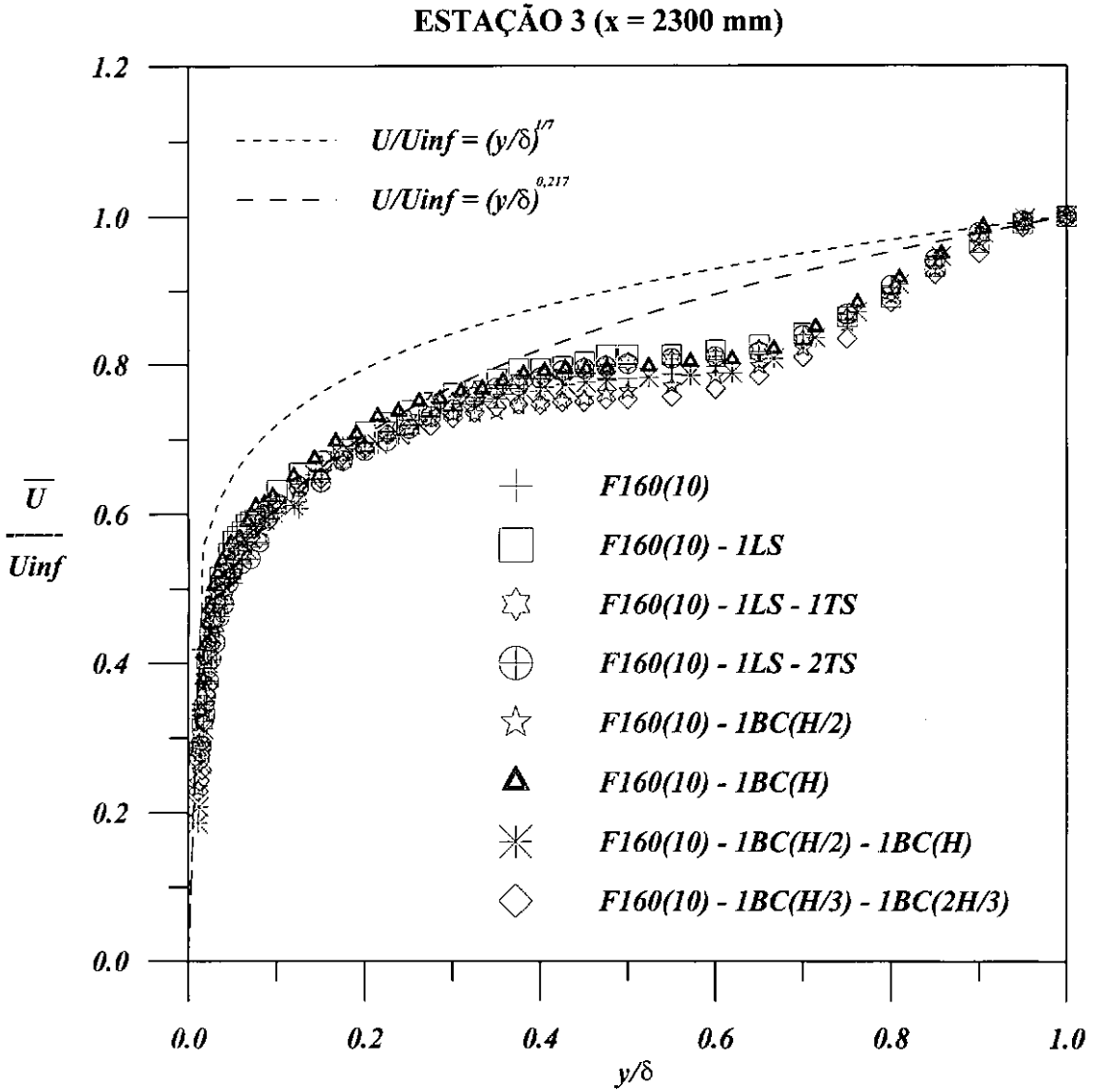


Figura 4.27 – Perfis de velocidade média adimensionalizados para os arranjos que empregaram a floresta de barras circulares de 160 mm com espaçamento transversal de 10 mm entre as barras (*F160(10)*).

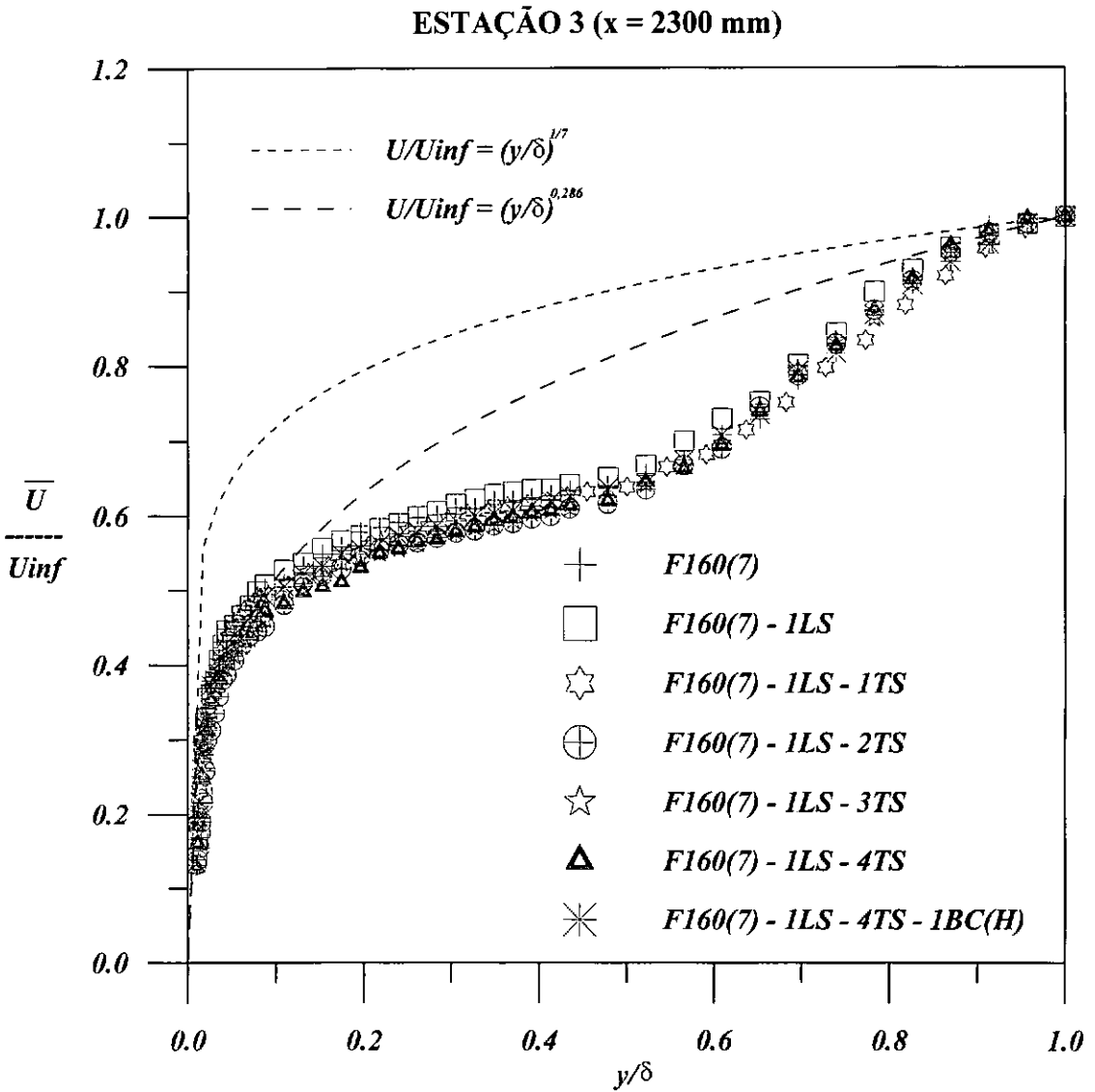


Figura 4.28 – Perfis de velocidade média adimensionalizados para os experimentos conduzidos com a floresta de 160 mm com espaçamento de 7 mm entre as barras (*F160(7)*). Comprimento da seção de testes: 3 m.

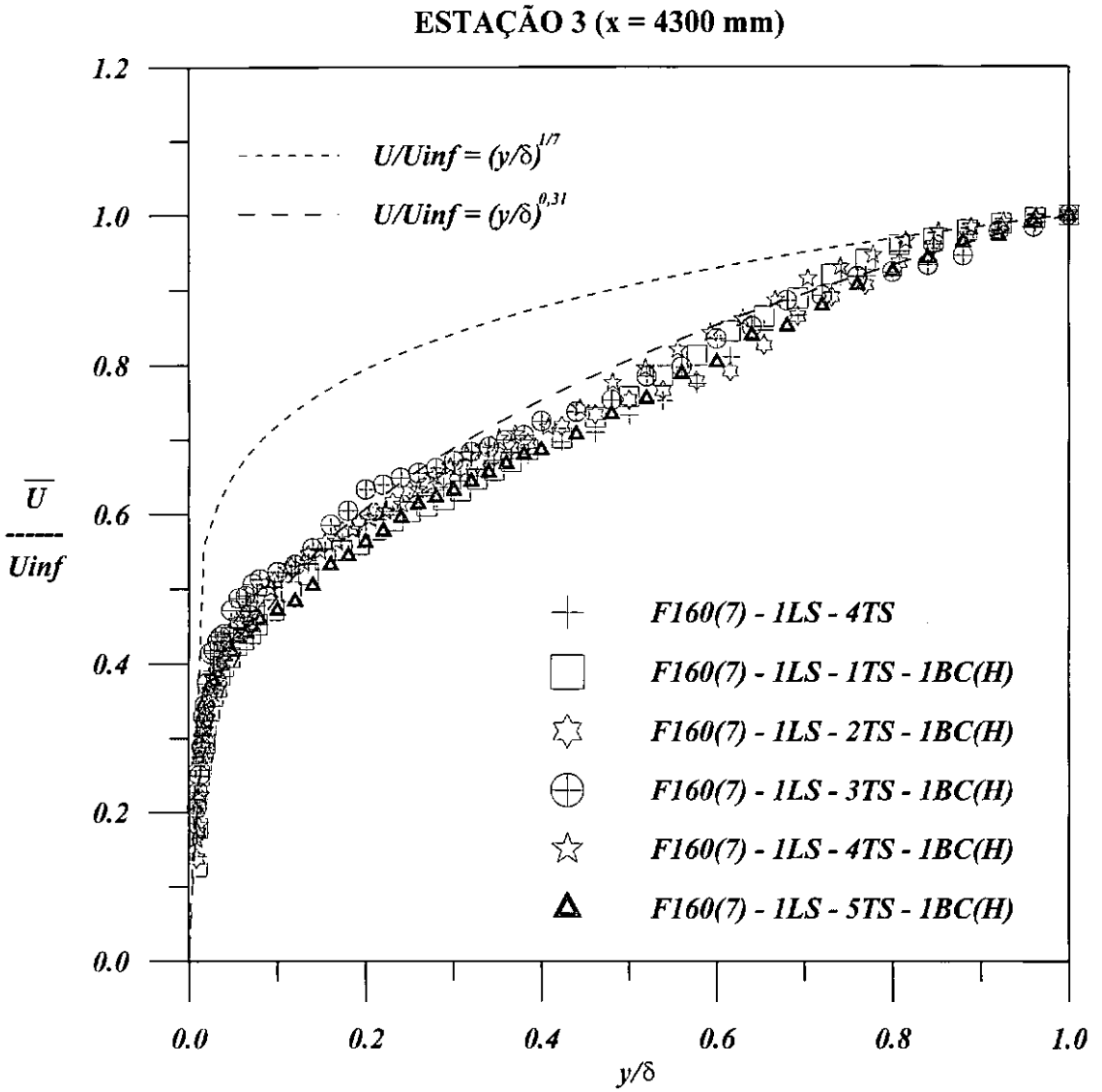


Figura 4.29 – Perfis de velocidade adimensionalizados para os experimentos realizados com a floresta de 160 mm com espaçamento de 7 mm entre as barras. Comprimento da seção de testes do túnel: 5 m.

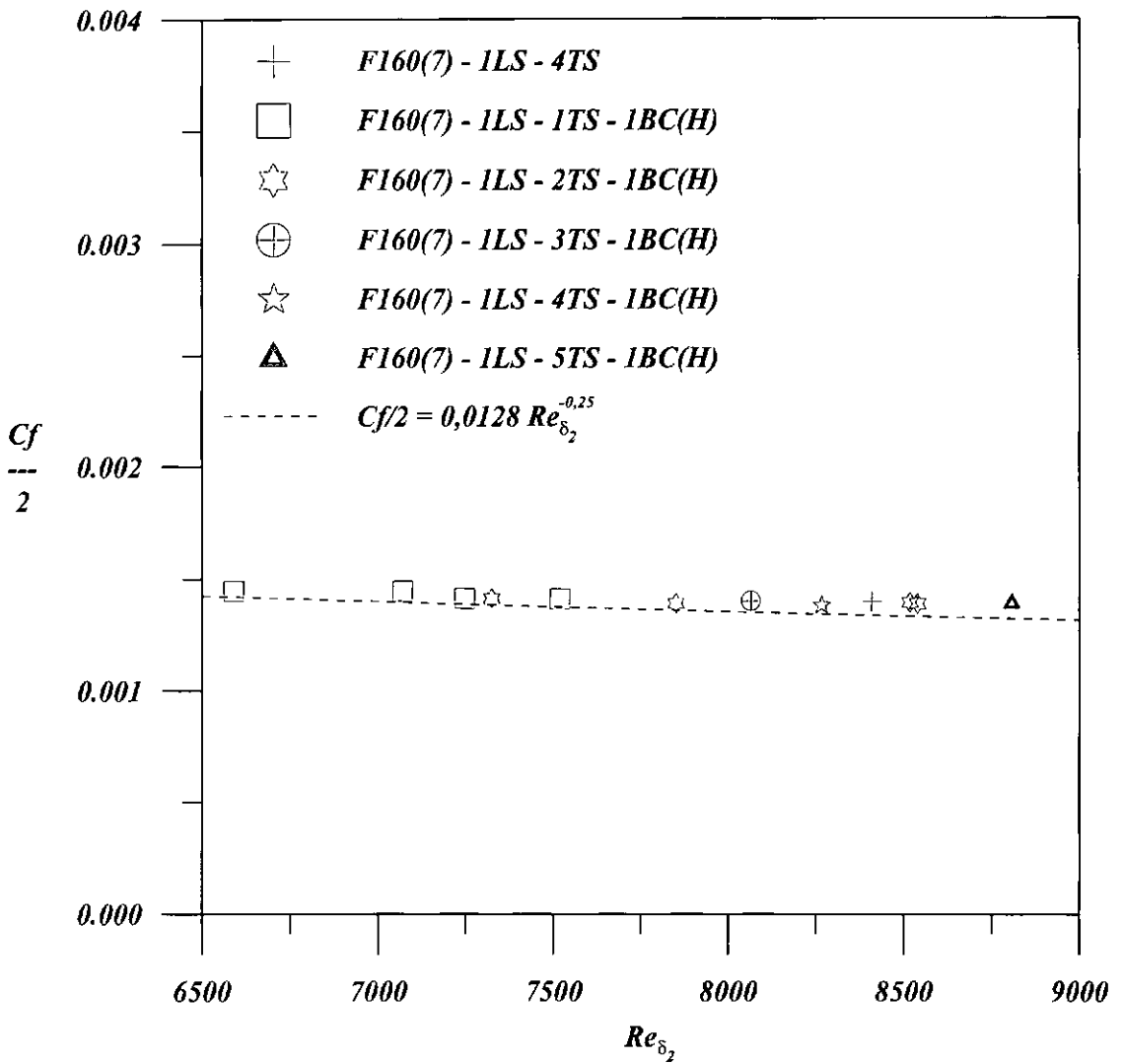


Figura 4.30 – Valores do coeficiente de atrito local na parede ($C_f/2$) para diversos experimentos que envolveram a floresta de 160 mm com espaçamento de 7 mm entre barras ($6,5 < Re_{\delta_2} \times 10^{-3} < 9$). Comprimento da seção de testes do túnel: 5 m.

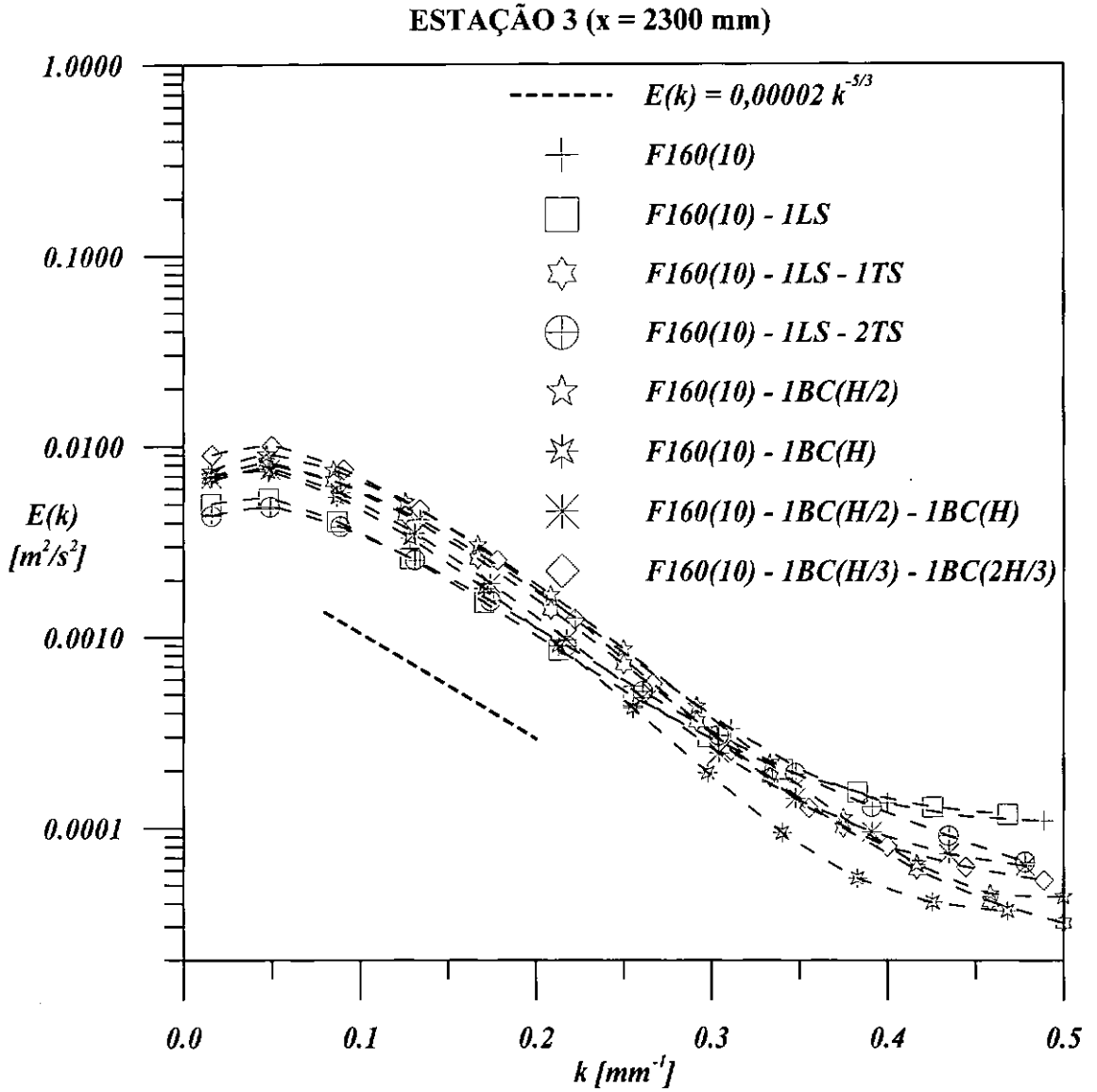


Figura 4.31 – Espectro longitudinal da turbulência para diversas configurações com a floresta de barras circulares de 160 mm com espaçamento transversal de 10 mm entre as barras ($F160(10)$).

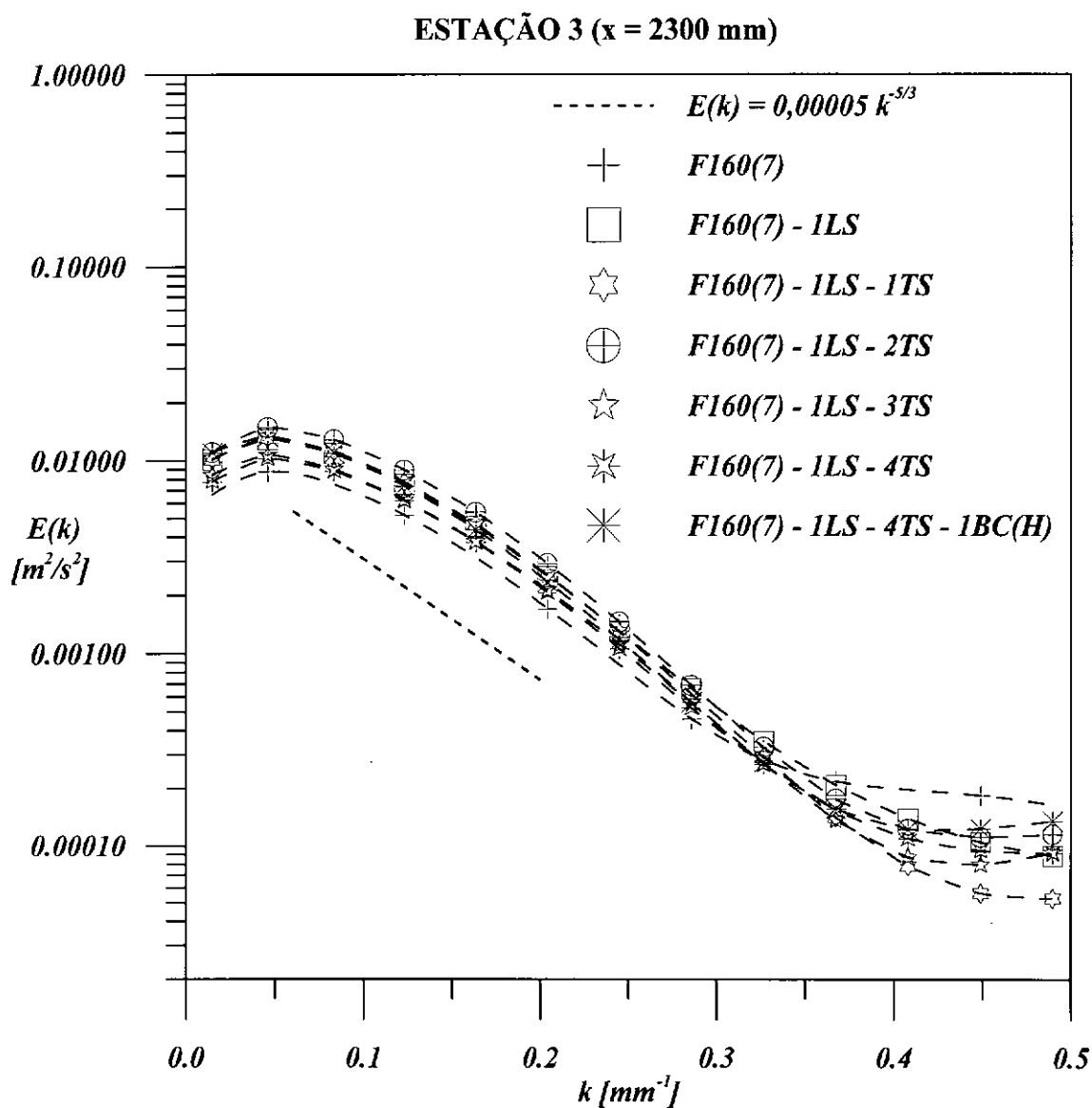


Figura 4.32 – Espectro longitudinal da turbulência para as configurações com a floresta de 160 mm com espaçamento de 7 mm. Comprimento da seção de testes: 3 m.

ESTAÇÃO 3 (x = 4300 mm)

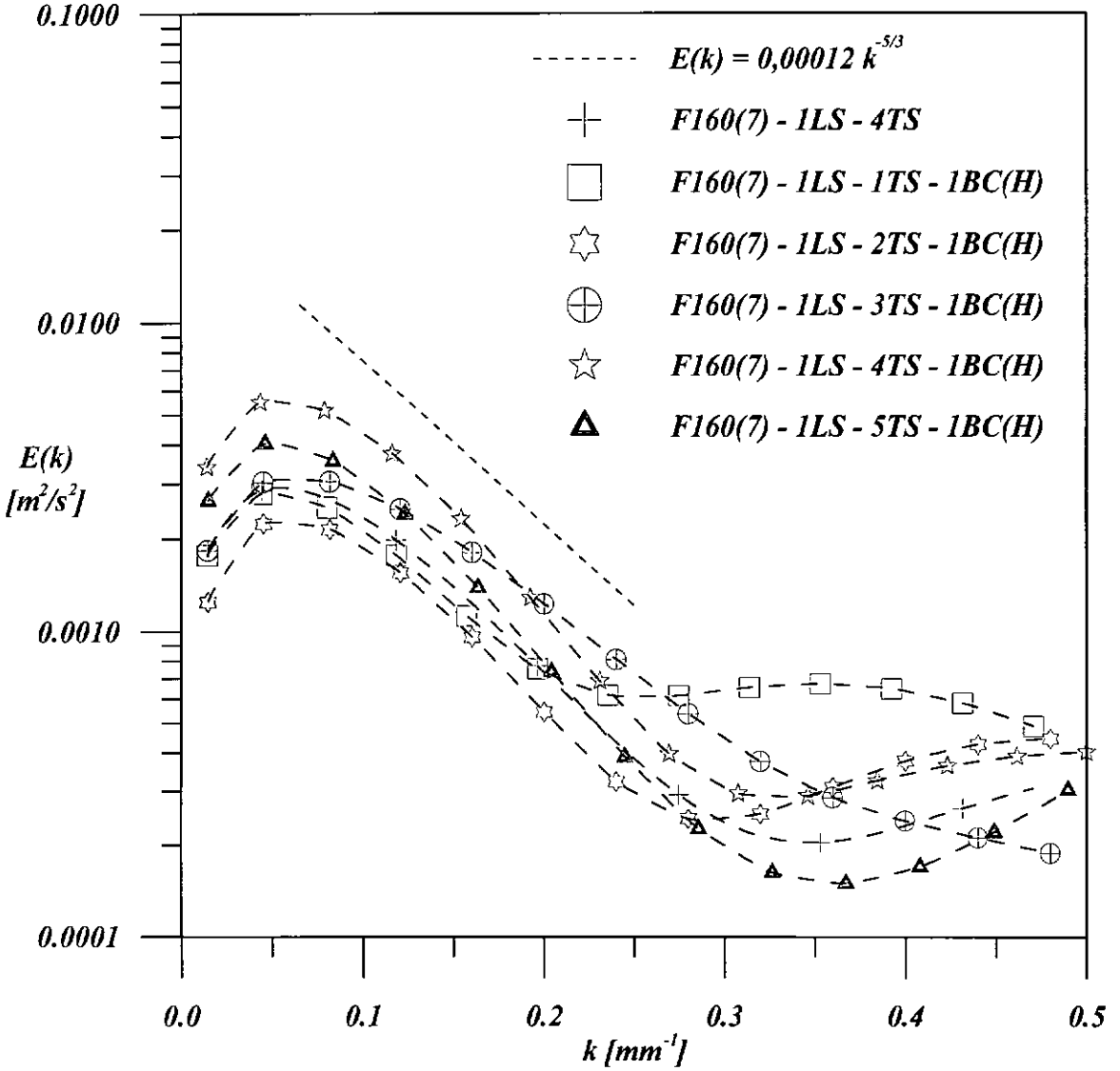


Figura 4.33 – Espectro longitudinal da turbulência para os experimentos realizados com a floresta de 160 mm com espaçamento de 7 mm. Comprimento da seção de testes: 5 m.

4.5 – Resultados da Visualização do escoamento

Por problemas já mencionados no Capítulo 3, a visualização do escoamento se deteve apenas à observação da estrutura formada imediatamente após a floresta de barras circulares. Neste sentido, pouca informação referente ao crescimento e ao equilíbrio da camada limite pôde ser apreciada.

Uma sequência de imagens foi tomada para a floresta de barras circulares de 160 mm com espaçamento de 7 mm entre barras consecutivas. Ao todo, sessenta imagens foram adquiridas numa frequência de aquisição de 30 Hz, totalizando um tempo de amostragem de 2 s. Entretanto, a apresentação sequenciada das imagens ficou bastante comprometida devido à baixa qualidade dos arquivos gerados, impossibilitando, deste modo, sua impressão neste documento. Assim, é apresentada a seguir somente uma imagem instantânea do escoamento (após o tratamento digital).



Figura 4.34 – Tomada visual do escoamento ao redor da floresta de barras circulares de 160 mm.

A estrutura do escoamento resultante após a passagem pelo aparato de engrossamento é mostrada acima. A perturbação provocada pela floresta no fluido é claramente observada notando-se o contraste existente entre as regiões interna e externa do escoamento. O vapor de glicerina injetado no escoamento também permite a observação de uma estrutura pouco comportada, que assume variações periódicas em sua espessura. Este comportamento intermitente, primeiramente observado por KLEBANOFF (1955) para camadas limite turbulentas sem gradientes de pressão, também é verificado com este aparato quando são efetuadas tomadas temporais deste experimento.

5. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

A aplicação da teoria de camadas limite sobre placas planas lisas para a validação de camadas limite artificialmente espessadas é questionável, conforme observado no capítulo anterior. Entretanto, sua utilização tornou-se essencial no decorrer deste trabalho ao servir como parâmetro de balizamento para os perfis adquiridos. A partir da sucessiva repetição de desvios desta teoria com os dados coletados em todos os experimentos, verificou-se a necessidade de se empregar algum outro parâmetro, mais refinado, para a validação definitiva das configurações que propiciaram os melhores perfis. Sendo assim, a proposta principal deste capítulo consiste em interpretar o significado físico destes desvios relacionando-os com o comportamento de um perfil de camada limite atmosférica neutra extraído de uma estação meteorológica.

Os perfis de velocidade de camadas limite atmosféricas frequentemente são adimensionalizados utilizando-se o comprimento de rugosidade aerodinâmico que, conforme abordado no Capítulo 2, representa a altura média da rugosidade do terreno, através da seguinte equação

$$\frac{u}{u_{\tau}} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{y}{y_0}\right) \quad (5.1)$$

Uma outra forma bastante utilizada na apresentação de perfis de camada limite refere-se à lei da parede que, em sua forma literal, pode ser expressa como

$$\frac{u}{u_{\tau}} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{yu_{\tau}}{\nu}\right) + A \quad (5.2)$$

Uma relação útil entre os parâmetros A e y_0 pode ser deduzida igualando-se o segundo membro das Equações (5.1) e (5.2) acima

$$\frac{1}{k} \ln\left(\frac{y}{y_0}\right) = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{yu_{\tau}}{\nu}\right) + A \quad (5.3)$$

ou ainda

$$\frac{1}{k} \ln y - \frac{1}{k} \ln y_0 = \frac{1}{k} \ln y + \frac{1}{k} \ln \left(\frac{u_\tau}{v} \right) + A \quad (5.4)$$

Eliminando-se o termo $\frac{1}{k} \ln y$ em ambos os membros e rearranjando a Equação (5.4), tem-se que

$$A = -\frac{1}{k} \ln \left(\frac{y_0 u_\tau}{v} \right) \quad (5.5)$$

De posse da Equação (5.5), é possível se determinar o comprimento de rugosidade aerodinâmico de qualquer camada limite artificialmente espessada e comparar este dado com os valores de y_0 estimados para diversos tipos de terrenos existentes na natureza. Entretanto, foi observado com o decorrer dessa análise que a validade da Equação (5.5) depende do método de cálculo da velocidade de atrito u_τ , sendo a determinação de uma reta que interpola a região completamente turbulenta o método que possibilita resultados mais acurados.

Um perfil atmosférico em condições de estratificação térmica neutra (MICKLE et al., 1988) é apresentado a seguir, superposto aos dados extraídos com a floresta de barras circulares de 160 mm. A Equação (5.5) foi empregada para a determinação do comprimento de rugosidade (y_0) que, para o perfil de CLA neutra em questão, resultou em $y_0 \cong 3$ cm. O mesmo valor de y_0 é apresentado em MICKLE et al. (1988), sugerindo a validade da Equação (5.5).

A Figura (5.1) apresenta os dados de três configurações distintas envolvendo a floresta de 160 mm adimensionalizados através de seus comprimentos de rugosidade aerodinâmicos (y_0). Para todas as configurações testadas, valores de y_0 em torno de 0,15 mm foram encontrados. Nota-se nesta figura um grande grau de colapsamento dos dados em sua região completamente turbulenta quando comparados com a CLA neutra e com a previsão teórica. Já a similaridade da região externa entre os perfis obtidos no túnel e o perfil atmosférico pode ser observada através da Figura (5.2). Por fim, a apresentação linear dos dados é mostrada na Figura (5.3). Uma boa concordância dos dados com a CLA é encontrada nesta figura nas regiões $0,2 \leq y/\delta \leq 0,6$ e $y/\delta \geq 0,8$.

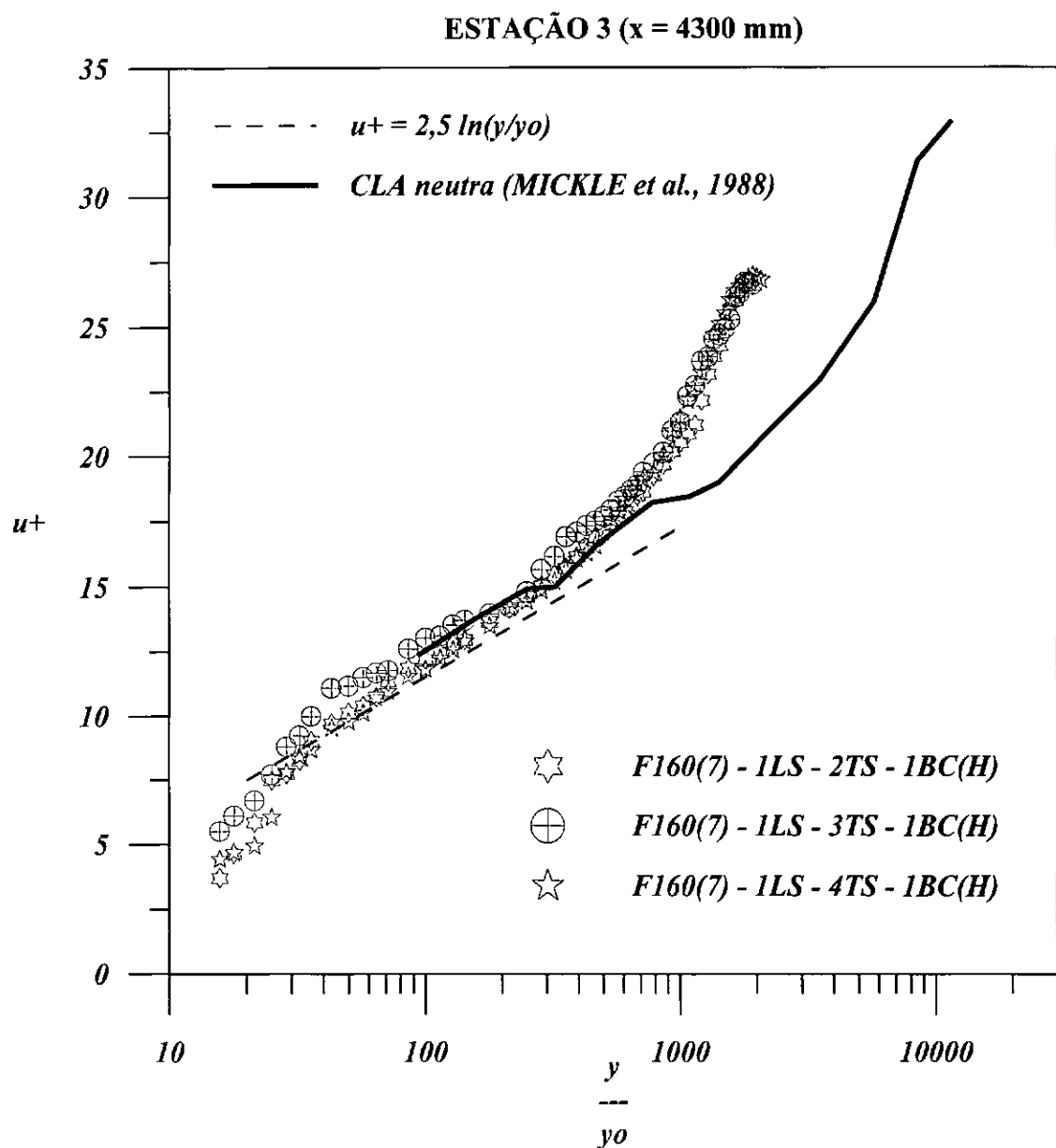


Figura 5.1 – Perfis de velocidade média apresentados em coordenadas internas da camada limite para três configurações distintas envolvendo a floresta de 160 mm comparados com um perfil de CLA neutra.

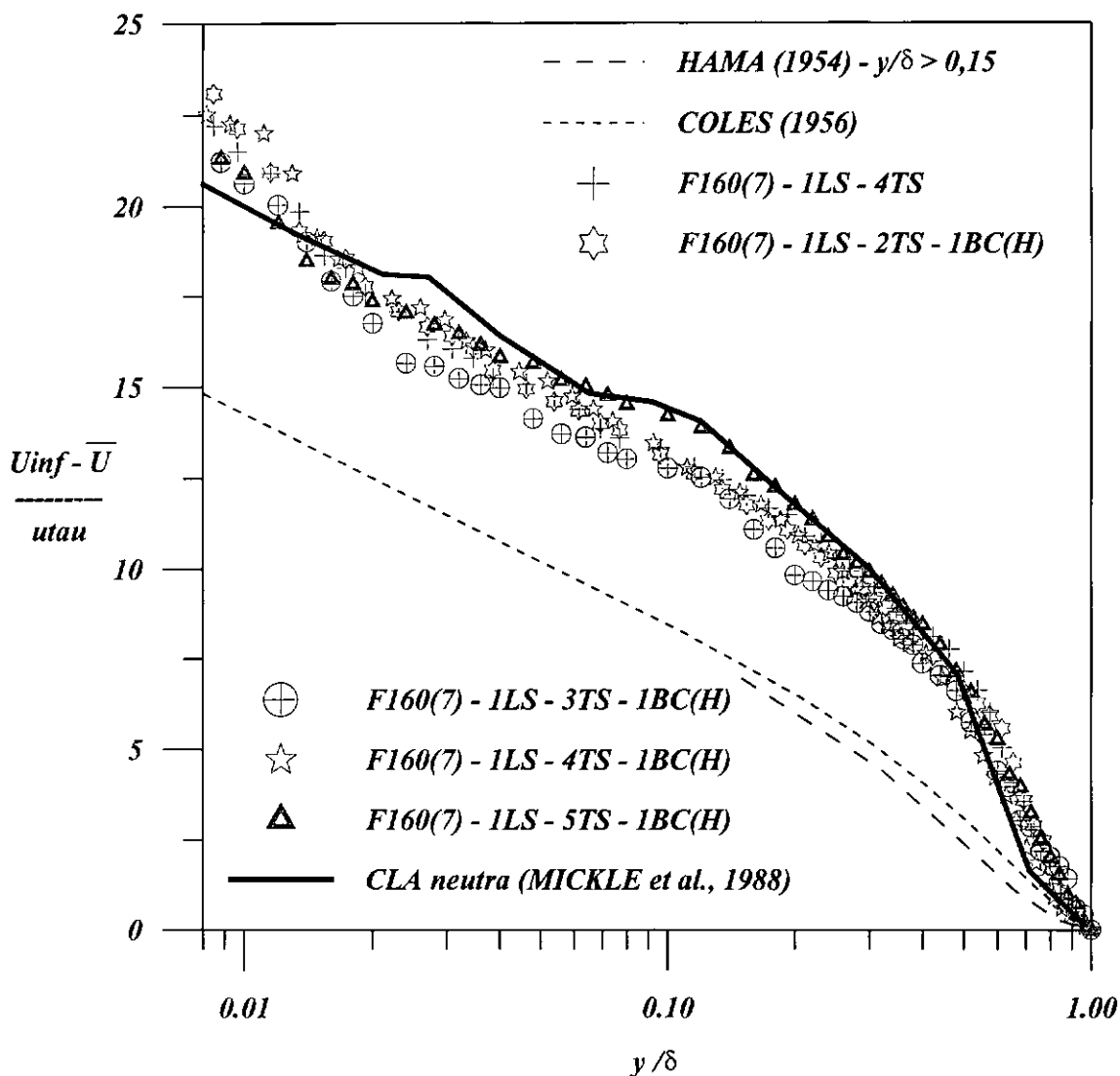
ESTAÇÃO 3 ($x = 4300$ mm)

Figura 5.2 – Perfis de velocidade média apresentados em coordenadas externas da camada limite para as configurações que empregaram a floresta de barras circulares de 160 mm comparados com um perfil de CLA neutra.

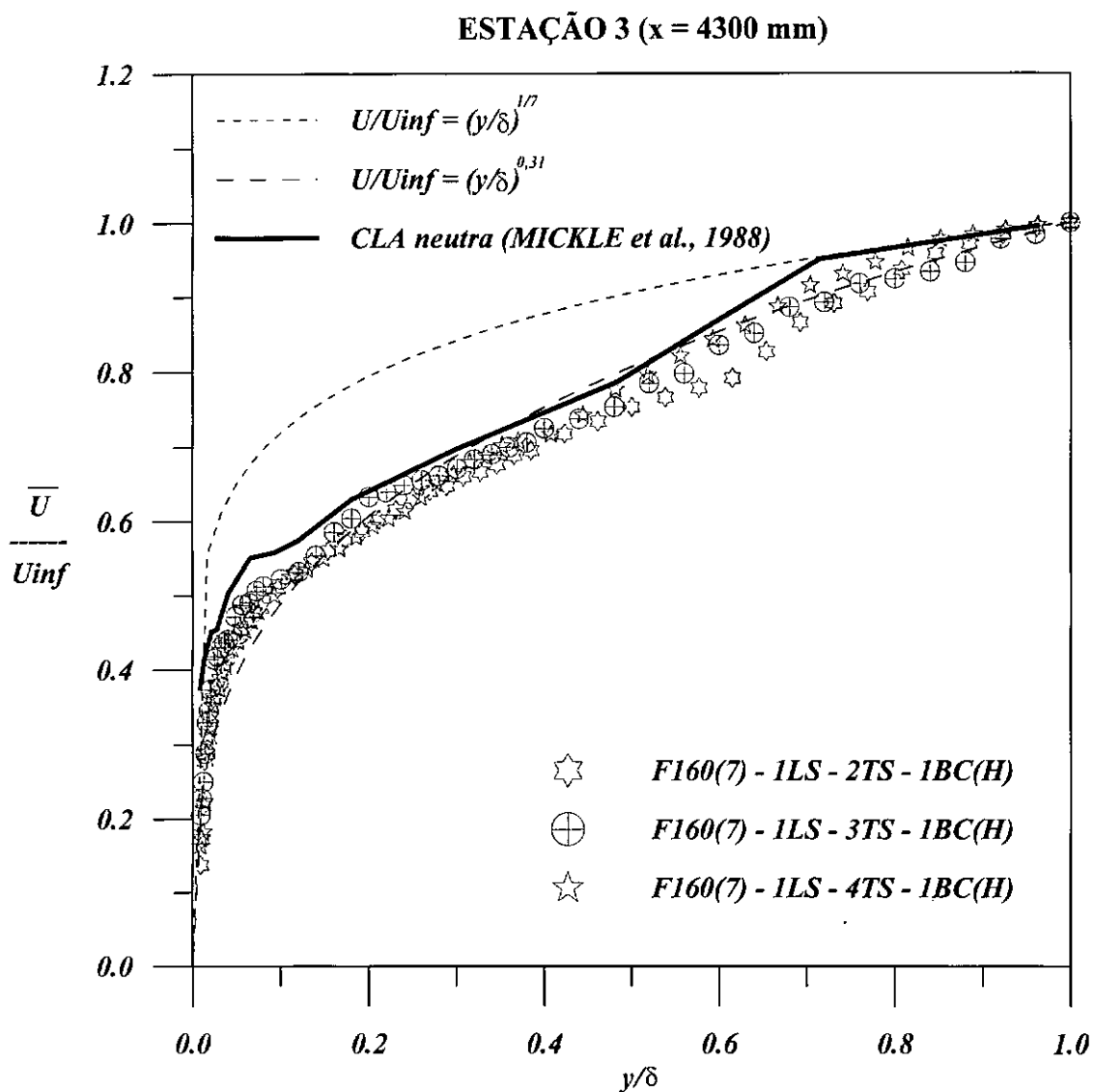


Figura 5.3 – Perfis lineares de velocidade para as configurações que empregaram a floresta de barras circulares de 160 mm comparados com um perfil de CLA neutra.

6. CONCLUSÕES

A partir do estudo sistemático de três técnicas de espessamento artificial de camadas limite turbulentas em túnel de vento, este trabalho propõe a simulação experimental de perfis de velocidade atmosféricos sob condições neutras de instabilidade. Nesse sentido, a adoção de um aparato de espessamento constituído de florestas de barras circulares mostrou-se conveniente. Em contrapartida, os resultados obtidos com o uso das telas revelaram um grande efeito de bloqueamento nas porções externas do escoamento, fruto provável da descontinuidade aerodinâmica existente na região limítrofe de suas esteiras. Da mesma forma, os resultados obtidos com os geradores de vórtices elípticos sugerem que um estudo mais detalhado deva ser conduzido com este aparato de espessamento, visto que o sucesso dessa técnica já foi constatado em COUNIHAN (1969).

A tarefa de se simular camadas limite atmosféricas em pequenos túneis de vento requer cuidados especiais (BARBOSA et al., 2000a). Normalmente, pequenos túneis de vento são mais susceptíveis a variações externas de temperatura e de velocidade do ar ambiente. Além disso, as chances de se obter camadas limite em equilíbrio (condição essencial para a simulação de uma CLA) são reduzidas, devido ao pequeno comprimento de acomodação ao qual o fluido está submetido. E, por último, faz-se necessário o espessamento artificial da camada limite para que o fator de escala (representado pela razão entre o modelo físico e o escoamento real) seja experimentalmente viável.

Mesmo com todos estes problemas, verifica-se que a relação custo/benefício de túneis que utilizam técnicas de espessamento de CLT torna-se atraente à medida em que possibilitam a ampliação de suas faixas de operação com pequenos custos de fabricação associados.

Apesar dos experimentos conduzidos com as florestas de barras circulares serem caracterizados como escoamentos sobre superfícies lisas, a maioria de seus resultados não apontam características similares às encontradas em escoamentos desenvolvidos sobre tais superfícies. Este fato é reforçado comparando-se as Figuras (4.23) e (5.1). Os perfis são apresentados na Figura (4.23) adimensionalizados segundo a forma clássica da lei da parede, onde a rugosidade do terreno não é levada em consideração. Já na Figura (5.1), os mesmos perfis são adimensionalizados utilizando-se

o conceito de comprimento de rugosidade aerodinâmico. Nota-se nesta primeira figura que sua adimensionalização não propicia similaridade entre os perfis adquiridos e a lei da parede para placas planas lisas. O mesmo não ocorre na Figura (5.1), o que favorece a utilização do comprimento de rugosidade aerodinâmico (ν_0) como parâmetro de adimensionalização para camadas limite engrossadas artificialmente.

Pouco se percebe com relação à introdução continuada das barras retangulares (strips). Entretanto, uma suave tendência ao equilíbrio é observada à medida em que são introduzidas no escoamento.

O espectro unidimensional de energia cinética turbulenta para todas as configurações testadas ao longo deste trabalho demonstrou boa concordância com a lei de decaimento espectral proposta por KOLMOGOROV (1941), principalmente na região do subintervalo inercial, sugerindo assim um comportamento único e bem definido da componente longitudinal da flutuação de velocidade com estes aparatos.

Apesar da ineficácia da teoria de camadas limite sobre placas planas lisas na descrição dos perfis de velocidade apresentados, os valores de $C_f/2$ para todas as configurações que envolveram as florestas de barras circulares estão de acordo com os valores previstos por esta teoria, o que nos leva a crer que a velocidade de atrito (u_τ) de escoamentos submetidos a este tipo de aparato de engrossamento preserva os mesmos valores encontrados em camadas limite naturalmente desenvolvidas sobre placas planas lisas.

A comparação dos dados obtidos com a floresta de barras circulares de 160 mm com o perfil atmosférico neutro extraído de MICKLE et al. (1988) demonstra nitidamente a coerência dos perfis de velocidade média obtidos no túnel com o comportamento atmosférico. A simulação de uma camada limite atmosférica neutra em túnel de vento parece, portanto, ser bem sucedida para esta técnica de espessamento.

Apesar deste trabalho possibilitar a geração de camadas limite espessas em distâncias relativamente pequenas, a espessura máxima de camada limite suportada pelo túnel não foi determinada. Deste modo, a otimização desta técnica seria interessante no desenvolvimento de trabalhos subsequentes.

Ainda podemos destacar as seguintes sugestões para trabalhos futuros: a estratificação térmica do escoamento, a aquisição e o tratamento das três componentes da velocidade do fluido, o refinamento dos mecanismos de visualização, o estudo de outras técnicas de espessamento artificial de camadas limite e a comparação dos dados com modelos numéricos de simulação de escoamentos atmosféricos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSEN, P. S., KAYS, W. M., MOFFAT, R. J., 1972, *The Turbulent Boudary Layer on a Porous Plate: An Experimental Study of the Fluid Mechanics for Adverse Free-Stream Pressure Gradients*, NASA HMT-15, Stanford, California.
- ARIE, M., KIYA, M., SUZUKI, Y., SAKATA, I., 1981, "Artificial Generation of Thick Turbulent Boundary Layers", *Bulletin of the JSME*, v. 24, pp. 956-964.
- AVELINO, M. R., 2000, *Caracterização das Propriedades de uma Camada Limite Sujeita à Variações Abruptas de Rugosidade na Superfície*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- BARBOSA, P. H. A., CATALDI, M., SILVA FREIRE, A. P., 2000a, "Simulation of Atmospheric Boundary Layer Flows in Short Wind Tunnels", *XI Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 16-20 Outubro.
- BARBOSA, P. H. A., CATALDI, M., SILVA FREIRE, A. P., 2000b, "Wind Tunnel Simulation of Atmospheric Boundary Layer Flows", *Encontro Nacional de Ciências Térmicas*, Porto Alegre, RS, Brasil, 3-6 Outubro.
- BRUNN, H. H., KHAN, M. A., AL-KAYIEM, H. H., FARDAD, A. A., 1988, "Velocity calibration relationships for hot-wire anemometry", *J. Phys. E.*, v. 21 (Sci. Instr.), pp. 225-232.
- BRUNN, H. H., 1995, *Hot-wire anemometry*. Oxford Science Publications.
- CERMAK, J. E., 1971, "Laboratory Simulation of the Atmospheric Boundary Layer", *AIAA Journal*, v. 9, pp. 1746-1754.
- CERMAK, J. E., 1975, "Applications of Fluid Mechanics to Wind Engineering - A Freeman Scholar Lecture", *Journal of Fluids Engineering*, pp. 9-37.

- CERMAK, J. E., 1981, "Wind Tunnel Design for Physical Modeling of Atmospheric Boundary Layers". *Proceedings of the ASCE*, v. 107 (EM3), pp. 623-641.
- CLAUSER, F. H., 1954, "Turbulent Boundary Layers in Adverse Pressure Gradients", *J. of Aero Sci.*, v. 21, pp. 91.
- COLES, D., 1956, "The law of the wake in turbulent boundary layers", *J. Fluid Mechanics*, v. 1, pp. 191-226.
- COLLIS, D. C., WILLIAMS, M. J., 1959, "Two-dimensional convection from heated wires at low reynolds numbers", *J. Fluid Mech.*, v. 6, pp. 357-384.
- COOK, N., 1973, "On simulating the lower third of the urban atmospheric boundary layer in a wind tunnel", *Atmos. Environ.*, v. 7, pp. 691.
- CORRSIN, S., 1943, *Investigation of Flow in an Axially Symmetrical Heated Jet of Air*, NACA W-94.
- COUNIHAN, J., 1968, *An improved method of simulating atmospheric boundary layer*, CERL 1540.
- COUNIHAN, J., 1969, "An Improved Method of Simulating an Atmospheric Boundary Layer in a Wind Tunnel", *Atmospheric Environment*, v. 3, pp. 197-214.
- COUNIHAN, J., HUNT, J. C. R., JACKSON, P. S., 1974, "Wakes behind two-dimensional surface obstacles in turbulent boundary layers", *J. Fluid Mech.*, v. 64, n. 3, pp. 529-563.
- DAVENPORT, A. G., 1963, "The relationship of wind structure to wind loading", *Proceedings ASCE - Journal of the Structural Division*, v. 86, pp. 39-66.
- FERNHOLZ, H. H., FINLEY, P. J., 1996, "The Incompressible Zero-Pressure-Gradient Turbulent Boundary Layer: An Assessment of the Data", *Prog. Aerospace Sci.*, v. 32, pp. 245-311.

- GARRATT, J. R., 1977, "Review of drag coefficients over oceans and continents", *Mon. Wea. Rev.*, v. 105, pp. 915-929.
- GARTSHORE, I. S., DE CROOS, K. A., 1977, "Roughness Element Geometry Required for Wind Tunnel Simulations of the Atmospheric Wind", *Journal of Fluids Engineering - Transactions of the ASME*, pp. 480-485.
- GRAINGER, C., MERONEY, R. N., 1994, "Inverted Floor Wind-Tunnel Simulation of Stably Stratified Atmospheric Boundary-Layer Flow". *Atmospheric Environment*, v. 28, n. 11, pp. 1887-1893.
- GRASS, A. J., 1971, "Structural features of turbulent flow over smooth and rough boundaries", *J. Fluid Mech.*, v. 50, pp. 233-255.
- GUIMARÃES, J. H. D., SANTOS JR., S. J. F., SILVA FREIRE, A. P., 1999, "Large Artificially Generated Turbulent Boundary Layers for the Study of Atmospheric Flows", *COBEM99*, Águas de Lindóia, SP, Brasil.
- HAMA, F. R., 1954, "Boundary Layer Characteristics for Smooth and Rough Surfaces", *Trans. Soc. Nav. Arch. Mar. Engrs.*, v. 62, pp. 333.
- HICKS, B. B., HYSON, P., MOORE, C. J., 1975, "A study of eddy fluxes over a forest", *J. Appl. Meteor.*, v. 14, pp. 58-66.
- HUNT, J. C. R., FERNHOLZ, H., 1975, "Wind-tunnel simulation of the atmospheric boundary layer: a report on Euromech 50", *J. Fluid Mech.*, v. 70, pp. 543-559.
- KANKAINEN, P., BRUNDRETT, E., KAISER, J. A., 1994, "A Small Wind Tunnel Significantly Improved by a Multi-Purpose Two-Flexible-Wall Test Section", *Journal of Fluids Engineering*, v. 116, pp. 419-423.
- KING, L. V., 1914, "On the convection of heat from small cylinders in a stream of fluid: Determination of the convection constants of small platinum wires with

applications to hot-wire anemometry". *Phil. Trans. Roy. Soc.*, v. A214, pp. 373-432.

KLEBANOFF, P. S., DIEHL, Z. W., 1952, *Some Features of Artificially Thickened Fully Developed Turbulent Boundary Layers with Zero Pressure Gradient*, NACA 1110.

KLEBANOFF, P. S., 1955, *Characteristics of Turbulence in a Boundary Layer with Zero Pressure Gradient*, NACA 1247.

KLINE, S. J., REYNOLDS, W. C., SCHRAUB, F. A., RUNSTADLER, P. W., 1967, "The structure of turbulent boundary layers", *J. Fluid Mechanics*, v. 30, pp. 741-773.

KOLMOGOROV, A. N., 1941, "Dissipation of Energy in the Locally Isotropic Turbulence", *Acad. Sci. URSS*, v. 32, n. 1, pp. 16-18.

KONDO, J., YAMAZAWA, H., 1986, "Aerodynamic roughness over an inhomogeneous ground surface", *Bound. Layer Meteor.*, v. 35, pp. 331-348.

KRAMERS, H., 1946, "Heat transfer from spheres to flowing media", *Physica*, v. 12, pp. 61-80.

KROGSTAD, P. A., ANTONIA, R. A., 1994, "Structure of turbulent boundary layers on smooth and rough walls", *J. Fluid Mech.*, v. 277, pp. 1-21.

LAUFER, J., 1954, *The Structure of Turbulence in Fully Developed Pipe Flow*, NACA 1174.

LEMES, M. A. M., MOURA, A. D., 1998, *Fundamentos de Dinâmica Aplicados à Meteorologia e Oceanografia*. FUNDEC.

LETTAU, H., 1969, "Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basis of roughness-element description", *J. Appl. Meteor.*, v. 8, pp. 828-832.

- LIGRANI, P. M., MOFFAT, R. J., 1979, "Artificially Thickening a Smooth-Wall Turbulent Boundary Layer", *AIAA Journal*, v. 17, pp. 907-910.
- LIGRANI, P. M., MOFFAT, R. J., KAYS, W. M., 1983, "Artificially Thickened Turbulent Boundary Layers for Studying Heat Transfer and Skin Friction on Rough Surfaces", *Journal of Fluids Engineering - Transactions of the ASME*, v. 105, pp. 146-153.
- LIGRANI, P. M., MOFFAT, R. J., 1986, "Structure of transitionally rough and fully rough turbulent boundary layers", *J. Fluid Mech.*, v. 162, pp. 69-98.
- LINDBORG, E., 1999, "Can the atmospheric kinetic energy spectrum be explained by two-dimensional turbulence?", *J. Fluid Mech.*, v. 388, pp. 259-288.
- MENUT, P. M., 1998, "Anemometria de Fio-Quente", *Transição e Turbulência - I Escola de Primavera*, capítulo 6, Rio de Janeiro, Brasil, ABCM - Associação Brasileira de Ciências Mecânicas.
- NAGIB, H. M., MORKOVIN, M. V., YUNG, J. T., TAN-ATICHAT, J., 1974, "On modelling of atmospheric surface layers by the counter jet technique", *8th. Aerodynamic Testing Conference*, paper 74-638.
- NAPPO, C. J., Jr., 1977, "Mesoscale flow over complex terrain during the Eastern Tennessee Trajectory Experiment (ETTEX)", *J. Appl. Meteor.*, v. 16, pp. 1186-1196.
- NEE, V. W., DIETRICK, C., BETCHOV, R., SZEWCZYK, A. A., 1973, "The simulation of the atmospheric surface layer with volumetric flow control", *Proc. Inst. Environ. Sci.*, pp. 483-487.
- ORLANDO, A. F., MOFFAT, R. J., KAYS, W. M., 1974, *Turbulent Transport of Heat and Momentum in a Boundary Layer Subject to Deceleration, Suction and Variable Wall Temperature*, NASA HMT-17, Stanford, California.

- PLATE, E., 1971, *Aerodynamics characteristics of atmospheric boundary layers*, U. S. Atomic Energy Commission, Office of Information Services T.I.D. 25465.
- PRANDTL, L., 1904, "Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung", *Proceedings 3rd. Intern. Math. Congr.*, pp. 484-491, Heidelberg.
- ROBINS, A., 1975, "Experimental model techniques for the investigation of the dispersion of chimney plumes", *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, v. 189, pp. 44.
- SCHLICHTING, H., 1968, *Boundary Layer Theory*. McGraw-Hill Publishing Co., New York, N.Y.
- SILVA FREIRE, A. P., AVELINO, M. R., SANTOS, L. C. C., 1997, "The State of the Art in Turbulence Modelling in Brazil", *J. of the Braz. Soc. Mechanical Sciences*, v. XIX(Special Issue), pp. 1-61.
- SILVA FREIRE, A. P., CRUZ, D. O. A., 1998, "Equações de Movimento e Resultados Assintóticos Aplicados à Teoria de Camada Limite", *Transição e Turbulência - I Escola de Primavera*, capítulo 2, Rio de Janeiro, Brasil, Associação Brasileira de Ciências Mecânicas - ABCM.
- SLUMAN, T. J., VAN MAANEN, H. R. E., OOMS, G., 1980, "Atmospheric boundary layer simulation in a wind tunnel, using air injection", *Applied Scientific Research*, v. 36, pp. 289-307.
- SMEDMAN-HÖGSTRÖM, A. S., HÖGSTRÖM, U., 1978, "A practical method for determining wind frequency distributions for the lowest 200 m from routine meteorological data", *J. Appl. Meteor.*, v. 17, pp. 942-954.
- STULL, R. B., 1988, *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers.

- TAYLOR, G. I., 1935, "Statistical Theory of Turbulence III - Distribution of Dissipation of Energy in a Pipe Over Its Cross-Section". *Proc. Roy. Soc. (London)*, v. 151, n. 873, pp. 455-464.
- THOMPSON, R. S., 1978, "Note on the aerodynamic roughness length for complex terrain", *J. Appl. Meteor.*, v. 17, pp. 1402-1403.
- TOWNSEND, A. A., 1957, "The turbulent boundary layer", *I.U.T.A.M. Symposium on Boundary Layer Research*, Springer, Berlin.
- WYNGAARD, J. C., 1992, "Atmospheric Turbulence", *Annual Reviews Fluid Mech.*, v. 24, pp. 205-233.

A. Valores Típicos de Y_0 para Diversos Terrenos

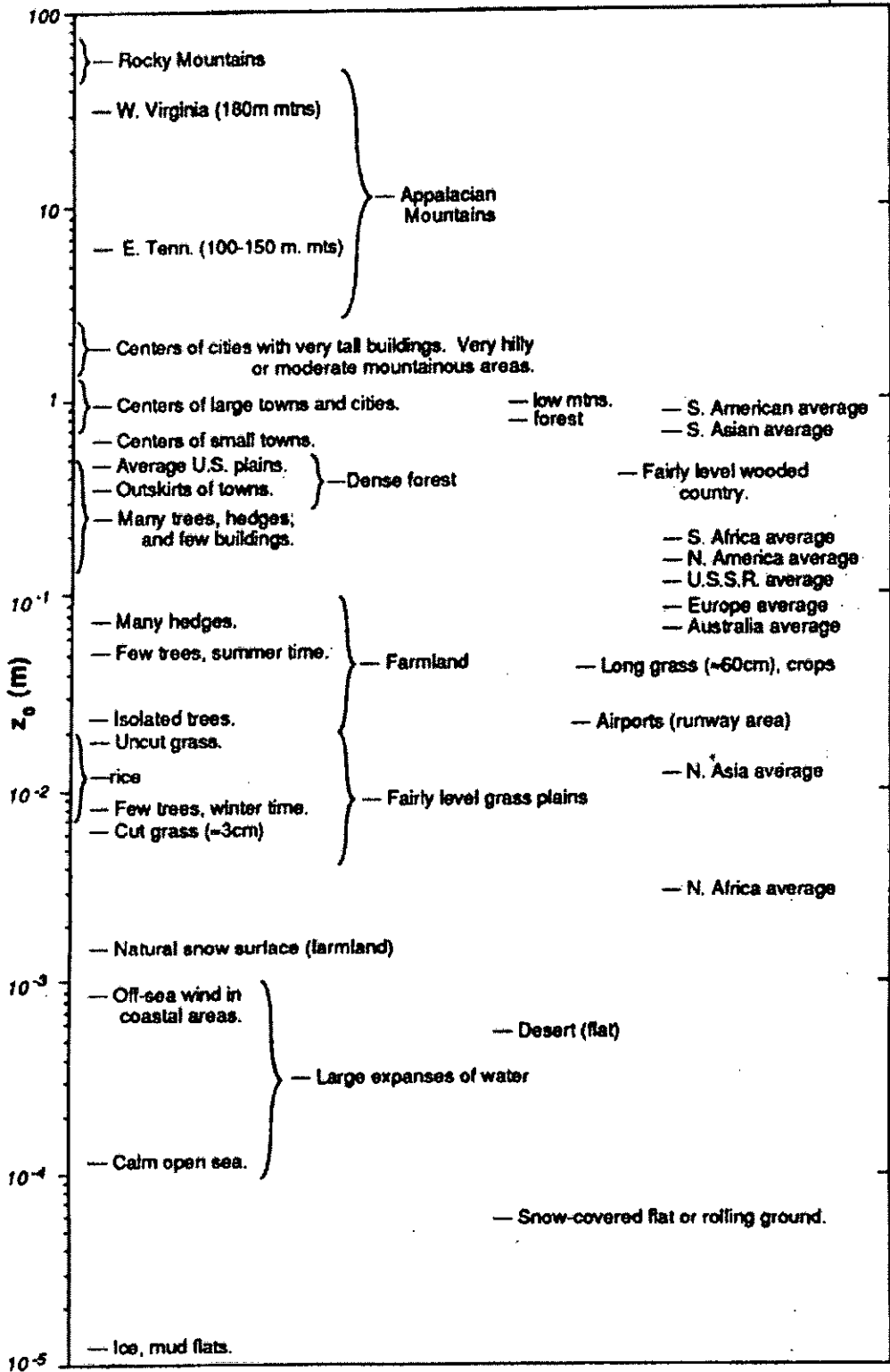


Figura A.1 – Comprimentos de rugosidade aerodinâmicos para vários tipos de terrenos existentes na natureza (STULL, 1988).

B. DESENHOS DO CONJUNTO BUCHA-MANDRIL

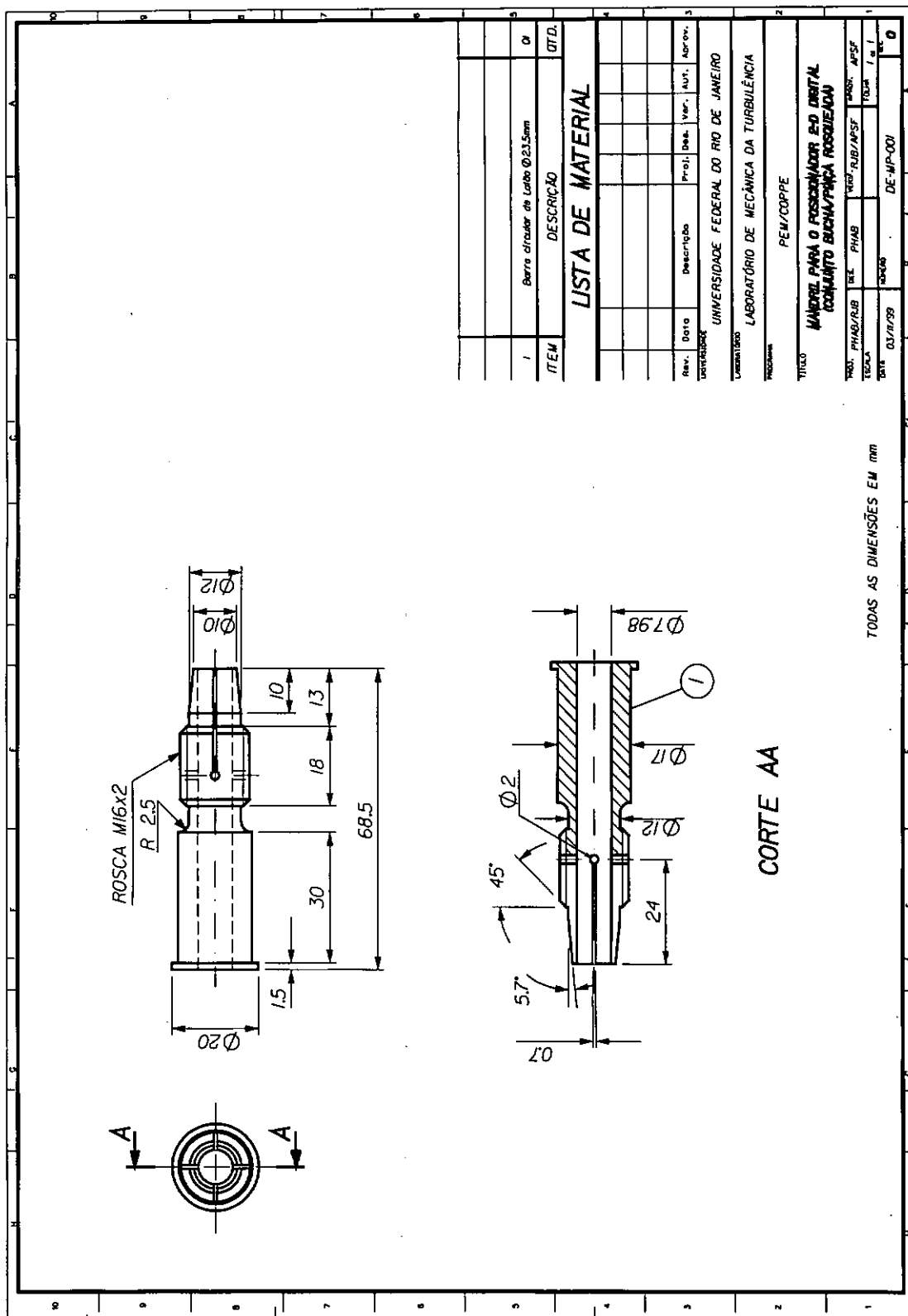


Figura B.1 – Parte do desenho técnico do conjunto bucha-mandrill projetado para o posicionador 2D utilizado nos experimentos (peça: bucha/pinça rosqueada).

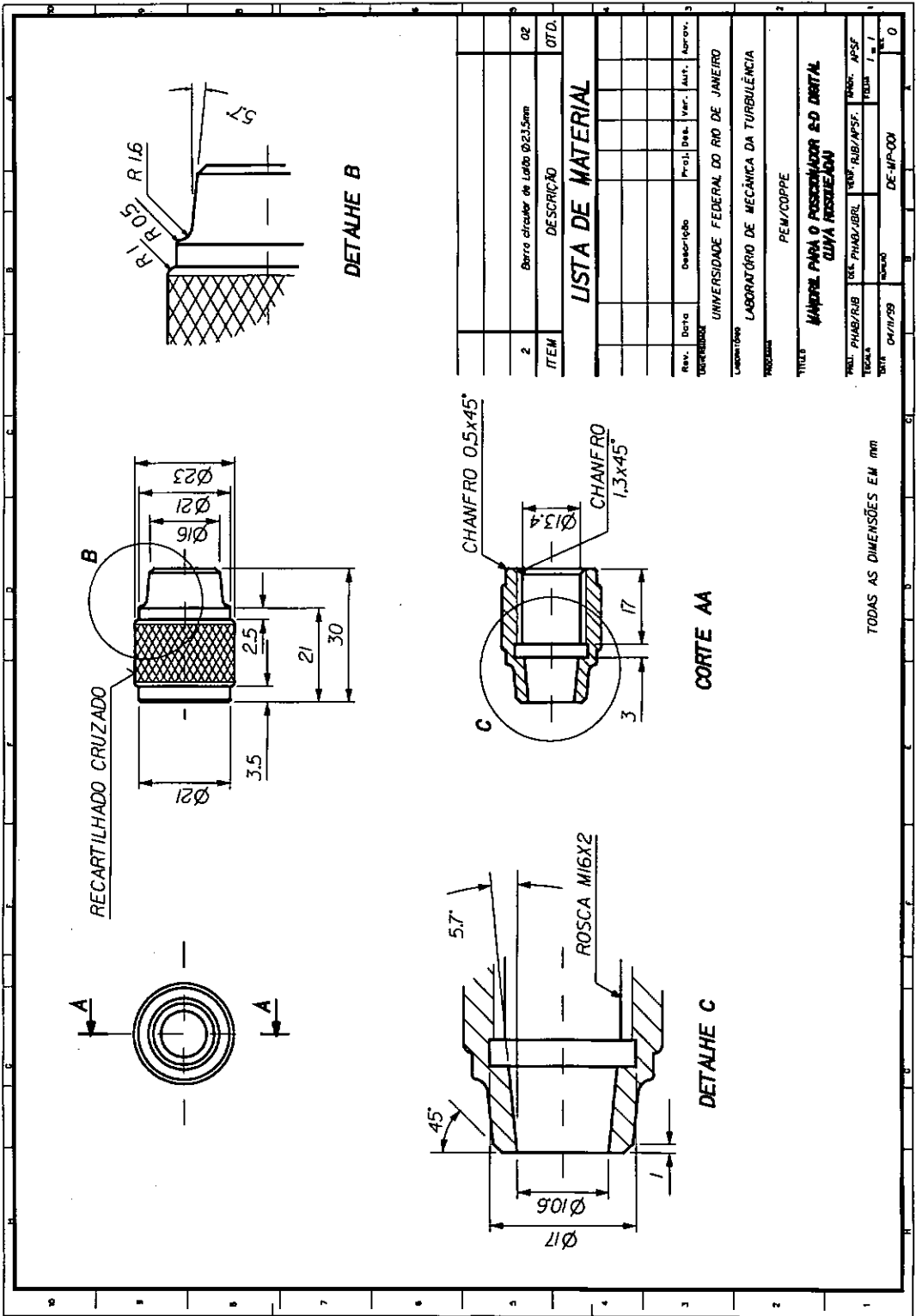


Figura B.2 – Parte do desenho técnico do conjunto bucha-mandril projetado para o posicionador 2D utilizado nos experimentos (peça: luva rosqueada).