

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO
SHS

ESTUDO TEÓRICO – EXPERIMENTAL
DO PROCESSO EROSIVO EM ÁREA DE ENCOSTA



Lucien Akabassi

Tese apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos, da Universidade de São
Paulo, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Doutor em
Hidráulica e Saneamento.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Marozzi Righetto

São Carlos
1999

Class.	TESE
Cutt.	10162
	e.1
Tombo	254/99

31100007823

sys 1062098

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

A313e Akabassi, Lucien
Estudo teórico-experimental do processo erosivo em
área de encosta / Lucien Akabassi. -- São Carlos,
1999.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 1999.

Área: Hidráulica e Saneamento.

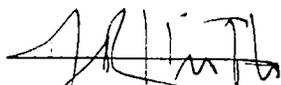
Orientador: Prof. Dr. Antonio Marozzi Righetto.

1. Deflúvio superficial.
2. Energia de escoamento.
3. Erosão-modelo.
4. Sedimento.
5. Microrrelevo.
6. Microcanais de drenagem. I. Título.

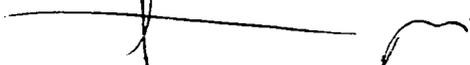
FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **LUCIEN AKABASSI**

Tese defendida e aprovada em 01-10-1999
pela Comissão Julgadora:



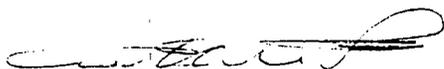
Prof. Associado **ANTONIO MAROZZI RIGHETTO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



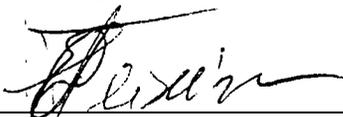
Prof. Titular **FAZAL HUSSAIN CHAUDHRY**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Titular **WOODROW NELSON LOPES ROMA**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **EVALDO MIRANDA COIADO**
(Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP)



Prof. Doutor **EDMILSON COSTA TEIXEIRA**
(Universidade Federal do Espírito Santo)



Prof. Associado **EDUARDO CLETO PIRES**
Coordenador da Área de Hidráulica e Saneamento



JOSE CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

À *Maria Aparecida* que soube manter a serenidade e transmitir forças e incentivos nos momentos difíceis, e que, sobretudo, não falhou em instante algum em preencher a ausência de *Pai* nos momentos que precisei estar ausente.

À *Evelyne*, minha filha, que desde o engatinhar e os primeiros passos inseguros na busca de proteção ao sorriso alegre e conquistador, transmitiu-me orgulho e constante motivação, a razão de todos meus esforços...

À minha *Mãe* por ensinar-me o caminho da perseverança e do equilíbrio.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Antonio Marozzi Righetto pela orientação, confiança e liberdade, principalmente pela amizade e constantes e irretiráveis incentivos nos momentos difíceis de desânimo e desespero, de improdutividade e de espera involuntária e angustiante por soluções. Ao Prof. Righetto, meus reconhecimentos pela oportunidade de trabalhar juntos, pela paciência e tolerância, pelos ensinamentos de seriedade e caráter, sem precisar ensinar.

Ao Prof. Dr. Woodrow N. L. Roma pelo inestimável apoio e preciosas críticas e sugestões na orientação do desenvolvimento da instrumentação, pela disposição de sempre atender e auxiliar, independentemente da hora e local.

Ao Prof. Dr. Fazal Hussain Chaudhry pelos constantes encorajamentos, a indescritível capacidade de percepção do ânimo do aluno, pelas valiosas sugestões, a preocupação e incentivos em ver concluído este trabalho, e especialmente, pela velha amizade.

Aos amigos, Prof. Dr. Marcelo Pereira de Souza, Prof. Dr. Arthur Mattos pelos incentivos e consolos.

Aos Técnicos e amigos: José Roberto Maramarque pela dedicação e sacrifício das horas de legítimo descanso em favor da realização dos experimentos e coleta dos dados de campo; Antônio Wagner Lamont, pelas longas horas dedicadas na busca do melhor princípio eletrotécnico para o desenvolvimento dos sensores e pela permanente oferta de ajuda; e tantos outros amigos pelos incentivos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, pela concessão dos recursos financeiros para o desenvolvimento do Projeto.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pela concessão de bolsa de estudos.

Ao Departamento de Hidráulica e Saneamento, SHS, pela oportunidade; ao CRHEA pelo apoio dado na instalação do experimento.

A todos os setores de apoio da EESC que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iii
LISTA DE SÍMBOLOS	iv
RESUMO	vi
<i>ABSTRACT</i>	vii
1. INTRODUÇÃO	01
2. REVISÃO DE LITERATURA	04
3. METODOLOGIA	11
3.1 Premissas da teoria da hidráulica do escoamento superficial	11
3.2 Experimentação	13
3.2.1 Área de estudo	13
3.2.2 Sistema hidráulico de bombeamento e recalque	17
3.2.3 Sistema simulador de chuvas	17
3.2.4 Monitoramento e aquisição de dados	20
3.2.5 Desenvolvimento do sensor fotoeletrônico de altura de deflúvio	21
3.2.6 Sistema receptor e de drenagem do deflúvio superficial	33
3.2.7 Medição do volume do deflúvio superficial	33
3.2.8 Determinação da carga de sedimento	37
3.3 Modelos matemáticos	38
3.3.1 Modelo bidimensional: Equações características	39
3.3.2 Modelo de infiltração	41
3.3.3 Modelo de erosão	42
4. ENSAIOS REALIZADOS E RESULTADOS	45
4.1 Planejamento dos ensaios	45
4.2 Ensaios realizados	52

4.3 Resultados	55
4.3.1 Regime de escoamento e dinâmica dos microcanais	62
4.3.2 Escoamento no domínio experimental	64
4.3.3 Hidrograma de saída do deflúvio superficial.....	87
4.3.4 Produção de sedimento	93
5. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA EROÇÃO	97
5.1 Introdução	97
5.2 O modelo numérico	102
5.3 Sensibilidade dos parâmetros	109
5.4 Calibração do modelo	114
6. CONCLUSÕES e RECOMENDAÇÕES	120
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124
BIBLIOGRAFIAS COMPLEMENTARES	128
ANEXO - 1. Planilhas de calibração final dos sensores	132
ANEXO – 2 / 2B. Hidrogramas de monitoramento de deflúvio superficial	149
ANEXO – 3 . Projeto do sistema fotogramétrico	200

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1	Representação esquemática do processo do escoamento superficial em uma bacia	15
FIGURA 3.2	Curvas características da bomba	18
FIGURA 3.3	Vista parcial da linha de recalque; linha dos aspersores; estrutura de sustentação da linha dos aspersores	19
FIGURA 3.4	Sensor fotoeletromecânico de altura de água	23
FIGURA 3.5	Suporte do sensor fotoeletromecânico de altura de água e do circuito eletrônico	24
FIGURA 3.6	Área experimental delimitada, e área de concentração de runoff	34
FIGURA 3.7	Detalhe do vertedor dos sistemas coletor e de drenagem	35
FIGURA 3.8	Esquema em planta da área experimental e dos Sistemas de recalque e drenagem	36
FIGURA 4.1	Mapa de instalação de sensores: fase – 1 (Ensaio 1 a 5)	65
FIGURA 4.2	Mapa de instalação de sensores: fase – 2 (Ensaio 6 a 18).....	66
FIGURA 4.3	Mapa de instalação de sensores: fase – 3 (Ensaio 19 a 23)	67
FIGURA 4.5	Hidrograma de saída do deflúvio superficial : Experimento 2	88
FIGURA 4.6	Hidrograma de saída do deflúvio superficial : Experimento 6	88
FIGURA 4.7	Hidrograma de saída do deflúvio superficial : Experimento 7	89
FIGURA 4.8	Hidrograma de saída do deflúvio superficial : Experimento 8	89
FIGURA 4.9	Hidrograma de saída do deflúvio superficial : Experimento 11	90
FIGURA 4.10	Hidrograma de saída do deflúvio superficial : Experimento 15.....	90
FIGURA 4.11	Hidrograma de saída do deflúvio superficial : Experimento 16	91
FIGURA 4.12	Hidrograma de saída do deflúvio superficial : Experimento 18	91
FIGURA 4.13	Evolução da produção de sedimento pela ação combinada De precipitação intensa e deflúvio superficial	93

FIGURA 4.14	Evolução da produção de sedimento pela ação combinada de precipitação intensa e deflúvio superficial: solo desestruturado.....	94
FIGURA 5.1	Área de encosta estudada, células de discretização e caracterização das variáveis	102
FIGURA 5.2	Fluxograma do modelo numérico	104
FIGURA 5.3	Tensão de resistência ao destacamento do solo em função da massa aparente e percentual de argila	110
FIGURA 5.4	Intensidade de chuva crítica para a ocorrência de destacamento de solo em função da massa específica aparente do solo e do percentual de argila	110
FIGURA 5.5	Coefficiente de destacamento de partícula de solo pela ação da chuva, $K_{p, total}$ em função de ρ_a em kg/m^3 e do percentual de argila do solo, ($\alpha=1$ e $b=0,1$).....	111
FIGURA 5.6	Coefficiente de destacamento de partícula de solo pela ação da chuva, $K_{p, total}$ em função de ρ_a em kg/m^3 e do percentual de argila do solo, ($\alpha=1$ e $b=1$)	111
FIGURA 5.7	Taxa de destacamento do solo pelas gotas de chuvas, $D_P=f(\rho_a, \% \text{ arg.}, (\alpha=1 \text{ e } b=0,1))$, em $\text{g.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$, para uma intensidade de chuva efetiva $i=50$ mm/h.	112
FIGURA 5.8	Taxa de destacamento de partículas do solo pelo deflúvio superficial, D_e , com $K_e=10$	113
FIGURA 5.9	Capacidade de transporte de sedimentos pelo deflúvio superficial em função da profundidade da lâmina d' água e da declividade do terreno	113
FIGURA 5.10	Hidrograma de saída observado no ensaio 18	116
FIGURA 5.11	Hidrograma simulado, referente ao ensaio 18	117
FIGURA 5.12	Simulação da erosão do solo referente ao ensaio 18	118
FIGURA 5.13	Material carreado em função da intensidade de chuva, com $L=50$ m, $S_0 = 0,10$	119
FIGURA 5.14	Quantidade de material erodido em função da intensidade de chuva e da declividade do terreno, $L=50$ m e $K_e=0,0075$	119

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1	Resumo das simulações de chuvas intensas realizadas para o estudo do processo de erosão pelo deflúvio superficial	56
TABELA 4.2	Coordenadas de instalação dos sensores: fase 1	65
TABELA 4.3	Coordenadas de instalação dos sensores: fase 2	66
TABELA 4.4	Coordenadas de instalação dos sensores: fase 1	67
TABELA 4.5	Tabela de dados referentes às simulações experimentais de erosão dos hidrogramas de monitoramento de escoamento no domínio	68
TABELA 5.1	Simulações de massa total de solo erodido em área de encosta de 10 x 50 m ² , em kg	114
TABELA 5.2	Características principais de cinco ensaios experimentais da erosão, com precipitação de duração de 1 hora	115
TABELA 5.3	Taxas de infiltração observadas	116

LISTA DE SÍMBOLOS

- α : parâmetro empírico
 b : parâmetro empírico
 c : concentração em massa de sedimentos, (M.L⁻²)
 d_{k_s} : diâmetro médio da gota
 D_e : taxa de destacamento pelo escoamento
 $D_{e,ef}$: taxa efetiva de destacamento
 D_P : taxa de destacamento de solo pela ação das gotas de chuva (ML⁻²T⁻¹),
 D_x, D_y : coeficientes de dispersão de sedimentos nas direções x e y , (L²T⁻¹)
 e_c : energia cinética crítica das gotas, (mJ)
 $e_{c,total}$: energia cinética crítica total, (mJ)
 e_v : índice de vazio
 f_{ms} : fração de área com material solto sem resistência
 F : infiltração acumulada (L)
 h : profundidade d'água do deflúvio (L)
 K_e : coeficiente empírico
 K_P : coeficiente empírico, (kg.m⁻².mm⁻¹)
 $K_{P,total}$: coeficiente empírico, (kg.m⁻².mm⁻¹)
 K_{sat} : condutividade hidráulica saturada (mm/h)
 ρ_0 : massa aparente específica seca (g/cm³)
 ρ_s : massa específica de sólidos (g/cm³)
 ρ_a : massa específica aparente do solo, (Mg.m⁻³)
 η : porosidade
 i : intensidade de chuvas, (LT⁻¹)
 i_c a intensidade de chuva crítica, (LT⁻¹)
 J : número de intervalos de tempo em que foi subdividida a duração da chuva
 f : taxa de infiltração, (LT⁻¹)
 $i-f$: intensidade de chuva excedente , (LT⁻¹)
(it) : número de iterações
 g : aceleração gravitacional, (LT⁻²).
 γ : peso específico da água em N.m³
 $h(i,j)$: profundidade d'água referente à uma célula (i,j)
 n : coeficiente de rugosidade de Manning
 N : número total de classes de diâmetros das gotas
 n_k : número de gotas pertencentes a classe k
 N_c : número de classes de gotas com energias cinéticas inferiores à e_c

p_c : pressão capilar, kPa

q_x : vazão específica na direção x , ($L^2.T^{-1}$)

q_y : vazão específica na direção y , ($L^2.T^{-1}$)

$q_x(i,j)$, $q_y(i,j)$: vazões específicas através das faces de jusante de uma célula (i,j) nas direções x e y

$q_{s,x}(i,j)$ e $q_{s,y}(i,j)$: cargas de sedimentos através das faces de jusante de uma célula (i,j) nas direções x e y

σ : tensão de resistência ao desprendimento de partículas do solo, (FL^{-2})

$S_{o,x}$, $S_{o,y}$: declividade média do terreno nas direções x e y

$S_{f,x}$ e $S_{f,y}$: declividade da linha de carga nas direções x e y

S : declividade da linha de carga do escoamento

S_s : taxa de sedimentos depositados ou carregados pelo escoamento, ($M.L^{-1}.T^{-1}$)

t : tempo

Δt : incremento de tempo

T_e : capacidade de transporte de sedimentos pelo deflúvio superficial, ($kg.cm^{-1}.s^{-1}$)

τ_x : tensão de atrito do leito na direção x , ($F.L^{-2}$)

τ_y : tensão de atrito do leito na direção y , ($F.L^{-2}$)

$\tau_{s,x}$ e $\tau_{s,y}$: tensões de atrito da superfície d'água nas direções x e y , ($F.L^{-2}$)

u_k : velocidade média de queda das gotas da classe k

W_e : potência do escoamento em $kg.s^{-3}$

z : elevação do terreno no ponto considerado, (L)

z_f : posição da frente em relação à superfície do terreno

$z_s(i,j)$: elevação do terreno correspondente à célula (i,j)

ψ_z : carga de sucção na frente de molhamento

$\Delta\theta$: diferença de teores de umidade do solo após e antes da passagem de frente

RESUMO

O processo de erosão do solo pelo deflúvio superficial em encostas foi estudado através da experimentação em condição de campo e simulação numérica. O deflúvio superficial foi gerado por meio de simulação de precipitações intensas, com intensidades variando de 100 mm a 170 mm/h em uma área de 500 m², comprimento de 50 m e declividade média igual a 4,54 %. A física da erosão envolvendo os processos de remoção de partículas, transporte e deposição de sedimentos foi analisada considerando a hidrodinâmica do escoamento e a interrelação do microrrelevo do leito e da sua evolução temporal com o escoamento. O domínio do escoamento foi monitorado através de uma rede de sensores fotoeletrônicos, controlados por um sistema computadorizado de aquisição de dados capaz de registrar a variação da altura de escoamento em tempo real. O deflúvio superficial foi observado com base nos registros da variação da altura no domínio. Verificou-se que a formação e a dinâmica do microrrelevo favorecem o aumento da turbulência do escoamento, a qual promove correntes secundárias que mantêm as partículas erodidas em suspensão no fluxo, e parecem incrementar o poder erosivo do escoamento. Embora não tenha havido uma evolução pronunciada do microrrelevo devido a alta resistência do solo da área experimental, a característica de "feedback" existente entre o escoamento e o microrrelevo foi verificada através da efemeridade de grande número de microcanais, os quais, conforme a interação mútua, desaparecem, se deslocam ou se juntam a outros. Este processo dinâmico seria o elemento fundamental responsável pelo controle da capacidade de remoção e transporte de material pelo deflúvio e pela evolução do microrrelevo. A variação da energia de escoamento, atributo hidráulico característico do deflúvio superficial, é intrinsecamente função da dinâmica do microrrelevo, e a sua magnitude depende da variação espacial e temporal da altura da lâmina de deflúvio. O desenvolvimento de uma metodologia de levantamento da dinâmica do microrrelevo é essencial à formulação de um modelo com base na energia de escoamento considerando a hidrodinâmica do deflúvio e características geomorfológicas do solo. Esta interconexão possibilitará melhor progresso na compreensão da dinâmica da formação da rede de microcanais de drenagem controlado pelo processo de erosão.

Palavras-chave: deflúvio superficial, energia de escoamento, erosão-modelo, sedimento, microrrelevo, microcanais de drenagem.

ABSTRACT

Soil erosion process by overland flow was studied through field experimentation and numerical simulation. Overland flow was generated by a rainfall simulator at high intensities of precipitation in the range of 100 mm/h to 170 mm/h. The 50 m x 10 m experimental plot had a slope of 4.5 %. The mechanics of erosion which controls the sub-processes of detachment, transport and deposition of sediment was analyzed with respect to the flow hydrodynamics and its relationship with the bed microtopography. The flow depths were surveyed by a computer controlled data acquisition system from a network of 16 sensors installed in the flow domain. This system has a capability to record the flow depths in real time. It was verified that the dynamic evolution of the microtopography is responsible for turbulence increase due to generation of secondary currents which maintain sediment in suspension and contribute to the detachment by the flow. Despite the slight evolution of the bed microtopography due to the high resistance of the investigated soil, the feedback between the flow and the bed microtopography was verified through ephemeral behavior of the rills. This dynamic process seems to control the capacity of flow for detachment and transport of sediment. This fact support the hypothesis that stream power variation is an intrinsic function of the dynamic evolution of the microtopography, controlled by the flow depths variation. A development of new techniques or methods for surveying the dynamic of the microtopography is essential for proposing new formulations of erosion models taking into account overland flow hydrodynamics and geomorphological characteristics of the rills.

Key words: Overland flow, erosion model, microtopography, rills, stream power, sediment.

1. INTRODUÇÃO

A erosão do solo pela água é um processo complexo com interrelações hidrológicas e hidráulicas diversas. A remoção e o transporte de partículas do solo pelo escoamento da água excedente na superfície do terreno, e a deposição deste material constituem os sub-processos básicos da erosão. A erosão, através da produção de sedimentos, torna-se um importante agente de degradação ambiental, de redução de produtividade agrícola, de assoreamento de reservatórios, lagos e cursos d'água. Em áreas de exploração agrícola intensiva, a poluição pelos defensivos agrícolas é acelerada devido à adsorção dos elementos ativos dos produtos químicos às partículas de solo que constituem os sedimentos. Os fertilizantes aplicados pouco tempo antes da ocorrência de precipitações intensas acompanhadas de escoamento superficial severo, são perdidos devido a erosão, arrastados pelo deflúvio superficial. Se por um lado, dentro de um certo limite, o processo de erosão pode ser considerado natural, por outro, a ocupação desordenada e o uso inadequado do solo, tanto na agricultura quanto na urbanização, acelera a erosão.

Os prejuízos causados pela erosão afetam, portanto, as áreas agrícolas, obras hidráulicas, obras de infraestruturas urbanas, principalmente em fase de execução, e o meio ambiente com um custo socio-econômico elevado.

Diversos fatores isolados ou interrelacionados agem de modo que se inicie o processo de erosão. Os eventos hidrológicos de precipitação e de escoamento superficial constituem os fatores fundamentais de disponibilidade da água na superfície do solo. Tratando-se da erosão pela água, é evidente, portanto, que em qualquer investigação ou análise do processo de erosão, a hidrologia e a hidráulica sejam a base fundamental do estudo.

A física das três fases da produção de sedimentos que constituem o processo de erosão - a remoção de partículas do solo, o transporte e a deposição de sedimentos, representa a área de maior interesse das pesquisas. O fenômeno é complexo, pois, envolve a interação de diversas variáveis tais como o volume da água escoando sobre a superfície do solo, a velocidade do escoamento, a resistência do solo ao cisalhamento que define sua erodibilidade, a erosividade do fluxo d'água, a capacidade de transporte do fluxo, a transportabilidade do sedimento, a microtopografia do terreno, a umidade do solo antes do evento hidrológico, o processo de infiltração, a composição química da água, a existência de cobertura vegetal e o uso do solo. É evidente a interdependência das diversas variáveis que atuam no processo. A determinação dos parâmetros fundamentais que desencadeiam e sustentam a dinâmica do processo de erosão, além das suas inter-relações, é de grande relevância para uma previsão mais acurada da magnitude da ocorrência da erosão e, conseqüentemente, possibilitar melhores tomadas de decisões quanto ao planejamento e ao controle dos danos decorrentes da erosão. A complexidade que cerca o processo sugere a necessidade de desenvolver mais trabalhos de pesquisa concentrados na interface *hidrologia - hidráulica - solo*.

A formulação de modelos matemáticos de erosão com embasamentos físicos é extremamente útil para a avaliação e investigação do processo em diferentes condições de escoamentos e regimes hidrodinâmicos. A obtenção de dados para fins de análises teóricas torna-se mais rápida, principal vantagem da modelagem matemática em relação ao estudo experimental, exaustivo e geralmente empírico. Porém, é preciso estudos experimentais confiáveis na descrição e compreensão do processo para respaldar a formulação das hipóteses, a construção de modelos matemáticos, assim como sua calibração e validação efetiva.

Através da experimentação e simulações numéricas, a dinâmica do processo da erosão foi investigada, considerando a forte interferência das irregularidades do terreno sobre a lâmina d'água do escoamento. As interrelações da hidrodinâmica do escoamento com o processo da erosão sob os aspectos físico e hidráulico na interface solo-água foram analisadas, levando em conta a dinâmica do

microrrelevo, a influência do teor atual de umidade e a variação espacial e temporal da infiltração sobre o escoamento.

Por essas variações deterem fortes influências de perturbações sobre o escoamento superficial e, conseqüentemente, sobre os hidrogramas nos microcanais, as suas contribuições no processo de erosão e no transporte de sedimentos foram estudadas com o objetivo de estabelecer parâmetros fundamentais do solo e fisicamente mensuráveis que, associados à hidráulica do escoamento, possibilitem formular um modelo hidrodinâmico de erosão com potencialidade de incorporar as variações espaciais e temporais das características físicas e hidráulicas do solo, e da superfície do leito de escoamento, dentro do realismo um tanto complexo do processo.

1.1 Objetivos

1. Estudar a variação de altura de escoamento de deflúvio simulado em área de encosta e caracterizar a sua hidráulica ;
2. Investigar a dinâmica do microrrelevo do leito do escoamento do deflúvio superficial através da formação e evolução dos microcanais;
3. Investigar as interrelações da hidrodinâmica do escoamento com o processo de erosão, sob os aspectos físico e hidráulico na interface solo-água, levando em conta a dinâmica do microrrelevo;
4. Verificar os efeitos da umidade atual e da variação espacial e temporal da infiltração sobre o deflúvio e conseqüente interrelação com o processo de erosão;
5. Definir parâmetros físicos fundamentais do solo, mensuráveis que, associados à hidráulica do escoamento, possibilitam formular equacionamento matemático baseado na hidrodinâmica do escoamento do deflúvio superficial, capaz de quantificar estimativas mais precisas de erosão em diversas condições e tipos de solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O impacto da erosão sobre o solo e a agricultura foi a primeira preocupação motivadora do estudo do processo da erosão pelos conservacionistas de solos. O estudo da erosão começou então de forma empírica, buscando compreender o processo e adotar medidas de controle. Hoje, com a ramificação da Ciência, o interesse pelo estudo da erosão não se limita mais apenas à agricultura. A incidência dos danos da erosão estende-se às obras de engenharia hidráulica como barragens, reservatórios e canais de distribuição; às obras de engenharia civil tais como construções viárias e pavimentação, estabilização de encostas; ao meio ambiente: degradação ambiental (poluição e contaminação ambiental), assoreamento de cursos d' água e lagos. O custo destes impactos, mostram-se extremamente elevado.

Todos os problemas de erosão pela água estão intimamente ligados à dinâmica do escoamento, particularmente ao escoamento na região da camada limite, à turbulência, à difusão e à propagação de ondas sobre o terreno.

Na prática da engenharia, muitas vezes, as estimativas de sedimentos são necessárias em diversos tipos de obras como por exemplo em projetos de represamento para barragens, reservatórios e lagos, obras portuárias e de navegação fluvial, adoção de medidas de controle do processo da erosão, a avaliação e planejamento do uso do solo e o seu manejo.

Segundo EDWARDS e OWENS (1991), citados por WU et al.(1993), sabe-se que as fortes chuvas produzem as maiores perdas de solo. Conseqüentemente, é necessário, às vezes, estimar a produção de sedimentos para um temporal específico ou para uma série de chuvas intensas. Há muitos modelos disponíveis, para usos e condições diversos, capazes de estimar o deflúvio superficial e a geração de sedimentos através da erosão. Mas a confiabilidade de um determinado

modelo depende da avaliação da sua capacidade e fidelidade de previsão, e da identificação de possíveis fontes de erros.

WU et al. (1993) observaram que os erros nas estimativas de erosão surgem devido as simplificações geralmente introduzidas nas equações empregadas no cálculo da carga de sedimentos. Este procedimento acaba por não representar toda a complexidade dos mecanismos envolvidos no processo. Os autores acrescentam ainda que fontes adicionais de erros são introduzidos por mesclar e tratar variáveis espaciais e temporais, tais como chuvas, declividade e propriedades do solo, como média global na obtenção dos parâmetros de entrada dos modelos. Como as perdas de solo no caso de um escoamento superficial severo são elevadas, os erros de previsão se tornar-se-iam muito sérios para estes eventos. Comparando-se o desempenho de três modelos de previsão de escoamento superficial e de erosão, AGNPS (Agricultural Non-Point-Source pollution), ANSWERS (Areal Non-Point-Source Watershed Environment Response Simulation) e CREAMS (Chemicals Runoff and ^{erosion} Erosão from Agricultural Management Systems), WU et al.(1993) concluíram que os resultados simulados e medidos, no caso do escoamento superficial, apresentaram-se, apenas, de razoavelmente consistentes a inconsistentes. As médias da razão entre a produção simulada de sedimentos e a observada para diversos eventos hidrológicos e em bacias diferentes mostraram-se muito dispersas. Dos três modelos, apenas o ANSWERS simulou resultados mais consistentes e compatíveis para o escoamento superficial e a produção de sedimentos. Todos os modelos apresentaram uma tendência de subestimar a produção de sedimentos no caso de chuva muito intensa. Segundo os autores, parte dos erros na estimativa de produção de sedimentos pode ser atribuída aos erros na estimativa do escoamento superficial, da umidade pré-evento e da caracterização da cobertura vegetal; no entanto, não são suficientes para explicar as grandes discrepâncias observadas entre produção de sedimentos simulada e medida para diversos eventos hidrológicos. A determinação correta dos parâmetros que influenciam o escoamento como também das propriedades fundamentais do solo que interferem no processo da erosão representa a preocupação fundamental com a precisão e a capacidade de previsão do modelo.

WILSON (1993) assegura que avanços substanciais foram obtidos em relação aos primeiros esforços em compreender e prever a erosão do solo, que eram muito empíricos. Nesses estudos, foram instaladas parcelas experimentais que serviam para medir as perdas de solo em função de características diferentes de chuva, solo, topografia e uso do solo. Os resultados desses trabalhos serviram para elaborar a conhecida Equação Universal de Perda de Solo (USLE), desenvolvida por WISCHMEIER e SMITH, 1960. Embora empírica, a Equação Universal teve ampla aceitação por parte dos conservacionistas na tarefa de estimativas das perdas de solo, do controle da erosão e do planejamento do uso do solo. Mais recentemente, cresceu o interesse pelos modelos para previsão de erosão baseados na física do processo. O motivo deste fato é que os modelos físicos têm a vantagem de poderem ser aplicados a uma gama de situações bem mais amplas quando comparados à Equação Universal ou seus similares. Segundo WILSON (1993), os modelos físicos abrem a possibilidade de se aprofundar e detalhar cada vez mais os processos que envolvem a erosão. O autor sustenta que embora a modelação matemática da erosão tenha progredido substancialmente, ainda é preciso seguir uma rigorosa linha de pesquisa que permita estudar e avançar mais na questão da previsão do processo de remoção de partículas do solo. Por exemplo, a erodibilidade do solo é diretamente relacionada com o processo de remoção de partículas do solo. Esta característica do solo depende da condição de saturação e de como a resistência do solo se comporta com a variação do grau de saturação. Se o processo não for melhor estudado e equacionado com base física, modelos diferentes de remoção produzirão valores diferentes de erodibilidade para o mesmo solo e nas mesmas condições. Portanto, sem investigação desse processo, não se conseguirá a compreensão desejada do processo tão importante para o fenômeno da erosão. Uma questão fundamental é então determinar e isolar os fatores, função das características intrínsecas do solo, daqueles do escoamento. Este trabalho deve ser feito no contorno solo-água, onde as interações solo-fluído determinam a remoção das partículas.

Através de diversos experimentos, segundo WILSON (1993), foi observado que a taxa de remoção de partículas é relativamente mais baixa para o escoamento com alta concentração de sedimentos em suspensão do que para a água

livre de sedimentos (FOSTER e MEYER, 1972; RICE e WILSON, 1990). Embora o decréscimo na taxa de remoção devido ao aumento de sedimentos no escoamento tenha sido muito explorado nos modelos de previsão de erosão (FOSTER, 1982; ELLIOT et al., 1989), pouco se conhece sobre o mecanismo físico desta redução. Segundo WILSON (1993), trabalhos teóricos realizados por PARKER et al. (1986) e WILSON (1989), indicaram que sedimentos em suspensão reduzem a energia turbulenta do escoamento, o que corresponde ao menor coeficiente de variação da turbulência no modelo por ele proposto.

WILSON (1993), aponta pelo menos dois possíveis mecanismos responsáveis pela redução da taxa de remoção com o aumento de sedimentos no fluxo do escoamento: uma efetiva redução nas forças turbulentas de cisalhamento; e/ou uma efetiva redução na taxa de troca no fundo do canal resultado do processo de sedimentação das partículas em suspensão. Observa-se que a complexidade do processo de erosão exige maiores esforços no sentido de avançar-se em cada sub-processo, de determinar parâmetros fundamentais tanto relativos ao solo quanto ao escoamento, e de estudar suas interrelações a fim de estender o modelo resultante às condições de solo mais abrangentes.

A modelação da erosão envolve fundamentalmente a descrição matemática do processo de remoção de partículas do solo pela água, o transporte destas partículas e sua deposição; e toda vez que houver deposição, pode haver nova remoção conforme as condições do escoamento, isto é, dependendo da capacidade de transporte do escoamento. Nas duas últimas décadas, diversas equações tem sido propostas para descrever os processos da erosão do solo pela água. Essas equações formam a base dos modelos de erosão que se tornaram alternativas mais amplamente utilizadas nos centros de pesquisas em detrimento dos modelos empíricos anteriores, pois requerem menos calibração e são mais flexíveis em termos de condições de aplicação.

HIRSCHI e BARFIELD (1988) relataram que LI et al. (1977) apresentaram um modelo de erosão do solo baseado em processos físicos incluindo a remoção e o transporte de partículas pelo escoamento superficial e pelos salpicos das gotas de chuva após o impacto com a superfície exposta do solo. Segundo os autores,

o modelo de LI mostrou-se razoável em matéria de previsão conforme os resultados obtidos, mas o cisalhamento nos microcanais não foi considerado. Além do mais, a remoção do solo pela chuva foi calculada por uma função potência da intensidade da chuva, o que não é apropriado para muitos simuladores de chuva. FOSTER e MEYER (1972), citados por PROFFIT et al.(1993), associaram a taxa de remoção de sedimentos com a força trativa exercida pela água e procuraram estabelecer um limite superior ao fluxo de sedimentos usando a equação de YALIN (1963). MOORE e BURCH (1986) associaram a concentração de sedimentos com o parâmetro hidráulico, a energia unitária do escoamento, e adaptaram o desenvolvimento de YANG (1972; 1973) para descrever a erosão laminar e a erosão nos microcanais.

ROSE et al. (1983) segundo ELLIOT e LAFLEN (1993), adaptaram a equação de transporte de sedimentos desenvolvida por BAGNOLD (1977) citado por ELLIOT e LAFLEN (1993), e desenvolveram equações para descrever a erosão em terreno íngrimes, usando o conceito de energia do escoamento como atributo hidráulico. Os autores acima referidos adaptaram o equacionamento no sentido de quantificar a capacidade do escoamento em carrear sedimentos, utilizando-se de resultados existentes sobre o transporte de sedimentos em rios, e o aplicaram ao caso do deflúvio superficial.

Mais recentemente, HAIRSINE e ROSE (1991; 1992 a, b) fizeram uma nova tentativa de modelar a erosão em terrenos com declividade onde o escoamento superficial é dominante. Empregaram como atributo a energia do escoamento. Conceitos de conservação e distribuição de energia foram usados para descrever os processos de remoção de material pela chuva e pelo escoamento. Os autores consideraram que em modelação da erosão, o impacto das gotas de chuvas e o escoamento são os únicos agentes que contribuem para erosão da superfície do solo. A remoção de sedimentos da matriz do solo parece ser o resultado da dissipação da energia proveniente ou do impacto da chuva, ou do escoamento.

PROFFIT e ROSE (1991a), observaram que a contribuição relativa desses dois processos depende da superfície, da extensão da declividade, do escoamento superficial por unidade de área e do tipo de solo. PROFFIT et al. (1993) alertam que a ocorrência de microcanais não é geral, e que depende, entre outros fatores, do tipo

de solo e das condições do escoamento. Porém, a formação de microcanais causa efeitos pronunciados sobre a energia do escoamento, e conseqüentemente, sobre a concentração de sedimentos no escoamento. Além do mais, a altura d' água seria variável com a ocorrência de microcanais e, tomando-se uma altura média e assumindo um escoamento espacialmente uniforme, afetaria a estimativa da contribuição de remoção de material pela chuva. Portanto, as características dinâmicas do escoamento, da concentração de sedimentos durante a ocorrência do processo de erosão devem ser medidas se possível, de tal forma que os parâmetros que se busca na formulação do modelo sejam consistentes.

Na modelagem matemática proposta por HAIRSINE e ROSE (apud) empregando o conceito da energia do escoamento para modelar a erosão pelo escoamento superficial, o processo de remoção primária e remoção secundária, aquela que ocorre após deposição do sedimento no decorrer de um mesmo evento, foi analisado. A energia dissipada na remoção primária é bem superior à da remoção secundária, devido à diferença de grau de coesão. Aplicaram a teoria ao processo de erosão laminar e à erosão em microcanais. Os parâmetros hidráulicos do modelo são a energia do escoamento e a altura da lâmina d' água, que podem ser obtidas através de medições diretas ou de modelo de previsão de deflúvio superficial. No entanto, a energia crítica de remoção, a fração da energia do escoamento dissipada para as remoções primária e secundária precisa ser determinada experimentalmente. HAIRSINE e ROSE concluíram, examinando as interações dos processos de remoção e deposição dinâmicas dos dados de MEYER e HARMON (1985), citados por HAIRSINE e ROSE (apud), que a aplicação desta nova teoria demonstrou ser consistente. Mas a hipótese de equilíbrio dinâmico adotada para a remoção e deposição no desenvolvimento das equações características e a hipótese de escoamento uniforme nos microcanais parecem ser uma limitação do modelo. Os autores mostraram que a influência da declividade sobre a taxa de erosão é uma questão central na previsão da erosão do solo e das estratégias conservacionistas.

ELLIOT e LAFLÉN (1993), no seu trabalho sobre a erosão em microcanais, identificaram processos como desmoronamento, dispersão, deslissamento de paredes dos microcanais, que dependendo das condições do escoamento e do

solo, predominam num dado evento de erosão. A umidade do solo antes do início do escoamento superficial e a coesão, função do grau de agregação, são determinantes no processo. Trabalharam com a hipótese de que a previsão da erosão em microcanais pode ser melhor modelada separando os sub-processos predominantes ao invés de assumir que toda remoção de sedimentos é causada pela força de cisalhamento. Análise estatística realizada com resultados do modelo mostrou que a função da energia do escoamento descreveu adequadamente a capacidade de remoção de sedimentos do escoamento, e que, a associação da força de cisalhamento à energia de escoamento não melhorou o coeficiente de correlação em mais do que 0,01. Concluíram que, independentemente do sub-processo em predominância, o modelo baseado na energia do escoamento mostrou-se ser o melhor preditor da taxa de remoção de sedimentos em todos os solos estudados.

3. METODOLOGIA

3.1 Premissas da teoria da hidráulica do escoamento superficial

No estudo da erosão pela água, o escoamento superficial é o elemento chave do processo. Para modelar então a erosão, a hidráulica do escoamento superficial é imprescindível para se poder analisar a dinâmica do escoamento a partir das equações características, e obter as soluções quanto à distribuição espacial e temporal da altura da lâmina d' água sobre o terreno e da velocidade do escoamento. Essas variáveis são em seguida utilizadas nas estimativas de remoção de partículas do solo e da capacidade de transporte de sedimentos do fluxo. Bacias naturais onde ocorre escoamento superficial são raramente planas com propriedades físicas e hidráulicas homogêneas. A microtopografia, a rugosidade da superfície do terreno e as propriedades hidráulicas do solo variam no espaço e as vezes sobre distâncias muito curtas, da ordem de metros ou mesmo de centímetros, e influenciam fortemente as características do escoamento superficial ao longo da bacia. Essas variações espaciais têm impactos significativos sobre o processo da erosão do solo e o transporte de poluentes. A previsão do comportamento hidrológico e hidráulico do escoamento superficial, da erosão pela água e do movimento de poluentes, e o estudo das inter-relações entre os processos de deflúvio superficial a nível de bacias, o solo e a cobertura vegetal existente, exigem a formulação de modelos multidimensionais que incorporem adequadamente as variações espaciais das características físicas e hidráulicas do terreno.

O escoamento superficial em terrenos de microtopografia irregular é tipicamente bidimensional, e pode ser descrito pelas equações hidrodinâmicas de Saint-Venant (CHOW e BEN-ZVI (1973); KAWAHARA e YOKOYAMA (1980); IWASA e INOUE (1982); INOUE et al. (1987), citados por TAYFUR et al. (1993);

ZHANG e CUNDY (1989); GOVINDARAJU e KAVVAS, 1991). Porém, durante várias décadas, a modelação do escoamento superficial em bacias tem sido tratada como sendo unidimensional e geralmente descrita através do modelo de onda cinemática ou modelo difusivo, que são aproximações formuladas a partir das equações hidrodinâmicas completas. Por reduzir o escoamento a unidimensional e assumindo o domínio plano e homogêneo, a maioria desses modelos então desenvolvidos eliminariam a variação espacial, real e mensurável que ocorre no domínio do escoamento. Como resultado, erros significativos na distribuição de velocidades, altura da lâmina d'água e por conseguinte na força trativa podem ser facilmente gerados. DUNNE e DIETRICH (1980), citados por CUNDY (1989), mostraram que enquanto os modelos unidimensionais podem prever satisfatoriamente o comportamento do escoamento em termos médios, como por exemplo a altura d'água e hidrogramas a nível de bacia com topografia real, eles são deficientes na simulação da variação espacial das características do escoamento no domínio; e, essa variação pode não ser desprezível. Segundo ZHANG e CUNDY (1989), o impacto da topografia da superfície do terreno e a variação do gradiente de declividade local é evidente sobre o escoamento. Em comparação com as alturas locais da água, a amplitude vertical da microtopografia é geralmente da mesma magnitude ou maior. Daí, conclui-se que a variação da superfície do escoamento é função do gradiente de declividade local e da microtopografia. Esta forte dependência do escoamento em relação à microtopografia causaria perturbações como o surgimento de regiões de escoamento abruptamente variado. Isso contraria as hipóteses em que se baseia a formulação das equações hidrodinâmicas e geram dificuldades na formulação numérica além de levar à instabilidades nas soluções.

ZHANG e CUNDY (1989) estudaram o escoamento superficial através do modelo hidrodinâmico completo bidimensional utilizando o esquema numérico de resolução por diferenças finitas de MacCormack, um esquema predictor-corrector. Simularam a variação espacial bidimensional da rugosidade da superfície do terreno, da infiltração e da microtopografia separadamente, sendo as duas primeiras variáveis geradas de modo estocástico. Observaram a partir do campo de distribuição de alturas e velocidades que o impacto da variação espacial da rugosidade do terreno ficou bem

evidente, mas apesar de influenciar fortemente a distribuição de alturas e a magnitude das velocidades, sua influência em alterar a direção do escoamento é muito pequena. No caso da microtopografia, foi observado que sua variação tem impacto preponderante na alteração da direção do escoamento.

Durante a modelação do escoamento superficial, a microtopografia extremamente irregular é geralmente substituída por uma superfície regular a fim de atender as hipóteses de escoamento gradualmente variado que garantem a validade das equações hidrodinâmicas. Este procedimento, segundo TAYFUR et al. (1993), não causa diferenças significativas nos hidrogramas, pois, os requisitos de continuidade são atendidos em ambos os casos. Porém, para efeito de cálculos de estimativas de erosão, é importante modelar a distribuição das alturas da lâmina e das velocidades locais no domínio real do escoamento, isto é, levando em conta a microtopografia irregular do terreno. Desta forma, as influências da variação espacial da microtopografia sobre as variações espacial e temporal da altura da lâmina e da velocidade local poderão ser registradas de maneira mais acurada, portanto, levando a resultados de estimativas mais precisos.

3.2 Experimentação

3.2.1 Área de estudo

A experimentação visa a aquisição de dados para a análise e investigação dos mecanismos do processo de erosão, a verificação da capacidade e confiabilidade do modelo hidrodinâmico de erosão e a validação dos parâmetros físicos e hidráulicos determinados. O estudo do processo de erosão exige esforços de observação e medições a nível de campo, durante e após cada evento hidrológico além do monitoramento das características hidráulicas do solo e da evolução da sua superfície ao longo do tempo. Na maioria das vezes, é difícil e inviável depender do ritmo da natureza para a realização de tais medidas e monitoramento de forma satisfatória. Portanto, visto que os dados de medições são imprescindíveis para o estudo do processo, é necessário que se recorra à experimentação em condições controláveis.

Apesar da importância que detem a aquisição de dados a nível de campo ou de laboratório, é notório a escassez de dados experimentais consistentes que tenham

sido obtidos com base na abordagem hidrodinâmica do processo de erosão, tais como a variação da altura da lâmina do escoamento, a variação da velocidade, a influência do teor de umidade inicial do solo sobre o hidrograma do deflúvio superficial, o levantamento da dinâmica do microrrelevo do solo, e a investigação das suas interferências nas características hidráulicas do escoamento. A Figura 3.1 ilustra a representação esquemática de alguns dos principais elementos do processo hidrológico envolvendo o escoamento superficial em uma área declivosa.

O experimento foi desenvolvido no Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA) da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, EESC - USP.

Para possibilitar o pleno desenvolvimento do escoamento e obter características próximas das que ocorrem nas condições naturais de deflúvio superficial, as dimensões da área experimental foram definidas com 50 m de comprimento por 10 m de largura, ou seja, uma extensão de 500 m^2 . Este critério de definição do domínio do escoamento permitiu que todas as interrelações entre o leito e o fluido pudessem realmente existir, ou fossem potencializadas, para investigação.

Experimentos realizados em áreas de tamanho muito reduzido restringem a expansão do escoamento e limitam a sua dinâmica, devido as características de “confinamento” do fluxo. A limitação da dinâmica do escoamento tem influências diretas sobre o processo de remoção e transporte das partículas do solo. Isto afeta, sobretudo, a formação do microrrelevo e sua rede de microcanais de drenagem e o “feedback” da sua evolução em relação ao escoamento e, conseqüentemente, a todo o processo de erosão. Resulta, portanto, do “confinamento” do escoamento que, as interrelações fluido-leito tendem a ser mascaradas, induzindo à interpretação distorcidas dos resultados obtidos através das simulações experimentais.

Para os ajustes de operação do sistema simulador de chuvas, a cobertura vegetal de grama foi aproveitada como proteção do solo durante os testes de funcionamento, uniformidade de distribuição e raio de alcance da precipitação do simulador de chuvas desenvolvido. Este procedimento foi necessário, uma vez que o sistema simulador é fixo e não pode ser deslocado para uma área “cobaia” para a realização dos testes.

Para evitar a interferência de fluxos provenientes de áreas circundantes e isolar a área experimental do trânsito de qualquer natureza, uma mureta de 0,30 m de altura foi construída em toda sua extensão, acompanhando a declividade do terreno, até o ponto de concentração do deflúvio conforme ilustrado pelas imagens das Fotos 1 e 2, adiante.

O procedimento adotado possibilitou o controle rigoroso do acesso à área, durante o período dos ensaios e monitoramento. Além dessa função de proteção, a mureta serve de base de instalação dos trilhos do sistema rolante que transporta os equipamentos de levantamento fotogramétrico do microrrelevo. As Foto 1 e Foto 2 mostram o início das obras, especificamente a construção da mureta e das brocas de concreto, base de assentamento dos pórticos de sustentação da linha dos aspersores.

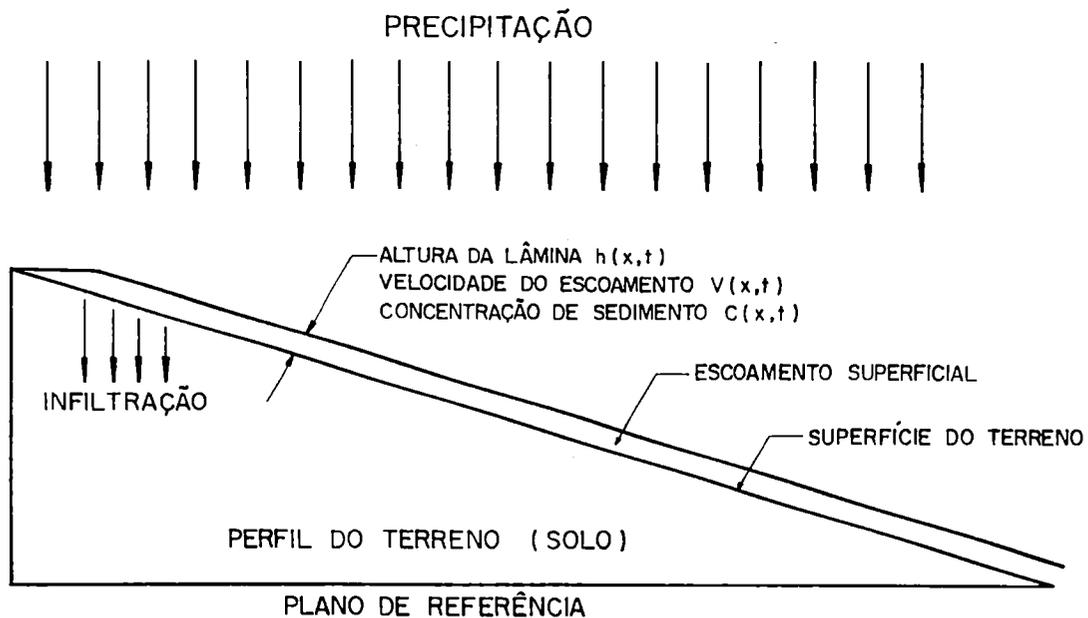


FIGURA 3.1 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICO DO PROCESSO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM UMA BACIA



Foto 1. Delimitação da área experimental e construção das brocas de sustentação da estrutura metálica



Foto 2. Descarregamento da estrutura metálica de sustentação para montagem

3.2.2 Sistema hidráulico de bombeamento e recalque

Para alimentar o simulador de chuvas, foi construída uma instalação hidráulica de bombeamento e recalque junto à Represa do Lobo, com uma extensão total de 200 m e diâmetro de 100 mm. Uma derivação em 90° com 100 mm de diâmetro alimenta a linha aérea dos aspersores.

O conjunto moto-bomba instalado é constituído de uma bomba centrífuga EQ 75-21 marca EQUIPE com um rotor de 170 mm, acoplada a um motor GE modelo B5K286AG2 - trifásico e potência de 25 HP. As características da bomba constam da Figura 3.2. Para fazer funcionar com segurança o motor de 25 HP, o conjunto é acionado por uma chave magnética estrela/triângulo com relê térmico de 30 a 40 A, temporizado de 10 a 180 segundos. O sistema é acionado a partir da área experimental com o auxílio de um telecomando. Um esquema de auto-escorva da bomba instalado no início da linha de recalque e os acessórios de controle de pressão e vazão instalados no trecho da área experimental, possibilitam que todo o sistema hidráulico seja efetivamente controlado a partir da área experimental, sem necessidade de descer até a unidade de bombeamento, junto à represa.

3.2.3 Sistema simulador de chuvas

A precipitação artificial tem como objetivo saturar rapidamente o solo e provocar o deflúvio superficial na parcela experimental e, conseqüentemente, induzir o processo de erosão. Para atender à taxa de precipitação de 100 mm a 170 mm/hora, a vazão necessária foi fornecida através do sistema de bombeamento com captação junto à represa do Lobo, conforme descrito no item anterior. A linha dos aspersores tem um comprimento de 50 m, igual à extensão da área experimental, em declive no sentido longitudinal da área.

A sustentação da linha dos aspersores é garantida por uma estrutura metálica constituída por 10 pares de pórticos apoiados sobre brocas de concreto armado, instalados a cada 5 m de intervalo ao longo da mureta, acompanhando a declividade longitudinal do terreno, sobre os quais são apoiadas as tesouras oferecendo um vão livre de 10 m. A taxa de precipitação foi controlada por um total

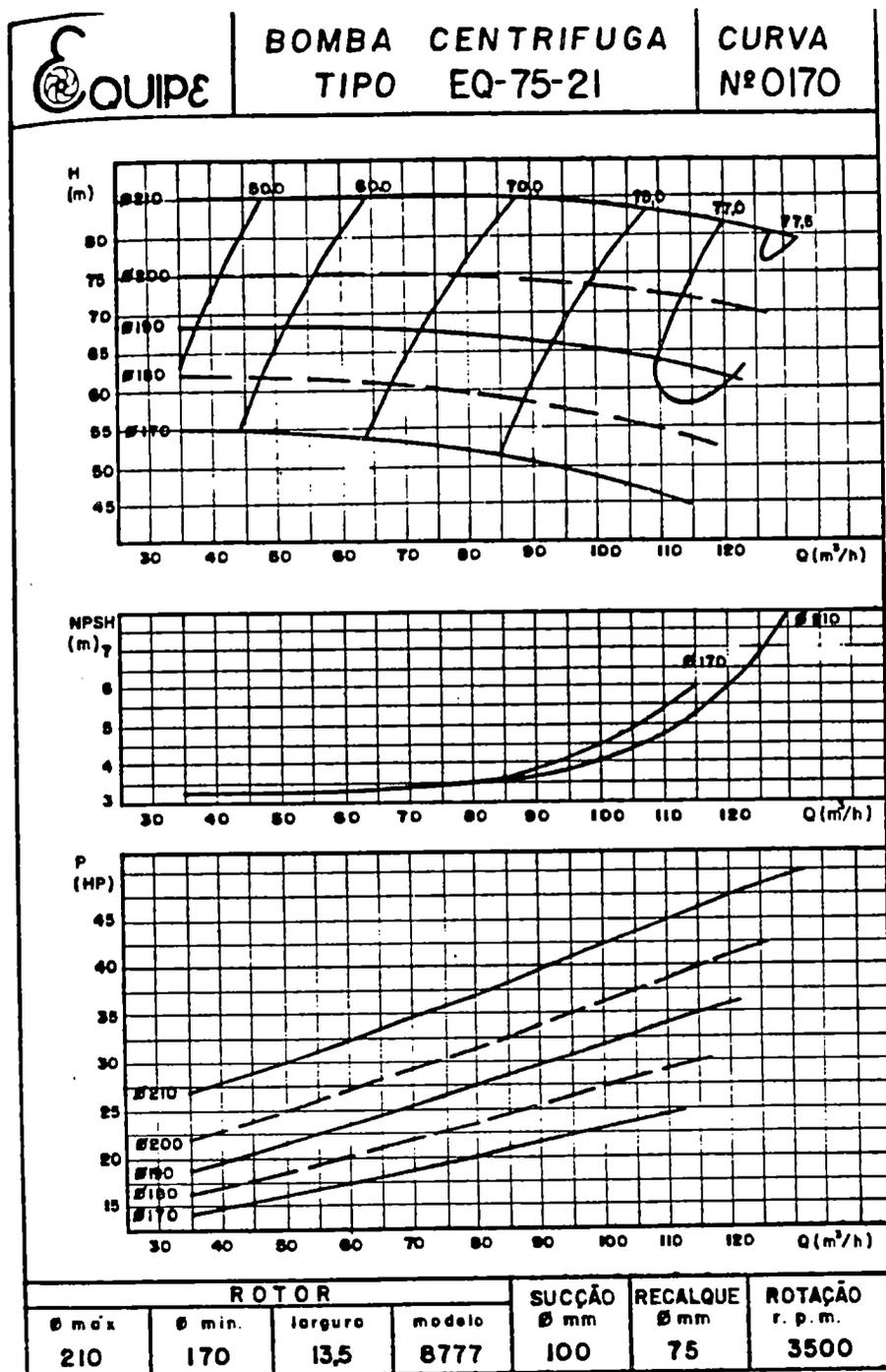


Figura 3.2 – Características da bomba centrífuga

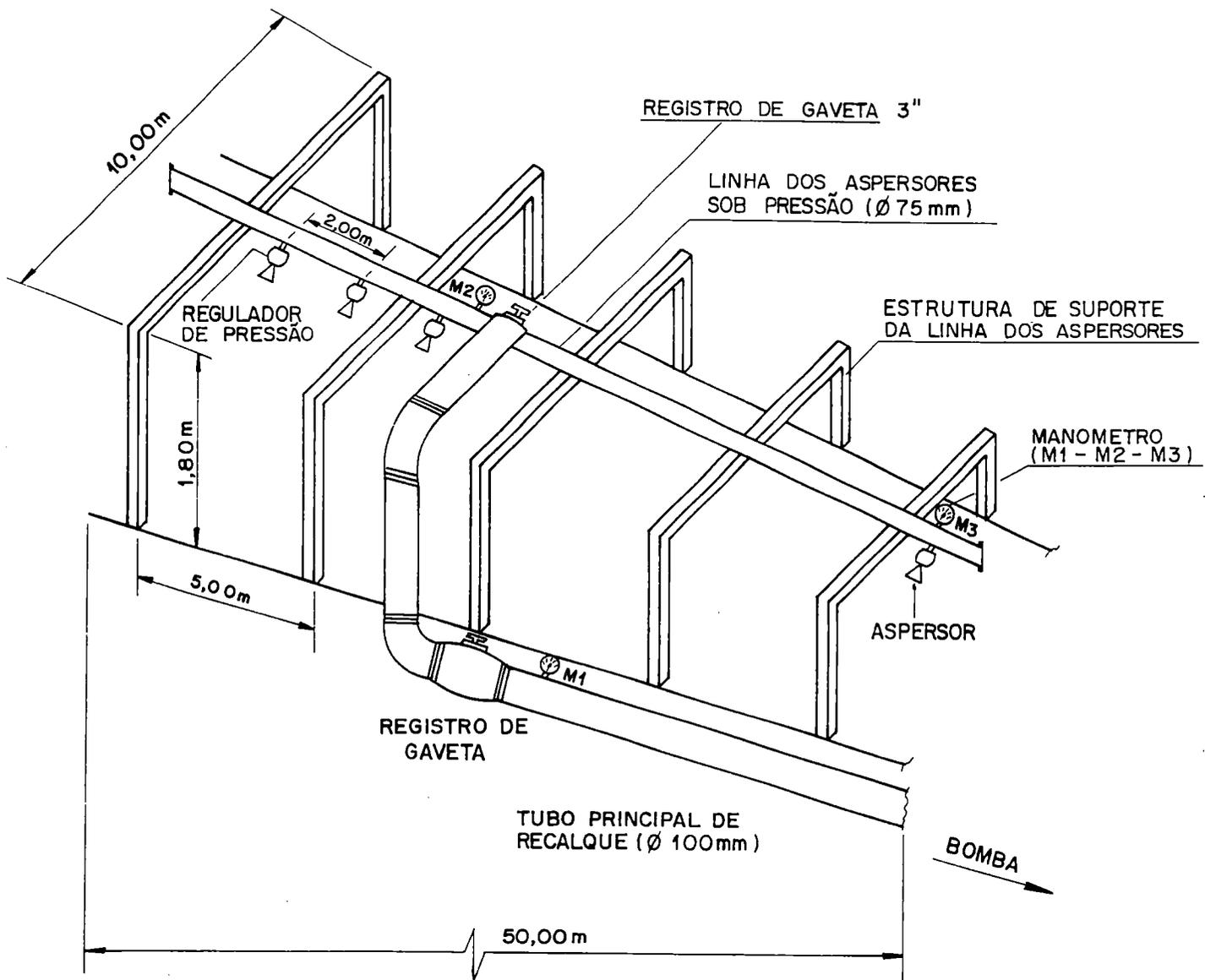


Figura 3.3 – Vista parcial: linha de recalque; linha dos aspersores; estrutura de sustentação da linha dos aspersores.

de 18 aspersores rotativos tipo Spinner-S3000 bocal - 42 (Mustard), com vazão nominal de 52,50 l/min / aspersor. A pressão máxima de serviço de 20 psi (14,0 mca), recomendada pelo fabricante, garante um diâmetro de alcance entre 8,0 e 10,67 m. O número de aspersores que era inicialmente de 16 foi alterado para 18 após os testes de uniformidade de distribuição para satisfazer o critério de recobrimento de alcance dos aspersores e evitar que as áreas das extremidades ficassem desfavorecidas em termos de precipitação. Este ajuste alterou a vazão inicial de projeto de 50,40 m³/h para 56,70 m³/h, porém o sistema de bombeamento dispunha de folga suficiente para cobrir o acréscimo de 6,30 m³/h. A Figura 3.3 mostra a vista parcial da linha de recalque, a linha dos aspersores e a estrutura de sustentação.

Os aspersores foram conectados a uma altura de 1,80 m em relação ao plano inicial da superfície do terreno. Após a retirada da cobertura vegetal e a sistematização da área, a altura do simulador de chuvas passou para 2,40 m, devido ao corte necessário para o nivelamento do terreno. A uniformidade da precipitação em todas as simulações é garantida pelo acoplamento a cada aspersor de um regulador de pressão. O intervalo entre aspersores foi de 2,50 m, sendo iniciada a instalação a 3,75 m da cabeceira da área e terminada à mesma distância antes do final da linha dos aspersores.

3.2.4 Monitoramento e aquisição de dados

As características do deflúvio superficial gerado através das precipitações são de grande relevância no entendimento da física do processo de erosão e da sua modelagem. Neste processo, a variação da lâmina do escoamento, ou seja o seu hidrograma, constitui um parâmetro importante a ser analisado.

O microrrelevo, por ter forte influência sobre o regime do escoamento superficial, ou seja, sobre a variação espacial e temporal das características hidráulicas tais como a altura da lâmina da água, a velocidade do escoamento, o seu número de Froude e, conseqüentemente, sobre a sua capacidade de remoção de partículas, exige

uma investigação direcionada de forma a conhecer a sua evolução no tempo devido ao processo da erosão e ao “feedback” desta evolução em relação ao regime do escoamento. Há, portanto, necessidade de interrelacionar o microrrelevo com o regime do escoamento.

A investigação desta interrelação através do estudo da dinâmica do microrrelevo e a consequente formação da rede de microcanais de drenagem requer o levantamento detalhado da microtopografia do leito de escoamento e da sua evolução no tempo e no espaço. Uma das técnicas empregadas neste tipo de levantamento é a fotogrametria digital. O princípio do estudo, proposto neste trabalho, consiste em realizar o levantamento da superfície do solo após cada simulação de precipitação, através do registro de imagens em estereofotogramas, que são restituídos posteriormente para análise sequencial da evolução. A evolução no tempo considera o levantamento anterior como estado inicial de referência para a simulação subsequente. Por ser dinâmico o estado inicial devido aos sub-processos da erosão (remoção, transporte, deposição e nova remoção) que podem ocorrer durante a simulação subsequente, a hidráulica do escoamento requer uma adequada caracterização.

O monitoramento do deflúvio superficial e o registro das variações da altura da lâmina do escoamento no domínio foram feitos através de uma rede de 16 sensores fotoeletrônicos estrategicamente distribuídos em toda área, de forma a poder rastrear as direções preferenciais do escoamento concentrado e, portanto, a formação da rede de microcanais de drenagem.

Para poder realizar o levantamento da evolução da microtopografia, e viabilizar a aplicação da fotogrametria digital para o estudo da dinâmica do microrrelevo, foi desenvolvido um sistema de levantamento fotogramétrico, cujo projeto encontra-se no ANEXO - 3.

3.2.5 Desenvolvimento do Sensor fotoeletrônico de altura de deflúvio

O desenvolvimento do sensor fotoeletrônico de altura de deflúvio superficial foi uma das etapas mais difíceis e mais longa do projeto. Devido aos requisitos de alta sensibilidade, da ordem de décimo de milímetro, uma faixa de leitura

de 150 mm e tempo de resposta mínimo de 10 ms, a construção do sistema tornou-se relativamente complexa. Foi preciso desenvolver diversos protótipos e aplicar diferentes princípios de funcionamento até alcançar o resultado satisfatório que permitisse, finalmente, iniciar o experimento de campo. Entre os princípios de funcionamento testados, o sistema de polarização da luz foi o que melhor atendeu as exigências de estabilidade térmica e luminosa, além da precisão de leitura, justificando a sua escolha em detrimento dos sistemas a base do infravermelho e da indução eletromagnética.

Projeto do sensor

O projeto do sensor fotoeletrônico de aquisição de altura de escoamento de deflúvio superficial foi desenvolvido exclusivamente para atender um dos objetivos principais da pesquisa, que consiste no estudo da variação em tempo real da lâmina de escoamento no terreno. É um sistema inédito para o registro em tempo real, de pequenas profundidades de lâmina de escoamento, objetivando o estudo da sua hidrodinâmica.

O sensor é constituído por um sistema mecânico e um circuito eletrônico. O sistema mecânico é composto por uma haste de aço inoxidável de 2 mm de diâmetro, na extremidade da qual é montada uma boia esférica extremamente leve. A um eixo de alumínio usinado e montado sobre dois rolamentos é fixada a haste de inox, cuja condição de equilíbrio é ajustada com o auxílio de um contra-peso fixado na segunda extremidade. Sobre o mesmo eixo, um disco de alumínio de 1,0 mm de espessura e 76,2 mm de diâmetro dotado de movimento excêntrico serve de obturador do feixe do sistema de fotodíodo e fototransistor.

O fotodíodo e o fototransistor são montados transversalmente ao obturador, alimentados por uma fonte de 220 V. A progressão do obturador dentro do feixe de luz emitido pelo fotodíodo provoca uma interceptação da intensidade do feixe a ser recebida pelo fototransistor.

As Figuras 3.4 e 3.5 mostram respectivamente os projetos do sensor fotoeletrônico desenvolvido e do suporte, construído em aço inox, para instalação em campo.

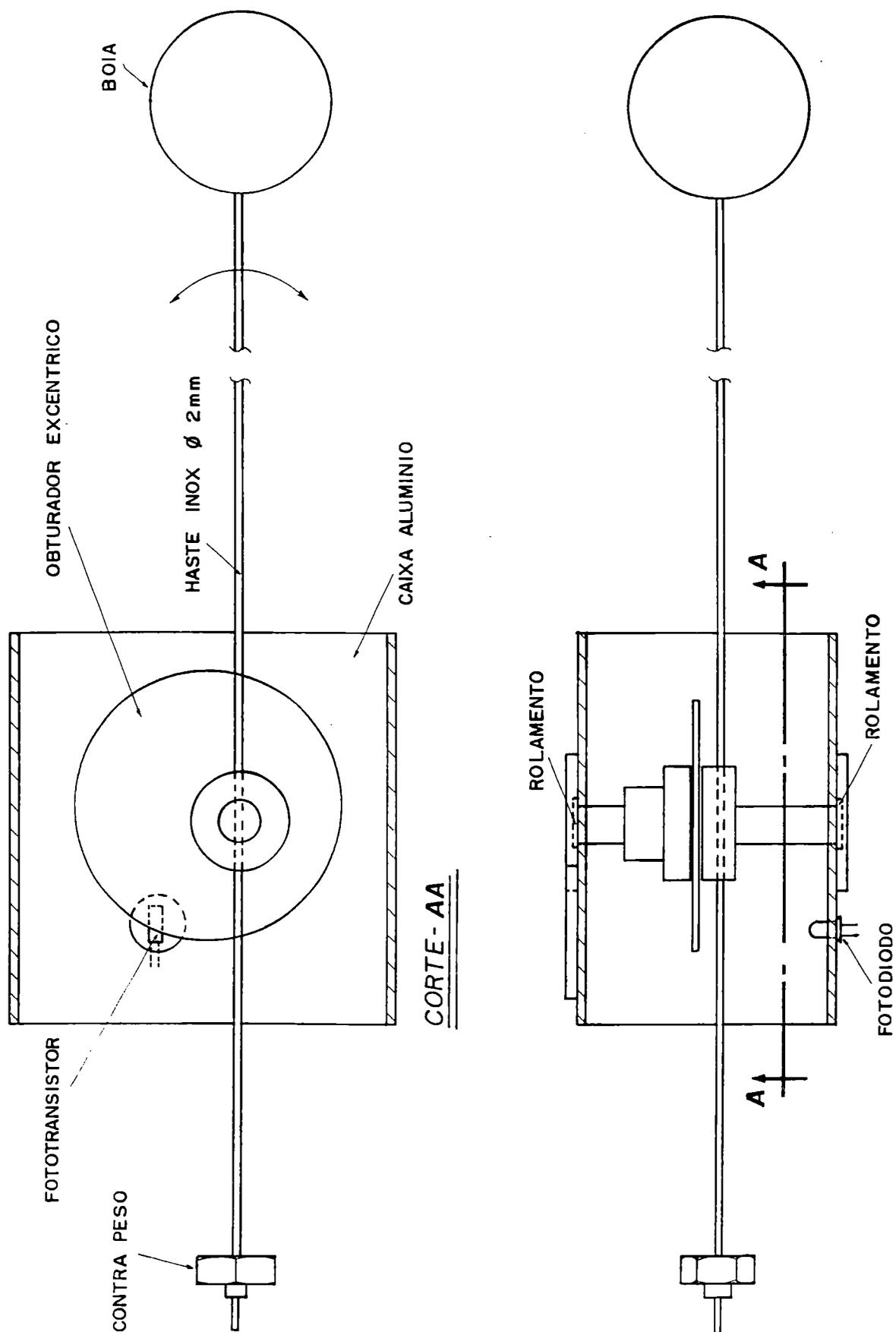


FIG.3.4- SENSOR FOTOELETROMECÂNICO DE ALTURA DE ÁGUA

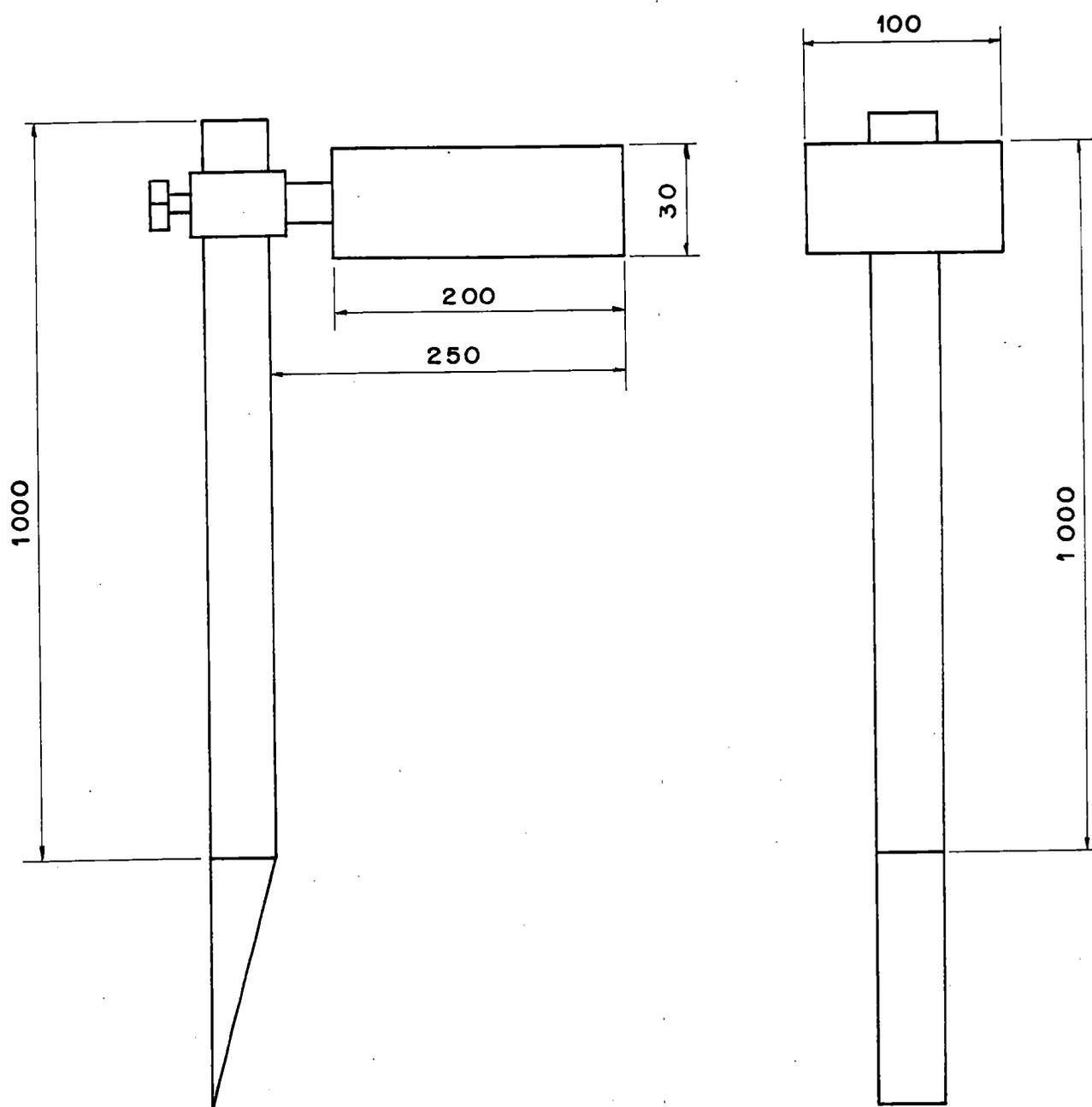


FIG. 3.5- SUPORTE DO SENSOR FOTOELETROMECÂNICO DE ALTURA DE ÁGUA E DO CIRCUITO ELETRÔNICO.

O impulso elétrico gerado pelo fototransistor, proporcional à intensidade de luz que incide sobre a sua área de detecção, é então transmitido ao circuito eletrônico responsável em analisar, filtrar, e amplificar o sinal. O sinal é então transformado em corrente elétrica, cuja tensão é enviada para a placa de aquisição de dados. Como a progressão do obturador é função da altura da lâmina do escoamento, a tensão gerada pelo sistema também é função desta altura.

A rede de sensores foi conectada a um microcomputador que, através da placa de aquisição de dados de 16 canais, registrava os sinais provenientes dos sensores. Os sinais fotoelétricos são transformados em tensão, proporcionalmente ao deslocamento sofrido pelo obturador, possibilitando obter o registro em tempo real da variação da altura do escoamento nos pontos correspondentes a cada sensor.

Testes de laboratório

Após concluir o projeto de construção, os circuitos de controle eletrônico de sinal construídos foram calibrados individualmente por varredura de sinal, utilizando um osciloscópio, e apresentaram-se estáveis, com mínimo de ruídos. Os sensores foram então montados em bancada de testes para calibração da faixa de leitura, interferência entre sensores e detecção de perda de sinal devido a extensão dos cabos de ligação à mesa de aquisição de dados.

Foi utilizado, para cada sensor o cabo de ligação, já no padrão de instalação em campo, constituído por um conjunto de três vias de fios que servem para alimentação, envio de sinal e aterramento, num comprimento de 30 metros. A perda de sinal observada devido ao comprimento do cabo de ligação foi desprezível. Porém, detectou-se ruídos no sinal, que foram eliminados com introdução de um capacitor na saída de sinal para a placa de aquisição de dados. Isso garantiu que o afastamento da mesa de aquisição de dados em relação à área experimental não seria crítico dentro do limite de 30,0 metros. As curvas de calibração levantadas mostraram uma faixa de linearidade para altura de lâmina da ordem de 8 cm a 10 cm. Acima desses valores o fotodíodo apresentou uma resposta mais lenta, comprometendo a linearidade até então obtida. As Fotos 3 e 4 mostram a mesa de padronização do

circuito eletrônico e detalhes do sensor fotoeletrônico, sendo preparado para teste de calibração.

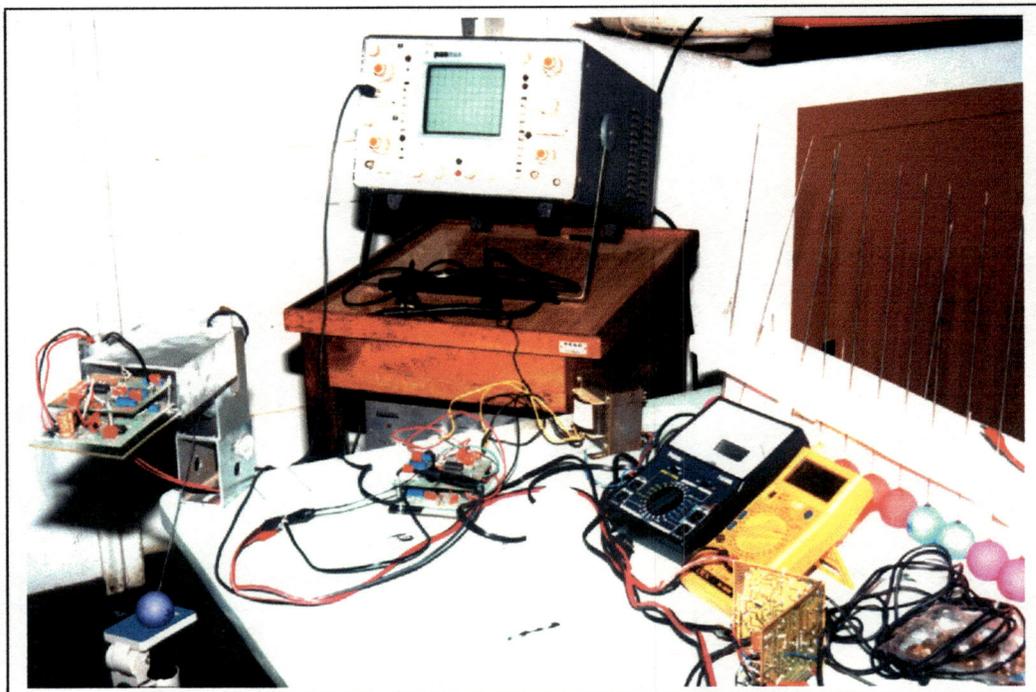


Foto 3. Padronização eletrônica e calibração do circuito de controle do sensor de deflúvio

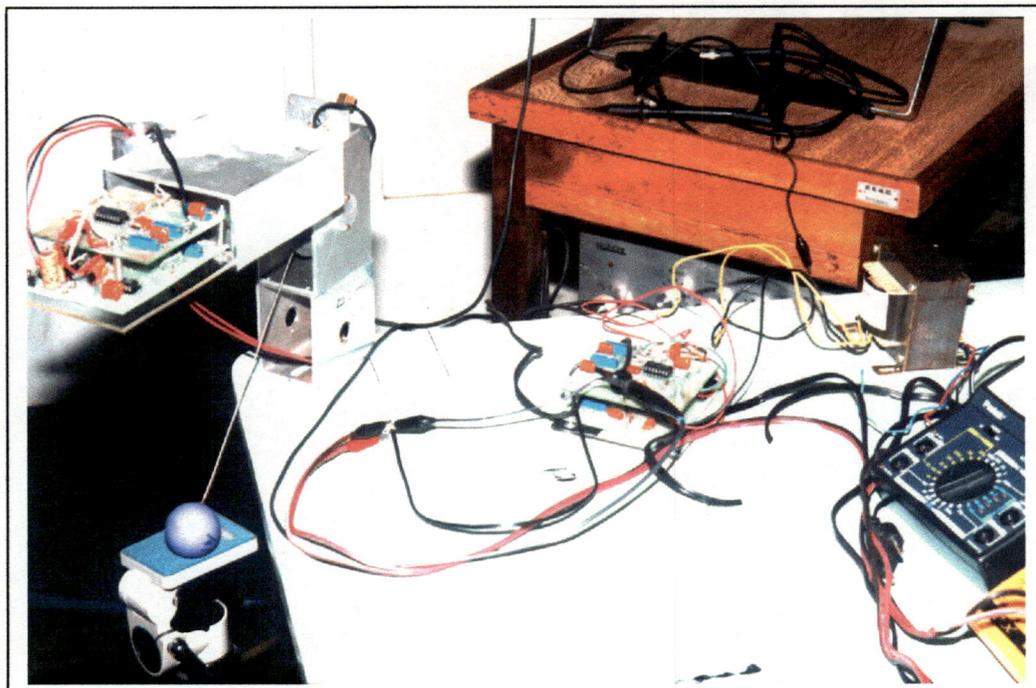


Foto 4. Detalhes do sensor fotoeletrônico e do circuito de controle

Fazendo-se ajuste no obturador do feixe de modo a explorar a excentricidade do disco, melhorou-se a linearidade mas, uma regressão polinomial de ordem 3 apresentou melhor ajuste, com alto coeficiente de correlação, de 99,99 %. Porém, observou-se uma deriva térmica e luminosa que evidenciaria a inconfiabilidade do sistema.

Deriva térmica e luminosa

Durante as repetições dos testes de calibração, foi observada uma flutuação excessiva da tensão de saída, quando o sistema é mantido numa mesma posição de leitura correspondente à uma determinada altura de lâmina de água por certo período de tempo. Esta observação levou à realização de testes de aquecimento e esfriamento do disco obturador e do fotodíodo isoladamente. Foi observado o funcionamento do sistema em ambientes naturalmente iluminados, parcialmente iluminados e totalmente escuros.

Os resultados evidenciaram que o fotodíodo utilizado não possuía características estáveis de emissão e detecção com variação da temperatura e da intensidade de luz. Uma blindagem foi testada contra a variação da energia luminosa, mas o resultado não se mostrou satisfatório, devido a própria alimentação do fotodíodo produzir variação térmica dos seus componentes, alterando a emissão do infravermelho e a detecção, causando a deriva térmica. A tentativa de blindagem térmica pareceu inviável, além de complexa execução para um equipamento que trabalharia em condições de campo.

Concluiu-se, portanto, que a deriva térmica e luminosa compromete a confiabilidade do equipamento para uso em condições de campo, a não ser em ambiente com temperatura controlada e ausência de luz. Nestas condições, é possível fazer uma correção da deriva, estudando a variação da temperatura e da luminosidade em correlação com a tensão de saída e a altura de referência. As Fotos 5 e 6 ilustram a bancada de calibração, e o processo de calibração dos sensores sendo realizado, no laboratório.

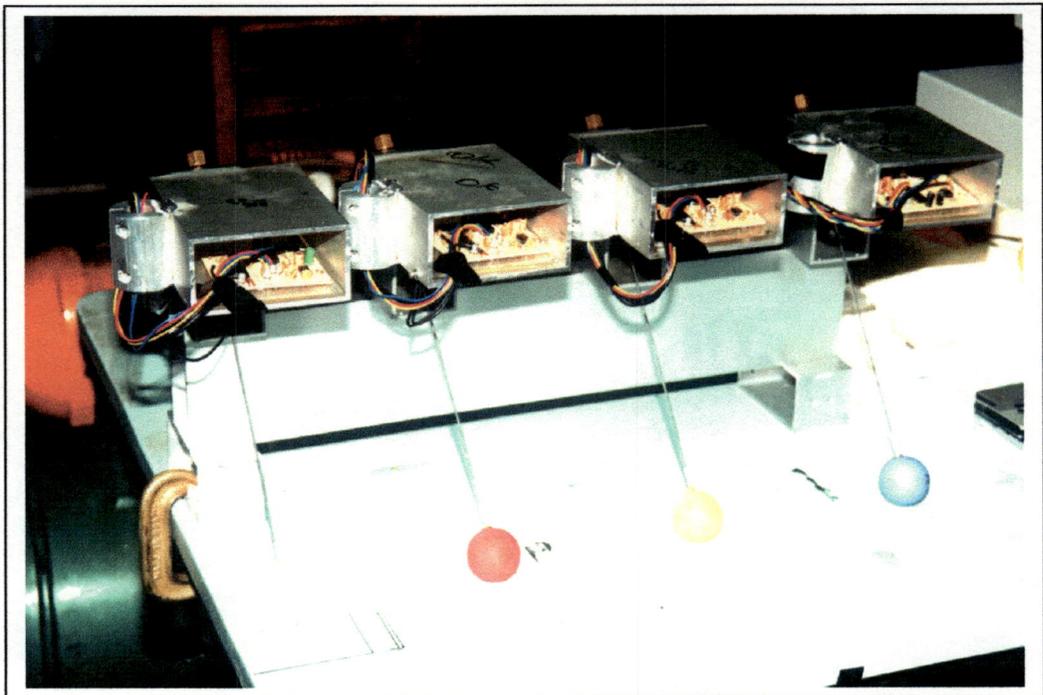


Foto 5. Detalhes dos sensores fotoeletrônicos de escoamento na bancada de testes

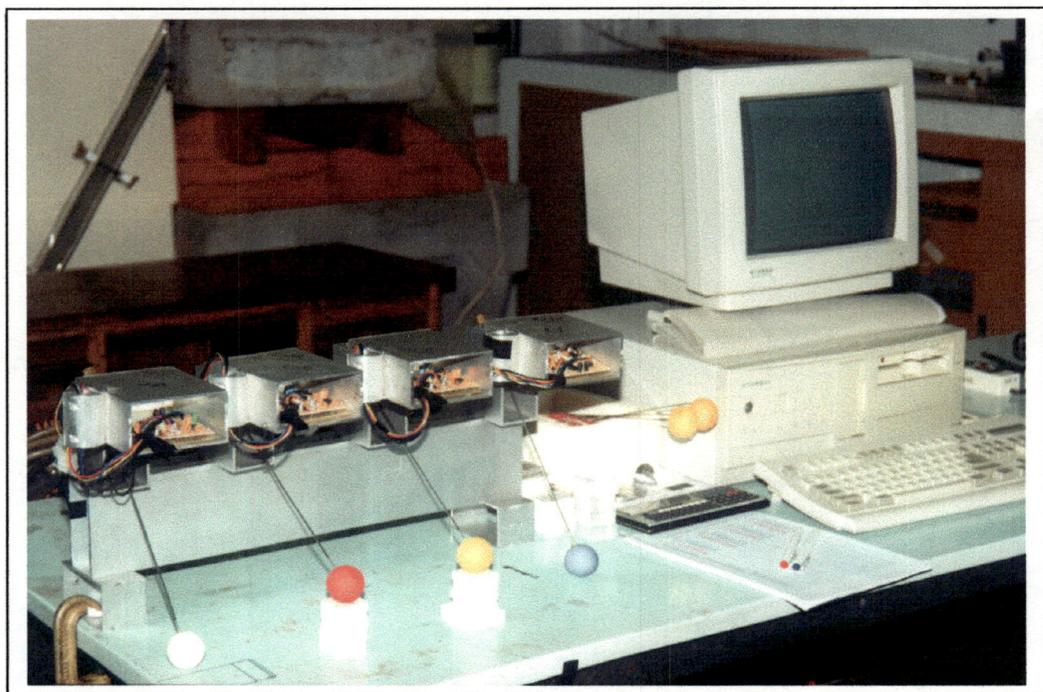


Foto 6. Sensores na bancada de testes, ligados ao microcomputador de aquisição de dados

Polarização do feixe de luz

Para eliminar o problema da deriva térmica e luminosa, o princípio da polarização da luz foi testado e adotado. Neste novo sistema, utilizou-se um fotodíodo, que emite luz na faixa de 800 nanômetros, ao invés do díodo de infravermelho. Um fotodetector é posicionado em frente ao fotodíodo dentro do mesmo plano, de forma que os centros de detecção e de emissão estejam perfeitamente alinhados. Para tanto, os elementos óticos são encapsulados em um pequeno bloco de alumínio, separados por uma fenda de 3 mm de largura, por onde desloca-se o disco polarizador.

O bloco de encapsulamento é montado verticalmente sobre o eixo que movimenta a boia, com a fenda posicionada perpendicularmente ao eixo. O fotodetector recebe a aplicação de uma pequena placa de polarizador de 3 mm² através de uma cola especial que não afeta a transparência do fotodetector e nem da placa de polarizador. Este elemento polarizador que separa o led e o fotodetector tem função de tornar os feixes difusos de luz emitidos pelo led em raios paralelos após atravessar o polarizador antes de atingir o fotodetector.

Sobre o eixo que movimenta a boia é fixado um segundo elemento de polarizador, com a geometria de um semi-círculo de circunferência, posicionado no limite do campo de interceptação do feixe de luz quando a boia está na posição zero. Com o deslocamento da boia, o segundo elemento de polarizador fixado ao eixo entra no campo de interceptação do feixe de luz, e conforme a sua progressão dentro deste campo em função da variação da posição da boia, o ângulo inicial relativo ao polarizador colocado sobre o detector varia, provocando a redução ou o aumento do campo de feixes paralelos recebidos pelo fotodetector, isto é, a variação da intensidade de luz que incide sobre o detector através do princípio de polarização da luz.

Um circuito eletrônico totalmente redesenhado, do tipo "lock-in", mais estável e com três estágios de amplificação, é encarregado de receber e analisar os impulsos elétricos gerados pelo sistema de polarização, transformá-los em tensão e enviar esta tensão para a placa de aquisição de dados. A tensão lida é então relacionada com a posição da boia, isto é, a altura referente à cada leitura. O

software de gerenciamento do circuito possibilita zerar o sistema em qualquer posição desejada, oferecendo assim maior flexibilidade na escolha de referencial para início de cada simulação. O intervalo de leitura ou de aquisição é de 10 ms ou maior, sendo que nos tempos menores, até 100 ms, é possível registrar efetivamente todas as variações de posição da boia do sensor. Em intervalos mais longos as aquisições são mais lentas, caracterizando as médias da variação. Dotado de um relógio e um loop de registro que divide o arquivo de dados de cada sensor em sub-arquivos automaticamente a cada 10 minutos, ou qualquer outro intervalo estipulado, desde que se ajuste o intervalo de aquisição de modo a respeitar a capacidade do microcomputador e do software de leitura. o software de aquisição possibilita trabalhar com intervalos de tempo de aquisição entre 10 ms a 200 ms, sem riscos de perder arquivos, por serem muito extensos nestes casos de intervalos de tempo de aquisição muito curtos.

Confiabilidade do sistema

Nesta nova configuração desenvolvida, os testes indicaram que não há influência da variação da luminosidade natural nem da frequência de 60 Hz. Em condição de laboratório, todos os testes realizados mostraram que a variação da temperatura no decorrer dos dias de testes não influenciou as leituras, com o sistema mantido em funcionamento ininterruptamente por 10 a 12 h aproximadamente.

Os testes de perda de sinal devido a conexão do cabo de alimentação e envio de sinal com comprimento de 30 metros também mostraram que o sinal não sofreu alteração, mantendo-se sem ruídos. As planilhas dos resultados dos testes de calibração realizados durante o desenvolvimento do sistema são apresentados nas tabelas do ANEXO -1.

Os resultados dos testes mostraram que o erro de leitura do sensor desenvolvido estava na faixa dos 2,5% nas primeiras versões, e com as modificações introduzidas, como encapsulamento, a redução da capacitância do fio de alimentação e envio de sinal, a implementação do terceiro estágio de amplificação, o erro ficou na faixa de 0 a 1,5 % , como mostram as planilhas do ANEXO – 1. Os testes ao ar livre, simulando as condições de operação em campo, são ilustrados pelas Fotos 7 e 8.



Foto 7. Testes dos sensores ao ar livre simulando a operação em condições de campo

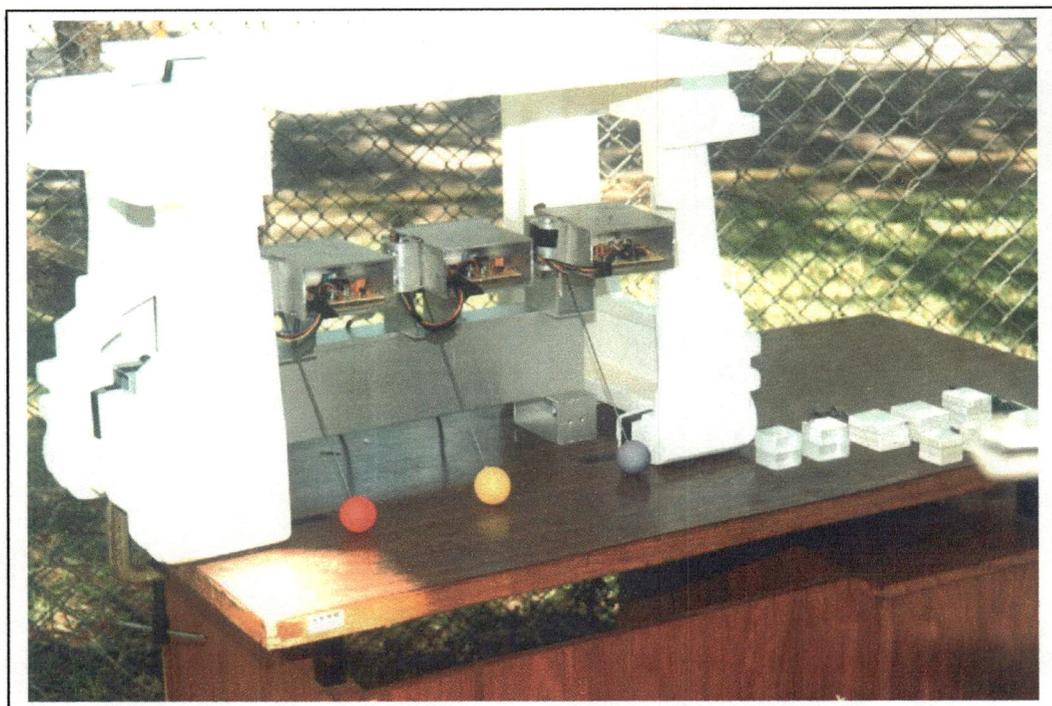


Foto 8. Testes ao ar livre com proteção contra incidência direta de raios solares

Um limite de 3 % de variação nas leituras, em valor absoluto, foi estipulado para aceitação dos registros de aquisição de dados em condição de campo. Mas, com base nos dados dos testes realizados em laboratório, acredita-se que esse percentual de erro de leitura não deva ser superado.

No caso do erro superar 3 %, o software dispõe do recurso de recalibração do sistema que passa a ser ajustado com novas constantes internas de regressão. Este recurso permite também que, em caso de mudança muito acentuada de temperatura, mas sem oscilações em períodos curtos menores que a duração de uma simulação ou período de aquisição de dados, o sistema seja ajustado para aquela condição de temperatura. Porém, esses casos de eventuais variações extremas precisam ser testados com o objetivo de verificar a estabilidade das constantes de ajuste. A imagem da Foto 9 ilustra o funcionamento simultâneo de todos os sensores, monitorados através do microcomputador, durante testes de interferências cruzadas.

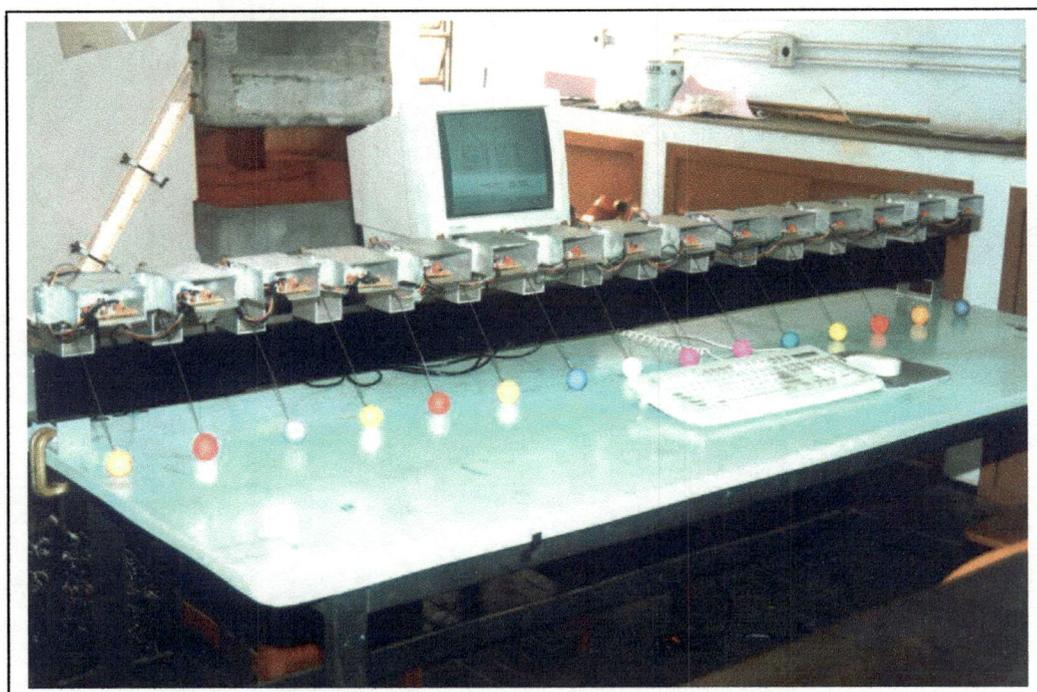


Foto 9. Testes finais de estabilidade de leituras e operação em conjunto:
testes de detecção de interferências cruzadas

3.2.6 Sistema receptor e de drenagem do deflúvio superficial

O sistema receptor e de drenagem de runoff é constituído por uma calha condutora, que recebe o volume de deflúvio proveniente da área de concentração, Figura 3.6, e o descarrega na caixa receptora. Os detalhes do sistema são mostrados na Figura 3.7. Uma tubulação de PVC de 150 mm de diâmetro faz a drenagem da caixa receptora para a represa. Na construção do sistema de drenagem, por questão de custo, a saída da tubulação de drenagem foi ligeiramente modificada para aproveitar a mesma valeta onde foi assentada a tubulação de recalque. A Figura 3.8 apresenta o lay-out da área experimental.

3.2.7 Medição do volume do deflúvio superficial

O volume do escoamento superficial proveniente da área experimental, chegava à área de concentração concretada e impermeabilizada (Figura 3.6), era conduzido para a caixa receptora bi-septada, através de um canal curto com vertedor. A fração do material erodido que passou pela área de concentração era retido no primeiro septo da caixa, para sedimentação. O segundo septo serviu de caixa de passagem do runoff para a tubulação de drenagem.

A carga em cima do vertedor foi registrada por um sensor fotoeletrônico de deflúvio, possibilitando gerar o hidrograma de saída do escoamento para cada simulação experimental. Através da transformação da carga em vazão, foi possível fazer a verificação do balanço de massa de água bombeada para a parcela experimental e do volume infiltrado, calculado a partir da equação de infiltração, procedimento essencial no ajuste de parâmetros do modelo de infiltração.

Além destes procedimentos de medição, o escoamento foi monitorado em seções estratégicas ao longo do domínio através da instalação de sensores de altura de escoamento, para medição automatizada da lâmina do deflúvio superficial. Esta medição tinha por objetivo determinar a configuração do escoamento local em função da microtopografia e do comportamento hidráulico do escoamento em todo o domínio e os efeitos de interferência causados pelas irregularidades do terreno, ou seja, pela microtopografia. A imagem da Foto 10 ilustra em detalhe, o trecho final da área experimental e a área de concentração do deflúvio.

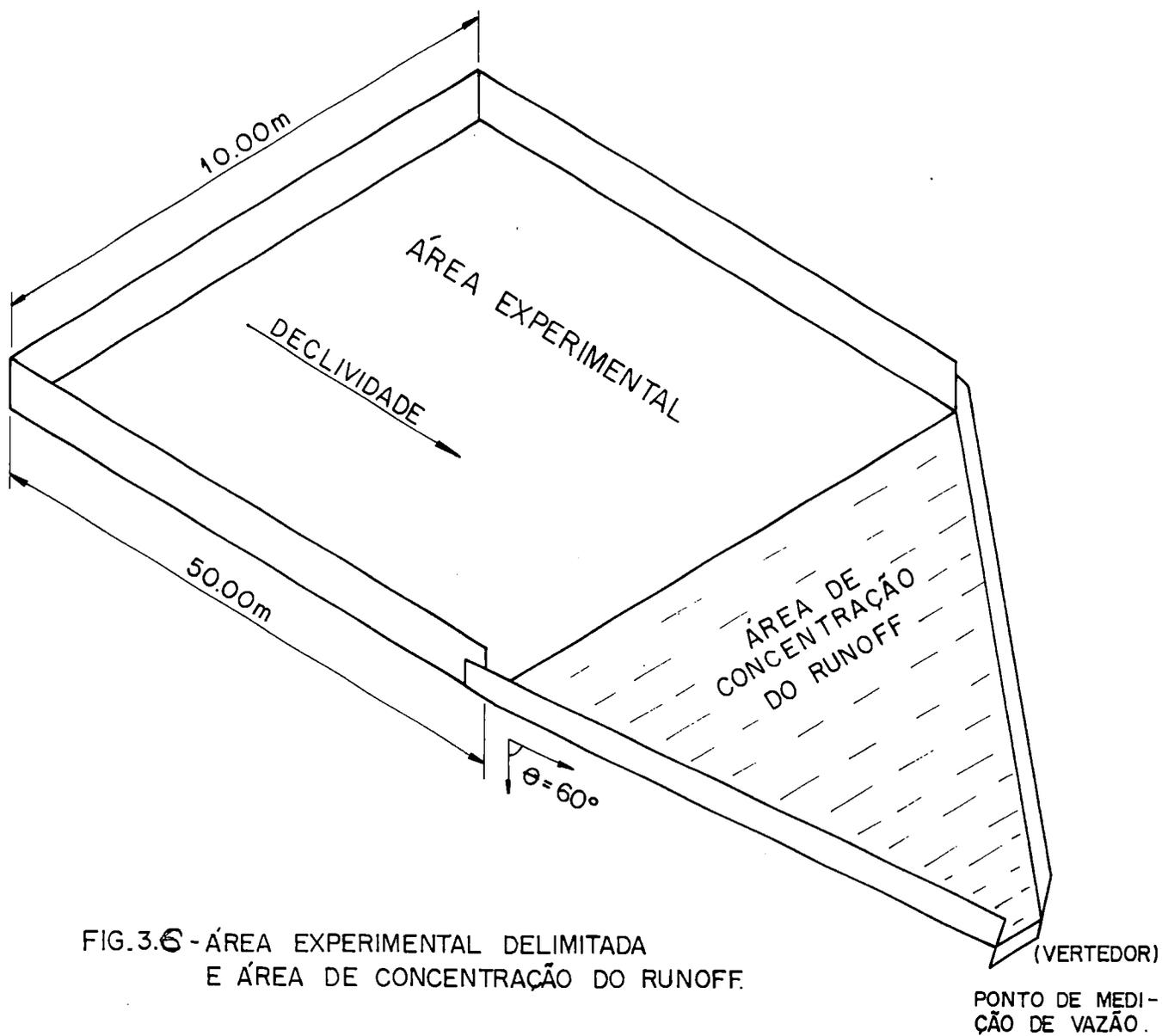


FIG.3.6 - ÁREA EXPERIMENTAL DELIMITADA
E ÁREA DE CONCENTRAÇÃO DO RUNOFF.

ÁREA EXPERIMENTAL



ÁREA DE CONCENTRAÇÃO DO RUNOFF

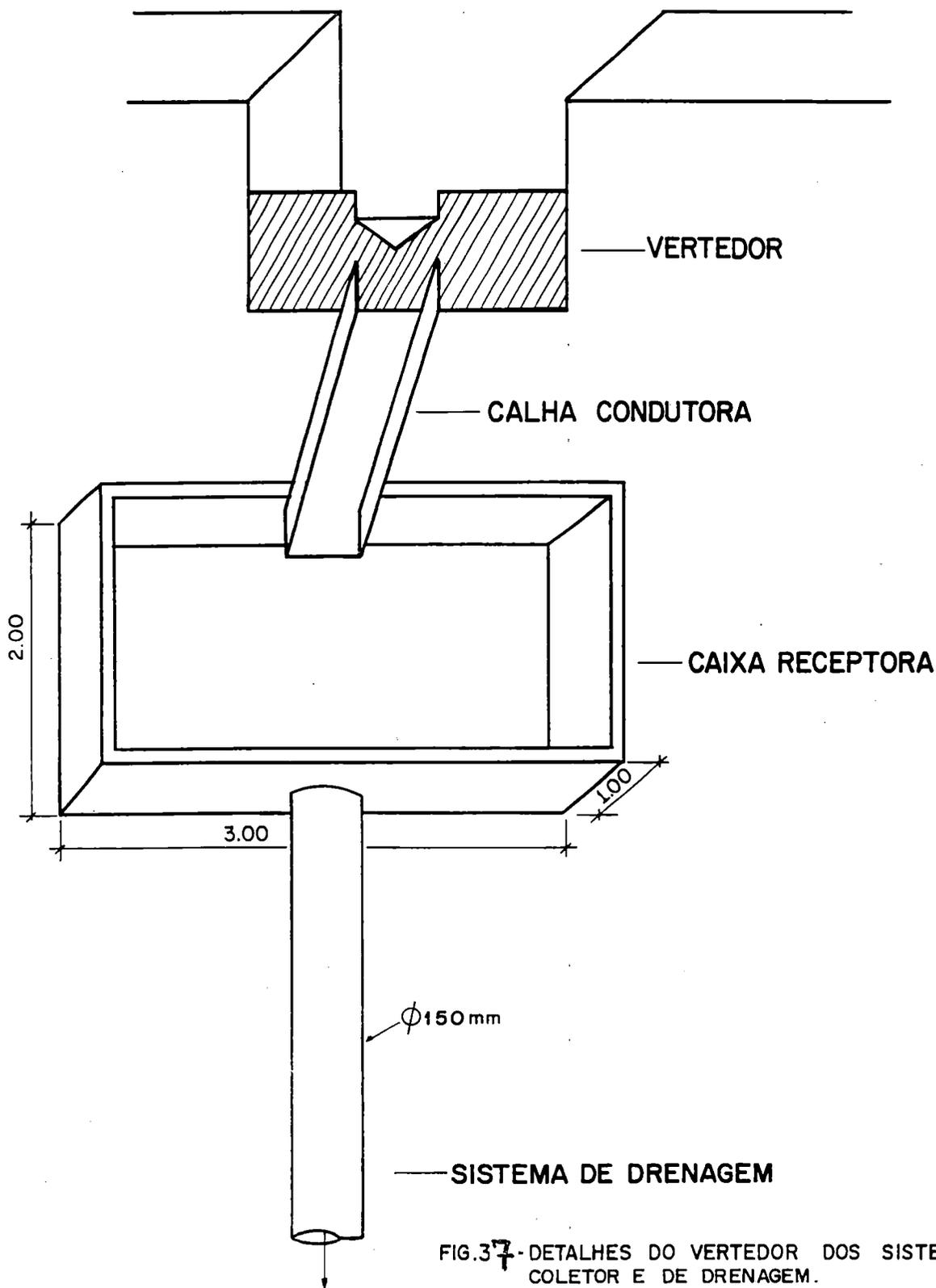


FIG.37 - DETALHES DO VERTEDOR DOS SISTEMAS COLETOR E DE DRENAGEM.

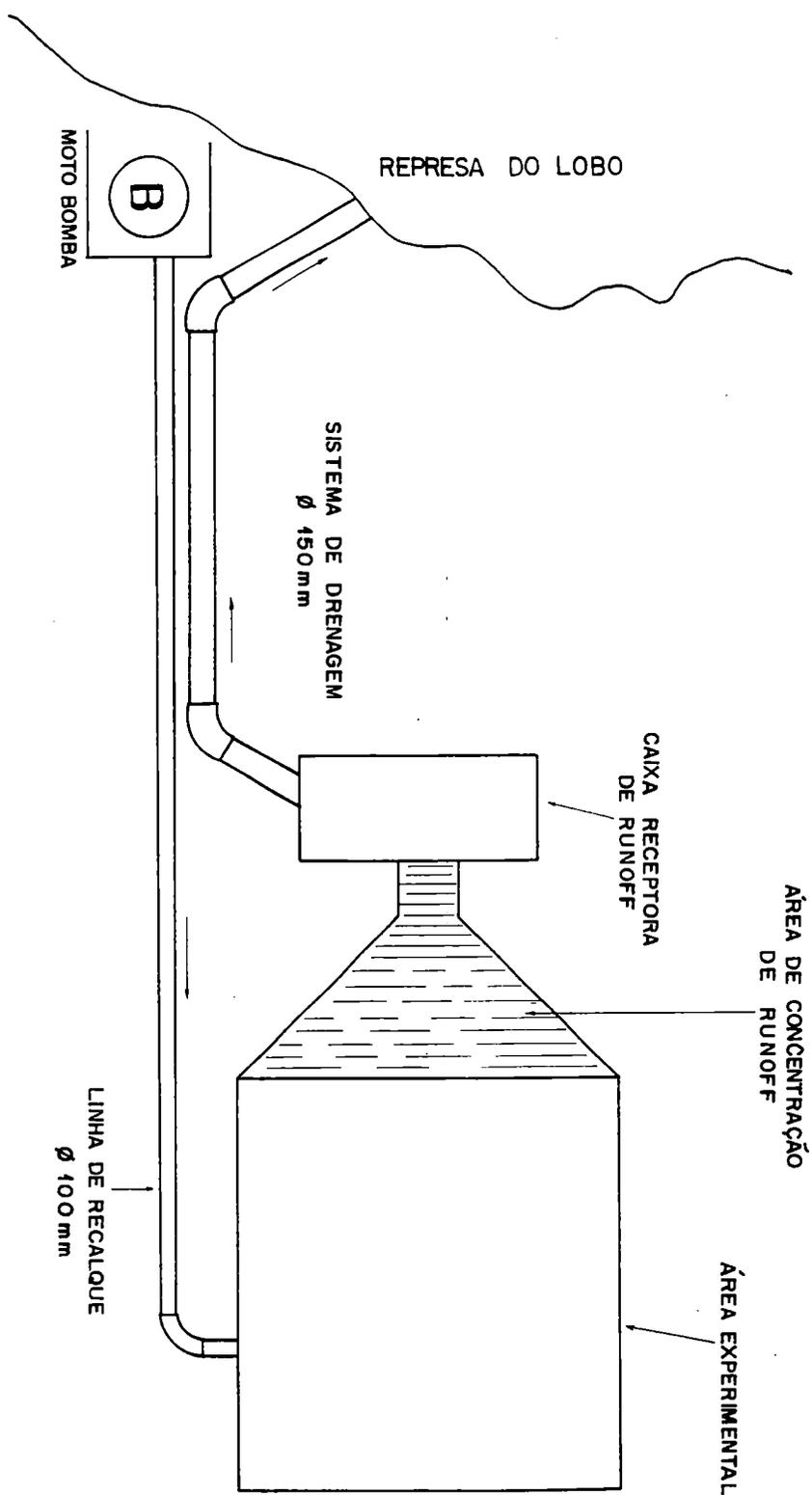


FIG. 3. 2 - ESQUEMA EM PLANTA DA ÁREA EXPERIMENTAL E DOS SISTEMAS DE RECALQUE E DRENAGEM.



Foto 10. Detalhes do trecho final da área experimental e área de concentração (concretada) com o canal de saída para a caixa receptora de deflúvio

A energia do escoamento, função da variação espacial e temporal da lâmina do escoamento no domínio, é quantificada com satisfatória precisão somente se conhecidos a variação da altura do escoamento no domínio e o microrrelevo do leito. O registro da variação da lâmina do deflúvio em tempo real através do sistema computadorizado de aquisição de dados possibilita que a dinâmica do escoamento possa ser analisada, investigada. A grandeza física definida pela energia de escoamento, e expressa através da Equação 3.14, constitui uma variável fundamental nesta busca da relação entre a hidrodinâmica do escoamento e o processo de erosão, considerando a influência do microrrelevo do leito.

3.2.8 Determinação da carga de sedimento

O volume do deflúvio superficial conduzido para a caixa receptora (Figura 3.7), foi amostrado após passar pelo primeiro septo da caixa, a intervalos de 5 minutos, durante todo o ensaio. As amostras em frascos de 500 ml, foram

identificados sequencialmente pelo seu intervalo de amostragem. As amostras foram decantadas durante 72 horas, e em seguida, filtradas. O material retido foi submetido à secagem em estufa a 105°C - 110°C durante 24 horas, para a determinação da concentração de sedimentos. A carga total de sedimentos durante um evento único de simulação é então determinada, com base na concentração e no volume total do escoamento superficial, somada ao total de material retido na área de concentração e no septo de sedimentação. A estimativa da erosão através do modelo com base na energia de escoamento pôde ser validado a partir da comparação com carga total de sedimentos obtida.

3.3. MODELOS MATEMÁTICOS

A propagação de escoamento sobre o solo, inicialmente seco ou com teor de umidade variável envolve escoamento a superfície livre com uma frente de molhamento dinâmica e um domínio em contínua expansão, portanto, irregular. O principal problema associado a este tipo de propagação é a dificuldade de se levar em conta, na discretização, esta expansão e incorporá-la a um esquema numérico. No caso da propagação em terreno inicialmente seco, os contornos da frente de avanço não são conhecidos a priori, e, conseqüentemente, nem suas equações nestes contornos. Isso introduz um grau de dificuldade adicional na elaboração das hipóteses do equacionamento no contorno da frente de avanço.

Portanto, a resolução do problema do escoamento em terreno inicialmente seco ou de teor de umidade inicial variável requer a construção de um esquema numérico que possibilite os cálculos serem confinados apenas na região atingida pelo escoamento, e o rastreamento da frente de avanço. Além do mais, uma vez que os contornos se deslocam a cada novo passo de cálculo, severas distorções da malha computacional podem ser evitadas somente se for feita uma discretização dinâmica durante a resolução, de maneira que reflita as mudanças físicas do escoamento no domínio.

3.3.1 Modelo bidimensional: equações características

O escoamento bidimensional não permanente a superfície livre pode ser descrito através das equações hidrodinâmicas de Saint-Venant. A formulação das equações é baseada na conservação de massa e da quantidade de movimento (balanço de energia) do fluido, e assumindo uma distribuição hidrostática de pressão, uma declividade relativamente pequena do terreno ou do leito do escoamento e uma distribuição uniforme de velocidade na vertical.

O modelo hidrodinâmico, constituído pela equação de conservação de massa (Eq. 3.1) e pelas equações da quantidade de movimento nas direções x e y (Eq. 3.2, 3.3), pode ser escrito através da seguinte formulação, segundo AKANBI e KATOPODES (1988):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = i \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2h)}{\partial x} + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} + g \frac{\partial(\frac{h^2}{2})}{\partial x} = gh(S_{0x} - S_{fx}) + D_{ix} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(v^2h)}{\partial y} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} + g \frac{\partial(\frac{h^2}{2})}{\partial y} = gh(S_{0y} - S_{fy}) + D_{iy} \quad (3.3)$$

onde h é profundidade da água; u e v são os componentes da velocidade do fluido respectivamente nas direções x e y ; S_{0x} e S_{0y} componentes da declividade do terreno ou dos microcanais em x e y ; S_{fx} e S_{fy} componentes da declividade da linha de energia em x e y ; i a intensidade efetiva de chuva; e g a constante de aceleração gravitacional.

As equações hidrodinâmicas de Saint-Venant são equações diferenciais parciais, não lineares do tipo hiperbólico. Portanto, não podem ser integradas diretamente para obtenção da solução, a não ser em casos onde simplificações podem ser feitas, como as que resultam nos modelos cinemático e difusivo mais aplicados a escoamento unidimensional. Devido ao alto grau de não linearidade das equações características e por serem do tipo hiperbólico, a solução é obtida apenas através dos

métodos numéricos, como o das diferenças finitas, dos elementos finitos ou do volume finito.

Os termos finais das equações (3.2) e (3.3) são aproximados na forma a seguir, (AKANBI e KATOPODES, 1988):

$$D_{i_x} = \frac{u}{2}i \quad (3.4)$$

$$D_{i_y} = \frac{v}{2}i \quad (3.5)$$

onde, D_{i_x} e D_{i_y} representam os termos de contribuição lateral.

Adotando-se a fórmula de Manning, os termos da declividade da linha de energia podem ser expressos como sendo:

$$S_{f_x} = \frac{n^2 u (u^2 + v^2)^{1/2}}{h^{4/3}} \quad (3.6)$$

$$S_{f_y} = \frac{n^2 v (u^2 + v^2)^{1/2}}{h^{4/3}} \quad (3.7)$$

Os componentes da declividade do terreno são expressos:

$$S_{0_x} = -\frac{\partial z_0}{\partial x} \quad (3.8)$$

$$S_{0_y} = -\frac{\partial z_0}{\partial y} \quad (3.9)$$

onde z_0 é a elevação do terreno ou leito do escoamento em relação à cota de referência.

3.3.2 Modelo de infiltração

A hidrologia do escoamento superficial em bacias depende fundamentalmente do processo de infiltração. A infiltração é definida como a entrada da água no perfil do solo a partir da sua superfície. É um processo hidrológico importante e complexo que deve ser cuidadosamente tratado na hidrologia de bacias, pois é a taxa de infiltração que por exemplo determina a distribuição e o volume do escoamento superficial durante um evento de chuva. Conseqüentemente, sua relação com o processo de erosão é quase direta. Diversos fatores influenciam a infiltração como as características texturais do solo, o teor de umidade inicial, a intensidade e duração da chuva, a concentração de sedimento no fluxo, a microtopografia. Como essas variáveis apresentam geralmente variações muitas vezes não desprezíveis a nível de campo, é importante que se busque levar em conta a variabilidade da infiltração visando maior precisão das estimativas do escoamento superficial. Dos fatores acima mencionados, o teor de umidade inicial tem um papel importante no comportamento da taxa de infiltração, principalmente no início do evento. A taxa de infiltração é elevada para condições de baixo teor de umidade inicial devido o elevado gradiente hidráulico e a maior disponibilidade da capacidade de armazenamento dos poros, mas esta dependência decresce a medida que o grau de saturação aumenta. Este mecanismo determina o rápido avanço da frente de molhamento e conseqüentemente, o comportamento da condutividade hidráulica em função da saturação. A literatura traz diversos modelos de infiltração para sua estimativa. O modelo de Green-Ampt é tido como de ampla aplicabilidade a nível de campo para a modelagem do processo da infiltração.

O modelo de infiltração de Green-Ampt é expressa na forma:

$$i = k \left(1 + \frac{p\psi}{F} \right) \quad (3.10)$$

Na qual, i = taxa de infiltração (mm/s) ; F = infiltração acumulada (mm) ; k = condutividade hidráulica saturada (mm/s) ; p = porosidade disponível ; e ψ = tensão de sucção da frente de molhamento (mm). A infiltração acumulada (F) é o produto

da porosidade disponível (p) e da lâmina infiltrada (d); e a taxa de infiltração (i) é o produto da porosidade disponível (p) e da variação da lâmina infiltrada (d) em relação ao tempo (MEIN e LARSON, 1973). A lâmina infiltrada é obtida pela seguinte expressão:

$$d = \left[d_0^2 + \frac{2k\psi}{p}(t - t_0) \right]^{1/2} \quad (3.11)$$

onde d_0 = lâmina infiltrada até o início do armazenamento superficial. A substituição da equação (3.11) na equação (3.10) permite reescrever a taxa de infiltração (i) na forma:

$$i = k \left[1 + \frac{\psi}{\left(d_0^2 + \frac{2k\psi}{p} \Delta t \right)^{1/2}} \right] ; \quad \Delta t = (t - t_0) \quad (3.12)$$

A aplicação do modelo requer apenas as estimativas da condutividade hidráulica (k), da porosidade (p) e da pressão capilar da frente de molhamento (ψ).

3.3.3 Modelo de erosão

O escoamento da água na superfície do solo ou em microcanais exerce forças hidráulicas nas interfaces solo-água, conhecidas por força trativa ou força de cisalhamento. A magnitude desta força depende do peso específico da água, da profundidade da lâmina do escoamento e do gradiente da linha de energia. Esta força é responsável pelo processo de erosão em bacias, em canais de irrigação e em leitos fluviais. A tensão trativa é geralmente descrita, segundo TORRI et al. (1987), citado por SLATERRY e BRYAN (1992), em caso de escoamento uniforme, isto é, assumindo uma distribuição uniforme da profundidade no domínio, pela equação:

$$\tau = \rho g R S \quad (3.13)$$

ou, assumindo profundidades muito pequenas, $R \approx D$,

$$\tau = \gamma DS \quad (3.13A)$$

onde τ é a tensão de cisalhamento (Pa), ρ é a densidade da água (kg/m^3), γ é o peso específico da água (N/m^3), g a aceleração da gravidade (m/s^2), R e D são respectivamente o raio hidráulico e a profundidade do escoamento (m) e S a declividade da linha de energia (m/m).

Do ponto de vista de energia hidráulica de escoamento o trabalho de remoção de partículas do solo, ou seja o processo de erosão, é sustentado pela grandeza Ω , que é a energia hidráulica do escoamento. Segundo BAGNOLD (1966, 1977), citado por SLATTERY E BRYAN (1992), a energia hidráulica de escoamento pode ser expressa pela equação:

$$\Omega = \frac{\rho g Q S}{w} \quad (3.14)$$

$$\Omega = \rho g R v S \quad (3.14A)$$

$$\Omega = \tau v \quad (3.14B)$$

onde, Q é a vazão escoada (m^3/s), w a largura do leito de escoamento, e v a velocidade média (m/s), sendo as outras variáveis definidas acima.

O equacionamento do processo da erosão tem diversas formulações que podem ser encontradas na literatura específica. A equação fundamental da erosão com base na força trativa exercida pelo escoamento é expressa pela fórmula:

$$E_r = K_r (\tau - \tau_c)^a \quad (3.15)$$

sendo E_r a taxa de remoção do solo, ($\text{g/m}^2/\text{s}$); K_r o fator de erodibilidade do solo, (g/m/s/Pa); τ_c a tensão de cisalhamento crítico; e o expoente a uma constante ($a=1.0$, FOSTER et al., 1982; $a=1.05$, KNISEL, 1980).

A investigação do processo de erosão a partir da aplicação da teoria da força trativa exercida pelo escoamento e da energia hidráulica exige que sejam conhecidas o comportamento da altura do escoamento no domínio e a resistência à erosão oferecida pelo solo.

Com base nas formulações apresentadas nas Equações (3.14) e (3.15), os esforços de modelagem matemática do processo de erosão causado pelo deflúvio superficial em áreas de encostas ou em bacias hidrográficas devem concentrar-se nas interações fluido-solo em termos de variáveis físicas quantificáveis com ênfase particular nas suas variações, devido ao estado dinâmico característico envolvido. Porém, a altura do escoamento do deflúvio é uma variável de difícil medição, como também a área efetiva onde o escoamento se concentra. Estas dificuldades constituem as principais fontes de erros nas medições e obtenção de dados experimentais.

4. ENSAIOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS

4.1 Planejamento dos ensaios

Na fase de preparação para o início dos ensaios, os ajustes essenciais para o bom desenvolvimento da experimentação foram executados, envolvendo:

- Testes do sistema hidráulico e do simulador de chuvas;
- Retirada da cobertura vegetal e nivelamento da área;
- Determinação das trajetórias preferenciais do escoamento;
- Levantamento das coordenadas dos pontos de instalação dos sensores;
- Instalação dos sensores de deflúvio superficial e dos pluviômetros;
- Montagem da unidade de aquisição automatizada de dados.

Testes do sistema hidráulico e do simulador

Através dos testes do sistema hidráulico e do simulador de chuvas foi definida a calibração do sistema que seria utilizada durante todos os ensaios. Estes testes foram desenvolvidos na própria área experimental como “área cobaia” aproveitando a cobertura vegetal de grama para evitar perdas de solo antes dos experimentos propriamente ditos iniciarem. O projeto de instalar em separado uma “área cobaia” para fazer os testes necessários, com o objetivo de ajustar o experimento, era inviável, devido as características da instalação: uma área de 500 m² (50 m x 10 m), onde a precipitação artificial era simulada por um sistema aéreo fixo, como ilustrado na imagem da Foto 11.



Foto 11. Vista do simulador de chuvas e início de pressurização

O funcionamento do simulador de chuvas mostrou um bom desempenho do sistema, simulando chuva intensa para gerar rapidamente escoamento superficial. A distribuição da precipitação na área apresentou uma faixa de aproximadamente 8 metros, no sentido transversal, com uniformidade de precipitação elevada, com variação de 5 a 15 % na faixa lateral da área, numa extensão de 1,0 a 1,50 m. O efeito do vento foi muito marcante na distribuição da precipitação pelo fato da área experimental estar em campo aberto, onde a ocorrência de vento é inevitável. Conforme a velocidade e a direção do vento, a área está sujeita à uma variação significativa da pluviometria e, conseqüentemente, afetando todo o escoamento e a extensão da área efetiva de contribuição. Isso fez com que os ensaios fossem iniciados em condições de ausência total de vento ou de vento muito fraco, mas este procedimento não garante que no decorrer de uma simulação haja mudança meteorológica brusca a ponto de interromper o ensaio ou descartar todos os seus dados. A imagem da Foto 12 mostra o sistema pressurizado, em pleno funcionamento e, pode-se observar o efeito do vento sobre a distribuição da precipitação. A Foto 13 ilustra a despressurização do simulador de chuvas.



Foto 12. Simulador pressurizado: avaliação da pluviometria e teste de uniformidade de distribuição



Foto 13. Despressurização do simulador de chuvas

Para evitar que a desintegração do solo pelo respingo de gotas pesadas após a despressurização mascare o processo em estudo, foi instalado um registro de $\frac{1}{2}$ polegada no final da linha dos aspersores a ser acionado simultaneamente com a despressurização do sistema.

Remoção da cobertura vegetal e preparo da área

Na sequência dos testes do simulador e do sistema hidráulico, iniciou-se o preparo da área experimental. A cobertura vegetal foi removida manualmente e com muito cuidado para não prejudicar o nivelamento subsequente. Após esta primeira fase do preparo, foi possível observar a existência da forte declividade transversal, renunciando os cuidados com o nivelamento. Assim como a retirada da cobertura, o corte para nivelar o terreno foi também executado manualmente para preservar ao máximo o solo da compactação excessiva caso utilizasse maquinaria pesada. Após o corte do terreno e o nivelamento, a declividade resultou em 4,54 %, dentro da faixa de projeto que era de 4 a 6 %. A ilustração da Foto 14 apresenta a proteção da área experimental contra chuvas naturais, após o preparo, antes de iniciar os ensaios.



Foto 14. Proteção da área experimental com lona plástica: prevenção contra chuvas naturais

Instalação dos sensores de deflúvio

Nesta etapa, foi montada a unidade principal de aquisição automatizada de dados de altura de escoamento, constituída pelo microcomputador com a interface de aquisição. A imagem da Foto 15 apresenta a unidade computadorizada de aquisição. Para proteger o sistema contra variação térmica devido a exposição ao tempo por período prolongado, o módulo que abriga o equipamento foi internamente revestido com isopor e foi mantido rigorosamente trancado, tendo o acesso permitido somente ao responsável em operar o sistema.

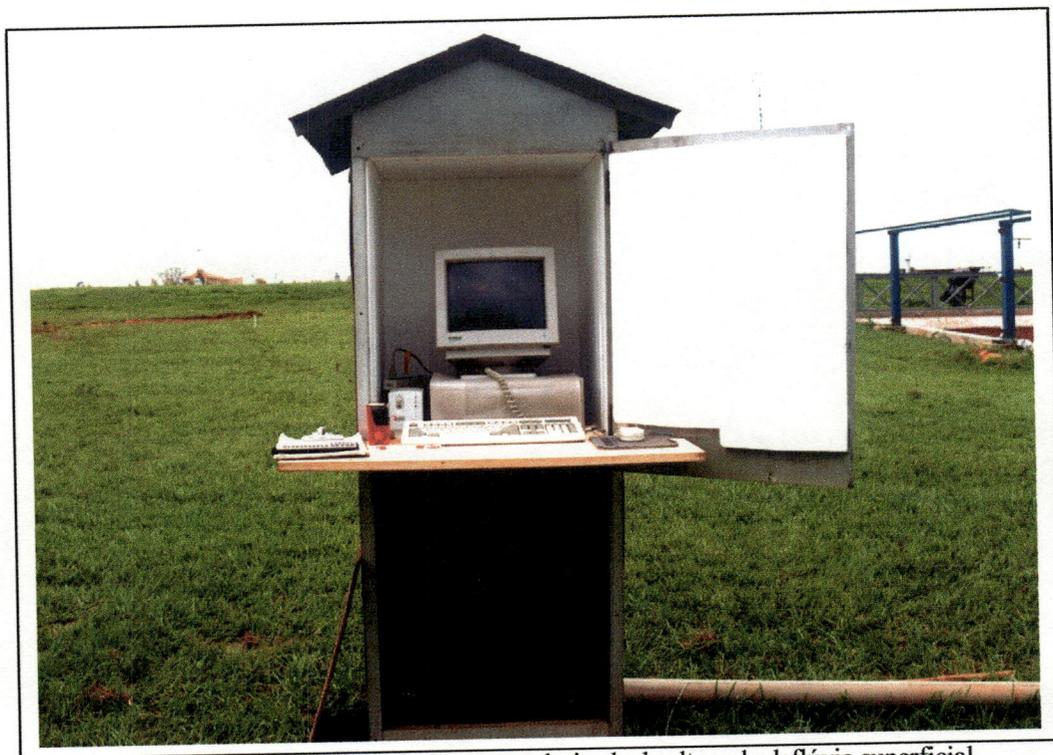


Foto 15. Unidade de aquisição computadorizada de altura de deflúvio superficial

À unidade de aquisição foram conectados os 16 sensores instalados na área para monitorar o deflúvio superficial. A sensibilidade de resposta dos sensores é comandada pelo programa de gerenciamento de aquisição, o qual permite escolher o intervalo de tempo entre uma aquisição e outra, possibilitando aquisição em tempo real, ou com intervalo mais longo. É possível também utilizar duas calibrações de gerenciamento dos sensores em função da temperatura, onde, o limite da faixa de

resposta da calibração para leitura com precisão era de 14°C , determinando tempo frio ou tempo quente. A calibração podia ser refeita toda vez que se necessitava de uma nova aferição, ou após manutenção do sistema.

A instalação dos sensores na área foi feita, após a determinação prévia dos caminhos preferenciais do escoamento. Este procedimento era essencial para a localização dos pontos de monitoramento e do rastreamento do surgimento dos microcanais. A ilustração da Foto 16 mostra uma vista parcial da área experimental, com os sensores instalados e protegidos com caixas de isopor contra chuvas, insolação direta e ação do tempo por exposição prolongada.

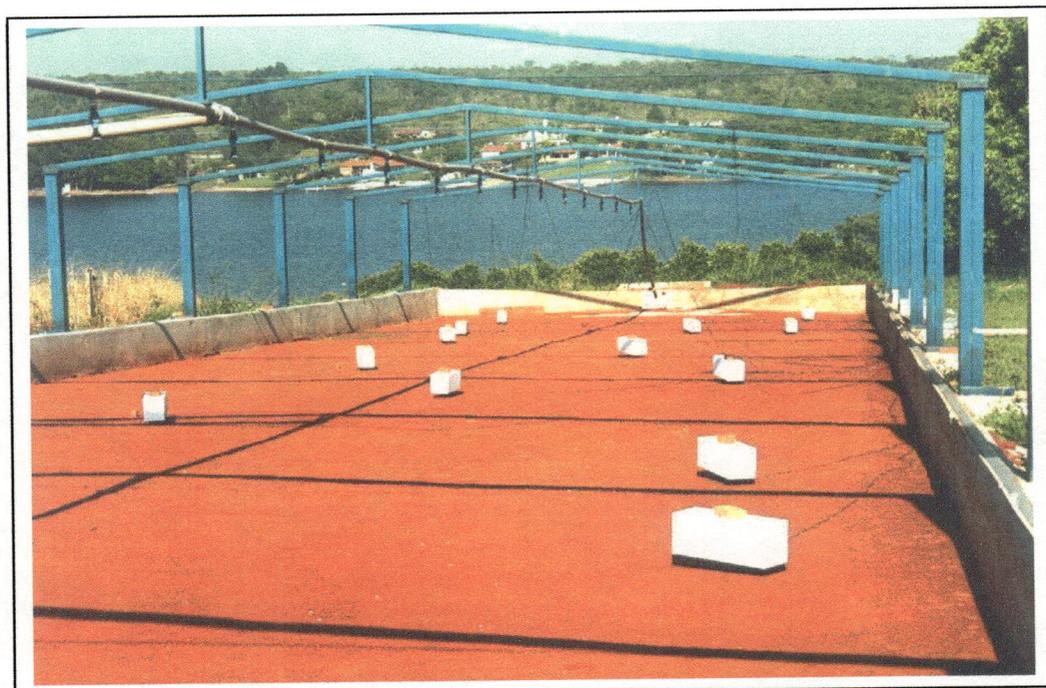


Foto 16. Vista parcial da área experimental com os sensores de deflúvio instalados

Com a instalação dos equipamentos de aquisição de dados concluída, passou-se à fase seguinte do desenvolvimento do projeto, que foi iniciar as simulações de chuvas, e coletar os dados necessários para investigar o processo de formação da rede de microcanais de drenagem pela ação do deflúvio superficial. As Fotos 17 e 18 apresentam em detalhe o sensor de altura do deflúvio superficial instalado na saída da área de concentração.



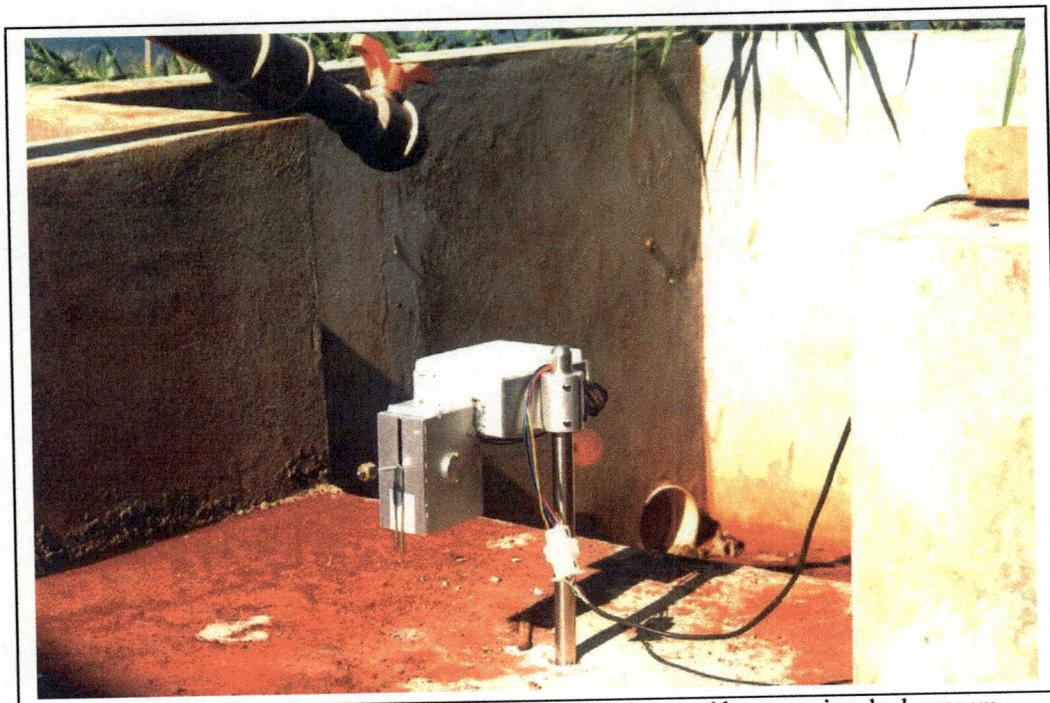


Foto 17. Vista lateral do sensor de deflúvio instalado na saída para caixa de drenagem

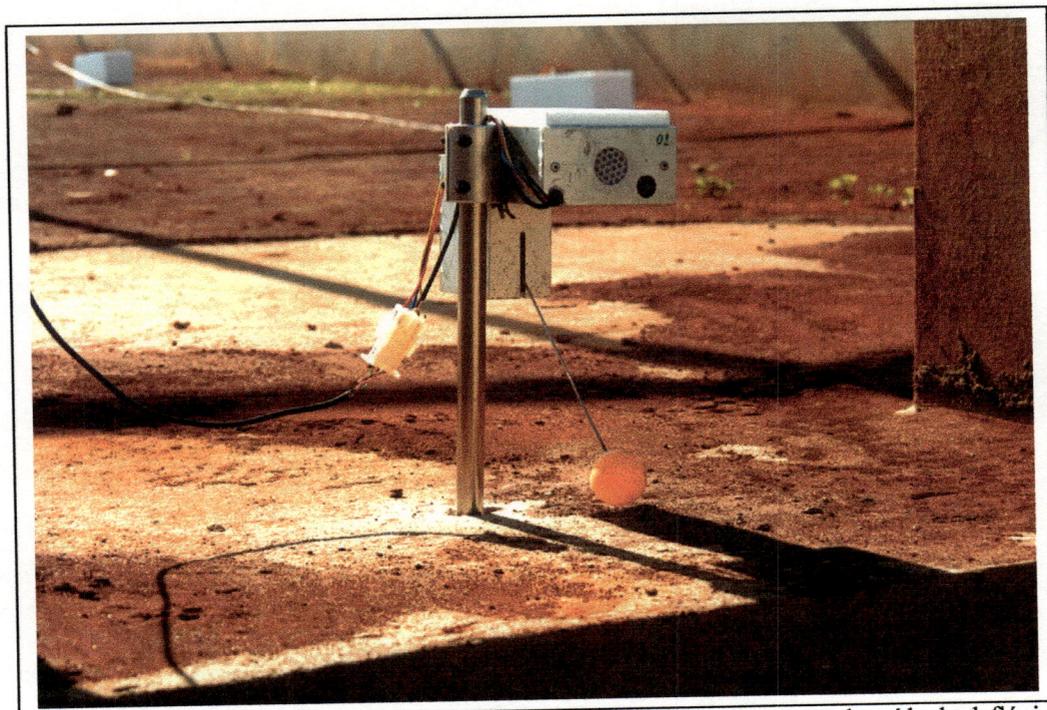


Foto 18. Vista frontal do sensor 1 instalado para registro do hidrograma de saída do deflúvio

4.2 Ensaio realizados

O solo da área experimental é um Latossol vermelho profundo que, segundo pesquisa de ARRUDA (1986), apresenta as seguintes características físicas: 42 % de argila, 19 % de silte e 39 % de areia. O coeficiente de permeabilidade, K_{sat} , referido à temperatura de 20^o C de 22,2 mm/h, e os índices físicos característicos apresentam os valores a seguir: massa específica aparente seca, (ρ_0), 1,25 g/cm³, massa específica dos sólidos, (ρ_s), 2,903 g/cm³, porosidade, (η), 56,9 % e o índice de vazios, (e_v), 1,32. O índice de vazios (e_v), e a porosidade (η) são calculados através das fórmulas de correlação a seguir:

$$e_v = (\rho_s / \rho_0) - 1 \quad (4.1)$$

$$\eta = (e_v / 1 + e_v) = 1 - (\rho_0 / \rho_s) \quad (4.2)$$

No planejamento inicial dos ensaios foram programados 15 ensaios. Porém, devido a alta resistência do solo à erosão observada no decorrer das primeiras simulações, foi necessário estender o máximo possível esse número, perfazendo um total de 22 ensaios, com duração variando de 15 minutos a 120 minutos. Para analisar os dados levantados, os ensaios foram agrupados em função da duração, conforme os grupos abaixo:

- Grupo A : 9 ensaios com duração de 60 minutos, sendo 1 de 30 minutos;
- Grupo B : 9 ensaios com duração de 120 minutos;
- Grupo C : 4 ensaios com duração de 15 minutos.

Os 4 ensaios com duração igual a 15 minutos referem-se à fase final do experimento em que o solo foi desestruturado, e, em seguida, compactado antes da realização dos ensaios do Grupo C.

Devido a forte influência do vento com efeitos conjugados de intensidade e mudanças de direção sobre a uniformidade de distribuição da precipitação simulada, todos os ensaios foram realizados ou pelo menos iniciados obedecendo aos dois principais requisitos meteorológicos básicos para o início das simulações: inexistência de vento ou vento muito fraco e previsão de tempo sem chuva natural por pelo menos 24 horas. Essas condições são desejáveis e necessárias para se obter uma média consistente de pluviometria simulada e garantir o recolhimento individualizado do material erodido durante o ensaio.

Os ensaios do Grupo A (60 minutos) e do Grupo B (120 minutos) foram realizados intercalados, a fim de investigar a influência da duração da chuva sobre o processo de erosão e produção de sedimento e, ao mesmo tempo, evitar que haja diferenciação do comportamento do solo caso os grupos fossem escalonados em etapas exclusivas.

Os ensaios foram iniciados em 15/10/1998 e concluídos em 01/02/ 1999, período durante o qual um total de 22 simulações experimentais foram realizadas e agrupadas para análise conforme descrito anteriormente.

Procedimentos de inicialização dos ensaios

Um padrão de procedimentos adotado antes de iniciar os ensaios constam das etapas abaixo relacionadas:

- Inspeccionar a área experimental, e proceder aos levantamentos fotográficos necessários;
- Parametrizar o programa de gerenciamento de aquisição;
- Vistoriar todos os sensores e retirar qualquer resíduo de respingo de solo da boia e da haste ;
- Vistoriar os pluviômetros ;
- Verificar a condição de vento através do registro no computador do estado de flutuação dos sensores;
- Inspeccionar a área de concentração e a caixa de drenagem de deflúvio;
- Inicializar o ensaio.

Para inicializar o experimento, o simulador de chuvas era acionado simultaneamente com a inicialização do programa de gerenciamento da aquisição. Ao final da duração do ensaio, 15, 60 ou 120 minutos, o simulador era desligado mas mantinha-se o sistema de aquisição em funcionamento até a drenagem completa da área. Desta forma, o período de recessão do deflúvio era registrado, assim como o comportamento do escoamento após a interrupção da precipitação.

No decorrer das simulações, observações visuais do escoamento ao longo de todo o comprimento da área são feitas assim como fotografias do comportamento do escoamento em seções específicas para posterior análise e correlação com os registros de alturas.

Foram programadas amostragens de sedimento em suspensão na saída da caixa de drenagem a fim de elaborar o sedimentograma do deflúvio. Esta amostragem foi feita com intervalo de 5 minutos na primeira metade da duração do ensaio, e após, a cada 10 minutos. Porém, durante os dois primeiros ensaios realizados em 15/10/98 e 23/10/98, foi observado que as amostras do deflúvio superficial recolhidas na caixa de drenagem, após passar pelo septo de decantação, e decantadas por 72 horas, apresentavam uma quantidade ínfima de material em suspensão, desprezível diante da quantidade de sedimento retida na área de concentração e no septo de decantação e drenagem. Foi observado que a medida que os ensaios prosseguiam as amostras apresentavam-se praticamente transparentes, indicando lavagem do solo nos primeiros instantes dos ensaios. Isso fez com que a parte de levantamento do sedimentograma do material em suspensão fosse eliminada da coleta de dados.

Medição da pluviometria e recolhimento do sedimento

Dois pluviômetros, modelo VILLE de Paris, foram instalados na área para medir a pluviometria de cada evento simulado. Foi definida uma posição fixa para o pluviômetro P1 na seção-7, identificado pelas coordenadas P1(34,60 m ; 2,90 m), sendo x a cordenada na direção do comprimento da área, y a cordenada na direção da largura, e a origem dos eixos no início da área orientados no sentido da declividade para x , e da direita para esquerda, para y . A Figura 4.1 permite a localização dentro da área, dos pontos de instalação dos pluviômetros. O segundo pluviômetro,

P2(14,80 m;7,20 m) foi utilizado às vezes como pluviômetro móvel para dar maior consistência às médias de precipitação simulada. No final de cada ensaio, o volume de cada pluviômetro foi medido, e feita a média.

Com o ajuste feito quanto ao sedimento em suspensão no deflúvio drenado pela caixa, o total de material erodido da área passou a ser o material retido na área de concentração e na caixa receptora. O material foi recolhido separadamente para cada ensaio, secado ao ar livre e pesado. O procedimento de secagem em estufa, a 110^o C por 24 horas, como foi inicialmente previsto no projeto, foi alterado, pois a análise granulométrica conjunta requer a secagem do material ao ar livre.

4.3 RESULTADOS.

A primeira simulação teve uma duração de 30 minutos para servir de elemento de calibração do procedimento padrão a ser utilizado durante toda experimentação, e também, pelo solo estar com material não coeso na superfície devido o corte recente do terreno para nivelamento. Na sequência, o tempo dos ensaios ficou estabelecido em 60 ou 120 minutos. Os ensaios 19 a 22 tiveram uma duração muito curta, 15 minutos, devido a desestruturação do solo para investigar o comportamento do escoamento sobre solo sem coesão e o padrão dos microcanais.

Os levantamentos feitos após o ensaio 1 mostrou que houve “lavagem” da superfície do solo, com arraste de grande quantidade de material solto disponível, sem provocar incisões marcantes. Porém, pôde-se observar o início da formação de alguns microcanais e a aparição de elementos do microrrelevo ainda que muito rasos. A Foto 19, tirada com zoom 70 mm, mostra o estado da superfície do solo após o primeiro ensaio, e apresenta um mosaico de pontos de erosão, precursores da formação de microcanais. A sequência dos ensaios realizados é apresentada a seguir, na Tabela 4.1 .

TABELA 4.1 – Resumo das simulações de chuvas intensas realizadas para o estudo do processo de erosão pelo deflúvio superficial

Nº do ensaio	Duração (min.)	P _m (mm/h)	Kg sedimento	Data
01	30	138	33,53	15.10.98
02	60	126	26,51	23.10.98
03	120	119,93	29,34	28.10.98
04	120	128,05	14,74	04.11.98
05	120	128,30	14,74	05.11.98
06	60	139,75	12,22	08.11.98
07	60	134,50	5,03	09.11.98
08	60	122,90	4,84	15.11.98
09	120	130,95	9,88	17.11.98
10	120	134,60	5,82	18.11.98
11	60	101,70	2,36	19.11.98
12	120	132,85	6,54	20.11.98
13	120	137,28	6,56	21.11.98
14	120	145,55	6,27	23.11.98
15	60	140,95	2,38	24.11.98
16	60	162,90	2,50	25.11.98
17	120	144,20	3,22	26.11.98
18	60	136,70	3,68	30.11.98
19	15	174	319,20	28.01.99
20	15	160	273,60	29.01.99
21	15	175,60	193,80	30.01.99
22	15	162,80	148,20	01.02.99



Foto 19. Estado da superfície do solo após o primeiro ensaio: mosaico de pontos de erosão precusores da formação de microcanais e do microrrelevo

A partir do segundo ensaio, houve uma multiplicação no número de formações iniciais de caminhos preferenciais, consequência do aumento do número de regiões com erosão localizada, principalmente nas seções 1 a 4, que se estendem até 22,50 metros no sentido do comprimento da área, Figura 4.1. Foi observado porém que a seção-1 situada entre 2,50 m e 7,50 m não apresentou padrão definido de formação de caminhos preferenciais precusores dos microcanais. Das observações feitas durante os ensaios, este comportamento da região de cabeceira se deve à alta taxa de desintegração do solo promovida pelas gotas da chuva e à reduzida extensão da área de contribuição de escoamento superficial, resultando em baixo fluxo de escoamento com capacidade de transporte de sedimento excedida.

Com chuvas sucessivas, o processo de desintegração provocou a formação de pequenas depressões, onde, a concentração de volume de detenção superficial contribui para amortecer o impacto das gotas de chuva, dando início ao fluxo. Este seria o mecanismo através do qual tem início a formação dos microcanais de drenagem. A imagem a seguir, Foto 20, mostra detalhes de uma região inicialmente

desintegrada, e que, em seguida, sofreu o processo de concentração de volume de detenção superficial, e dando início ao escoamento. O resultado deste processo pode ser observado na imagem retratada na fotografia abaixo.



Foto 20. Detalhes do início da formação dos microcanais e rastro de transporte de material

A partir do 4^o ensaio, a evolução do microrrelevo intensificou-se e o seu efeito sobre o escoamento ficou caracterizado através da concentração em faixas bem definidas do escoamento do deflúvio superficial e o aumento da intensidade da turbulência nestas faixas de escoamento. Obviamente, a profundidade da lâmina nestas regiões tendem a ser mais expressivas, principalmente a partir dos 25 m do comprimento da área. Com maior altura de escoamento devido a concentração, o processo de erosão tende a ser mais intenso pela conjugação da força trativa, função da altura da lâmina do escoamento, e do aumento da turbulência.

Como resultado, as regiões de maior concentração de escoamento apresentaram maior grau de erosão e área erodida mais extensa. Estas regiões mostraram uma densidade elevada de microcanais em relação à área de cabeceira, onde a desintegração pelas gotas de chuva é predominante. As ilustrações das Fotos 21 e 22 apresentam, respectivamente, a concentração do escoamento em faixas bem

definidas, e a turbulência, resultado da influência do microrrelevo do leito do deflúvio.



Foto 21. Processo de formação do microrrelevo e a sua contribuição na concentração do escoamento (faixas de escoamento)



Foto 22. Turbulências e presença de escoamento secundário: influência do microrrelevo

A formação do microrrelevo do leito do deflúvio é um processo dinâmico, e no caso de solo coeso com alto teor de argila, como neste estudo, é lento. Com a evolução do microrrelevo, a rede de microcanais sofre constantes ajustes devido a dinâmica de remoção e deposição de sedimento, função da concentração do escoamento. Assim, microcanais se aprofundam ou se fecham total ou parcialmente, causando desvio de fluxos. A seguir, apresenta-se algumas ilustrações sobre a evolução da formação do microrrelevo sob ação do deflúvio superficial.



Foto 38. Evolução do microrrelevo: erosão distribuída característica



Foto 24. Fase avançada da evolução do microrrelevo: aumento da densidade de microcanais



Foto 25. Drenagem do deflúvio superficial: detalhes da rede de microcanais

4.3.1 Regime de escoamento e dinâmica dos microcanais

Do ponto de vista de hidráulica, o escoamento apresenta uma intrínseca dependência da microtopografia do terreno. Isto é, o regime do escoamento é função do tipo de microrrelevo do leito. A importância da microtopografia na hidrodinâmica da erosão torna-se, conseqüentemente, de grande relevância em abordagens onde presume-se equacionar o processo com base nas interações na interface solo-fluido.

O deflúvio superficial inicia o seu movimento sobre o terreno concentrando-se devido aos gradientes microtopográficos locais. Este processo de concentração e escoamento é controlado pelas propriedades físicas, hidráulicas e geomorfológicas do solo tais como o microrrelevo, a porosidade, a textura, a condutividade hidráulica, o teor de umidade, a erodibilidade e o processo de infiltração.

A medida que o suprimento de água à superfície do terreno continua, a frente de umidade se propaga rapidamente e aumenta a saturação do solo. A redução do gradiente hidráulico das camadas superiores do solo faz decair a taxa de infiltração, e, conseqüentemente, aumentar o volume disponível de água convertido em deflúvio. O processo de concentração do escoamento sustentado e controlado pelo microrrelevo se intensifica e avança ao longo da declividade. O resultado deste processo é a formação dos microcanais que sulcam o terreno predominantemente no sentido do maior gradiente de declividade.

A densidade dos microcanais tem influência preponderante sobre o processo de erosão, principalmente quando se trata da magnitude de sedimentos removidos. A explicação para esta interrelação densidade de microcanais-erosão merece uma cuidadosa investigação e análise tanto do ponto de vista de experimentação quanto da modelagem matemática.

De fato, a altura da lâmina do escoamento é sempre maior nos microcanais, função das suas profundidades e geometrias, do que nas áreas tributárias de contribuição direta, mesmo no caso em que toda a superfície do solo esteja coberta pelo escoamento.

Essas variações implicam na variação das variáveis hidráulicas chaves que são a força trativa na interface solo-fluido e a energia do escoamento. Conseqüentemente, com maior altura de lâmina de escoamento, espera-se que a

capacidade de remoção de sedimentos do fluxo nos microcanais seja mais elevada em relação às demais áreas. Daí a importância da densidade dos microcanais no domínio, o que torna imprescindível a sua inclusão, direta ou indiretamente na formulação do modelo de remoção de sedimentos.

Uma vez iniciada a formação dos microcanais, a evolução ou a dinâmica do processo depende das condições hidrológicas que controlam o escoamento e das propriedades geomorfológicas do solo exposto à ação do deflúvio superficial. Considerando-se que conforme as características do escoamento os processos de remoção, transporte e deposição de sedimentos podem ocorrer simultaneamente em trechos diferentes dos microcanais, as características hidráulicas do escoamento estariam variando constantemente de acordo com a dinâmica dos microcanais que o próprio escoamento induz a formar.

Existe, portanto, uma interrelação do tipo "feedback" entre o escoamento e a dinâmica dos microcanais dentro de determinado limite de altura da lâmina d'água do escoamento. Procurar determinar um padrão sistemático de densidade de microcanais torna-se um exercício difícil e de resultado talvez pouco útil, devido à dinâmica e às condições variáveis do escoamento. Como a densidade dos microcanais é fortemente dependente das características geomorfológicas do solo em questão, a existência de um padrão definido de densidade sugere que a estabilização dos microcanais estaria atingida, e que portanto, o processo de erosão estaria num estágio que não preocupa mais pela sua contribuição em termos de carga de sedimentos. Mas esta situação seria uma simples hipótese de investigação que não contempla toda a complexidade do fenômeno.

Segundo EMMETT (1970; 1978), citado por LOEWENHERZ-LAWRENCE (1994), em superfícies naturais a rugosidade da superfície deve contribuir fortemente na estocasticidade do escoamento superficial, mesmo em casos de números de Reynolds baixos ou moderados. SAVAT (1980), ABRAHAMS et al. (1990), citados pelo mesmo autor, concluíram que o maior efeito da rugosidade da superfície é um aumento na resistência por fricção associada ao escoamento, alterando sua hidráulica. A dinâmica do microrrelevo resultante do processo da erosão deverá apresentar um comportamento semelhante, com maior amplitude. Conforme a evolução do microrrelevo, é de se esperar que o escoamento apresente

localmente regimes diferentes ao longo do domínio experimental, como regime variado, gradualmente variado, laminar, turbulento e de transição.

Isto reforça a necessidade de caracterizar adequadamente a hidráulica do escoamento nas condições de microrrelevo dinâmico para a determinação das variáveis hidráulicas como a força trativa na interface solo-fluído e a dissipação de energia do escoamento no processo da erosão. A obtenção destas grandezas em condições de microtopografia dinâmica, associadas a um parâmetro geomorfológico capaz de descrever fidedignamente a resistência do solo à remoção das suas partículas, permitirá uma modelagem matemática mais acurada com base na hidrodinâmica do deflúvio superficial.

4.3.2 Escoamento no domínio experimental

O escoamento do deflúvio superficial no domínio experimental, após monitorado através do sistema de aquisição de dados, foi retratado na forma de gráficos para análise. O rastreamento da concentração do escoamento controlada pela formação e evolução do microrrelevo, permite que se investigue a potencialidade erosiva do escoamento devido à esta concentração. Os registros feitos com o auxílio do sistema de aquisição computadorizada, permitiu obter o perfil do escoamento ao longo do tempo a fim de investigar a dinâmica do escoamento e o processo de formação do microrrelevo, e o “feedback” existente entre os dois processos.

Os dados observados através dos registros do sistema de aquisição foram agrupados por seções do domínio, em virtude das características de comportamento observadas durante os ensaios. A divisão da área em seções, Figuras 4.1 a 4.3, tem o objetivo de facilitar a visualização e a interpretação dos dados observados e apresentados nos gráficos de registro de altura de escoamento no domínio experimental. Como se pode observar a partir dos hidrogramas locais, as seções iniciais localizadas na região de cabeceira, não tiveram concentração significativa de escoamento, como era de se esperar. Por esta mesma razão, algumas seções iniciais deixaram de ser monitoradas para dedicar mais sensores às seções onde a probabilidade de concentração de fluxo era maior. Os mapas de instalação dos sensores, Figuras 4.1 a 4.3, apresentam também as coordenadas de localização dos sensores durante as etapas do experimento.

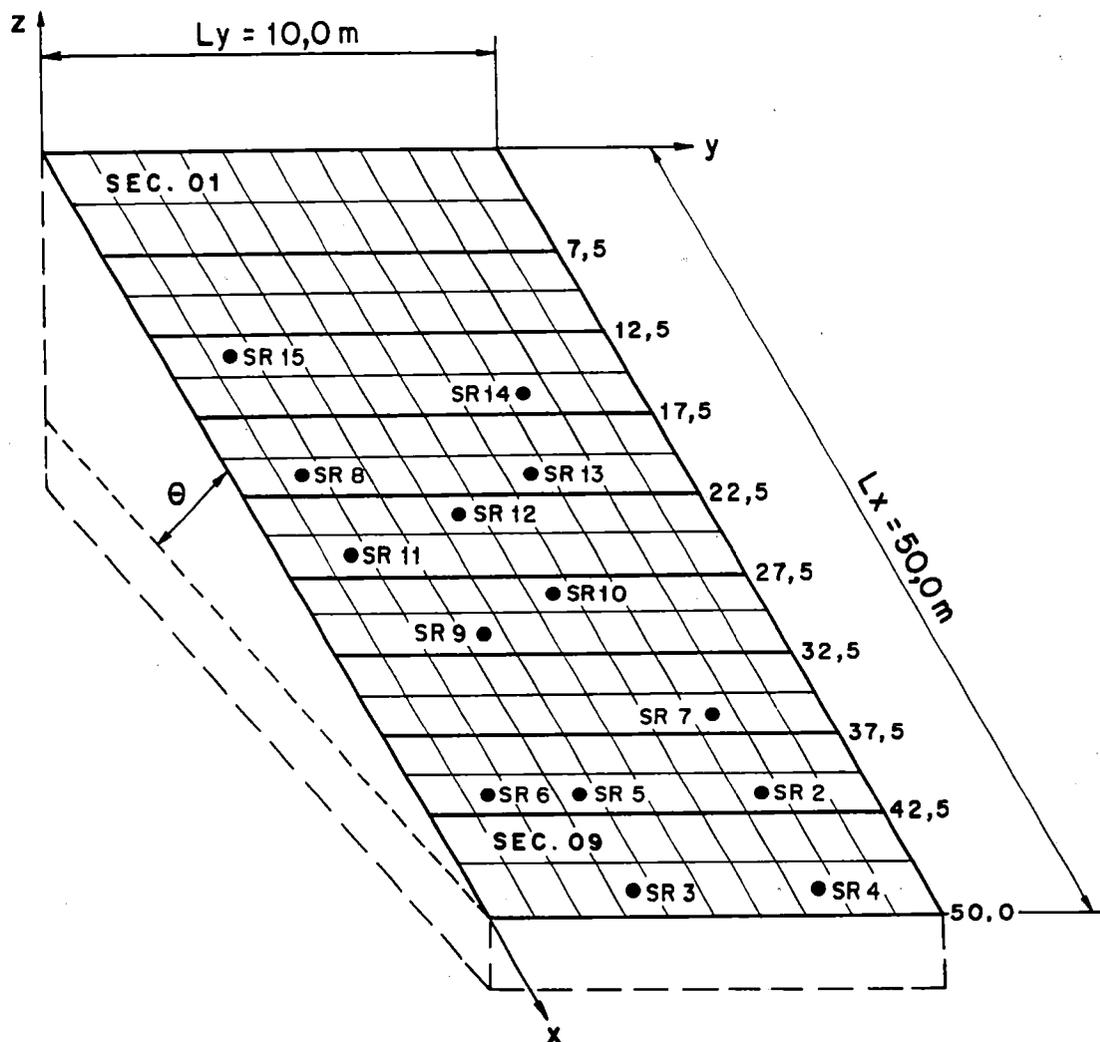


Tabela 4.2 Coordenadas de instalação dos sensores: Fase 1.

SENSOR	COORD. X(m)	COORD. Y(m)	SEÇÃO
SR1	-	-	SAÍDA
SR2	41.0	7.7	8
SR3	47.2	3.7	9
SR4	47	7.95	9
SR5	41.3	3.45	8
SR6	40.5	1.6	8
SR7	36.5	7.12	7
SR8	20.2	1.9	4
SR9	31.8	3.6	6
SR10	29.3	5.8	6
SR11	26.3	1.9	5
SR12	24.5	4.75	5
SR13	21.75	6.9	4
SR14	15.5	7.15	3
SR15	15.5	1.2	3

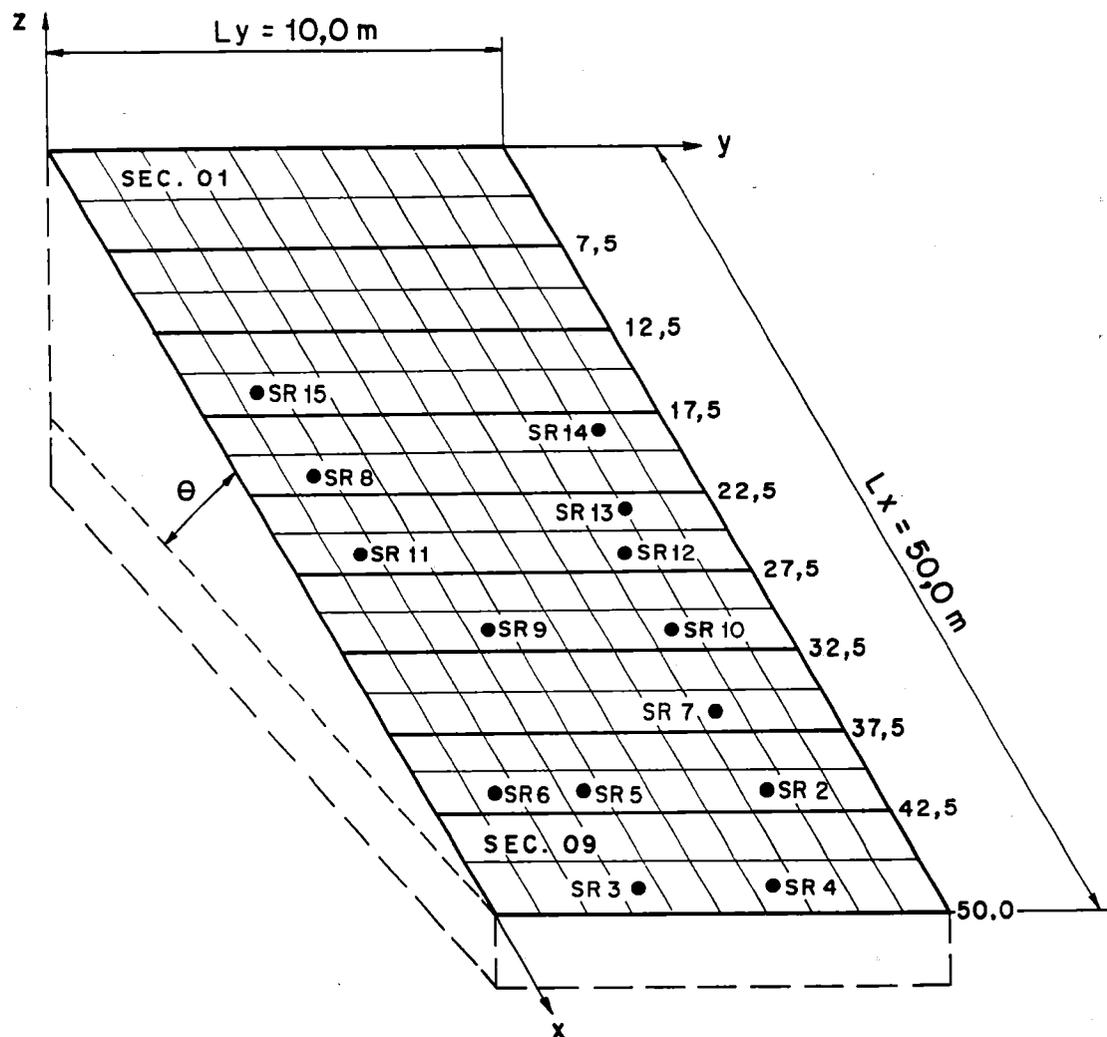


Tabela 4.3 Coordenadas de instalação dos sensores: Fase 2.

SENSOR	COORD. X(m)	COORD. Y(m)	SEÇÃO
SR1	-	-	SAÍDA
SR2	41.5	7.7	8
SR3	47.4	3.8	9
SR4	47.4	6.45	9
SR5	41.5	3.4	8
SR6	40.5	1.6	8
SR7	36.5	7.1	7
SR8	21.5	1.65	4
SR9	31.9	3.55	6
SR10	31.9	7.6	6
SR11	27	1.9	5
SR12	27	7.5	5
SR13	23	8	5
SR14	18.5	8.35	4
SR15	15.8	1.3	3

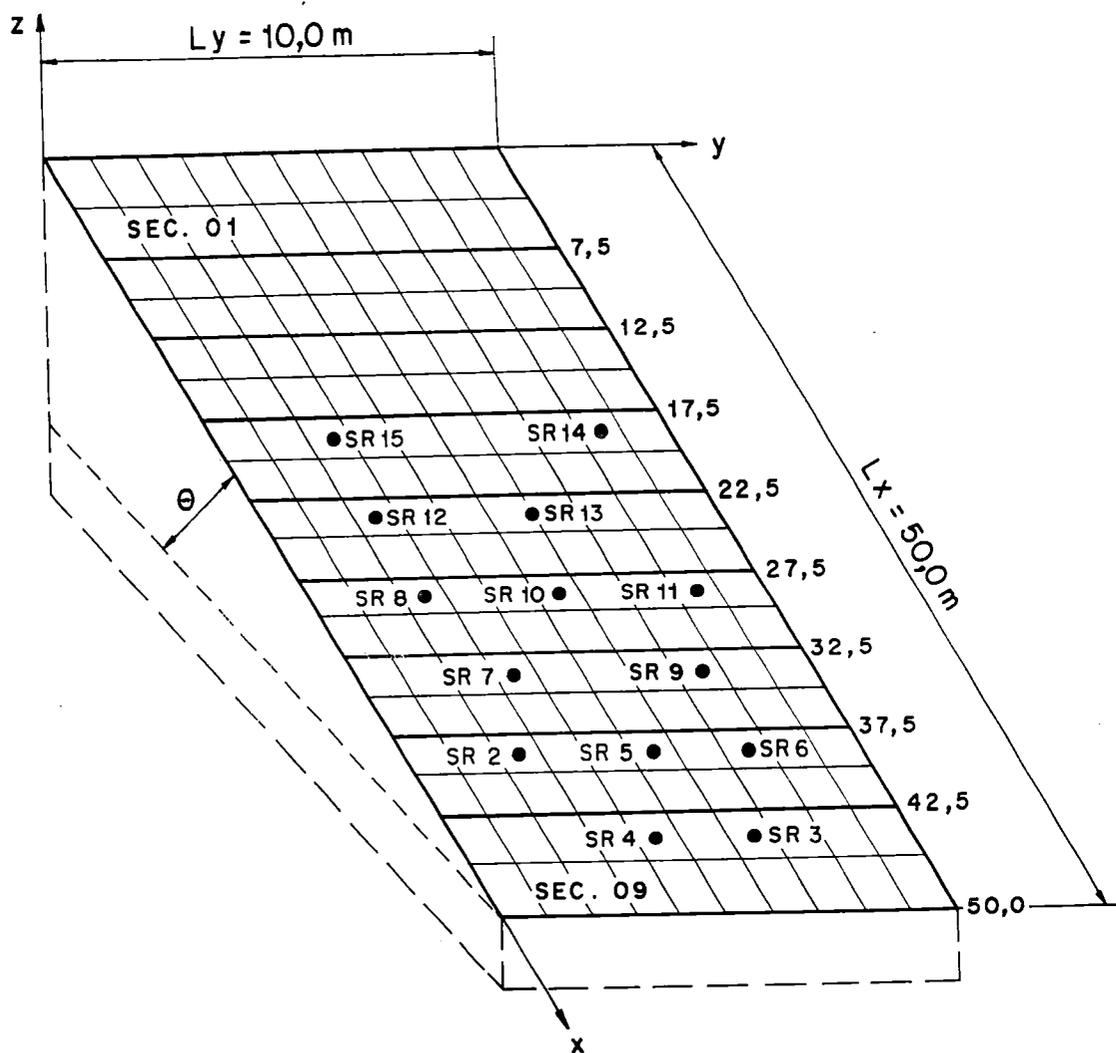


Tabela 4.4 Coordenadas de instalação dos sensores: Fase 3.

SENSOR	COORD. X(m)	COORD. Y(m)	SEÇÃO
SR1	-	-	SAÍDA
SR2	38.75	2.7	8
SR3	45	6.82	9
SR4	45	4.1	9
SR5	38.75	5.75	8
SR6	38.75	7.55	8
SR7	33	3.25	7
SR8	29.5	2.55	6
SR9	33	7.72	7
SR10	29.5	5.95	6
SR11	29.5	8.35	6
SR12	24.5	2.77	5
SR13	24.5	6	5
SR14	19.15	8.20	4
SR15	19.15	2.95	

Nessas regiões, a falta de áreas tributárias reduziu drasticamente a possibilidade de escoamento concentrado. Por essas características, a desagregação das partículas do solo pelo impacto das gotas de chuvas era mais intensa devido à não formação do filme d'água que absorveria grande parte da energia da gota. Uma consequência direta associada a esses processos acima, foi o adensamento do solo observado, devido ao processo de "sealing" ou cimentação por partículas finas, que é muito menor, senão inexistente, na região de cabeceira (Seções 1 a 3), quando comparado ao do trecho final, aonde a declividade favorece a concentração do escoamento. Na Tabela 4.5, a seguir, consta o resumo dos principais dados referentes aos ensaios cujo monitoramento é apresentado através dos hidrogramas de alturas locais.

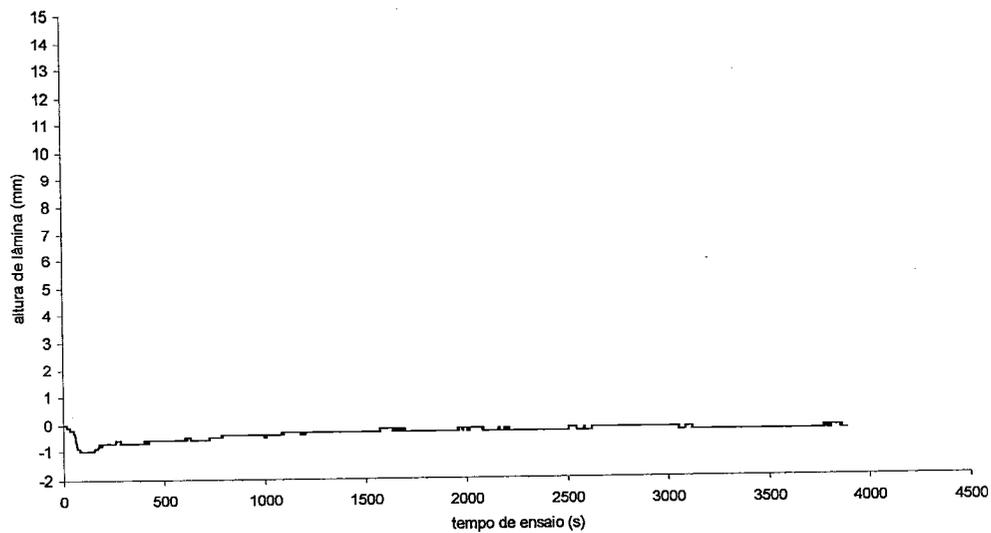
TABELA 4.5 – Tabela de dados referentes às simulações experimentais de erosão dos hidrogramas de monitoramento de escoamento no domínio experimental
(veja em ANEXO-2 / 2B)

Nº do ensaio	Duração (min.)	P _m (mm/h)	Kg sedimento	Data
06	60	139,75	12,22	08.11.98
07	60	134,50	5,03	09.11.98
08	60	122,90	4,84	15.11.98
11	60	101,70	2,36	19.11.98
15	60	140,95	2,38	24.11.98
16	60	162,90	2,50	25.11.98
18	60	136,70	3,68	30.11.98
13	120	137,28	6,56	21.11.98

Hidrogramas de monitoramento da altura do escoamento na Seção - 3

Seção – 03 / Simulação 06

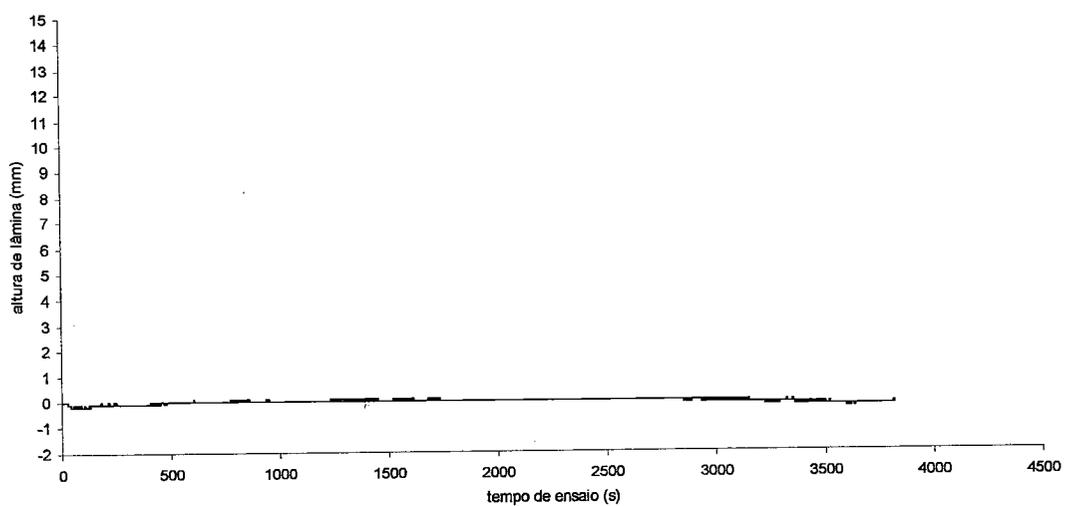
G1



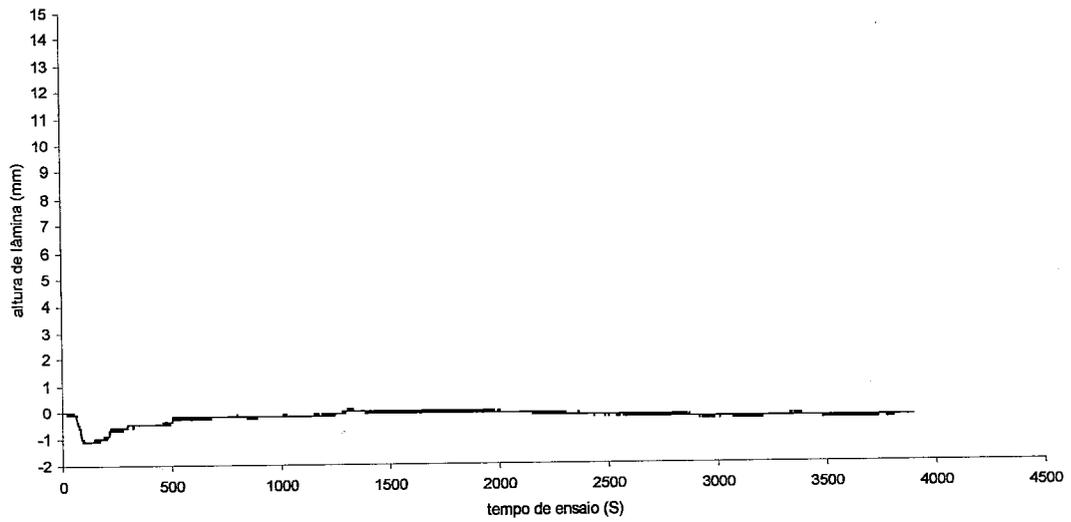
Varição da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 03/SR15 - SIMULAC 6

Seção – 03 / Simulação 07

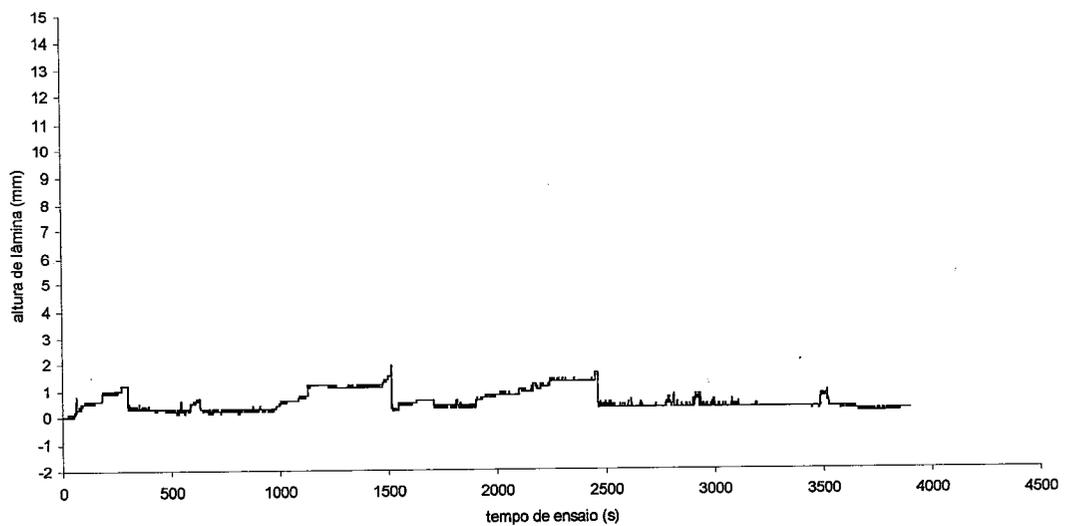
G2



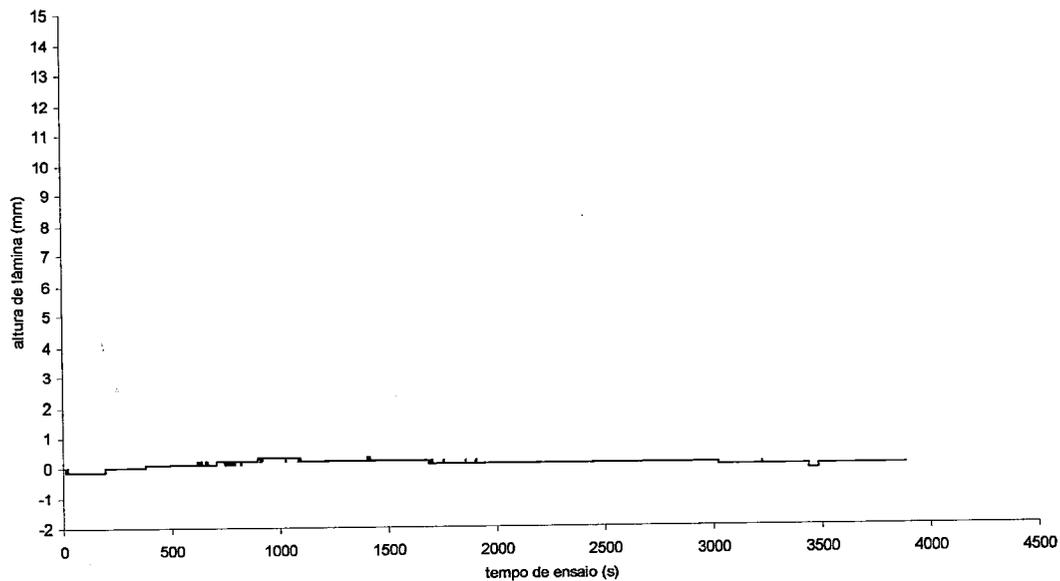
Varição da altura de escoamento no domínio experimental - seção 03/SR15 - SIMULAC 07

Seção – 03 / Simulação 08*G3*

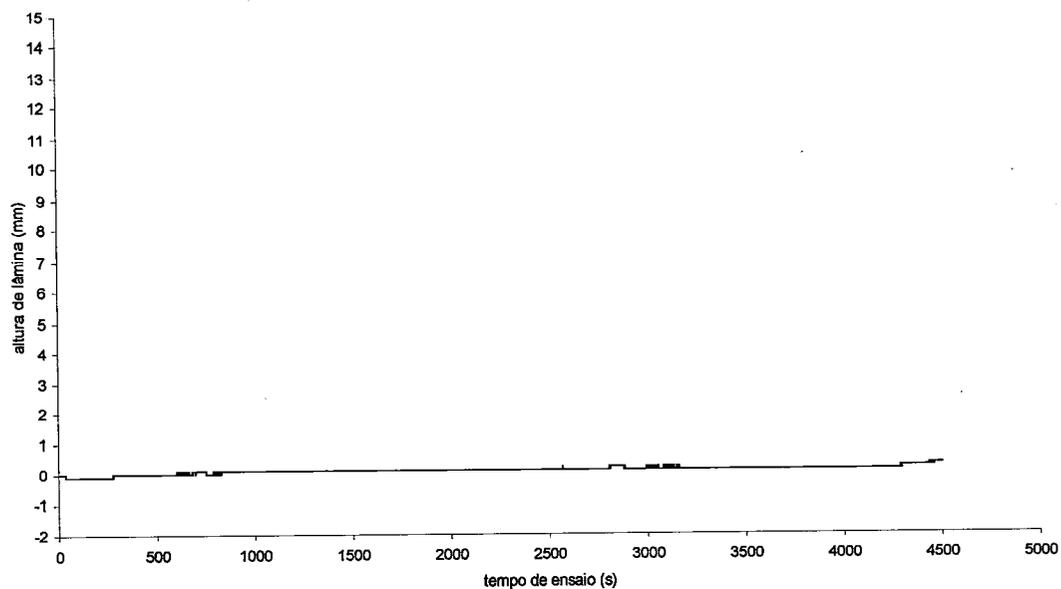
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 03/SR15 - SIMULAC 08

Seção – 03 / Simulação 11*G4*

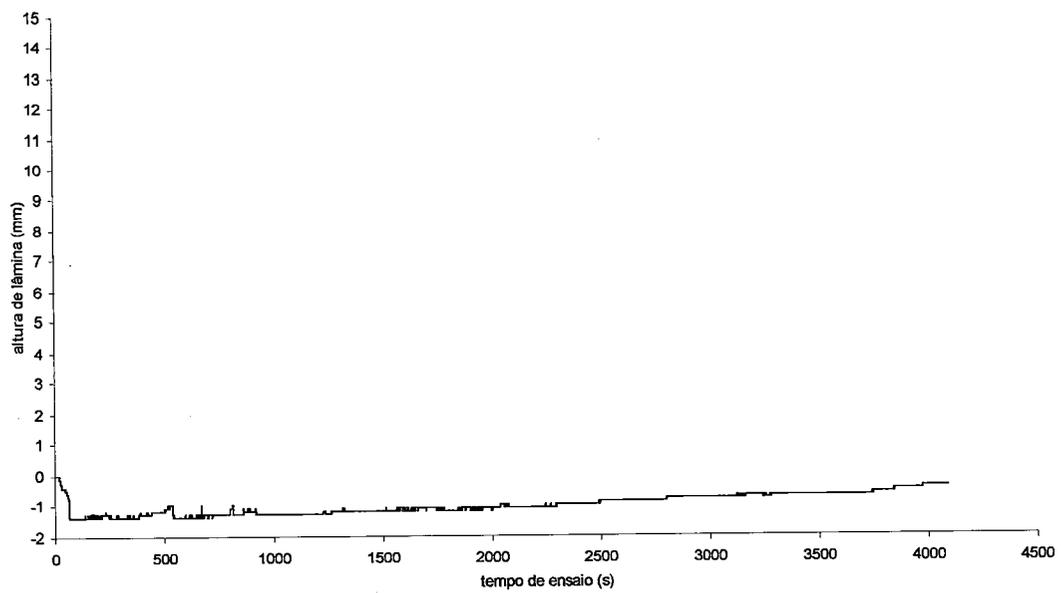
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 03/SR15 - SIMULAC 11

Seção – 03 / Simulação 15*G5*

Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 03/SR15 - SIMULAC 15

Seção – 03 / Simulação 16*G6*

Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 03/SR15 - SIMULAC 16

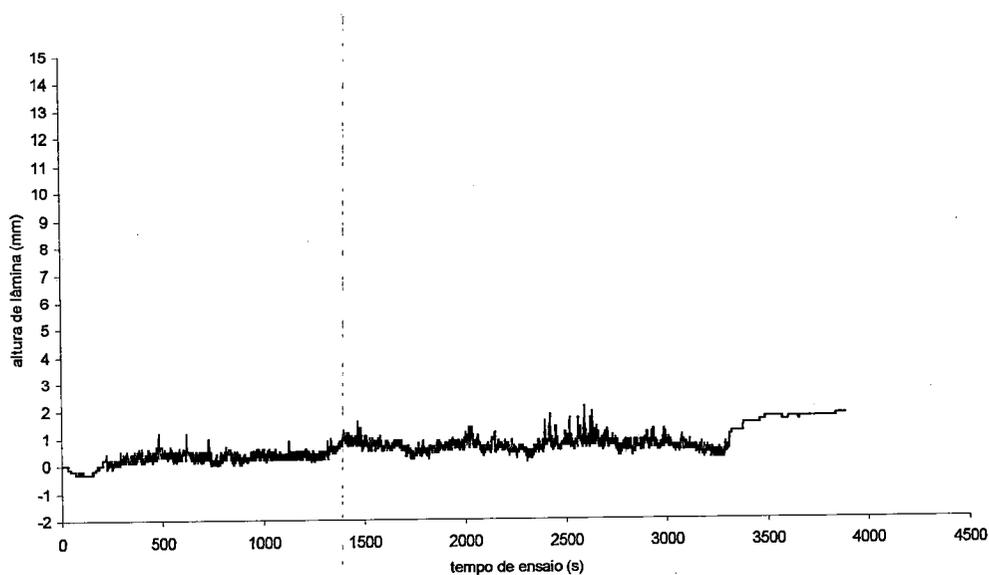
Seção – 03 / Simulação 18*G7*

Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 03/SR15 - SIMULAC 18

Hidrogramas de monitoramento da altura do escoamento na Seção - 8

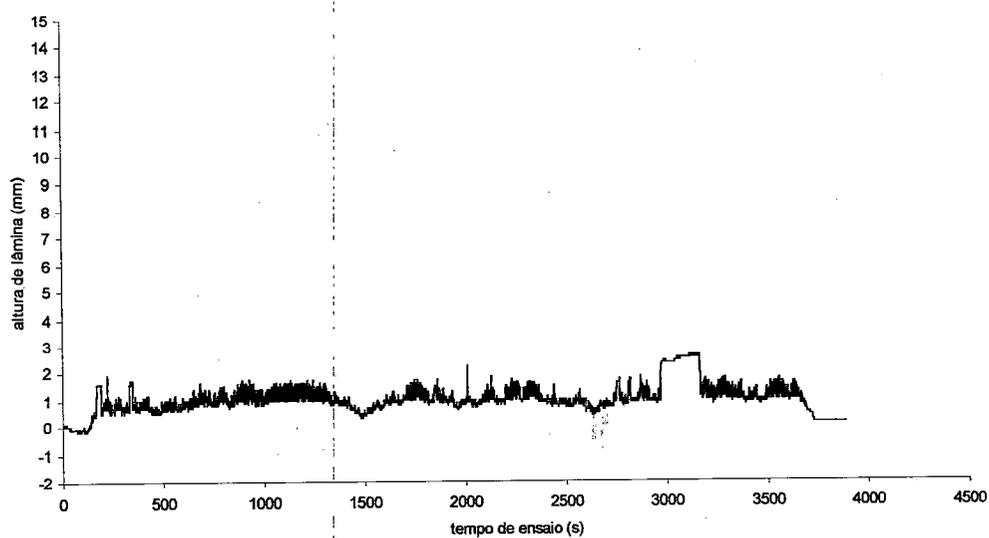
Seção - 8 / Simulação 06

G8

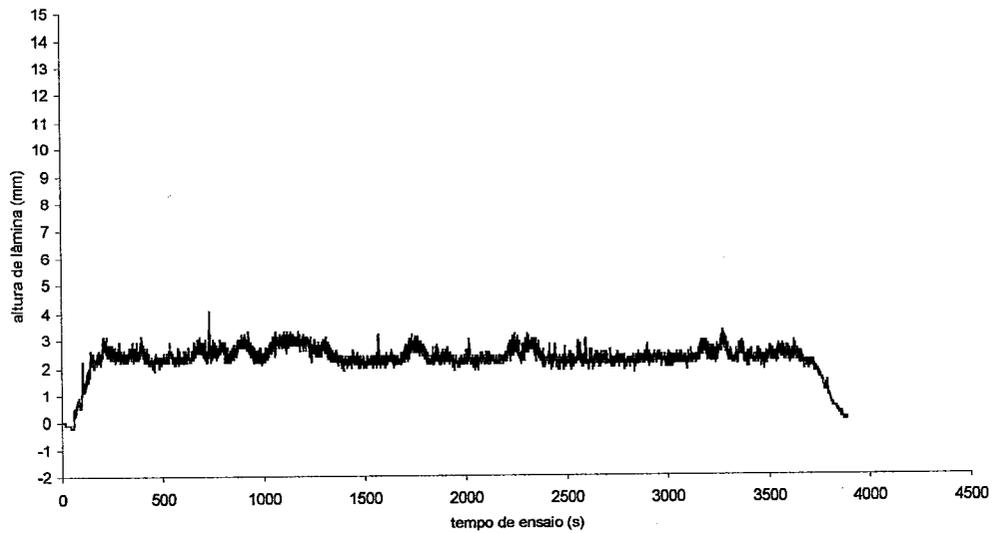


Varição da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 08/SR2 - SIMULAC 6

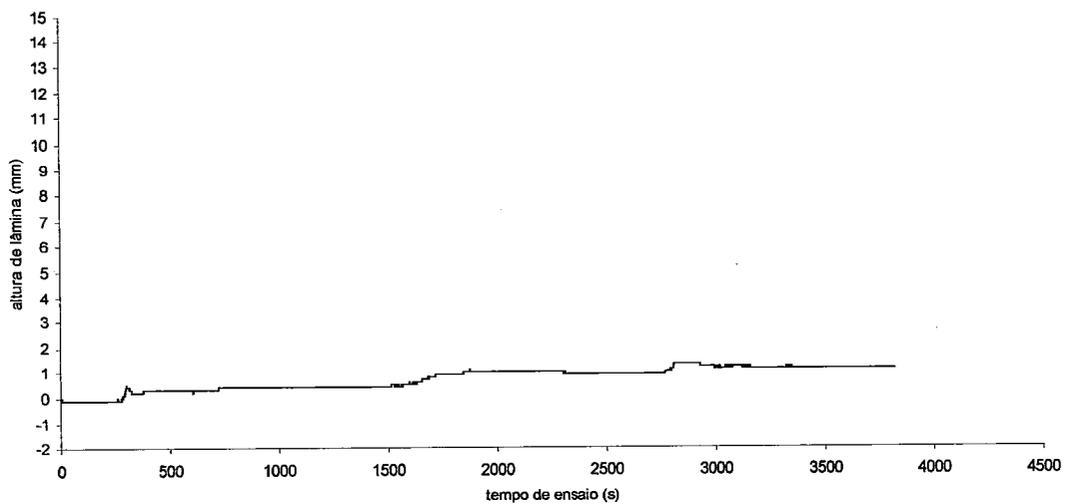
G9



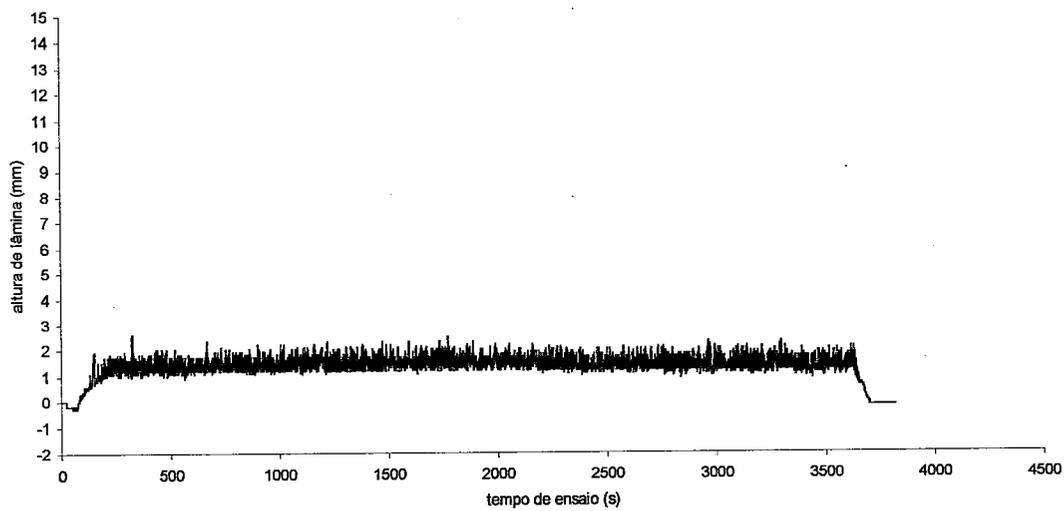
Varição da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 08/SR5 - SIMULAC 6

G10

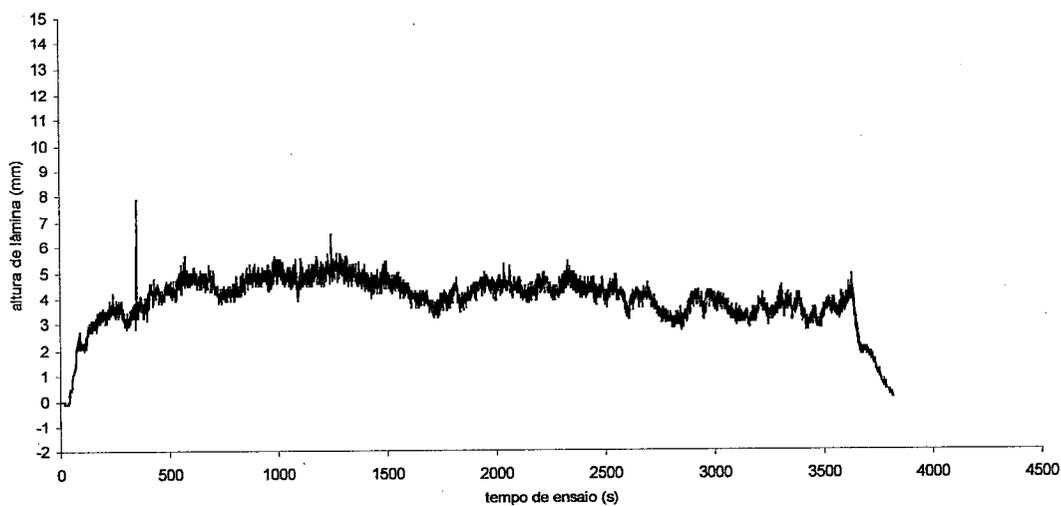
Varição da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 08/SR6 - SIMULAC 6

Seção – 08 / Simulação 07*G11*

Varição da altura de escoamento no domínio experimental - seção 08/SR2 - SIMULAC 07

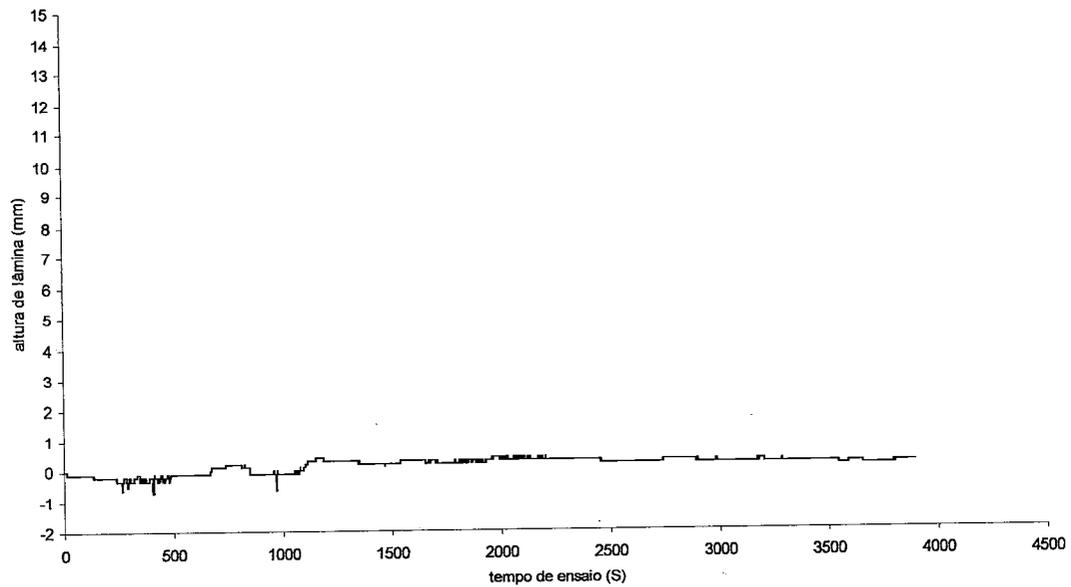
G12

Varição da altura de escoamento no domínio experimental - seção 08/SR5 - SIMULAC 07

G13

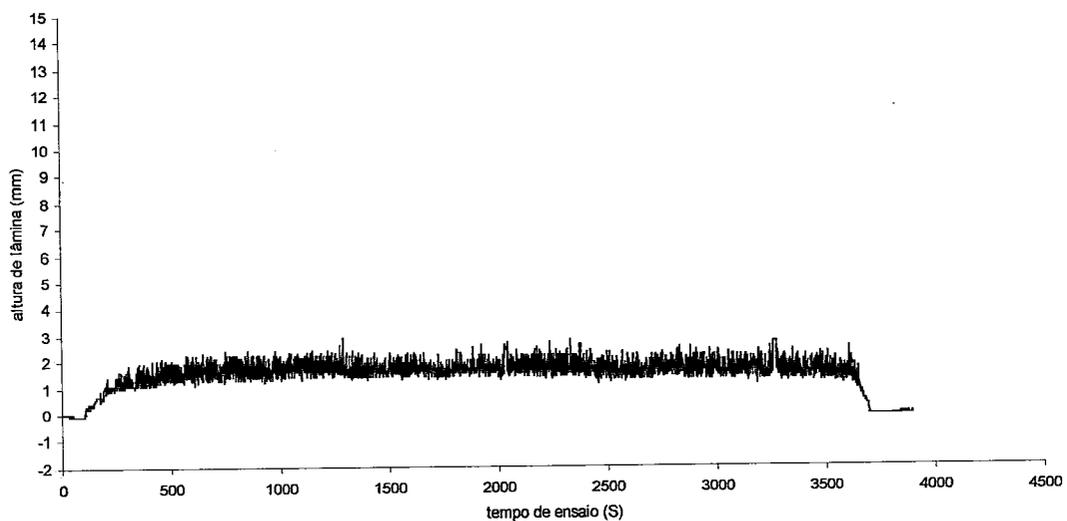
Varição da altura de escoamento no domínio experimental - seção 08/SR6 - SIMULAC 07

Seção – 08 / Simulação 08
G14

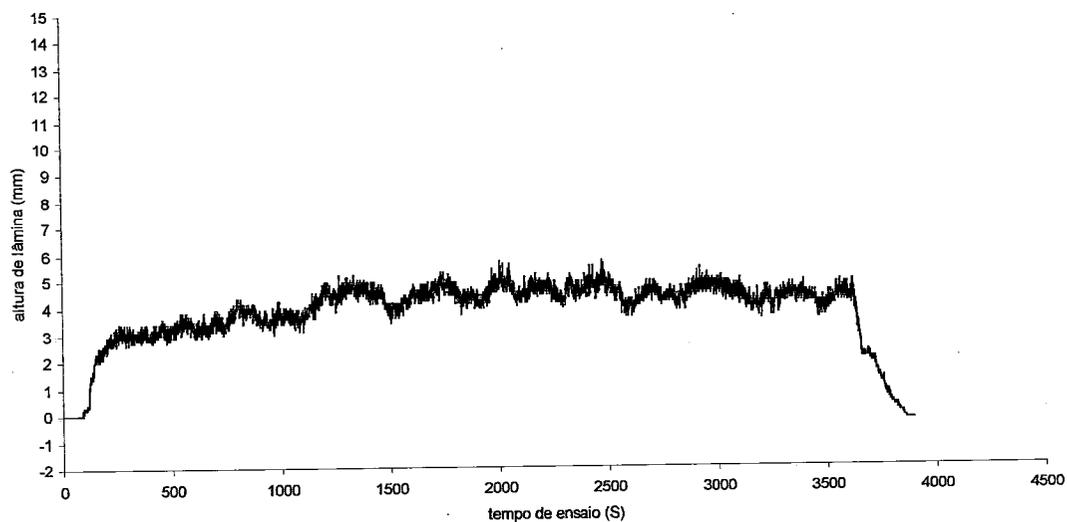


Varição da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 08/SR2 - SIMULAC 08

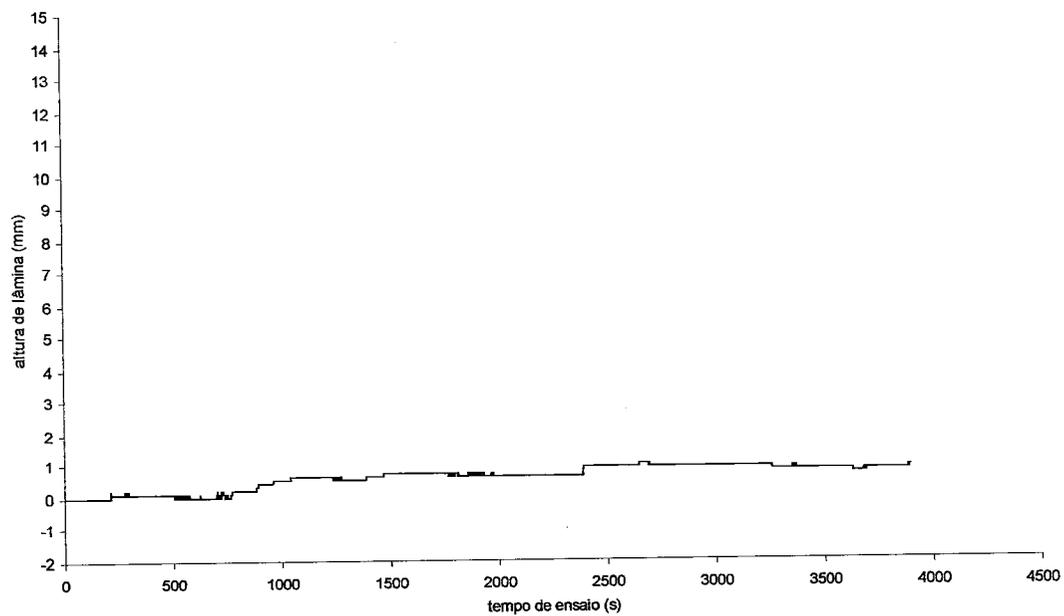
G15



Varição da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 08/SR5 - SIMULAC 08

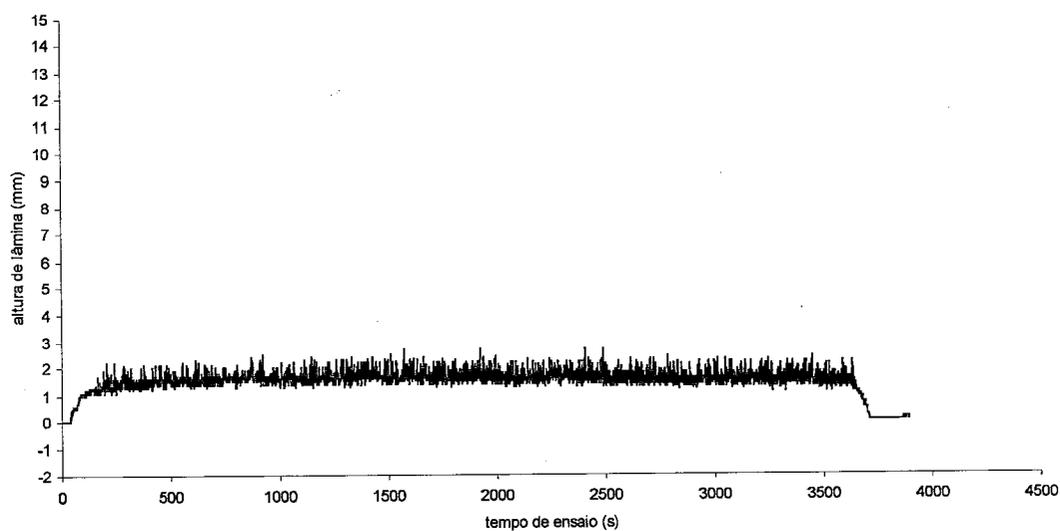
G16

Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 08/SR6 - SIMULAC 08

Seção – 08 / Simulação 11*G17*

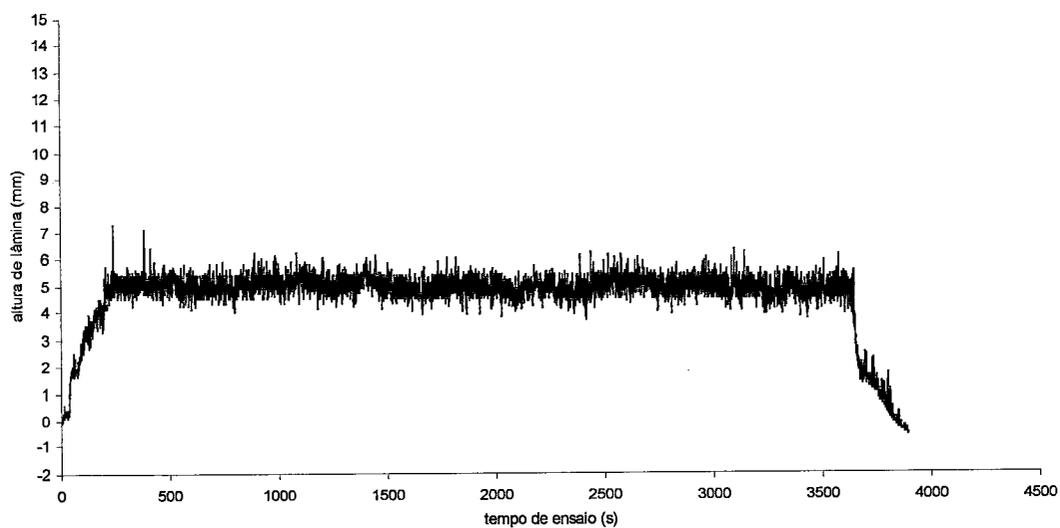
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 08/SR2 - SIMULAC 11

G18



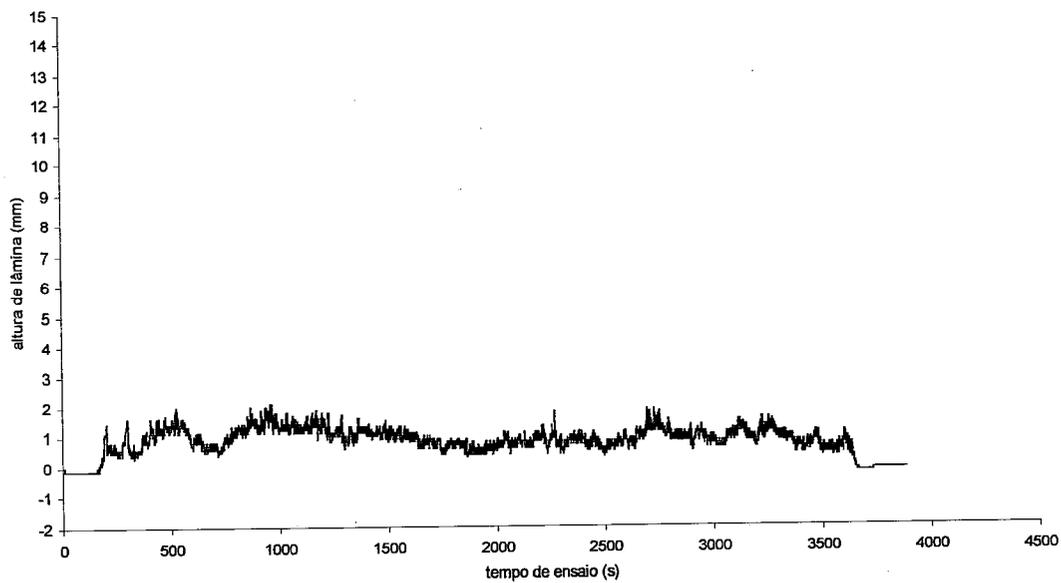
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 08/SR5 - SIMULAC 11

G19



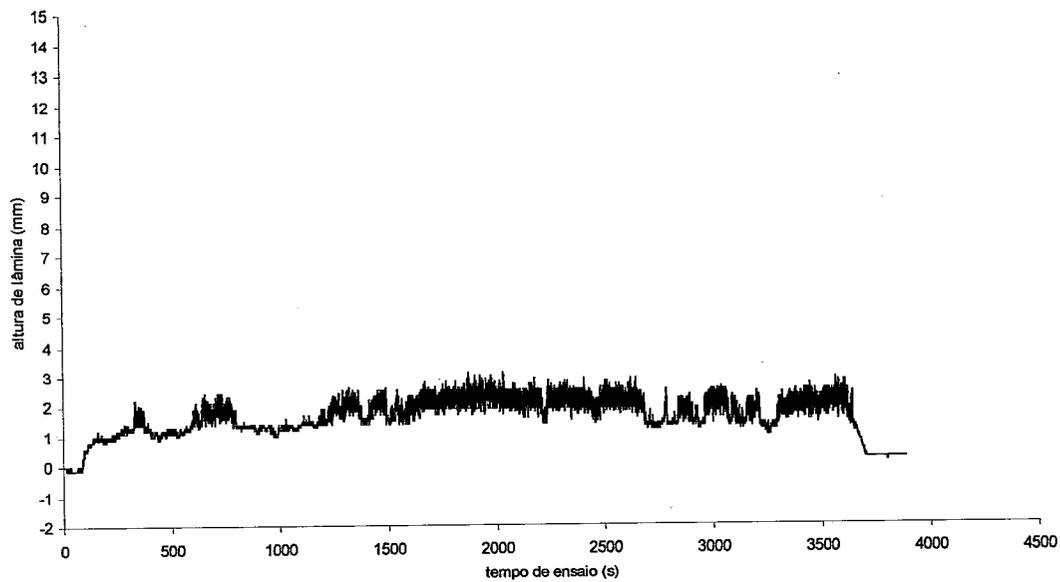
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 08/SR6 - SIMULAC 11

Seção – 08 / Simulação 15
G20



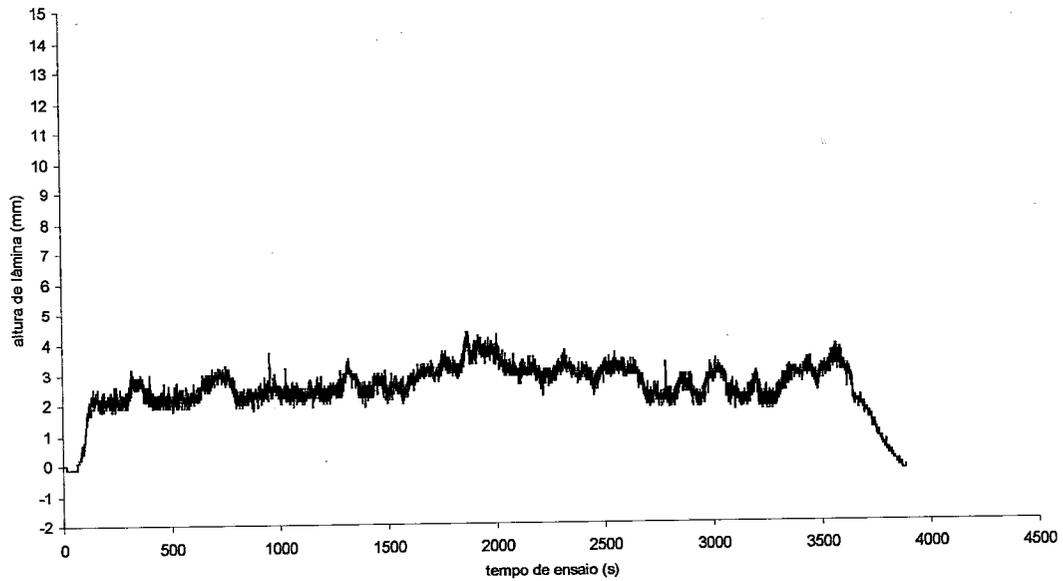
Varição da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 08/SR2 - SIMULAC 15

G21



Varição da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 08/SR5 - SIMULAC 15

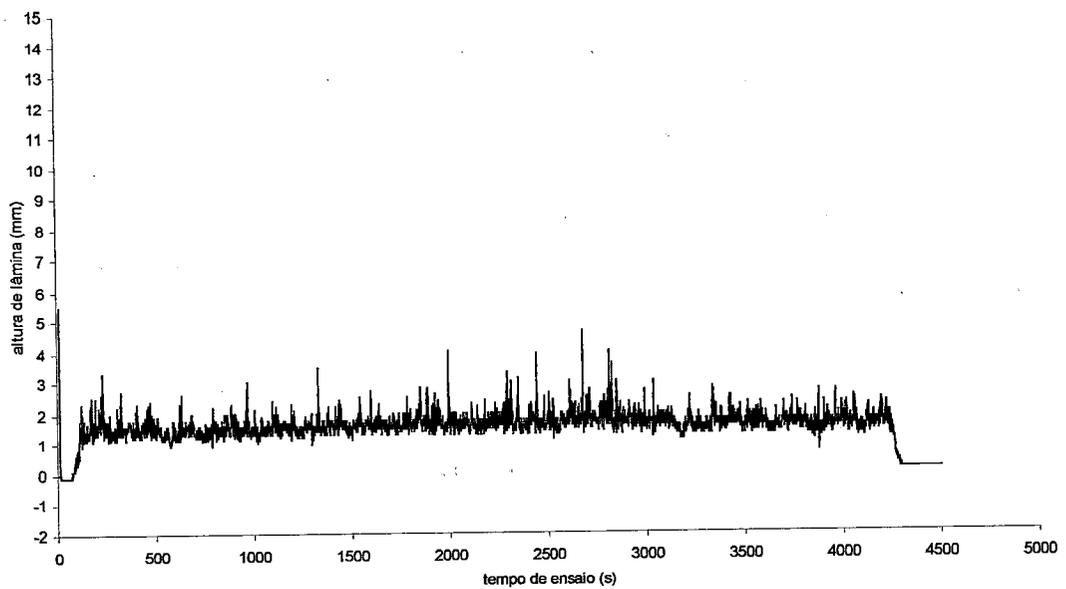
G22



Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 08/SR6 - SIMULAC 15

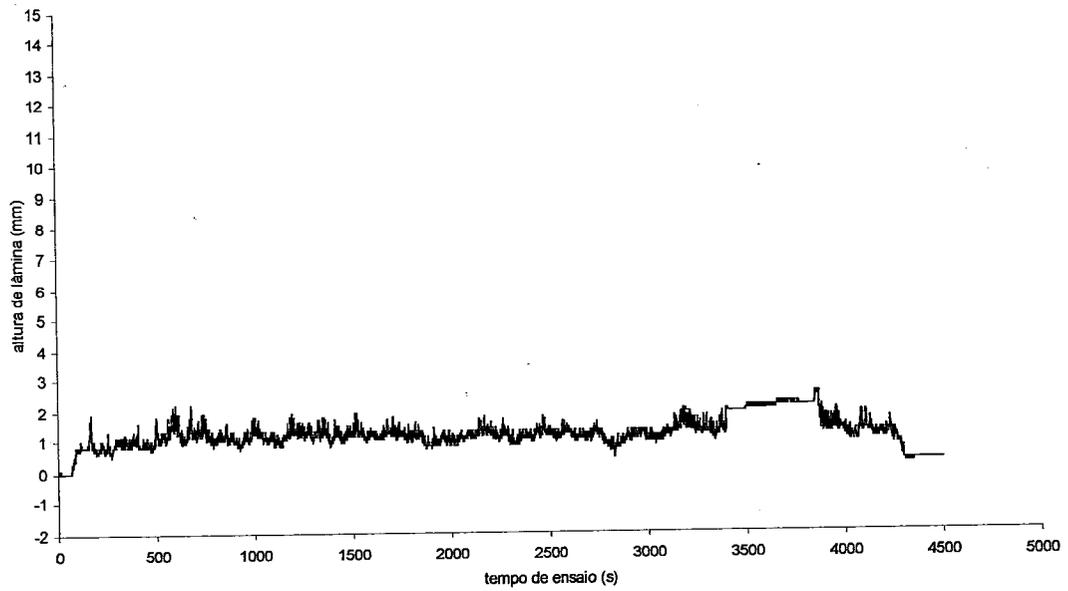
Seção - 08 / Simulação 16

G23



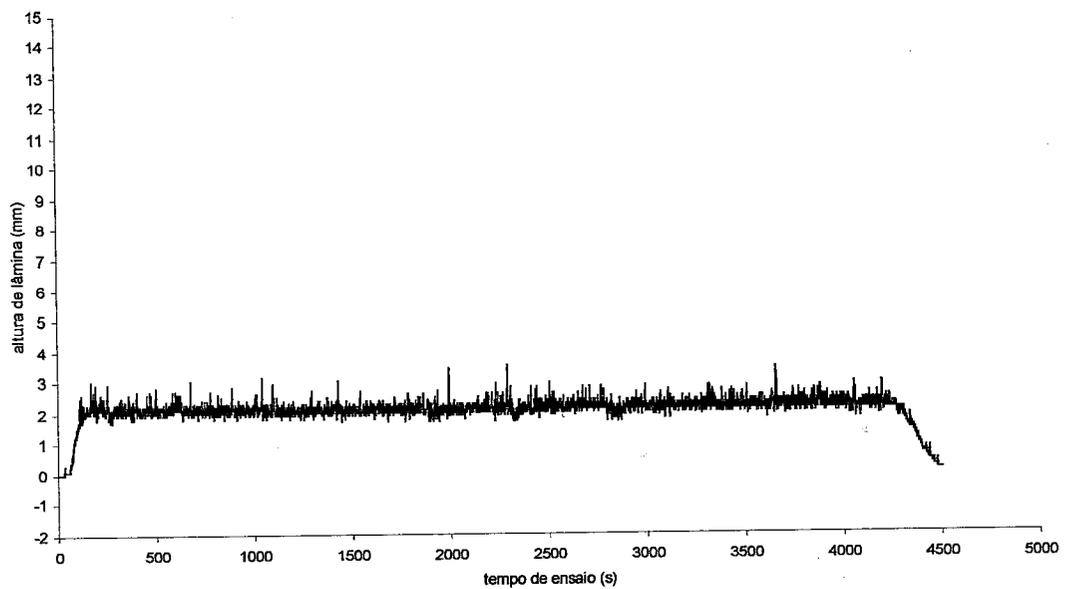
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 08/SR2 - SIMULAC 16

G24



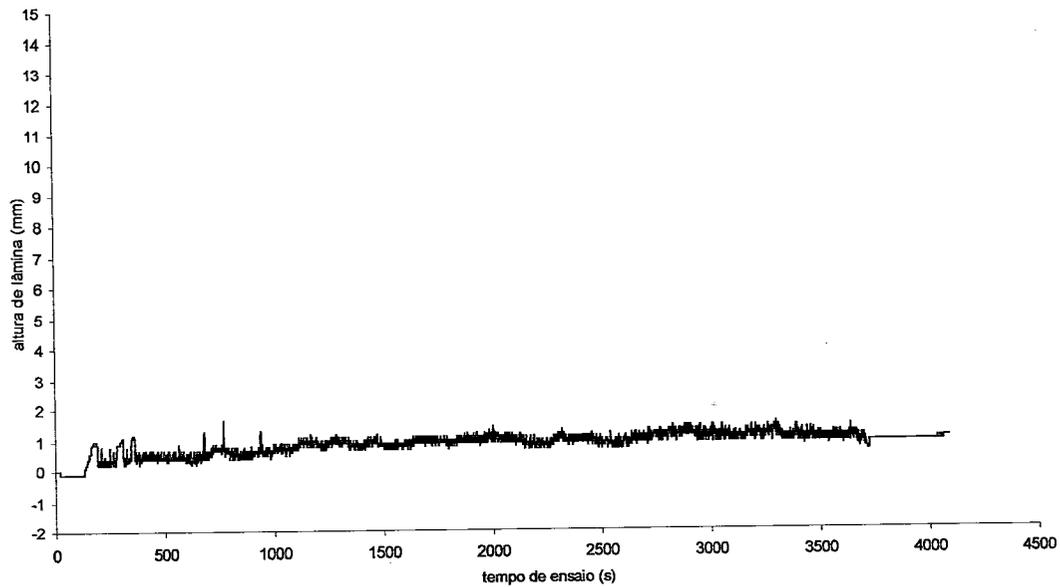
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 08/SR5 - SIMULAC 16

G25



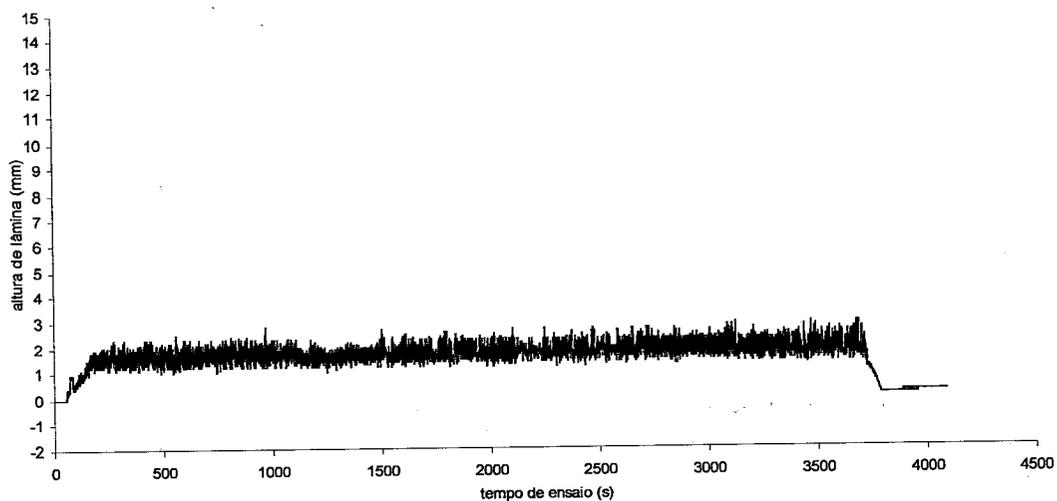
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 08/SR6 - SIMULAC 16

Seção – 08 / Simulação 18
G26

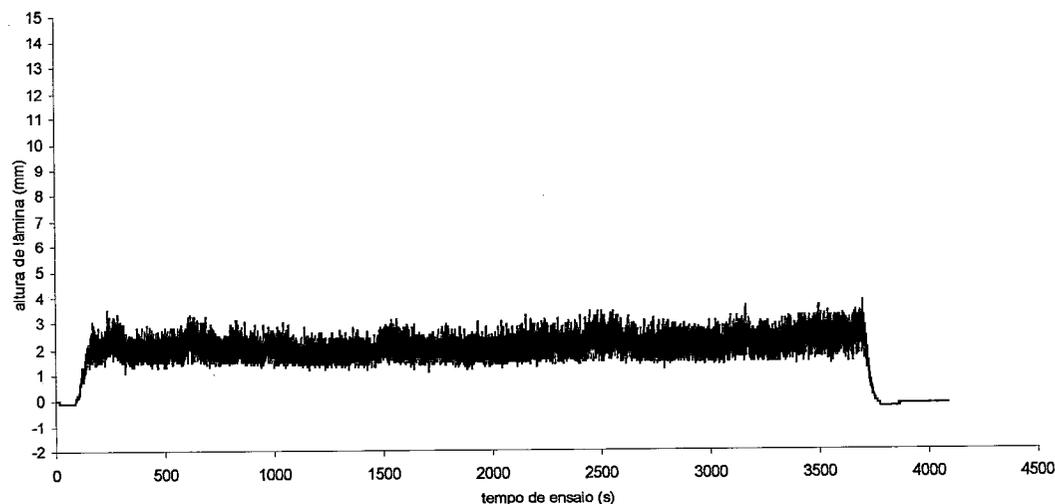


Varição da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 08/SR2 - SIMULAC 18

G27



Varição da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 08/SR5 - SIMULAC 18



Varição da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 08/SR6 - SIMULAC 18

Para os registros de altura de deflúvio no domínio, foi observada uma alternância de superposição de dados ao longo do tempo, comprovando o comportamento dinâmico do escoamento. Em diversos pontos de registro de altura, houve na fase inicial da experimentação uma faixa de altura de lâmina de escoamento praticamente igual para a maioria dos sensores. A explicação para este comportamento é que, nesta fase inicial, o microrrelevo ainda está em formação, portanto, seu efeito sobre o escoamento é reduzido, e há o espalhamento do deflúvio resultando em pequenas alturas na maior parte do domínio. A medida que evolui o microrrelevo, o efeito dinâmico aumenta, favorecendo a concentração do escoamento. Esta caracterização foi ilustrada pela Foto 21, apresentada anteriormente.

A análise dos registros de dados de monitoramento da altura do deflúvio dos dois primeiros ensaios, revelou que não houve influência marcante do microrrelevo sobre o escoamento posta em evidência através do “caos” observado no registro da altura de lâmina do escoamento, principalmente nos primeiros

estágios, de 15 a 30 minutos. Nesse período, o volume excedente da precipitação e disponível para o deflúvio ainda é pequeno, devido à alta taxa de infiltração no início do ensaio. Com o microrrelevo em formação, portanto, não havendo a concentração do escoamento em trajetórias preferenciais, nota-se o espalhamento do deflúvio no domínio, o que resulta em lâminas muito pequenas, principalmente nas seções de cabeceiras.

À medida que os ensaios prosseguem, o microrrelevo inicia sua formação e evolui através da dinâmica do processo da erosão, passando a influenciar o escoamento. Esta influência reside na concentração do escoamento em caminhos preferenciais, precursores dos microcanais de drenagem. A concentração do escoamento pela influência do microrrelevo, conforme o grau de evolução, faz desaparecer o “caos” observado nos registros de monitoramento do deflúvio nos instantes iniciais da experimentação. O resultado da evolução do microrrelevo são registros de alturas de deflúvio bem definidos e separáveis, consequência da concentração e o aumento da profundidade do escoamento. Os gráficos de monitoramento do deflúvio do Ensaio 18 mostram este efeito de concentração e a separação dos registros. A Foto 21 ilustra a influência da microtopografia sobre o escoamento, mostrando a concentração em trajetórias preferenciais.

Todo o processo da erosão parece ser sustentado pelo “feedback” existente entre o escoamento e o microrrelevo. O escoamento cria o microrrelevo e sustenta sua dinâmica de evolução através da sua capacidade de remoção de sedimento. Por outro lado, o microrrelevo orienta o escoamento pela sua capacidade de limitar a capacidade de transporte do sedimento removido. Uma característica importante do microrrelevo em relação ao escoamento é a sustentação da turbulência que é responsável pelos escoamentos secundários em torno dos elementos que compõem o próprio microrrelevo e cuja energia é utilizada no desprendimento de sedimento. É uma relação de equilíbrio até o limite aonde a força da gravidade seja absolutamente dominante, e o microrrelevo passa a não ter mais nenhum controle sobre o escoamento, como é o caso de enxurradas de lama em encostas desnudas e muito inclinadas.

Ao analisar os hidrogramas locais da única seção da região de cabeceira monitorada por sensor de altura de escoamento, a *Seção -03*, observa-se que a referida seção não apresentou concentração de escoamento suficiente cuja altura pudesse ser detectada e registrada pelos sensores. Este comportamento foi verificado para todos os ensaios realizados, e é ilustrado através dos hidrogramas G1 a G7, da *Seção -03*, apresentados anteriormente. Apesar de o registro G4 parecer que houve algum escoamento, os sinais registrados são ruídos elétricos, provavelmente associados à “fuga do zero” ou fuga do off-set, que se deve a pequenas oscilações de sinal em torno do zero, não raras em instrumentação.

Com a tendência de ausência de escoamento apresentada nas seções iniciais, o efeito do impacto das gotas de chuvas tornam-se predominante nestas regiões, o que explica o maior grau de desagregação do solo aí verificada. Isto confirma as gotas de chuvas como o principal agente de destacamento de partícula do solo, quando não há concentração de fluxo suficiente para concorrer no processo de remoção.

À medida que as seções se afastam da região da cabeceira com o aumento da distância, cresce a probabilidade de o escoamento concentrar-se, denotando a importância do aumento da área de contribuição, da extensão da rampa e, também, da influência do microrrelevo. A concentração ocorre progressivamente ao longo do terreno, sendo os caminhos preferenciais esparsos, às vezes efêmeros, podendo tornar-se faixas contínuas nas seções finais do domínio. Nestas seções, as lâminas são maiores, porém, sempre variáveis de um ponto para outro.

Estas características do escoamento que caracterizam bem a dinâmica envolvida no processo, devido ao microrrelevo e sua evolução espacial e temporal. Tais características podem ser facilmente comprovadas através dos registros dos hidrogramas locais da *Seção -8*, já apresentados. A intensidade da turbulência, função da lâmina do escoamento e da dinâmica do microrrelevo, é caracterizada ao longo dos hidrogramas, cada um com características diferenciadas e intrínsecas. As características manifestadas, incorporam as condições do microrrelevo local e da hidráulica do escoamento. Portanto, as provas de que as condições da hidráulica do escoamento e do microrrelevo não são uniformes, parecem irrefutáveis.

Comparando-se os registros através dos hidrogramas G11, G12 e G13 para uma mesma simulação experimental, observa-se a região monitorada pelo sensor SR2, não apresentou escoamento, enquanto que o G12 e G13 mostram concentração de fluxo intenso, sendo o registro G13 de maior lâmina e ao mesmo tempo denota maior intensidade do efeito do microrrelevo do leito na região. As mesmas características são observadas nos registros G14, G15 e G16 do ensaio 08. A dinâmica do escoamento é bem retrada nos hidrogramas locais G16 do ensaio 08, e no G19 do ensaio 11, pois trata-se do mesmo ponto de monitoramento. No ponto monitorado pelo sensor SR2, o registro também é altamente comprobatório da dinâmica envolvida no processo. Neste ponto da seção 08, a lâmina apresentou variação em torno de 1,0 mm a 1,5 mm durante a maior parte do tempo de ensaio na simulação 06, como mostra o hidrograma local G8. Na simulação 07, não houve lâmina para escoamento, como mostra o hidrograma G11. Porém, nas simulações 15 e 16, o mesmo ponto apresentou uma atividade intensa de escoamento, caracterizada pelos gráficos G20 e G23, passando a um escoamento tranquilo na simulação 18, como mostra o hidrograma local, G26.

Finalmente, o aumento da lâmina devido à concentração do escoamento, nas seções finais do domínio, pode ser verificado através da amplitude da faixa de variação dos registros, nestes pontos, ou, em qualquer outro, aonde a lâmina tem maior profundidade, como pode-se observar nos hidrogramas G19, G27 e G28. As mesmas características podem ser também observadas nos hidrogramas locais, ANEXO – 2, como complemento de discussão da dinâmica do escoamento e do microrrelevo do leito, e o “feedback” mútuo intrínscico do processo de erosão pelo escoamento superficial.

Ensaio do Grupo B

Os ensaios do Grupo B são caracterizados pela duração de 120 minutos. Para manter-se dentro do mesmo padrão de comportamento do solo, os ensaios do Grupo A e do Grupo B foram realizados intercalados, sem serem agrupados de modo isolado e independente. Desta maneira, é possível confrontar resultados finais de produção de sedimento, na busca de identificar a contribuição efetiva do

escoamento superficial, uma vez que nos ensaios do Grupo B as alturas do deflúvio no domínio tendem a ser maiores.

Este grupo contém duas partes de 60 minutos. A primeira parte é idêntica aos procedimentos do Grupo A, com a diferença do material erodido não ser recolhido após os 60 minutos. Apenas a pluviometria era rapidamente medida e o sistema de aquisição de dados reinicializado para a segunda parte do ensaio. Esta reinicialização do sistema era necessária devido o intervalo de tempo de aquisição ser pequeno (250 a 500 ms), resultando em tamanho de arquivo de dados muito grande. No final da segunda parte, o material erodido e acumulado era recolhido para secagem e posterior pesagem. Com esta estratégia, criou-se a condição de saturação do solo para o início da segunda parte dos ensaios do Grupo B.

Foi observado que os hidrogramas da primeira parte dos ensaios tem o mesmo comportamento que os do Grupo A, ressaltando-se as condições iniciais específicas do solo e da influência do vento. O tempo de estabilização do volume do deflúvio não foi muito diferente entre as duas partes do ensaio devido à chuva natural do 29/11/98 de 8,4 mm. No caso da parte B, observou-se que, devido à saturação do solo durante a primeira parte do ensaio, o tempo de início do escoamento detectável pelos sensores era menor do que na primeira parte, assim como o tempo para a concentração na saída, praticamente igual a metade do registrado durante a parte A.

Porém, observou-se diferença entre as duas curvas devido a saturação pela ascensão do registro de deflúvio na saída. A inclinação da curva no primeiro caso, denota que a taxa de infiltração era elevada, porque houve redistribuição da umidade e que a chuva realmente não era intensa. Os hidrogramas de monitoramento do escoamento para um ensaio do grupo B, o ensaio 13, constam do ANEXO – 2/2B.

4.3.3 Hidrogramas de saída do deflúvio superficial

Os registros obtidos através do sistema de aquisição automatizada de dados permitiram gerar os hidrogramas de saída do deflúvio superficial para cada ensaio realizado. Os hidrogramas de saída referente aos ensaios de duração 60 minutos são apresentados a seguir:

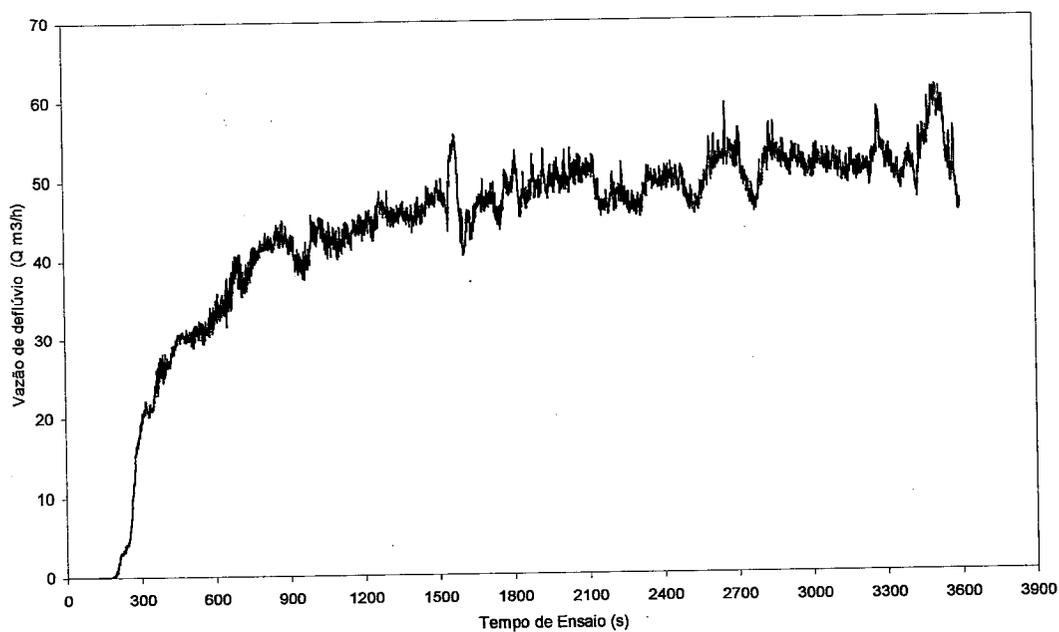


Figura 4.5 Hidrograma de saída do deflúvio superficial: Experimento 2.
(P = 126.0 mm ; Sedimento = 26.51 Kg)

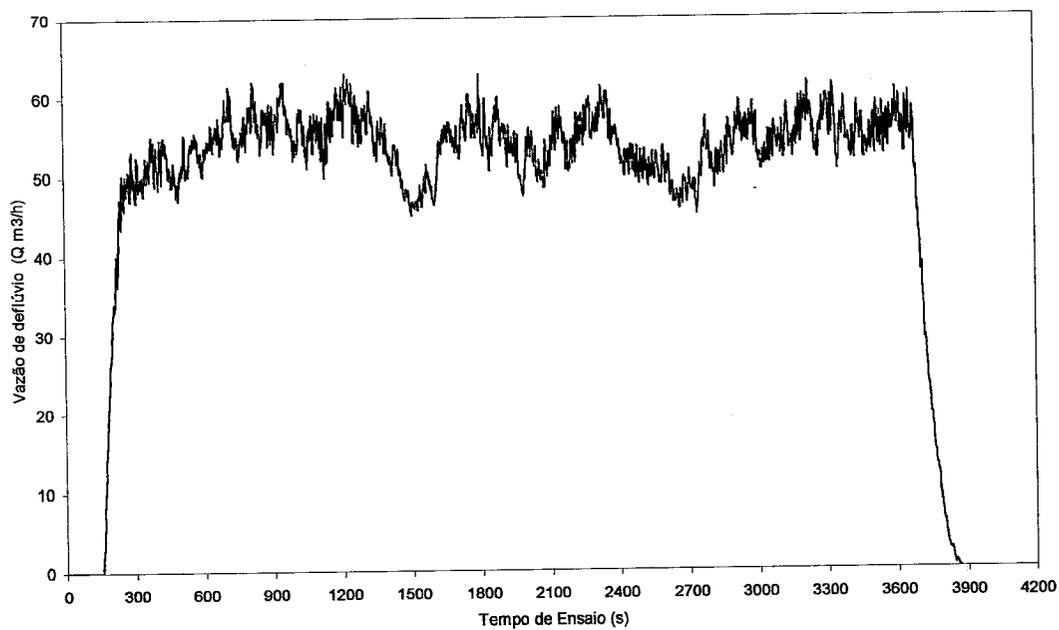


Figura 4.6 Hidrograma de saída do deflúvio superficial: Experimento 6.
(P = 139.75 mm ; Sedimento = 12.22 Kg)

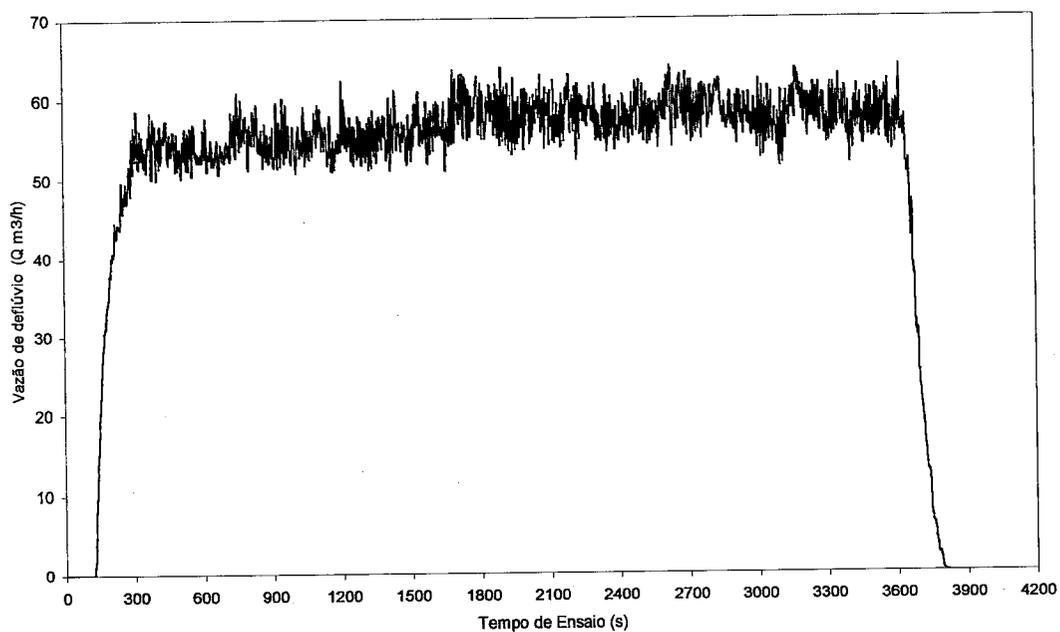


Figura 4.7 Hidrograma de saída do deflúvio superficial: Experimento 7.
($P = 134.50$ mm ; Sedimento = 5.03 Kg)

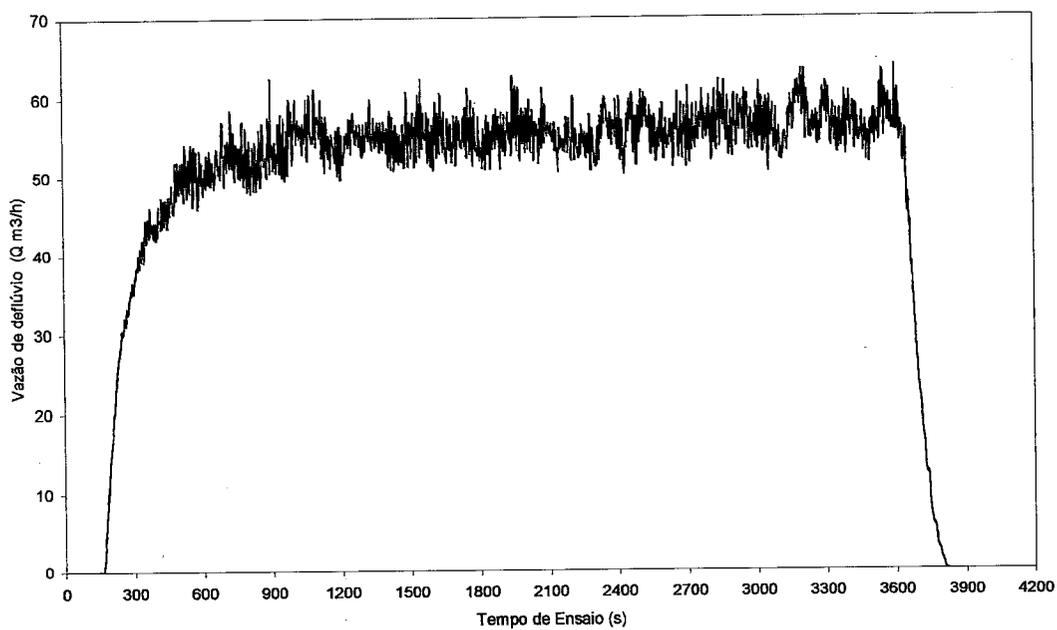


Figura 4.8 Hidrograma de saída do deflúvio superficial: Experimento 8.
($P = 122.90$ mm ; Sedimento = 4.84 Kg)

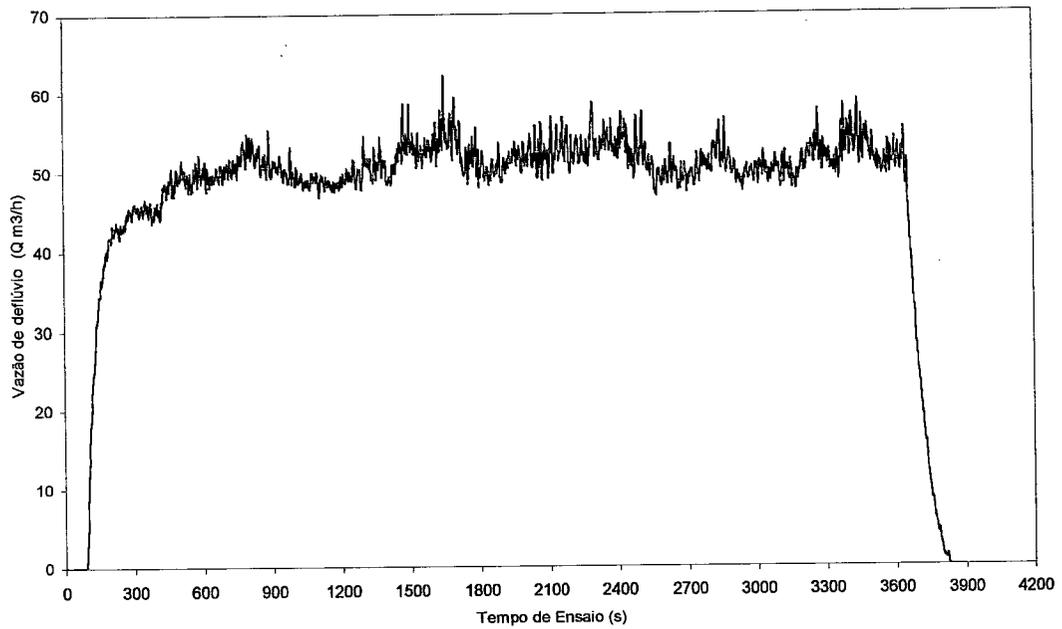


Figura 4.9 Hidrograma de saída do deflúvio superficial: Experimento 11.
($P = 101.70$ mm ; Sedimento = 2.36 Kg)

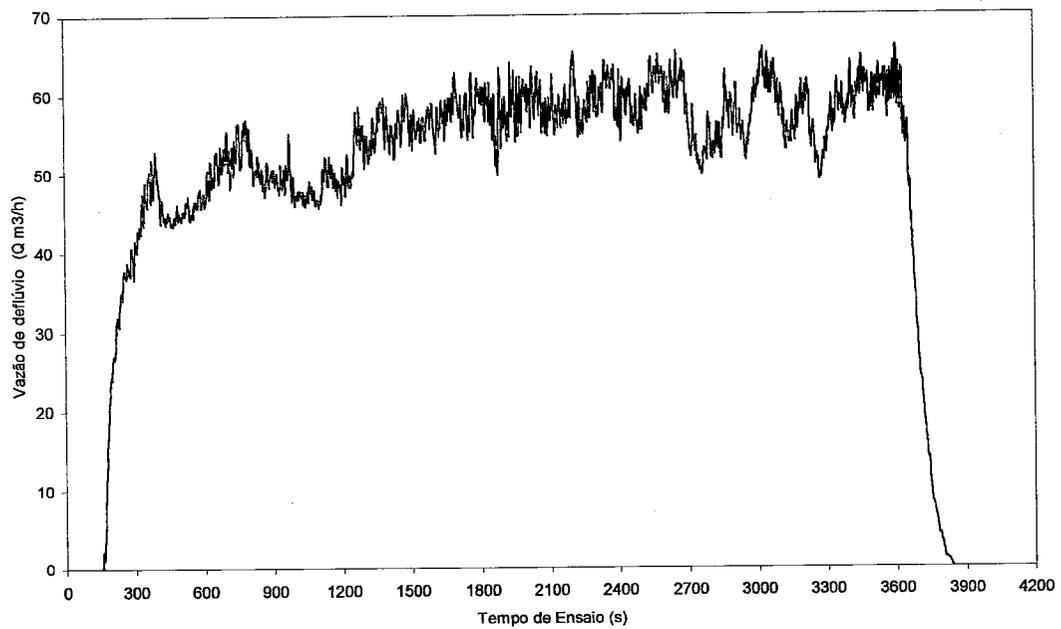


Figura 4.10 Hidrograma de saída do deflúvio superficial: Experimento 15.
($P = 140.95$ mm ; Sedimento = 2.38 Kg)

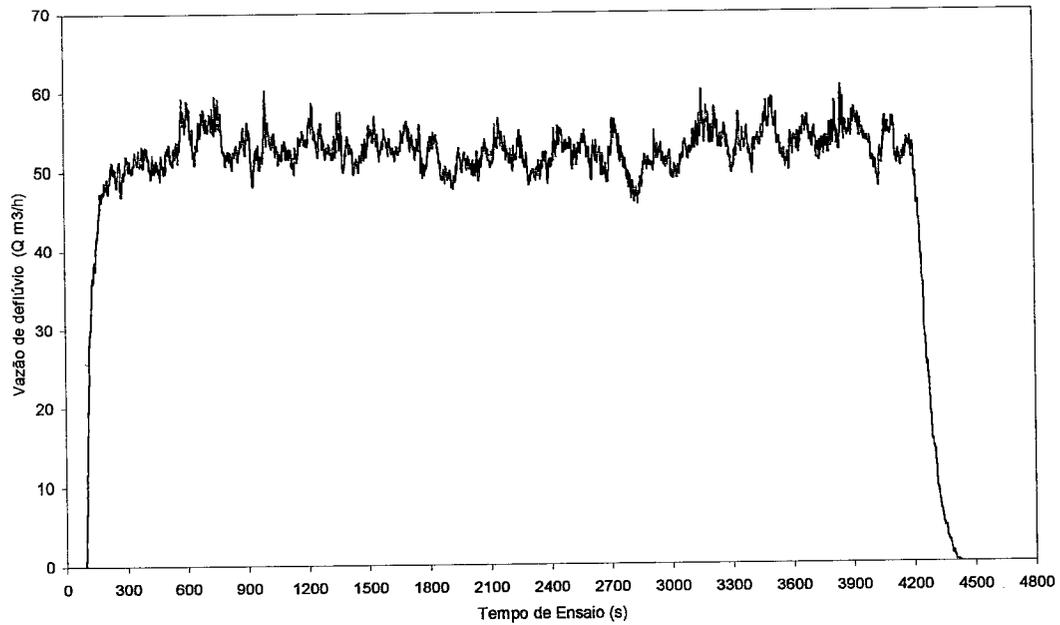


Figura 4.11 Hidrograma de saída do deflúvio superficial: Experimento 16.
($P = 162.90 \text{ mm}$; Sedimento = 2.50 Kg)

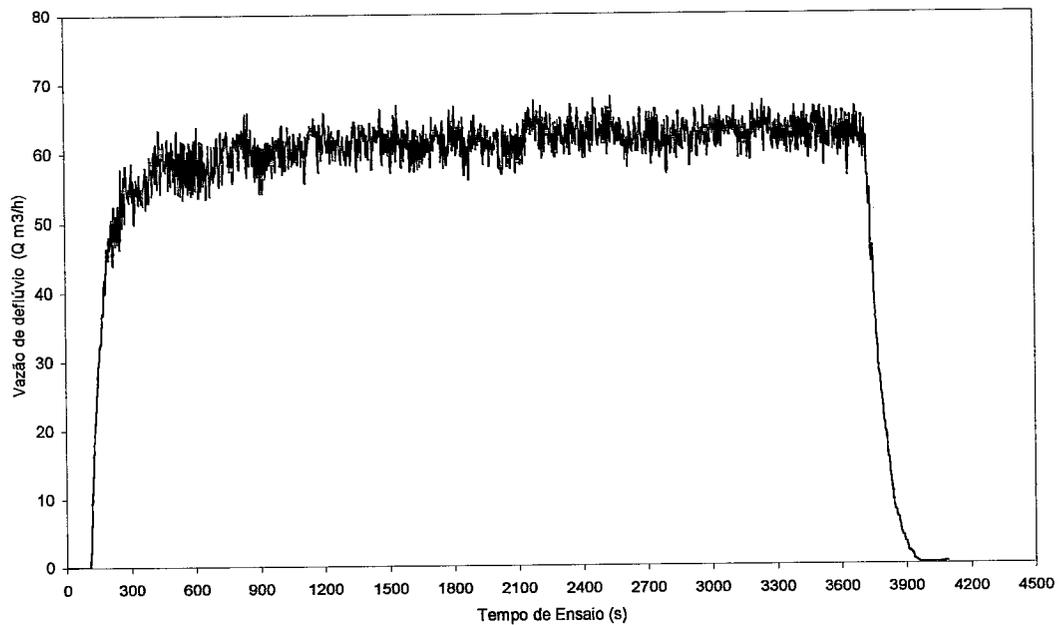


Figura 4.12 Hidrograma de saída do deflúvio superficial: Experimento 18.
($P = 136.70 \text{ mm}$; Sedimento = 3.68 Kg)

Ao analisar os hidrogramas ficou evidente que o volume de deflúvio superficial depende da precipitação efetiva regida pelas condições iniciais de umidade e das características físicas e hidráulicas do solo. Estas condições se refletem na estabilização da vazão do hidrograma, a qual pode ocorrer rapidamente ou mais lentamente.

É importante salientar que a variação observada na taxa de precipitação no decorrer de toda experimentação foi devido à influência do vento, pois, apesar dos ensaios terem sido iniciados em condições de vento calmo ou muito fraco, essas condições sofrem mudanças durante o evento. Isso gera concentrações da precipitação em determinadas regiões da área em detrimento de outras, afetando a uniformidade de distribuição e, portanto, as médias da pluviometria do ensaio.

O hidrograma da Figura 4.5, do Ensaio 2, mostra uma ascensão gradual bem definida do volume do deflúvio drenado, o que caracteriza a condição de solo muito seco antes do início do experimento. As oscilações de maiores amplitudes observadas a partir dos tempos 1500 s a 3000 s explicam a saturação da camada superficial do solo e resultando em maior volume de deflúvio. Este acréscimo do volume devido a baixa taxa de infiltração gera um aumento da intensidade da turbulência registrada pelo sensor de deflúvio instalado na saída, para monitorar o hidrograma. Em comparação com o hidrograma do Ensaio 8 (Figura 4.8), nota-se que há uma forte semelhança no comportamento dos hidrogramas no início. Neste último caso, embora o solo esteja seco, seu teor de umidade é mais alto que na situação do Ensaio 2, devido a ocorrência de chuva natural de 8.0 mm no dia 13/11, dois dias antes do ensaio. A redução do gradiente hidráulico por causa da chuva natural anterior ao evento simulado fez com que a infiltração tendesse rapidamente para a taxa básica e o volume do deflúvio se estabelecesse também rapidamente.

O Ensaio 6 sofreu influência marcante do vento e da mudança constante de direção no decorrer da simulação, que afetou a uniformidade de distribuição da precipitação. Esta alternância da concentração da chuva em diferentes regiões da área explica as oscilações muito pronunciadas observadas no hidrograma. O Ensaio 11 também teve a influência do vento, com a velocidade do vento registrada na estação climatológica do CHREA/SHS/EESC/USP de 25,2 km/h, e a

média do dia 18 km/h. A situação se repete nos Ensaio 15 e 16 com médias pluviométricas elevadas, contrariamente ao Ensaio 11, onde esta média foi de 101.70 mm.

Para corrigir o efeito do vento sobre a uniformidade de distribuição da precipitação seria necessário aplicar um fator de correção à área de drenagem ou à própria média da pluviometria, a fim de evitar que as vazões sejam superestimadas. Como em condições de chuvas naturais a área abrangida pela precipitação é bem mais extensa, a influência do vento nestes casos não parece ter tanta importância na extensão da área efetiva de contribuição.

4.3.4 Produção de sedimento

O material erodido durante os ensaios foi retratado em gráficos conforme a cronologia de realização. As produções de sedimento relativa aos ensaios dos Grupos A e B são apresentados na Figura 4.13, enquanto a relativa ao Grupo C, solo desestruturado, constam da Figura 4.14 .

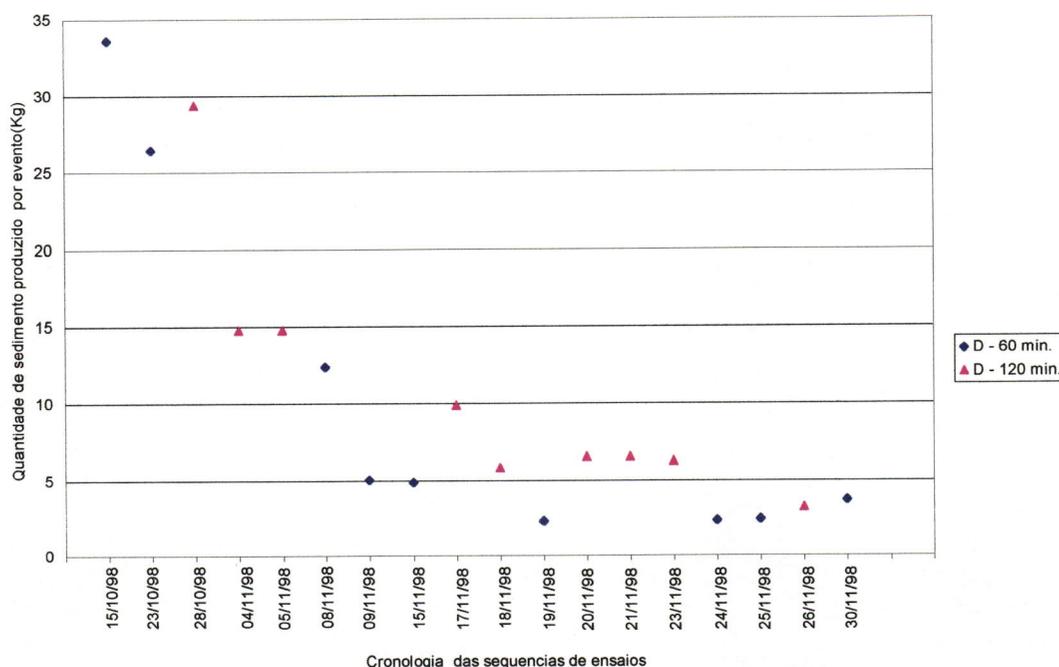


Figura 4.13 Evolução temporal da produção de sedimento pela ação combinada de precipitação intensa simulada e deflúvio superficial

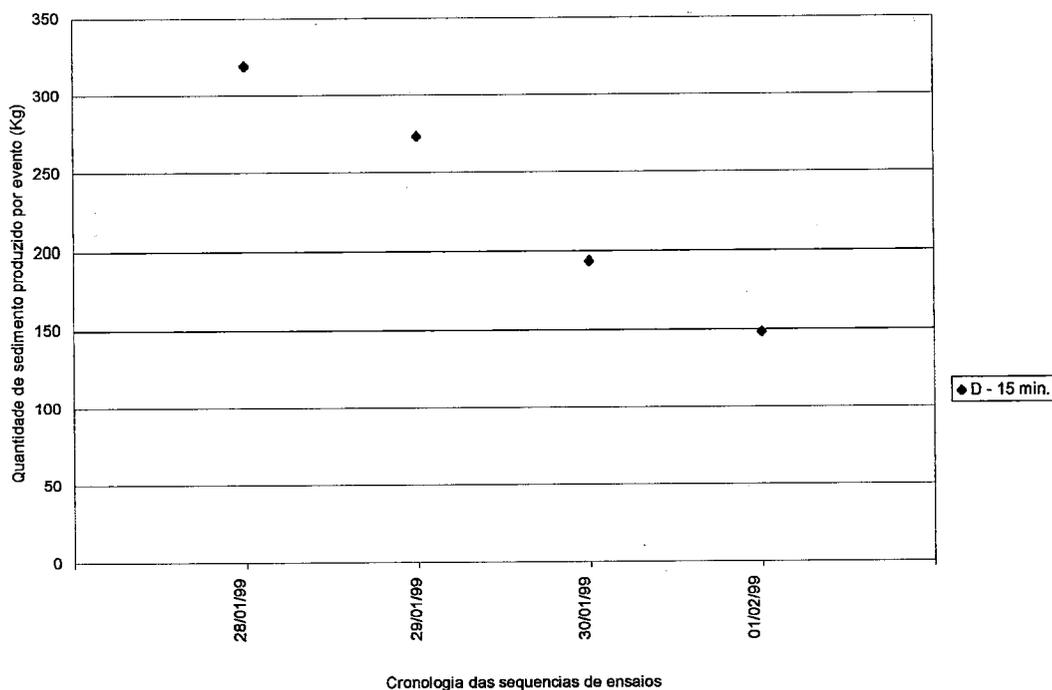


Figura 4.14 Evolução temporal da produção de sedimento pela ação combinada de precipitação intensa simulada e deflúvio superficial: solo desestruturado

As sequências de dados mostram uma tendência de decaimento da produção de sedimento por evento chuvoso ao longo do período de ensaio, independente da duração dos ensaios. Os experimentos com duração de 120 minutos apresentaram produções de sedimento superiores às dos ensaios de 60 minutos, exceto no caso dos ensaios do 15/10/98 e do 26/11/98 comparado à produção do 30/11/98 relativo a um ensaio de 60 minutos. Na primeira situação, a duração do ensaio foi apenas de 30 minutos, no entanto a produção de sedimento foi a maior de todos os ensaios realizados com o solo coeso. A explicação deste fato é que trata-se da primeira simulação após a limpeza e nivelamento da área, e havia grande quantidade de material solto ou de pouca resistência ao arraste. No segundo caso a produção de sedimento do ensaio de 60 minutos superou ligeiramente (0.46 Kg) a produção obtida no ensaio de 120 minutos, porém, não há nenhuma relação direta de proporcionalidade com a duração. Considerando o intervalo entre as simulações, o fato observado indica que a exposição ao tempo, ou intervalos longos entre eventos

chuvosos aumentariam a erodibilidade do solo. Isso pode explicar a tendência de recuperação de produção de sedimento no final das sequências. Pode haver, portanto, uma influência climatológica efetiva sobre a resistência do solo à erosão ou possivelmente um efeito de histerese durante os intervalos entre eventos chuvosos, os quais poderão ser investigados em pesquisas futuras.

A tendência observada de decaimento de produção de sedimento pode ser atribuída a um aumento de resistência à erosão devido a compactação provocada pelas gotas de chuvas e ao processo de cimentação superficial (sealing). Com intervalos longos entre eventos chuvosos, a exposição ao tempo acaba provocando trincas na crosta superficial possibilitando a recuperação da infiltração, que auxilia na ruptura da coesão do solo, e, conseqüentemente, aumento na produção do sedimento.

Os ensaios do Grupo C que tem duração de 15 minutos, foram realizados com o objetivo de verificar o comportamento do solo desestruturado quanto à produção de sedimento e ter noção de grandeza do grau de resistência do solo no seu estado inicial. Os resultados são apresentados na Figura 4.14 .

A tendência de decaimento foi também verificado com o solo desestruturado, fato que comprova o efeito de compactação das gotas de chuva, principalmente em solo argiloso. Participa deste processo de adensamento, o transporte de partículas finas para a camada subsuperficial através da infiltração. A grande quantidade de material erodido nestes ensaios em relação ao solo não desestruturado prova o quanto é importante a avaliação da coesão do solo em que se estuda o processo de erosão ou a sua modelagem.

Levantamento do microrrelevo.

A importância do microrrelevo na dinâmica do processo da erosão é inegável, e o seu levantamento detalhado é fundamental para a elaboração de modelos com bases físicas que simulem a dinâmica envolvida. Na bancada experimental, foi desenvolvido o sistema levantamento do microrrelevo, com base na fotogrametria digital, para a reconstituição dos estereofotogramas por meio do software DVP (Digital Video Plotter). A restituição das imagens da evolução do microrrelevo do terreno, após cada simulação experimental, é de fundamental

importância para se conhecer a profundidade real do escoamento no domínio, uma vez que os registros dos hidrogramas locais fornecem apenas a altura relativa ao início de cada ensaio. O sistema, montado com câmeras não métricas, ANEXO -3, não produziu imagens capazes de serem interpretadas pelo DVP, devido a inexistência de coordenadas das marcas fiduciais, essenciais para os procedimentos de orientação em fotogrametria.

O nível de detalhamento envolvido no levantamento da dinâmica da microtopografia do terreno requer um trabalho com malhas densas de células para melhor representar o microrrelevo. Isso requer câmeras fotogramétricas específicas e equipamento de alta performance em processamento de imagens. Os conhecimentos a respeito da dinâmica do microrrelevo, através do seu levantamento rigoroso, continua sendo o principal desafio de estabelecimento de variáveis geomorfológicas, fundamentais para a construção de modelos físicos com abordagem da hidrodinâmica do processo de erosão por escoamento superficial.

5. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA EROÇÃO

5.1 Introdução

O processo erosivo do solo, manifestado durante períodos de chuva intensa, tem sido estudado exaustivamente nos últimos trinta anos, com propostas de formulação baseadas principalmente em experimentos, Wishmeier (1965, 1978), Foster (1972). Recentemente, expressões baseadas em princípios físicos vem sendo utilizadas, sem prescindir das experimentações necessárias para a quantificação dos parâmetros inerentes às formulações teóricas, Hirschi & Barfield (1988), Roth et al. (1989), Zhang et al. (1989), Lei et al. (1998).

Os modelos com embasamento físico são usualmente desenvolvidos a partir da utilização das equações do movimento do deflúvio superficial, de equações que quantificam as ações erosivas do impacto das gotas de chuva e do escoamento superficial sobre o terreno e da capacidade de transporte de sedimentos deste escoamento.

As equações gerais que exprimem o deflúvio superficial são a equação da continuidade e da quantidade de movimento em geral desmembradas às direções principais do domínio considerado. Para domínios bidimensionais, as equações que exprimem o deflúvio superficial são as seguintes (Zhang, 1989):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = i - f \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial (q_x^2 / h)}{\partial x} + \frac{\partial (q_x \cdot q_y / h)}{\partial y} = -g \cdot z \cdot \left[\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial x} \right] - \frac{1}{\rho} \tau_x - \frac{1}{\rho} \tau_{s,x} \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial(q_y^2/h)}{\partial x} + \frac{\partial(q_x \cdot q_y/h)}{\partial y} = -g \cdot z \cdot \left[\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial z}{\partial y} \right] - \frac{1}{\rho} \tau_y - \frac{1}{\rho} \tau_{s,y} \quad (5.3)$$

sendo h a profundidade d'água do deflúvio em um ponto do domínio definido pelas coordenadas (x,y) e no instante t , (L); q_x e q_y as vazões específicas nas direções x e y , respectivamente, ($L^2 \cdot T^{-1}$); $i-f$ a intensidade de chuva excedente, isto é, a intensidade de chuva i subtraída da taxa de infiltração f , (LT^{-1}); τ_x e τ_y as tensões de atrito do leito nas direções x e y , respectivamente, ($F \cdot L^{-2}$); $\tau_{s,x}$ e $\tau_{s,y}$ as tensões de atrito da superfície d'água nas direções x e y , respectivamente, ($F \cdot L^{-2}$); z a elevação do terreno no ponto considerado, (L), e g a aceleração gravitacional, (LT^{-2}).

As tensões de atrito são comumente determinadas pela equação de Manning, quando o escoamento superficial é turbulento; neste caso, tem-se que

$$\tau_x = \frac{g \cdot n^2}{h^{4/3}} q_x \cdot (q_x^2 + q_y^2)^{1/2} \quad (5.4)$$

$$\tau_y = \frac{g \cdot n^2}{h^{4/3}} q_y \cdot (q_x^2 + q_y^2)^{1/2} \quad (5.5)$$

em que n é o coeficiente de rugosidade de Manning. As tensões de superfície são originadas pelo impacto das gotas de chuva, podendo ser expressas por (Zhang, 1989):

$$\tau_{s,x} = \frac{\rho \cdot i \cdot q_x}{h} \quad (5.6)$$

$$\tau_{s,y} = \frac{\rho \cdot i \cdot q_y}{h} \quad (5.7)$$

O transporte de sedimentos pelo deflúvio superficial pode ser expresso por (Lei et al., 1998):

$$h \frac{\partial c}{\partial t} + q_x \frac{\partial c}{\partial x} + q_y \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (h D_x \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (h D_y \frac{\partial c}{\partial y}) + S_s \quad (5.8)$$

sendo c a concentração em massa de sedimentos, ($M.L^{-2}$), D_x e D_y , os coeficientes de dispersão de sedimentos nas direções x e y , respectivamente, ($L^2.T^{-1}$); S_s a taxa de sedimentos depositados ou carregados pelo escoamento, ($M.L^{-1}.T^{-1}$).

A taxa de destacamento de solo pela ação de impacto das gotas de chuva pode ser avaliada por uma expressão que leve em consideração a energia cinética de impacto das gotas de chuva sobre a superfície e a tensão resistiva do solo. Uma expressão comumente utilizada é a seguinte (Righetto, 1998):

$$D_P = K_{P,total} \cdot (i - i_c) \quad (5.9)$$

sendo D_P a taxa de destacamento de solo pela ação das gotas de chuva ($ML^{-2}T^{-1}$), i a intensidade de chuva, (LT^{-1}); i_c a intensidade de chuva crítica, abaixo da qual não há energia suficiente para destacar partículas do solo e $K_{P,total}$ um coeficiente empírico. As seguintes relações podem ser utilizadas para determinar os valores de i_c e K_P , Sharma et al (1991) e Sharma & Gupta (1989):

$$i_c = 5,5 + 24,14 \sqrt{e_{c,total}} \quad (5.10)$$

$$K_{P,total} = K_P \cdot (0,033 - 0,027 \sqrt{e_{c,total}}) \quad (5.11)$$

$$e_{c,total} = \sum_{j=0}^J [k \cdot \sum_{k=1}^{N_c} d_k^3 \cdot u_k^2 \cdot n_k + e_c \cdot \sum_{k=N_c+1}^N n_k] \quad (5.12)$$

$$e_c = 0,013 \cdot \sigma + 0,005 \cdot \arg \quad (5.13)$$

$$K_P = \alpha \cdot \sigma^{-b} \quad (5.14)$$

sendo σ a tensão de resistência ao desprendimento de partículas do solo, (FL^{-2}), arg o percentual de argila do solo (%), α e b parâmetros empíricos. Sharma et al. (1991) propõe a seguinte expressão empírica para a determinação de σ , em kPa:

$$\sigma = \exp[-8,46 + 6,55 \cdot \rho_a + 0,061 \cdot arg - 0,87 \cdot p_c] \quad (5.15)$$

sendo ρ_a a massa específica aparente do solo em $Mg \cdot m^{-3}$, p_c a pressão capilar em kPa e arg o percentual de argila do solo. Valores típicos dos parâmetros α e b para solos arenosos e argilosos são, respectivamente, (33,1 e 0,275) e (5,5 e 0,372). Para solos com 52% de areia, 28% de silte, 20% de argila, 1,5% de matéria orgânica e $\sigma=8,54$ kPa, os valores correspondentes da energia crítica e_c e do coeficiente K_P obtidos por Sharma et al (1991) foram 0,17mJ e 13,3 mg/mJ.

Na expressão da energia cinética total da chuva, equação 5.12, J é o número de intervalos de tempo em que foi subdividida a duração da chuva; N o número total de classes de diâmetros das gotas da chuva; n_k número de gotas pertencentes a classe k , com diâmetro médio d_k ; u_k velocidade média de queda das gotas da classe k ; N_c o número de classes de gotas com energias cinéticas inferiores à crítica. Na equação 5.10, i_c é calculada em mm/h, sendo e_c em mJ; na equação 11, os valores de $K_{P,total}$ e K_P têm unidades $kg \cdot m^{-2} \cdot mm^{-1}$ enquanto $e_{c,total}$ é tomado em mJ. Dessa maneira, com a equação 5.9, o valor calculado de D_P é expresso em $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$.

O escoamento superficial tem também ação erosiva tanto no transporte de sedimentos destacados quanto no próprio destacamento de grãos da estrutura de solo do terreno. O destacamento de solo pelo escoamento é causado pela turbulência, ou mais especificamente, pelos turbilhões gerados próximos ao leito ou superfície do terreno. Nearing (1991) baseado em observações laboratoriais, a seguinte equação para a taxa de destacamento de solo decorrente do escoamento, D_e :

$$D_e = F \cdot P \cdot M \quad (5.16)$$

sendo F a frequência temporal e espacial dos eventos de turbilhões turbulentos; P a probabilidade que a tensão gerada pelo evento turbulento seja superior a tensão de resistência do solo e M a massa média de grão destacados por evento turbulento



erosivo. Através da adoção de distribuições de probabilidades Normal para as tensões originadas pela turbulência e a de resistência do solo, Nearing(1991) obteve uma expressão para D_e envolvendo a profundidade d'água do deflúvio superficial, o coeficiente de atrito do escoamento, a declividade da linha de energia e parâmetros empíricos. Dessa maneira, a seguinte relação pode ser utilizada para expressar D_e :

$$D_e = K_e h^{2/3} S^{3/2} \quad (5.17)$$

sendo S a declividade da linha de carga do escoamento e K_e um coeficiente empírico a ser determinado indiretamente através de experimentos.

Os grãos destacados da superfície do solo são carregados se a capacidade de transporte do deflúvio for superior à massa total destacada em um intervalo de tempo Δt . No caso do deflúvio superficial ser incapaz de carrear todas as partículas destacadas pelas gotas de chuva e pelo próprio escoamento nesse intervalo de tempo, então, apenas parte é transportada e, neste caso, haverá a necessidade de considerar duas condições de superfície: uma fração da superfície coberta com material já destacado, porém depositado na superfície, e outra fração onde as partículas de solo encontram-se na condição natural de tensão de resistência ao destacamento. Assim, no balanço de material a ser carregado deve ser considerada uma taxa de destacamento total, $(D_P + D_e)_{total}$, referente a essas duas frações de solo, ou seja,

$$(D_P + D_e)_{total} = f_{ms} \cdot (D_P + D_e)_{ms} + (1 - f_{ms})(D_P + D_e)_{sn} \quad (5.18)$$

em que f_{ms} é a fração de área com material solto, $(D_P + D_e)_{ms}$ a taxa de destacamento da fração da área com material solto sem resistência e $(D_P + D_e)_{sn}$ a taxa de destacamento de partículas do solo natural.

O equacionamento anteriormente apresentado é suficientemente abrangente para ser utilizado em situações práticas, principalmente quando se deseja detalhar o fenômeno físico do escoamento superficial e da erosão, em domínios pequenos ou médios.

Neste trabalho, procurou-se desenvolver um modelo numérico baseado nesse equacionamento, porém, com algumas simplificações a fim de permitir a

utilização do algoritmo computacional em problemas práticos, envolvendo dimensões de domínios relativos às encostas de bacias hidrográficas. Com o modelo, foram realizados experimentos numéricos com o objetivo de possibilitar a análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo e de levantar as faixas de possíveis valores a serem utilizados para a simulação da erosão de uma pequena área de encosta e comparação com resultados experimentais observados em condições de campo.

Nos itens seguintes, são apresentados em detalhes o modelo numérico desenvolvido, a análise de sensibilidade dos parâmetros, os experimentos realizados em condições de campo e a comparação de resultados simulados com os observados.

5.2 O Modelo Numérico

A Figura 5.1 ilustra o domínio utilizado para as simulações numéricas do deflúvio superficial e da erosão distribuída do solo, a discretização desse domínio em células retangulares e a caracterização das principais variáveis envolvidas. As vazões específicas através das faces de jusante de uma célula (i,j) é denotada por $q_x(i,j)$ na direção x e $q_y(i,j)$ na direção y . De maneira semelhante, as cargas de sedimentos são denotadas por $q_{s,x}(i,j)$ e $q_{s,y}(i,j)$. A elevação do terreno correspondente à célula (i,j) é denotada por $z_s(i,j)$ e a profundidade d'água por $h(i,j)$. As declividades médias do terreno nas direções x e y são denotadas, respectivamente, por $S_{o,x}$ e $S_{o,y}$.

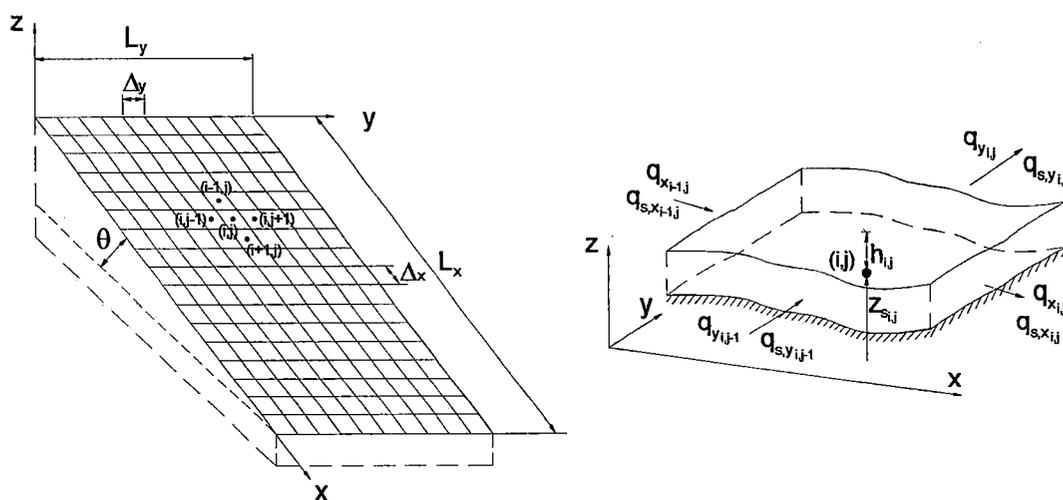


Figura 5.1 – Área de encosta estudada, células de discretização e caracterização das variáveis.

A dinâmica do deflúvio superficial e da configuração do terreno envolve fenômenos associados, pois, se de um lado o material destacado é continuamente transportado pelo escoamento, modificando as elevações do terreno, por outro lado, a alteração da declividade altera as tensões de atrito, as profundidades do escoamento e as repartições de vazão nas direções principais x e y .

Por esse fato, o modelo numérico bidimensional foi concebido para calcular iterativamente o deflúvio superficial a partir das condições estabelecidas no início de um intervalo de tempo, isto é, no tempo genérico t e, em seguida, o destacamento e transporte de partículas de sedimentos do terreno, e o balanço de massa de sedimentos transportada ou sedimentada numa determinada célula do domínio. Por meio de várias iterações de cálculo do deflúvio, do transporte de sedimentos e da modificação das elevações do terreno, são determinadas as vazões específicas, a profundidade d'água e as cargas de sedimentos no final do intervalo de tempo considerado, ou seja, no instante $t+\Delta t$. O fluxograma apresentado na Figura 5.2 ilustra os procedimentos gerais de cálculo do modelo numérico.

Deflúvio superficial

Tomando-se uma célula genérica do domínio (i,j) , $i=1,2,\dots,I$ e $j=1,2,\dots,J$, a equação da continuidade é expressa por

$$\begin{aligned} \Delta x \Delta y \frac{h(i,j,t+\Delta t) - h(i,j,t)}{\Delta t} = & 0,5 \Delta y [q_x(i-1,j,t) + q_x(i-1,j,t+\Delta t) - q_x(i,j,t) - q_x(i,j,t+\Delta t)] + \\ & + 0,5 \Delta x [q_y(i,j-1,t) + q_y(i,j-1,t+\Delta t) - q_y(i,j,t) - q_y(i,j,t+\Delta t)] + \\ & + 0,5 \Delta x \Delta y [i(t) + i(t+\Delta t) - f(t) - f(t+\Delta t)] \end{aligned} \quad (5.19)$$

ou, para uma iteração (it) , de cálculo do valor de h no tempo $t+\Delta t$:

$$\begin{aligned} h(i,j,t+\Delta t)^{(it)} = & 0,5 [h(i,j,t+\Delta t)^{(it-1)} + h(i,j,t)] + \\ & + 0,25 \{ [q_x(i-1,j,t) + q_x(i-1,j,t+\Delta t)^{(it)} - q_x(i,j,t) - q_x(i,j,t+\Delta t)^{(it-1)}] / \Delta x + \\ & + [q_y(i,j-1,t) + q_y(i,j-1,t+\Delta t)^{(it)} - q_y(i,j,t) - q_y(i,j,t+\Delta t)^{(it-1)}] / \Delta y + \\ & + [i(t) - f(t) + i(t+\Delta t) - f(t+\Delta t)] \} \end{aligned} \quad (5.20)$$

adotando-se na primeira iteração: $h(i,j,t+\Delta t)^{(it-1=0)} = h(i,j,t)$.

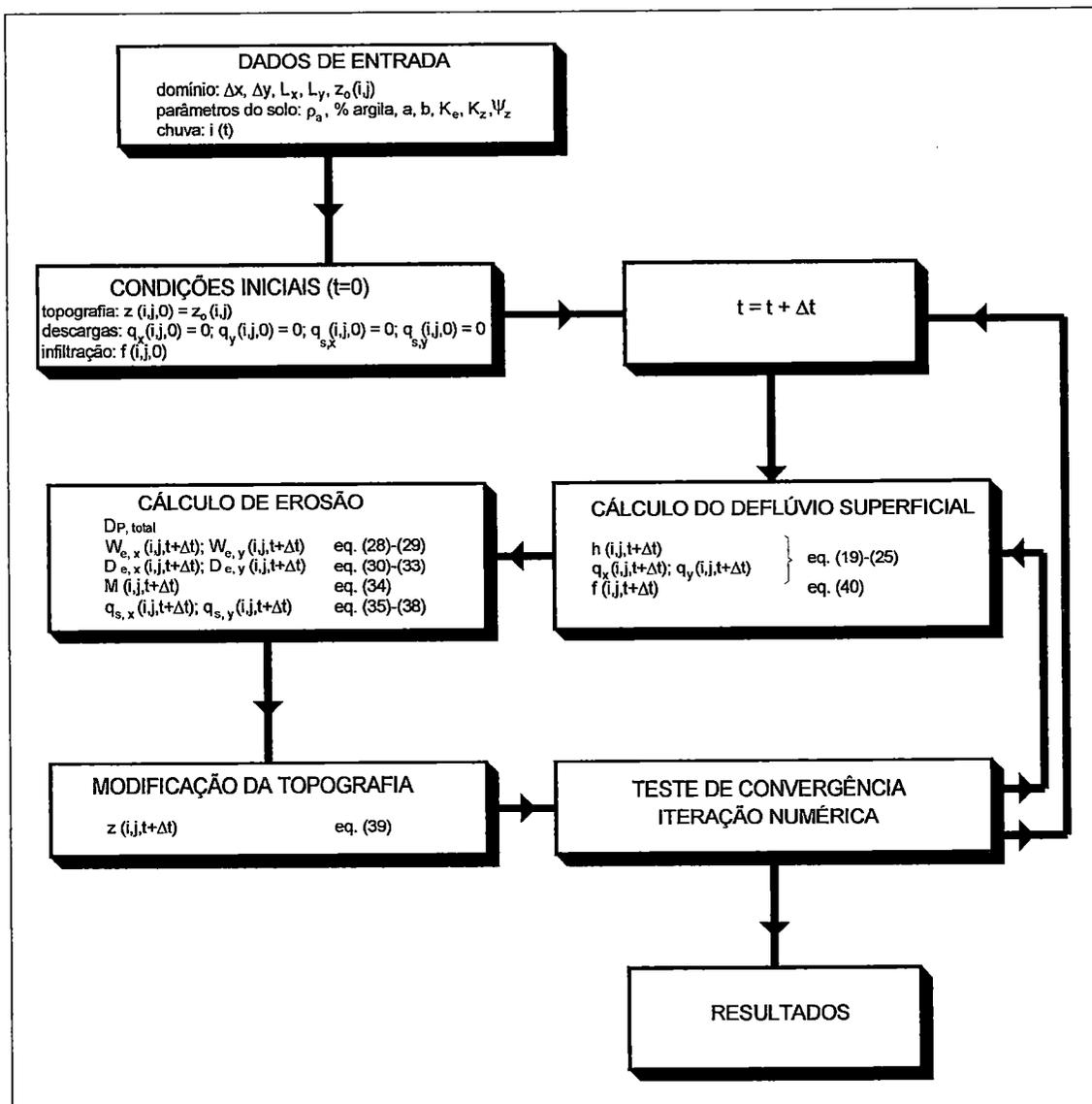


Figura 5.2 – Fluxograma do modelo numérico.

Usualmente os modelos utilizam o método das ondas cinemáticas para o cálculo das vazões, de modo que a equação da quantidade de movimento aplicada às direções x e y resultam em equações simples de resistência ao escoamento como, por exemplo, a da equação de Manning, identificando-se a declividade da linha de carga com a declividade do terreno no ponto (i,j) ; essa identidade limita a aplicação desses modelos, tornando-os impróprios nas simulações em que o terreno tem pequena declividade ou mesmo declividade reversa em alguns pontos.

A fim de adequar o modelo para simular situações em que podem ocorrer remanso ou escoamento reverso, foi utilizado o método da difusão, ou seja, as declividades da linha de carga nas direções x e y , $S_{f,x}$ e $S_{f,y}$ são expressas, respectivamente, por

$$S_{f,x} = -\frac{\partial}{\partial x}(h+z) = \frac{n^2 \cdot q_x^2}{h^{10/3}} \quad (5.21)$$

$$S_{f,y} = -\frac{\partial}{\partial y}(h+z) = \frac{n^2 \cdot q_y^2}{h^{10/3}} \quad (5.22)$$

No procedimento numérico iterativo, as vazões $q_x(i,j,t+\Delta t)$ e $q_y(i,j,t+\Delta t)$ são calculadas através das seguintes expressões:

$$S_{f,x}^{(it-1)} = \frac{[h(i,j,t+\Delta t) + z(i,j,t+\Delta t) - h(i+1,j,t+\Delta t) - z(i+1,j,t+\Delta t)]^{(it-1)}}{\Delta x} \quad (5.23)$$

$$q_x(i,j,t+\Delta t)^{(it)} = \pm \left[\frac{|S_{f,x}^{(it-1)}|}{n^2} \right]^{1/2} \cdot [h(i,j,t+\Delta t)^{5/3}]^{(it)} \quad (5.24)$$

$$q_y(i,j,t+\Delta t)^{(it)} = \pm \left[\frac{|S_{f,y}^{(it-1)}|}{n^2} \right]^{1/2} \cdot [h(i,j,t+\Delta t)^{5/3}]^{(it)} \quad (5.25)$$

Transporte de Sedimentos

A capacidade de transporte de sedimentos pelo deflúvio superficial, T_e , é estimada através da seguinte relação obtida por Nearing et al. (1998):

$$\log_{10}(T_e) = -37,47 + \frac{38,61 \cdot \exp[2,081 + 0,412 \cdot \log(W_e)]}{1 + \exp[2,081 + 0,412 \cdot \log(W_e)]} \quad (5.26)$$

sendo T_e em $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ e W_e a potência do escoamento em $\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$, definida pela seguinte relação:

$$W_e = \gamma \cdot S_f \cdot q \quad (5.27)$$

sendo γ o peso específico da água em $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$. No modelo numérico, as capacidades de transporte nas direções x e y são estimadas utilizando as potências do escoamento nessas direções, isto é:

$$W_{e,x}^{(it)}(i, j, t + \Delta t) = \gamma \cdot S_{f,x}^{(it)}(i, j, t + \Delta t) \cdot q_x^{(it)}(i, j, t + \Delta t) \quad (5.28)$$

$$W_{e,y}^{(it)}(i, j, t + \Delta t) = \gamma \cdot S_{f,y}^{(it)}(i, j, t + \Delta t) \cdot q_y^{(it)}(i, j, t + \Delta t) \quad (5.29)$$

A taxa de destacamento de solo pelas gotas de chuva pode ser estimada através das equações (5.9) a (5.15). Neste trabalho, essa taxa de destacamento foi estimada pelas seguintes relações:

$$D_P = K_{P,total} \cdot (i - i_c) \quad (5.30)$$

sendo o coeficiente $K_{P,total}$ em $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ e i_c em $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ a intensidade de chuva crítica avaliados através das seguintes expressões:

$$i_c = (1,52 + 6,70 \cdot e_c^{1/2}) \cdot 10^{-6} \quad (5.31)$$

$$K_{P,total} = \alpha \cdot \sigma^{-b} \cdot (0,033 - 0,027 \cdot e_c^{1/2}) \quad (5.32)$$

$$e_c = 0,013 \cdot \sigma + 0,005 \cdot \arg \quad (5.33)$$

sendo D_p $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, i e $i_{c,total}$ em m.s^{-1} , arg o percentual de argila do solo, σ em kPa a tensão de resistência ao destacamento do solo, estimada pela seguinte relação:

$$\sigma = \exp[-8,46 + 0,00655.\rho_a + 0,061.arg] \quad (5.34)$$

sendo ρ_a a massa específica aparente do solo em kg.m^{-3} , e α e b parâmetros empíricos do modelo.

A taxas efetivas de destacamento do solo pelo escoamento, $D_{e,ef}$, nas direções x e y são quantificadas através da Equação (5.17), ou seja, para a célula (i,j) são calculadas das taxas potenciais de destacamento pelo escoamento, obtidas por:

$$D_{e,x}(i, j, t + \Delta t)^{(it)} = K_e \cdot [h(i, j, t + \Delta t)^{2/3} \cdot |S_{f,x}(i, j, t + \Delta t)|^{3/2}]^{(it)} \quad (5.35)$$

$$D_{e,y}(i, j, t + \Delta t)^{(it)} = K_e \cdot [h(i, j, t + \Delta t)^{2/3} \cdot |S_{f,y}(i, j, t + \Delta t)|^{3/2}]^{it} \quad (5.36)$$

Em seguida, compara-se as cargas de sedimentos estimadas na iteração anterior com a capacidade de transporte de sedimentos pelo escoamento a fim de verificar se há taxa de destacamento de solo pelo escoamento e, em caso afirmativo, a sua quantificação. Assim, se $q_{s,x}^{(it-1)} < T_{e,x}^{(it)}$ então

$$D_{e,x,ef}(i, j, t + \Delta t)^{(it)} = D_{e,x}(i, j, t + \Delta t)^{(it)} \cdot \left[1 - \frac{q_{s,x}(i, j, t + \Delta t)^{(it-1)}}{T_{e,x}^{(it)}}\right] \quad (5.37)$$

No entanto, se $q_{s,x}^{(it-1)} > T_{e,x}^{(it)}$, então

$$D_{e,x,ef}(i, j, t + \Delta t)^{(it)} = b_e \cdot [q_{s,x}(i, j, t + \Delta t)^{(it-1)} - T_{e,x}^{(it)}] \quad (5.38)$$

Procedimento semelhante é utilizado para a determinação de $D_{e,y,ef}(i, j, t + \Delta t)^{(it)}$. Convém ressaltar, que as cargas de sedimentos podem ser positivas

ou negativas, com a mesmo sentido das vazões. Dessa maneira, havendo a possibilidade dos valores de $q_{s,x}$ e $q_{s,y}$ serem negativos, deve-se então expressar as cargas de sedimentos em módulo quando aplicadas às Equações (5.37) e (5.38).

Finalmente, utiliza-se a equação da conservação da massa para realizar o balanço de massa de sedimentos erodida ou depositada com as cargas transportadas. Denotando por M a massa destacada disponível, tem-se então a seguinte equação de balanço para uma determinada célula (i,j) :

$$\begin{aligned} M(i, j, t + \Delta t)^{(it)} = & M(i, j, t) + [D_P + D_{e,x,ef}(i, j, t + \Delta t)^{(it)} + D_{e,y,ef}(i, j, t + \Delta t)^{(it)}] \Delta t + \\ & + 0,5 \Delta t \cdot \{ \Delta y \cdot [q_{s,x}(i-1, j, t) + q_{s,x}(i-1, j, t + \Delta t)^{(it)} - q_{s,x}(i, j, t) + q_{s,x}(i, j, t + \Delta t)^{(it)}] + \\ & + 0,5 \Delta t \cdot \{ \Delta y \cdot [q_{s,y}(i, j-1, t) + q_{s,y}(i, j-1, t + \Delta t)^{(it)} - q_{s,y}(i, j, t) + q_{s,y}(i, j, t + \Delta t)^{(it)}] \} \end{aligned} \quad (5.39)$$

Os valores de $q_{s,x}(i, j, t + \Delta t)^{(it)}$ e $q_{s,y}(i, j, t + \Delta t)^{(it)}$ são então calculados através da diferença entre os valores de $M(i, j, t + \Delta t)^{(it)}$ com $[T_{e,x}(i, j, t + \Delta t)^{(it)} + T_{e,y}(i, j, t + \Delta t)^{(it)}]$, ou seja, se a diferença $(M - T_{e,x} - T_{e,y}) > 0$ então

$$q_{s,x}(i, j, t + \Delta t)^{(it)} = 2 \Delta y \cdot T_{e,x}(i, j, t + \Delta t)^{(it)} - q_{s,x}(i, j, t) \quad (5.40)$$

$$q_{s,y}(i, j, t + \Delta t)^{(it)} = 2 \Delta y \cdot T_{e,y}(i, j, t + \Delta t)^{(it)} - q_{s,y}(i, j, t) \quad (5.41)$$

No entanto, se $(M - T_{e,x} - T_{e,y}) < 0$, então

$$q_{s,x}(i, j, t + \Delta t)^{(it)} = 2 \frac{\Delta y}{\Delta t} \frac{T_{e,x,ef}(i, j, t + \Delta t)^{(it)}}{T_{e,x,ef}(i, j, t + \Delta t)^{(it)} + T_{e,y,ef}(i, j, t + \Delta t)^{(it)}} M(i, j, t + \Delta t)^{(it)} - q_{s,x}(i, j, t) \quad (5.42)$$

$$q_{s,y}(i, j, t + \Delta t)^{(it)} = 2 \frac{\Delta x}{\Delta t} \frac{T_{e,y,ef}(i, j, t + \Delta t)^{(it)}}{T_{e,x,ef}(i, j, t + \Delta t)^{(it)} + T_{e,y,ef}(i, j, t + \Delta t)^{(it)}} M(i, j, t + \Delta t)^{(it)} - q_{s,y}(i, j, t) \quad (5.43)$$

Com os valores de $M(i,j,t+\Delta t)$, $q_{s,x}(i,j,t+\Delta t)$ e $q_{s,y}(i,j,t+\Delta t)$ calcula-se imediatamente o valor da elevação do terreno em (i,j) , isto é, $z(i,j,t+\Delta t)$ é expresso por

$$z(i,j,t+\Delta t)^{(it)} = z(i,j,t) + \{M(i,j,t+\Delta t)^{(it)} - M(i,j,t) + 0,5\Delta t. [\Delta y.(q_{s,x}(i-1,j,t+\Delta t)^{(it)} + q_{s,x}(i-1,j,t) - q_{s,x}(i,j,t+\Delta t)^{(it)} - q_{s,x}(i,j,t)) + \Delta x.(q_{s,y}(i,j-1,t+\Delta t)^{(it)} + q_{s,y}(i,j-1,t) - q_{s,y}(i,j,t+\Delta t)^{(it)} - q_{s,y}(i,j,t))]\} / (\rho_s.n_{ef}.\Delta x.\Delta y)$$

(5.44)

5.3 Sensibilidade dos Parâmetros

Os parâmetros das equações que exprimem do processo erosivo, correspondentes às taxas de destacamento do solo pela ação das gotas de chuva e pelo deflúvio superficial e à capacidade de transporte do deflúvio são os seguintes: para a taxa de destacamento do solo pela chuva, o coeficiente $K_{P,total}$ (Equação 5.32) depende apenas dos valores ajustados dos parâmetros α e b , admitindo que sejam válidas as expressões de e_c , $e_{c,total}$ e σ ; e para a determinação das taxas de destacamento do solo pelo deflúvio superficial; deve ser ajustado o valor ou valores do parâmetro K_e (Equação 5.35 e 5.36). Para a capacidade de transporte de sedimentos pelo deflúvio superficial (Equações 5.26 a 5.29) não há parâmetro de calibração, uma vez que o equacionamento é função apenas da potência do escoamento.

A Figura 5.3 apresenta a relação entre a tensão de resistência ao destacamento do solo, σ , em função da massa específica aparente do solo, ρ_a , e o percentual de argila do solo.

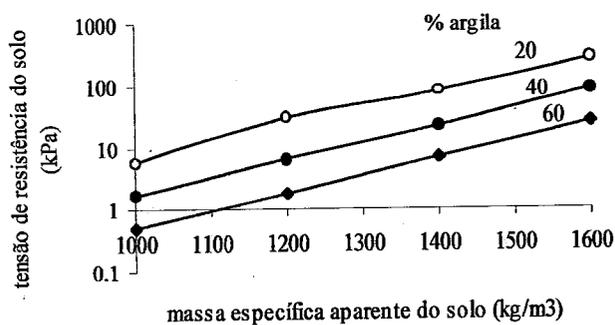


Figura 5.3 – Tensão de resistência ao destacamento do solo em função da massa aparente e percentual de argila.

A Figura 5.4 a relação entre a intensidade de chuva crítica, i_c em mm/h em função dessas mesmas variáveis.

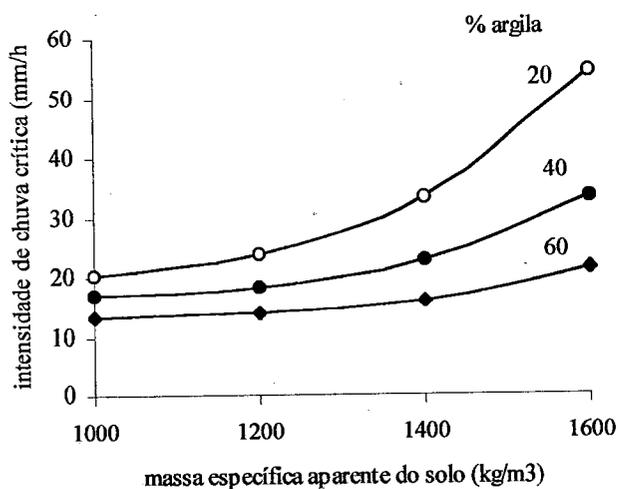


Figura 5.4 – Intensidade de chuva crítica para a ocorrência de destacamento de solo em função da massa específica aparente do solo e do percentual de argila.

As Figuras 5.5 e 5.6 mostram a variabilidade do coeficiente $K_{P,total}$ em função de ρ_a e do percentual de argila, tomando-se valores para os parâmetros (α, b) iguais a $(1; 0,1)$ e $(1; 1)$, respectivamente.

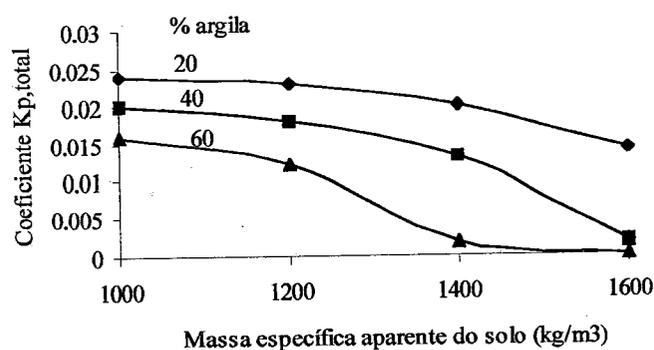


Figura 5.5 – Coeficiente de destacamento de partículas do solo pela ação da chuva, $K_{P,total}$, em função de ρ_a em kg/m^3 e do percentual de argila do solo, com os parâmetros $\alpha=1$ e $b=0,1$.

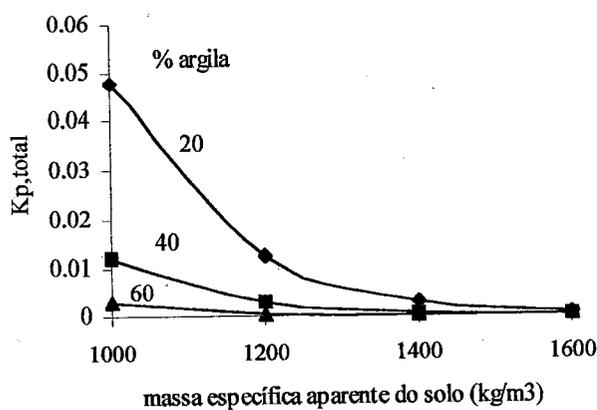


Figura 5.6 – Coeficiente de destacamento de partículas do solo pela ação da chuva, $K_{P,total}$, em função de ρ_a em kg/m^3 e do percentual de argila do solo, com os parâmetros $\alpha=1$ e $b=1$.

A Figura 5.7 fornece o valor da taxa de destacamento de solo pelas gotas de chuva em função de ρ_a em kg/m^3 , do percentual de argila do solo, com os parâmetros $\alpha=1$ e $b=0,1$ para uma intensidade de chuva efetiva $i=50$ mm/h.

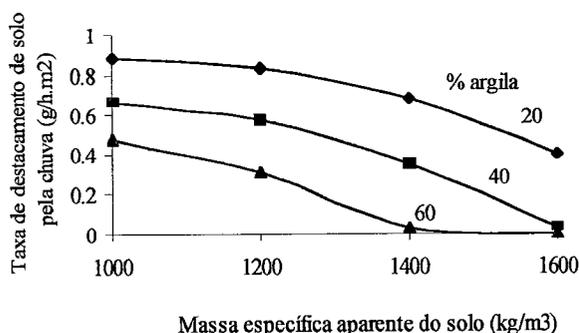


Figura 5.7 – Taxa de destacamento de solo pelas gotas de chuva $D_p=f(\rho_a, \%arg, \alpha=1, b=0,1)$ em $\text{g.h}^{-1}.\text{m}^2$, para uma intensidade de chuva efetiva $i=50$ mm/h.

Com relação à taxa de destacamento do solo pelo escoamento de superfície, a concentração de fluxo em linhas preferenciais do terreno aumenta significativamente a ação erosiva. Evidentemente, além das variáveis hidráulicas que influem no valor de D_e o valor ajustado do coeficiente K_e é que permitirá a calibração de modelo. A Figura 5.8 ilustra a variabilidade de D_e em função da profundidade d'água do deflúvio, da declividade do terreno para $K_e=10$ através da utilização da Equação 5.35.

Através de experimentos em campo, pode-se estimar o valor do parâmetro K_e realizando o levantamento da erosão média dos sulcos após uma determinada chuva intensa. Como exemplo, considere um terreno desnudo com inclinação de 5% e solo com massa específica aparente igual a 1300kg/m^3 . Inicialmente, tem-se um determinado sulco de forma triangular com largura igual a 0,30m e altura de 0,03m. Após uma chuva efetiva de 50 mm/h e duração de 1 h e deflúvio com altura de lâmina igual a 0,05m, as dimensões do sulco foram modificadas para uma seção ainda triangular, porém, com largura de 0,40 m e altura 0,05 cm. Com esses valores, verifica-se que houve erosão de 7,7 kg/m de solo e, pela Equação (5.35) que $K_e=1,41$.

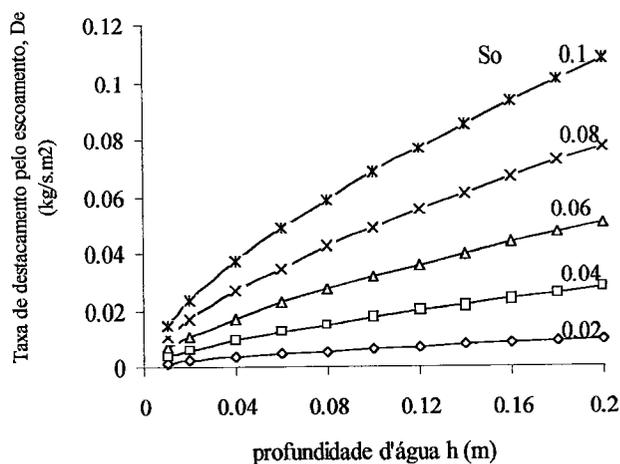


Figura 5.8 – Taxa de destacamento de partículas do solo pelo deflúvio superficial, D_e , com $K_e=10$.

A capacidade de transporte pelo deflúvio superficial em áreas de encosta em geral é superior às taxas de destacamento de solo como pode ser facilmente verificado utilizando-se das Equações 5.26 e 5.27. Tomando-se pares de valores de (h,S) calcula-se a potência do escoamento e , através da Equação 5.26, a capacidade de transporte do escoamento, T_e . A Figura 5.9 apresenta essa relação.

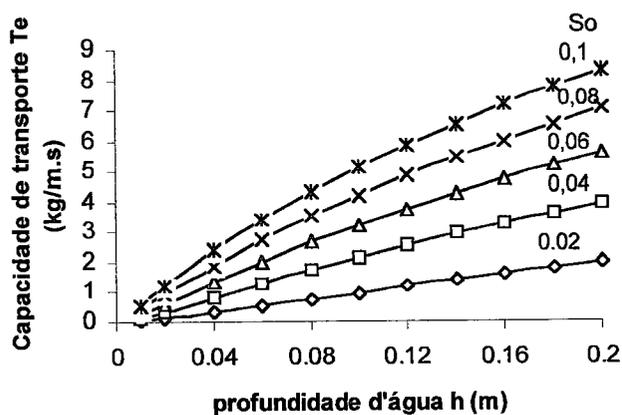


Figura 5.9 – Capacidade de transporte de sedimentos pelo deflúvio superficial em função da profundidade da lâmina d'água e da declividade do terreno.

Tabela 5. 1– Simulações da massa total de solo erodida em área de encosta de 10x50m², em kg.

ρ_a (kg/m ³)	argila (%)	α	b	K_e	$i_{ef}=50\text{mm/h}$ $d_c=1\text{ hora}$		$i_{ef}=100\text{mm/h}$ $d_c=1\text{ hora}$	
					$S_o=0,04$	$S_o=0,08$	$S_o=0,04$	$S_o=0,08$
1100	50	1,0	1,0	1,0	103,5	338,5	220,5	621,4
1100	50	1,0	1,0	0,1	15,6	51,8	28,6	78,8
1100	50	1,0	1,0	0,01	1,66	5,51	3,03	8,20
1100	50	5,0	1,0	0,01	1,75	5,64	3,39	8,63
1100	50	1,0	2,0	0,01	1,63	5,47	2,95	8,11
1100	50	1,0	0,5	0,01	1,69	5,55	3,16	8,36
1100	25	1,0	1,0	1,0	103,5	338,6	220,9	621,8
1100	25	1,0	1,0	0,1	15,7	52,0	29,1	79,3
1100	25	1,0	1,0	0,01	1,79	5,71	3,52	8,77
1100	25	5,0	1,0	0,01	2,44	6,67	5,83	11,5
1100	25	1,0	2,0	0,01	1,75	5,65	3,60	8,61
1100	25	1,0	0,5	0,01	1,81	5,74	15,2	8,87
1300	50	1,0	1,0	1,0	103,5	338,5	220,5	621,4
1300	50	1,0	1,0	0,1	15,5	51,8	28,6	78,7
1300	50	1,0	1,0	0,01	1,64	5,48	2,95	8,11
1300	50	5,0	1,0	0,01	1,65	5,50	3,02	8,19
1300	50	1,0	2,0	0,01	1,63	5,47	2,94	8,09
1300	50	1,0	0,5	0,01	1,65	5,50	3,02	8,19

5.4. Calibração do Modelo

Os ensaios de erosão realizados na bancada experimental e utilizados para a calibração do modelo numérico correspondem a precipitações de 1 hora de duração e intensidades entre 100 e 141 mm. A Tabela 5.2 apresenta os resultados de cinco ensaios considerados os mais significativos para representar o processo erosivo da área ensaiada. Nessa tabela, além do número e data de realização dos ensaios selecionados, estão apresentadas as intensidades de precipitação, de precipitação excedente e a vazão máxima e a quantidade total de material erodido observados.

Tabela 5.2 – Características principais de cinco ensaios experimentais da erosão, com precipitação de duração de 1 hora.

Ensaio	Data	$i(t)$ (mm/h)	$i_{exc}(t)$ (mm/h)	Q_{max} (l/s)	$M_{s,tot}$ (kg)
2	23/10/98	126	108	15,0	25,51
6	8/11/98	140	110	15,3	12,28
7	9/11/98	135	114	15,8	5,03
8	15/11/98	123	110	15,3	4,84
15	24/11/98	141	120	16,7	2,38
18	30/11/98	137	126	17,5	3,68

A Figura 5.10 ilustra um hidrograma observado, relativo ao ensaio 18, correspondente a uma intensidade de precipitação excedente de 126 mm/h e duração de 1 hora, com material erodido total igual a 3,68 kg.

Pelos valores observados do material erodido ao longo da seqüência de ensaios, verifica-se forte decaimento da quantidade de material carregado pelo deflúvio superficial o que sugere que as características de resistência do solo na superfície variam com o tempo.

A superfície está submetida a efeitos térmicos significativos durante períodos sem chuva, com possível formação de micro-fissuras e conseqüentemente, com diminuição da resistência contra a desagregação provocada pelos eventos de precipitação e deflúvio superficial. Ao longo de sucessivas precipitações, o material de superfície com baixa resistência à erosão vai sendo removido até a superfície do terreno adquirir resistência à erosão praticamente constante e função das características estruturais do perfil de solo natural. Caso a seqüência de precipitação seja interrompida por período suficientemente longo, verifica-se novamente, diminuição da resistência do terreno à erosão e aumento de sedimentos carregados durante um novo período de precipitação.

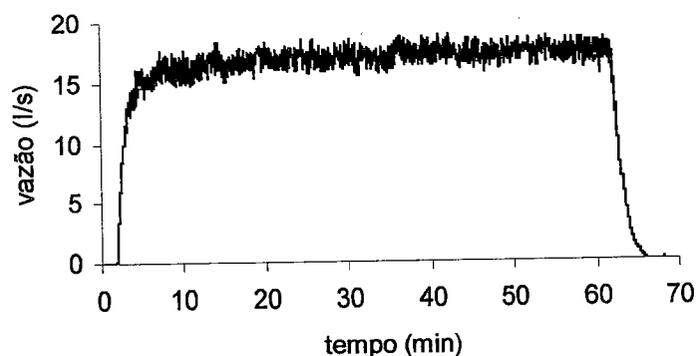


Figura 5.10 – Hidrograma de saída observado no ensaio 18.

Utilizando o hidrograma observado, verifica-se que o volume escoado corresponde a uma altura de lâmina de 123 mm, resultando em infiltração acumulada de 14 mm, o que demonstra o alto grau de compactação do solo argiloso ensaiado. Pelos valores encontrados, pode-se admitir na simulação numérica da erosão que a taxa de infiltração média de água no solo é aproximadamente constante e igual a 11mm/h.

Utilizando o hidrograma observado, verifica-se que o volume escoado corresponde a uma altura de lâmina de 123 mm, resultando em infiltração acumulada de 20 mm. Tomando-se os instantes $t = 3,3; 5,0; 10,0$ e 60 min, obtêm-se os valores de infiltração acumulada, $F(t)$ e da taxa de infiltração, $f(t)$, indicados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Taxas de infiltração observadas.

t (min)	$Q(t)$ (l/s)	$F(t)$ (mm)	$f(t)$ (mm/h)
3,5	13,8	1,6	37
5,0	15,2	4,2	27
10,0	16,8	9,0	16
60,0	17,6	20,0	11

Com esses valores de infiltração em função do tempo, obtêm-se facilmente os parâmetros da equação de Green-Ampt expressa por

$$f = K_z \frac{h + \psi_z + z_f}{z_f} \quad (5.45)$$

sendo ψ_z a carga de sucção na frente de molhamento, z_f a posição da frente em relação à superfície do terreno, ou, tomando-se a infiltração acumulada, $F = z_f \Delta\theta$, em que $\Delta\theta$ é a diferença de teores de umidade do solo após e antes da passagem de frente,

$$f \cong K_z \frac{\psi_z \cdot \Delta\theta + F}{F} \quad (5.46)$$

Com os parâmetros determinados, a equação de infiltração de água no solo para as condições experimentais do ensaio 18 é expressa por

$$f(t) \cong 11,4 \frac{3,58 + F(t - \Delta t)}{F(t - \Delta t)} \quad (5.47)$$

A Figura 5.11 apresenta o hidrograma simulado para as mesmas condições do ensaio 18. A fim de se obter hidrograma simulado semelhante ao observado, ajustou-se automaticamente o valor do coeficiente de rugosidade de Manning em $n=0,040$.

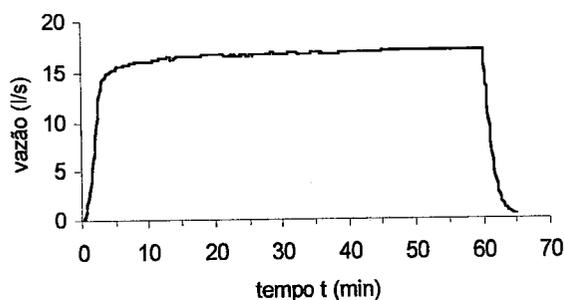


Figura 5.11 – Hidrograma simulado, referente ao ensaio 18.

A Figura 5.12 mostra a evolução da quantidade de material erodido em função do tempo. Como o deflúvio superficial atinge rapidamente a condição quase estacionária com vazões próximas do regime permanente, tem-se então, carga de sedimento praticamente constante e, conseqüentemente, crescimento linear da quantidade de material erodido.

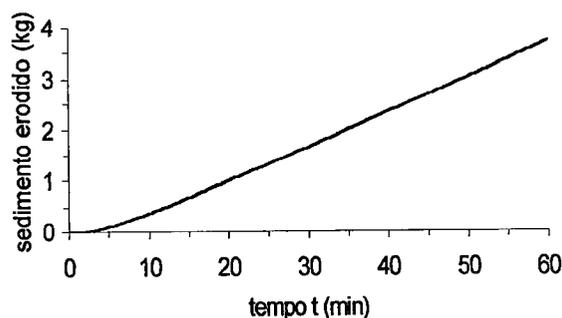


Figura 5.12 – Simulação da erosão do solo referente ao ensaio 18.

Com relação aos valores ajustados parâmetros de erosão para os vários ensaios realizados, verificou-se através de experimentação numérica que os parâmetros α e b exercem pequena influência nos valores das cargas de sedimentos, uma vez que é o deflúvio superficial o principal responsável pela erosão. Assim foram ajustados os valores desses dois parâmetros para todos os ensaios em $\alpha=1,0$ e $b=0,5$. Para o coeficiente K_e os valores ajustados ficaram compreendidos entre 0,075 (ensaio 2) e 0,0075 (ensaio 18).

4. Simulação da Erosão em Áreas de Encosta

Com o modelo calibrado, foram realizadas simulações a fim de determinar as cargas de sedimentos em áreas de encosta, tomando-se alguns valores para o comprimento, declividade, e intensidade de precipitação.

A Figura 5.13 fornece a quantidade de material erodido por unidade de largura de encosta em função da intensidade de chuva e dos valores limites encontrados para o solo ensaiado, $K_e=0,0075$ e $0,075$ tomando-se $L=50$ m e $S_o=0,10$.

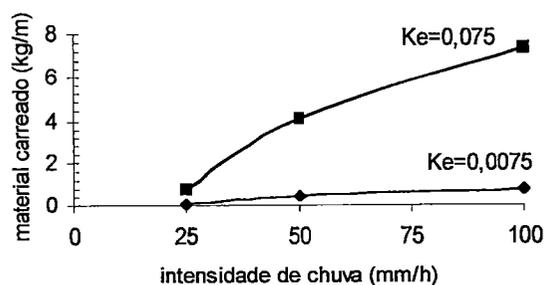


Figura 5.13 – Material carregado em função da intensidade de chuva com $L=50$ m, $S_o=0,10$.

A Figura 5.14 fornece a quantidade de material erodido em função da intensidade de chuva e da declividade do terreno, tomando-se como comprimento da encosta $L=50$ m e $K_e=0,0075$.

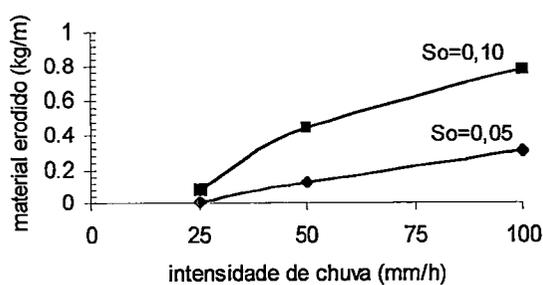


Figura 5.14 - Quantidade de material erodido em função da intensidade de chuva e da declividade do terreno, $L=50$ m e $K_e=0,0075$.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A experimentação em campo, através da simulação de chuvas artificiais intensas possibilitou o estudo do processo de erosão pela ação combinada da precipitação e do deflúvio superficial.

O monitoramento da distribuição da altura de escoamento do deflúvio no domínio com o auxílio do sistema de aquisição automatizada mostrou que o escoamento sofre forte influência do microrelevo à medida que este evolui. Com influência reduzida no início da sua evolução, o microrelevo não consegue orientar a concentração do escoamento; como resultado, observa-se espalhamento do deflúvio no domínio gerando alturas de lâmina muito pequenas.

À medida que o microrelevo se define, surgem lentamente, ainda com um aspecto pouco definido, as faixas de concentração ou caminhos preferenciais, precursores dos microcanais de drenagem. Com a inter-relação escoamento/microrelevo, o processo de erosão se intensifica, a micro topografia evolui e os microcanais aumentam de densidade e de extensão.

A característica de "feedback" existente entre o escoamento e o microrelevo foi verificado na efemeridade de microcanais, os quais, conforme a interação mútua desaparece, se deslocam ou se juntam a outros, processo sustentado pela dinâmica e controle da capacidade de remoção e de transporte de material pelo deflúvio.

Neste processo dinâmico, a turbulência provocada pelo microrelevo é fundamental. A intensidade da turbulência depende da evolução do microrelevo que pode gerar, conforme esta evolução, mais correntes secundárias, promovendo remoção de partículas e resuspensão do material já erodido para ser transportado.

A definição do microrelevo e a conseqüente concentração do escoamento promoveu o aumento da lâmina no domínio principalmente nas seções de jusante, em direção à saída. Como resultado, os microcanais são mais ativos, porém tendem a se alargar, contrariamente à região da cabeceira onde tendem a ser mais estreito, e onde também a desagregação do solo pela chuva é predominante devido às baixas alturas registradas nessa região.

Foi verificado que a produção de sedimento apresenta uma tendência de decaimento ao longo de sucessivos períodos com e sem chuva, fato que pode ser explicado pelo aumento da resistência do solo promovido pelo impacto das gotas de chuvas e o processo de cimentação superficial ("sealing"). Observou-se através dos dados de produção de sedimento que há a influência climatológica sobre a suscetibilidade do solo à erosão que poderá ser objeto de pesquisa futura, a fim de se incorporar esse aspecto fenomenológico ao modelo matemático da erosão.

A instrumentação desenvolvida para monitorar o escoamento atendeu aos objetivos de caracterizar o escoamento, embora este protótipo seja de difícil operação em condição de campo. Foi possível concluir, com base nos dados obtidos que a abordagem da modelação da erosão por deflúvio superficial deve o escoamento sendo turbulento, portanto, a sua hidrodinâmica é fundamental na obtenção de resultados mais precisos.

O "feed-back" inerente ao escoamento e ao microrrelevo do leito, impõe a necessidade de desenvolver métodos mais precisos de leitura de pequenas lâminas considerando o transporte de sedimento, e técnicas mais acessíveis para levantamento da dinâmica do microrrelevo.

O modelo matemático distribuído desenvolvido, baseado na equação da continuidade e na difusão, mostrou-se eficiente para simular o deflúvio superficial e a erosão do solo.

O modelo é suficientemente versátil para simular áreas heterogêneas, com características locais diferenciadas e com possibilidade de gerar deflúvios bidimensionais decorrentes da distribuição das elevações nas células discretizadas que compõem o domínio.

A análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo mostrou que os valores de três parâmetros - dois relativos a erosão pelo impacto das gotas de chuva e um relativo à erosão provocada pelo deflúvio superficial - são os mais relevantes para a calibração do modelo numérico; destes, para a área ensaiada e simulada, o coeficiente da taxa de destacamento de solo pelo deflúvio superficial mostrou ser o preponderante para a obtenção de material carregado simulado compatível com o observado.

O solo ensaiado, por suas características de resistência decorrente do alto teor de argila e alta compactação, é altamente resistente à erosão provocada tanto pela precipitação quanto pelo deflúvio superficial. Na área de ensaio, com 50 m de comprimento e 10 m de largura, não se observou forte canalização que pudesse provocar concentração do deflúvio e conseqüentemente, erosão mais intensa. Evidentemente, esse processo ocorreria caso fosse utilizada área de maior comprimento como ocorre nas encostas dos cursos d'água.

Os valores dos parâmetros principais do modelo após o processo de calibração do modelo mostraram para a área ensaiada que valores para o coeficiente de rugosidade de Manning compreendidos entre 0,020 e 0,040 resultam em hidrogramas compatíveis com os hidrogramas observados. Os valores parâmetros α e b da taxa de destacamento do solo pela precipitação foram fixados em 1,0 e 0,5, respectivamente, apesar de variações de seus valores em torno destes são pouco sensíveis no resultado de produção de sedimentos.

O parâmetro K_e da taxa de destacamento de solo pelo deflúvio mostrou ser o parâmetro fundamental para a calibração do modelo. Pelos ensaios realizados, verificou-se que a quantidade de material erodido por chuva sofre decaimento ao longo das sucessivas chuvas com intervalos de dias sem precipitação, de modo que o parâmetro K_e tem valor em torno de 0,075 para as primeiras chuvas da seqüência e 0,0075 para as últimas precipitações.

Nas simulações realizadas para áreas de encosta com comprimentos entre 50 e 300 m, verificou-se a forte dependência do material erodido com o comprimento e declividade da encosta. Para encostas com 300 m de largura, obteve-se para o solo ensaiado, erosões por unidade de largura de encosta de 42,5 kg/m e de 133 kg/m, respectivamente, para declividades de 0,05 e 0,10, e chuva de 50 mm/h e 1 hora de duração.

Este trabalho abriu novos horizontes de investigação, tanto em estudos experimentais quanto teóricos e de modelagem. Com relação a trabalhos experimentais, a área experimental construída possibilita a realização de ensaios com materiais diversos, com características adequadas para a observação da evolução de sulcos e intensificação do processo erosivo. Nessa área, será possível introduzir vegetação e práticas de conservação do solo e verificar os resultados relativos ao

decaimento da erosão. No entanto, para a utilização do modelo em áreas de encosta de dimensões de dezenas ou centenas de hectares, é altamente desejável a realização de estudos experimentais de quantificação da erosão em função de precipitações, dos deflúvios superficiais e heterogeneidades topográficas, de solo, de cultivo e de práticas de conservação a fim de introduzir novas formulações e parâmetros no modelo.

Com relação aos estudos teóricos, o modelo deve sofrer evolução no sentido de permitir a utilização de células geometricamente irregulares de modo a permitir a modelagem de encostas de bacias hidrográficas com as diversas peculiaridades e heterogeneidades existentes. Necessariamente, com relação à evolução do modelo, algoritmos probabilísticos ou de incertezas devem ser introduzidos a fim de possibilitar que se expressem resultados dentro de faixas de confiança.

Deve-se recomendar cuidados especiais no levantamento de sedimentogramas para o estudo da erosão pelo deflúvio superficial, pois, embora altamente desejáveis, é praticamente impossível a identificação do sedimento com os microcanais ou faixas de concentração de escoamento que estiveram na origem desta produção. Portanto, é recomendável que novos sistemas de amostragens, na saída do deflúvio, sejam desenvolvidos, com o objetivo de possibilitar a individualização da origem do sedimento amostrado.

Quanto ao levantamento da evolução do microrrelevo, é de fundamental importância para que se conheça a profundidade real do escoamento no domínio, uma vez que os registros dos hidrogramas locais fornecem apenas, a profundidade relativa às condições iniciais do terreno, antes da simulação experimental. Por requerer um apurado detalhamento do microrrelevo, o levantamento exige um trabalho com malhas de mapeamento densas, exigindo equipamento de alta performance e câmeras fotogramétricas específicas.

Os conhecimentos a respeito da dinâmica do microrrelevo, através do seu levantamento rigoroso, parece ser o principal desafio para estabelecer variáveis geomorfológicas, fundamentais na construção de modelos físicos com a abordagem hidrodinâmica que requer o processo da erosão pelo escoamento superficial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKANBI, A., A., KATOPODES, N. D. Model for flood propagation on initially dry land. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, v. 114, n.7, p. 689-706, 1988.
- ARRUDA, L. B. *Estudo experimental da infiltração através do balanço hídrico em um infiltrômetro com aspersores*. São Carlos, EESC-USP, 1984. 155p. Dissertação de Mestrado.
- ELLIOT, W.J., LAFLEN, J.M. A Process-based rill erosion model. *Transactions of the ASAE*, v.36, n.1, p.65-72, 1993.
- FOSTER G. R., MEYER, L. D. A closed-form soil erosion equation for upland areas. In: *Sedimentation*, ed. SHEN, Fort Collins, CO.: Colorado State University. 1972.
- FOSTER, G.R. Modeling the erosion process. In: *Hydrologic modeling of small watersheds*, ASAE, C. T. Haan, H. P. Johnson & D.L. Brakensick, orgs, cap. 8, p. 297-380. 1982.
- GOVINDARAJU, R.S., KAVVAS, M. L.. Modeling the erosion process over steep slopes: approximate analytical solutions. *Journal of Hydrology*, v.127, n. 1-4, p. 279-305,1991.
- GOVINDARAJU, R.S., JONES, S.E. , KAVVAS, M.L. On the diffusion wave model for overland flow 1. solution for steep slopes. *Water Resources Research*, v.24, n.5, p.734-744, may 1988.
- HAIRSINE, P. B., ROSE, C. W. Modeling water erosion due to overland flow using physical principles: 1. Sheet flow. *Water Resources Research*, v. 28, n.1, p. 237-243, 1992.
- _____. Modeling water erosion due to overland flow using physical principles: 2. Rill flow. *Water Resources Research*, v. 28, n.1, p. 245-250, 1992.
- HIRSCHI, M. C., BARFIELD, B. J. Kyermo- A physically based research erosion model. Part I. Model development. *Transactions of the ASAE*, v. 31, n.3, p. 804-813, 1988.
- _____. Kyermo- A physically based research erosion model. Part II. Model sensitivity analysis and testing. *Transactions of the ASAE*, v.31, n.3, p. 844-820, 1988.

- HOWARD, A.D. A Detachment-limited model of drainage basin evolution. *Water Resources Research*, v.30, n.7, p.2261-2285, jul.1994.
- KNISEL, W.G., ed.. CREAMS: A field scale model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems. US. Department of Agriculture, Conservation Research Report, n. 26, 1980. Washington DC.
- LEI, T., et al. Rill erosion and morphological Evolution: A simulation model. *Water Resources Research*, v. 34, n.11, p.3157-3168, 1998.
- LOEWENHERZ-LAWRENCE, D.S. Hydrodynamic description for advective sediment transport processes and rill initiation. *Water Resources Research*, v. 30, n.11, p. 3203-3212, nov.1994.
- MEIN, R. G., LARSON, C. L. Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resources Research*, v.9, n.2, p.384-394, 1973.
- MOORE, I. D., BURCH, G. J. Sediment transport capacity of sheet and rill flow: Applicability of unit stream power theory. *Water Resources Research*, v. 22, n.8, p.1350-1360, 1986.
- NEARING, M. A. A probabilistic Model of soil detachment by shallow turbulent flow. *Transactions of the ASAE*, v. 34, n.1, p. 81-85, 1991.
- OGDEN, F., L., JULIEN, P., Y. Runoff sensitivity to temporal and spatial rainfall variability at runoff plane and small basin scales. *Water Resources Research*, v.29, n.8, p.2589-2597, 1993.
- PROFFITT, A. P. B., ROSE, C. W. Soil erosion processes -I : The relative importance of rainfall detachment and runoff entrainment. *Aust. J. Soil Res.*, v.29, p. 671-683, 1991.
- PROFFITT, A.P.B., HAIRSINE, P.B., ROSE,C.W. Modeling soil erosion by overland flow: Application over a range of hydraulic conditions. *Transactions of the ASAE*, v. 36, n. 6, p. 1743-1753, 1993.
- RICE, C. T., WILSON, B.N. Analysis of dynamic variables of rill flows. *ASAE Paper* n. 90-2011 St. Joseph, MI: ASAE, 1990.
- RIGHETTO, A., M. *Hidrologia e recursos hídricos*. São Carlos: EESC/USP, 1998. 819 p. (Projeto REENGE).
- ROTH, G., SICCARDI, F., ROSSO, R. Hydrodynamic description of the erosional development of drainage patterns. *Water Resources Research*, v.25, n.2, p.319-332, 1989.

- SHARMA, P. P., GUPTA, S.C. Sand detachment by single raindrops of varying kinetic energy and momentum. *Soil Sci. Soc. Am. Journal*, v. 53, p. 1005-1010, 1989.
- SHARMA, P. P., GUPTA, S.C., RAWLS, W. J. Soil detachment by single raindrops of varying kinetic energy. *Soil Sci. Soc. Am. Journal*, v. 55, p. 301-307, 1991.
- SLATTERY, M.C., BRYAN, R.B. Hydraulic conditions for rill incision under simulated rainfall : a laboratory experiment. *Earth Surface Processes and Landforms*. v.17, p.127-146, 1992.
- TAYFUR, G., et al. Applicability of Saint-Venant equations for two-dimensional overland flows over rough infiltrating surfaces. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, v. 119, n. 1, p. 51- 63, 1993.
- WILSON, N. B. Development of a fundamentally based detachment model. *Transactions of the ASAE*, v. 36, n. 4, p. 1105-1114, 1993.
- _____. Evaluation of a fundamentally based detachment model. *Transactions of the ASAE*, v. 36, n. 4, p. 1115-1122, 1993.
- WISCHMEIER, W. H., SMITH D. D. A universal soil-loss equation to guide conservation farm planning. In: *Proc. of VII International Congress of Soil Science*, 418 – 425, 1960.
- WISCHMEIER, W. H., SMITH D. D. *Predicting rainfall erosion losses from Cropland East of the Rocky Mountains*: Washington: 1965. (USDA Agriculture Handbook, 282)
- _____. *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. 1978. (Science and Education Administration, U.S. Department of Agriculture in Cooperation with Purdue Agricultural Experiment Station, Agriculture Handbook, 537)
- WICKS, J. M., BATHURST J. C. SHESED: A Physically Based, Distributed Erosion and Sediment Yield Component for the SHE Hydrological Modelling System, *Journal of Hydrology* , v.175, p. 213-238, 1996.
- WU, T. H., HALL, J. A., BONTA, J.V. Evaluation of runoff and erosion models. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, v. 119, n. 4, p. 364-382, 1993.
- YANG, T.C. Incipient motion and sediment transport. *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, v. 99, n. HY 10, p. 1679-1704, 1973.
- YANG, T.C. Unit stream power and sediment transport . *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, v.98, n.HY10, p.1805, 1826, oct. 1972.

YANG, T.C., MOLINAS, A. Sediment transport and unit stream power function. *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, v.108, n.HY6, p.774-792, june 1982.

ZHANG, W., CUNDY, T., W. Modeling of two-dimensional overland flow. *Water Resources Research*, v. 25, n.9, p.2019-2035, 1989.

BIBLIOGRAFIAS COMPLEMENTARES

- ABRAHAMAS, A. D. , PARSONS,A.J. Determining the mean depth of overland flow in the field studies of flow hydraulics. *Water Resources Research*, v.26, n.3, p.501-503, 1990.
- ABRAHAMAS, A.D., PARSONS, A. J., LUK, S. H. Distribution of depth of overland flow on desert hillslopes and its implications for modeling soil erosion. *Journal of Hydrology*, v.106, p.177-184, 1989.
- AKAN, O. A., BEN, C.Y. Mathematical model of shallow water flow over porous media. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, v.107, n.HY4, p.479-494, 1981.
- AKAN, O. A. Time of concentration of overland flow. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.112, n.4, p.283-292,1986.
- AKIYAMA, J. , STEFAN, H. Turbidity current with erosion and deposition. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, v.111, n.12, p.1473-1496, dec.1985.
- ANDERSON, M.G., BURT, T. P., eds. *Process studies in hillslope hydrology*. Chichester, John Wiley, 1990. 539 p.
- ANNANDALE, G.W. Erodibility. *Journal of Hydraulic Research*, v.33, n.4, p.471-494,1995.
- ARMANINI, A. Non-uniform sediment transport: dynamics of the active layer. *Journal of Hydraulic Research*, v.33, n.5, p.611-622, 1995.
- ASCOUGHT II, J.c. et al. The Wepp watershed model. I. Hydrology and erosion. *Transactions of the ASAE*, v.40, n.4, p.921-933, 1997.
- BAFFAUT, C. et al. The Weep watershed model. II. Sensitivity analysis and discretization on small watersheds. *Transactios of the ASAE*, v.40, n.4, p.935-943, 1997.
- BALAMONTE, G., FERRO, V. The Influence of roughness geometry and shields parameter on flow resistance in gravel-bed channels. *Earth Surface Processes and Landforms*, v.22, p.759-772, 1997.
- BEN, C.Y., AKAN, O. A. Effects of soil properties on overland flow and infiltration. *Journal of Hydraulic Research*, v.21, n.2, p.153-172, 1983.
- BENNET, J.P. Concepts of mathematical modeling of sediment yield. *Water Resources Research*, v. 10, n.3, p. 485-492, 1974.
- BEVEN, K. , KIRKBY, M. J., ed. *Channel network hydrology*. Chichester, New York, 1993. 319 p.
- BINLEY, A., ELGY, J., BEVEN, K. A Physically based model of heterogeneous hillslopes. 1. Runoff production. *Water Resources Research*, v.25, n.6, p.1219-1226, june 1989.

- BLAU, J. B., WOOLHISER, D.A., LANE, L. J. Identification of erosion model parameters. *Transactions of the ASAE*, v.31, n.3, p.839-854, 1988.
- BOWLES, D. S., O'CONNELL, P.E. eds. *Recent advances in the modeling of hydrologic systems*. Dordrecht, Kluwer academic, 1991. 667 p.
- BRYAN, R.B., POESEN, J. Laboratory experiments on the influence of slope length on runoff, percolation and rill development. *Earth Surface Processes and Landforms*, v.14, p.211-231, 1989.
- BUNTE, K., POESEN, J. Effects of rock fragment covers on erosion and transport of noncohesive sediment by shallow overland flow. *Water Resources Research*, v.29, n.5, p.1415-1424, 1993.
- CHI-HAI, L. Criteria for incipient motion of spherical sediment particles. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, v.121, n.6, p.472-478, June 1995.
- CHOW, V.T., BEN-ZVI, A. Hydrodynamic modeling of two-dimensional watershed flow. *Journal of the Hydraulics Division*, v.99, n.HY11, p.2023-2040, Nov. 1973.
- COCHRANE, T. A., FLANAGAN, D.C. Detachment in a simulated rill. *Transactions of the ASAE, American Society of Agricultural Engineers*, v.40, n.1, p.111-119, 1995.
- COSTA, J. E. et al. eds. *Natural and anthropogenic influences in fluvial geomorphology*. Washington, American Geophysical Union, 1995. 239 p. (Geophysical monograph, 89)
- DIETRICH, W.E. et al. Analysis of erosion thresholds, channel networks, and landscape morphology using a digital terrain model. *The Journal of Geology*, v.101, p.259-278, 1993.
- DUNNE, T., ZHANG, W., AUBRY, B.F. Effects of rainfall vegetation and microtopography on infiltration and runoff. *Water Resources Research*, v.27, n.9, p.2271-2285, Sept. 1991.
- ELLIOT, W.J. et al. Photogrammetric and rillmeter techniques for hydraulic measurement in soil erosion studies. *Transactions of the ASAE*, v.40, n.1, p.157-165, 1997.
- FLANAGAN, D. C., et al. Laser scanner for erosion plot measurements. *Transactions of the ASAE*, v.38, n.3, p.703-710, 1995.
- GOVERS, G., RAUWS, G. Transporting capacity of overland flow on plane and irregular beds. *Earth Surface Processes and Landforms*, v.11, p.515-524, 1986.
- GOVERS, G. et al. A long flume study of the dynamic factors affecting the resistance of a loamy soil to concentrated flow erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, v.15, p.313-328, 1990.
- GOVINDARAJU, R.S., KAVVAS, M. L., TAYFUR, G. A Simplified model for two-dimensional overland flows. *Advances in Water Resources*, v.15, p. 133-141, 1992.
- _____. Characterization of the rill geometry over straight hillslopes through spatial scales. *Journal of Hydrology*, v.130, p. 339-365, 1992.
- GRAF, W. H. *Hydraulics of sediment transport*. New York, McGraw Hill, 1971. 513p.
- GRANT, G.E. Critical flow constrains flow hydraulics in mobile-bed streams : a new hypothesis. *Water Resources Research*, v.33, n.2, p.349-358, Feb. 1997.

- GYR, A., SCHMID, A., Turbulent flows over smooth erodible sand beds in flumes. *Journal of Hydraulic Research*, v.35, n.4, p.525-544, 1997.
- HAAN, C. T., JOHNSON, H. P., BRAKENSIEK, D.L., eds. *Hydrologic modeling of small watersheds*. Michigan, American Society of Agricultural Engineers, 1982. 533 p.
- HARTLEY, D.M. , JULIEN, P.Y. Boundary shear stress induced by raindrop impact. *Journal of Hydraulic Research*, v.30, n.3, p.341-358, 1992.
- HERSCHY, R. W. *Streamflow measurement*. 2. ed. London, E & F N Spon, 1995. 524 p.
- KATZ, D., WATTS, J., BURROUGHS, E. Effect of surface roughness and rainfall impact on overland flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, v.121, n.7, p.546-553, July 1995.
- LAGUNA, A. , GIRALDEZ, J. V. The description of soil erosion through a kinematic wave model. *Journal of Hydrology*, Amsterdam : Elsevier Science, v.145, p.65-82, 1993.
- LAMBERMONT, J., LEBON, G. Erosion of cohesive soils. *Journal of Hydraulic Research*, v.16, n. 1, 1978.
- LAVELLE, J. W., MOFJELD, H. Do critical stresses for incipient motion and erosion really exist? *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, v. 113, n. 3, p. 370-385. mar.1987.
- LEWIS, S. M. et al. Proril - an erosion model using probability distributions for rill flow and density. 1. Model development. *Transactions of the ASAE*, v.37, n.1, p. 115-123, 1994.
- _____, et al. Proril - an erosion model using probability distributions for rill flow and density. 2. Model validation. *Transactions of the ASAE*, v.37, n.1, p.125-133, 1994.
- LI, G., ABRAHAMAS, A.D. Effect of saltating sediment load on the determination of the mean velocity of overland flow. *Water Resources Research*, v.33, n.2, p.341-347, feb.1997.
- MAAS, H.-G. Digital photogrammetry for determination of tracer particle coordinates in turbulent flow research. In:Close-range photogrammetry meets machine vision. *SPIE*, v.1395, p.391-398, 1990.
- MOLEN, W. H. van der , TORFS, P. J. J. E. , LIMA, J. L. M. P. de. Water depths at the upper boundary for overland flow on small gradients. *Journal of Hydrology*, Amsterdam : Elsevier Science, v.171, p.93-102, 1995.
- NICHOLSON, John , O'CONNOR, B. A. Cohesive sediment transport model. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, v.112, n.7, p. 621-640, July 1986.
- NNADI, F.N. , WILSON, K.C. Bed-load motion at high shear stress: dune washout and plane-bed flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, v.121, n.3, p.267-273, mar.1995.
- OWOPUTI, L. O., STOLTE, W. J. Soil detachment in the physically based soil erosion process: a review. *Transactions of the ASAE*, v. 38, n.4, p. 1099-1110, 1995.
- PEIPE, J., STEPHANI, M.. Digital object models of water surfaces. In:Close-range photogrammetry meets machine vision. *SPIE*, v.1395, p.809-815, 1990.

- PROSSER, I.P., DIETRICH, W.E. Field experiments on erosion by overland flow and their implication for a digital terrain model of channel initiation. *Water Resources Research*, v.31,n.11, p.2867-2876, nov.1995.
- PROSSER, I.P., DIETRICH, W.E., STEVENSON, J. Flow and sediment transport by concentrated overland flow in a grassland valley. *Geomorphology*, v.13, p.71- 86, 1995.
- QUINE, T.A. et al. Erosion processes and landform evolution on agricultural land - new perspectives from caesium-137 measurements and topographic-based erosion modelling. *Earth Surface Processes and Landforms*, v.22, p.799-816, 1997.
- RAUDKIVI, A. J., TAN, S. K. Erosion of cohesive soils. *Journal of Hydraulic Research*, v. 22, n. 4, p. 217-233, 1984.
- RAUWS, G., GOVERS, G. Hydraulic and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soils. *Journal of Soil Science*, v.39, p.111-124, 1988.
- RICHARDSON, J.R. , JULIEN, P.J. Suitability of simplified overland flow equations. *Water Resources Research*, v.30, n.3, p.665-671, mar.1994.
- ROBICHAUD, P. R., MOLNAU, M. Measuring soil roughness changes with an ultrasonic profiler. *Transactions of the ASAE*, v. 33, n. 6, p. 1851-1858, 1990.
- RÖMKENS, M. J. M., WANG, J. Y., DARDEN, R. W. A laser microreliefmeter. *Transactions of the ASAE*, v. 31, n. 2, p. 408-413, 1988.
- SAVAT, J. The Hydraulics of sheet flow on a smooth surface and the effect of simulated rainfall. *Earth Surface Processes*, v.2, p.125-140, 1977.
- SIMONS, D. B., SENTURK, F. *Sediment transport technology : water and sediment dynamics*. Colorado, Water Resources, 1992. 897 p.
- SMITH, R.E., WOOLHISER, D.A. Overland flow on an infiltrating surface. *Water Resources Research*, v.7, n.4, p.899-913, aug.1971.
- SONG, T., CHIEW, Y.M., CHIN, C.O. Effect of bed-load movement on flow friction factor. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.124, p.165-175, feb.1998.
- STONE, J.J., LANE, L.J., SHIRLEY, E.D. Infiltration and runoff simulation on a plane. *Transactions of the ASAE*, v.35, n.1, p.161-170, jan./febr.1992.
- TAYFUR, G., KAVVAS, L.M. Spatially averaged conservation equations for interacting rill-interrill area overland flows. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, v. 120, n.12, p. 1426-1448, 1994.
- TEISSON, C. Cohesive suspended sediment transport : feasibility and limitations of numerical modeling. *Journal of Hydraulic Research*, v.29, n.6, p.755-769, 1991.
- VILAR, O. M. *Formulação de um modelo matemático para erosão dos solos pela chuva*. São Carlos, 1987, 196 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo
- YANG, T.C. Incipient motion and sediment transport. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, v.99, n.HY10, p.1679-1704, oct.1973.
- _____. Unit stream power equation for gravel. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, v.110, n.12, p.1783,-1797, dec.1984.
- _____, XIANGBAI, K. Energy dissipation rate and sediment transport. *Journal of Hydraulic Research*, v.29, n.4, p.457-474, 1991.
- YEN, B.C., AKAN, O. A. Effects of soil properties on overland flow and infiltration. *Journal of Hydraulic Research*, v. 21, n. 2, p. 153-172, 1983.

ANEXO – 1

PLANILHAS DE TESTES DE DESENVOLVIMENTO E CALIBRAÇÃO
DOS SENSORES DE ALTURA DE DEFLÚVIO SUPERFICIAL

DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE DEFLÚVIO SUPERFICIAL :

TESTE DE CALIBRAÇÃO E SENSIBILIDADE TÉRMICA

SENSOR - NO. 01 DATA / / DELTA - T: 100 ms

H(mm)	1/7/98		2/7/98		2/7/98		2/7/98		5/7/98		MD	D.P.	ER %
	16:02		9:20		10:45		17:15		17:35				
0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0.01	0.032	0
10.1	10	10.1	10.1	10.2	10	10	10	10.1	10	10	10.05	0.071	-0.5
20.2	20	20.1	20.2	20.2	20.1	20.1	20	20.2	20	20.1	20.1	0.082	-0.5
30.3	30.2	30.2	30.4	30.4	30.3	30.3	30.2	30.2	30.2	30.2	30.26	0.084	-0.13
40.4	40.2	40.3	40.5	40.5	40.3	40.4	40.2	40.2	40.2	40.2	40.3	0.125	-0.25
50.5	50.4	50.4	50.6	50.6	50.5	50.5	50.4	50.4	50.4	50.5	50.47	0.082	-0.06
60.6	60.5	60.6	60.7	60.8	60.5	60.7	60.6	60.6	60.5	60.5	60.6	0.105	0
70.7	70.6	70.6	70.8	70.8	70.6	70.6	70.7	70.7	70.6	70.6	70.66	0.084	-0.06
80.8	80.6	80.6	80.9	80.9	80.6	80.8	80.7	80.7	80.7	80.6	80.71	0.12	-0.11
90.9	90.8	90.8	91	91	90.9	90.9	90.9	90.9	90.8	90.8	90.88	0.079	-0.02
101	100.8	100.8	101	101.1	101	101	101	101	100.9	100.9	101	0.097	-0.05
111.1	110.9	110.9	111.1	111.2	111.1	111.2	111.2	111.2	111	111	111.1	0.123	-0.02
121.2	121.1	121.1	121.2	121.2	121.2	121.2	121.2	121.2	121.1	121.1	121.2	0.052	-0.03
131.3	131.3	131.3	131.4	131.4	131.4	131.4	131.4	131.4	131.3	131.3	131.4	0.052	0.046
141.4	141.3	141.4	141.6	141.6	141.6	141.6	141.5	141.5	141.4	141.4	141.5	0.11	0.064
151.5	151.5	151.5	151.8	151.8	151.7	151.7	151.8	151.8	151.6	151.6	151.7	0.123	0.119

H(mm)	7/7/98		8/7/98		9/7/98		15/7/98		15/7/98		MD	D.P.	ER %	
	11:00		10:30		15:30		10:30		13:35					
0	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0.1	0	0.2	0.05	0.071	0	
10.1	10.1	10.1	10	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.09	0.032	-0.1	
20.2	20.2	20.2	20	20.1	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.17	0.067	-0.15	
30.3	30.2	30.2	30.2	30.2	30.3	30.3	30.3	30.3	30.3	30.4	30.27	0.067	-0.1	
40.4	40.2	40.3	40.2	40.2	40.4	40.4	40.4	40.4	40.3	40.3	40.31	0.088	-0.22	
50.5	50.4	50.4	50.4	50.4	50.5	50.5	50.5	50.5	50.5	50.5	50.46	0.052	-0.08	
60.6	60.5	60.6	60.6	60.6	60.6	60.6	60.7	60.6	60.7	60.6	60.61	0.057	0.017	
70.7	70.6	70.6	70.7	70.7	70.7	70.8	70.7	70.7	70.6	70.7	70.68	0.063	-0.03	
80.8	80.7	80.7	80.7	80.7	80.8	80.8	80.7	80.8	80.7	80.7	80.73	0.048	-0.09	
90.9	90.8	90.8	90.9	90.9	90.9	90.9	90.9	90.8	90.9	91	91	90.89	0.074	-0.01
101	100.8	100.8	101	101	101.1	101.1	100.9	101	100.9	100.9	101	0.108	-0.05	
111.1	110.9	110.9	111.2	111.2	111.2	111.2	110.8	111	111.1	111.2	111.1	0.157	-0.03	
121.2	121.1	121.1	121.3	121.3	121.3	121.3	121	121.2	121.2	121.3	121.2	0.11	0.008	
131.3	131.2	131.3	131.5	131.5	131.5	131.5	131.3	131.4	131.5	131.5	131.4	0.114	0.091	
141.4	141.4	141.4	141.7	141.5	141.7	141.7	141.4	141.4	141.5	141.6	141.5	0.134	0.092	
151.5	151.7	151.7	151.9	151.9	151.9	151.9	151.6	151.6	151.7	151.9	151.8	0.132	0.185	

DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE DEFLÚVIO SUPERFICIAL :

TESTE DE CALIBRAÇÃO E SENSIBILIDADE TÉRMICA

SENSOR - NO. ----- **02** ----- DATA -----/-----/----- DELTA - T: 100 ms

		1/7/98	2/7/98	2/7/98	2/7/98	2/7/98	2/7/98	2/7/98	2/7/98	5/7/98				
		16:15	09:30	10:50	10:50	17:20	17:20	17:20	17:20	17:40	MD	D.P.	ER %	
H(mm)														
0	0	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	0.1	0.04	0.052	0
10.1	10.1	10.2	10.2	10.3	10.2	10.2	10.1	10.1	10.2	10.2	10.18	0.063	0.792	
20.2	20.1	20.1	20.2	20.2	20.1	20.2	20.1	20.1	20.2	20.2	20.15	0.053	-0.25	
30.3	30.2	30.3	30.4	30.4	30.3	30.3	30.2	30.3	30.3	30.3	30.31	0.074	0.033	
40.4	40.5	40.5	40.6	40.6	40.5	40.6	40.4	40.4	40.5	40.6	40.52	0.079	0.297	
50.5	50.6	50.6	50.7	50.7	50.7	50.7	50.5	50.6	50.7	50.8	50.66	0.084	0.317	
60.6	60.7	60.7	60.8	60.9	60.7	60.8	60.7	60.7	60.8	60.8	60.76	0.07	0.264	
70.7	70.9	70.9	71	71	70.9	71	70.8	70.9	71	71	70.94	0.07	0.339	
80.8	81	81	81.1	81.1	81	81.1	81	81	81	81.1	81.04	0.052	0.297	
90.9	91.2	91.2	91.3	91.3	91.2	91.3	91.1	91.1	91.1	91.2	91.2	0.082	0.33	
101	101.2	101.3	101.5	101.5	101.5	101.5	101.4	101.4	101.4	101.4	101.4	0.099	0.406	
111.1	111.5	111.5	111.6	111.6	111.6	111.6	111.6	111.6	111.6	111.6	111.6	0.042	0.432	
121.2	121.6	121.6	121.6	121.6	121.6	121.7	121.6	121.6	121.6	121.6	121.6	0.032	0.338	
131.3	131.6	131.6	131.6	131.6	131.7	131.7	131.6	131.6	131.6	131.7	131.6	0.048	0.251	
141.4	141.8	141.8	141.8	141.8	141.9	141.9	141.8	141.9	141.8	141.8	141.8	0.048	0.304	
151.5	151.9	151.9	151.9	151.9	152	152	152	152	151.9	151.8	151.9	0.067	0.284	

		7/7/98	8/7/98	9/7/98	15/7/98	15/7/98								
		11:05	10:35	15:35	10:40	13:40	MD	D.P.	ER %					
H(mm)														
0	0	0	0	0	0	0.1	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.04	0.052	0
10.1	10.2	10.2	10.1	10.1	10.2	10.3	10.2	10.3	10.2	10.2	10.2	0.067	0.99	
20.2	20.2	20.2	20.1	20.2	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.25	0.071	0.248	
30.3	30.3	30.3	30.3	30.3	30.3	30.3	30.3	30.3	30.3	30.3	30.3	0	1E-14	
40.4	40.5	40.5	40.5	40.5	40.5	40.5	40.5	40.5	40.4	40.4	40.48	0.042	0.198	
50.5	50.6	50.6	50.7	50.6	50.6	50.6	50.5	50.6	50.5	50.5	50.58	0.063	0.158	
60.6	60.7	60.7	60.8	60.8	60.6	60.6	60.6	60.6	60.6	60.6	60.66	0.084	0.099	
70.7	70.9	70.9	71	71	70.7	70.7	70.7	70.7	70.7	70.7	70.8	0.133	0.141	
80.8	81	81	81.1	81.1	80.8	80.8	80.7	80.7	80.7	80.8	80.87	0.164	0.087	
90.9	91.2	91.2	91.3	91.3	90.9	90.9	90.8	90.8	90.8	90.8	91	0.221	0.11	
101	101.3	101.3	101.5	101.5	100.9	100.9	100.8	100.8	100.8	100.9	101.1	0.295	0.069	
111.1	111.4	111.4	111.6	111.6	110.9	110.9	110.8	110.8	110.9	110.9	111.1	0.336	0.018	
121.2	121.4	121.4	121.7	121.7	121.1	121.1	120.9	121	121	121	121.2	0.298	0.025	
131.3	131.5	131.5	131.7	131.7	131.2	131.3	131.1	131.1	131.2	131.3	131.4	0.227	0.046	
141.4	141.8	141.8	142	141.9	141.3	141.3	141.2	141.2	141.2	141.3	141.5	0.33	0.071	
151.5	151.9	151.9	152.1	152	151.4	151.4	151.2	151.3	151.4	151.4	151.6	0.333	0.066	

DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE DEFLÚVIO SUPERFICIAL :

TESTE DE CALIBRAÇÃO E SENSIBILIDADE TÉRMICA

SENSOR - NO. ----- **03** ----- DATA -----/-----/----- DELTA - T: 100 ms

H(mm)	1/7/98		2/7/98		2/7/98		2/7/98		5/7/98		MD	D.P.	ER %
	16:20	09:35	10:55	10:55	17:25	17:25	17:45	17:45					
0	0	0	0.1	0.1	0.2	0.2	0	0	0	0.1	0.07	0.082	0
10.1	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.1	10.2	10.2	10.2	10.19	0.032	0.891
20.2	20.2	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.1	20.3	20.2	20.2	20.25	0.071	0.248
30.3	30.4	30.4	30.4	30.5	30.4	30.5	30.4	30.4	30.3	30.3	30.4	0.067	0.33
40.4	40.4	40.4	40.5	40.6	40.6	40.6	40.4	40.4	40.5	40.5	40.49	0.088	0.223
50.5	50.7	50.7	50.7	50.7	50.7	50.7	50.7	50.7	50.7	50.8	50.71	0.032	0.416
60.6	60.8	60.8	60.8	60.8	61	61	60.8	60.8	60.9	60.9	60.86	0.084	0.429
70.7	70.8	70.8	70.8	70.9	71	71	70.8	70.9	70.9	70.9	70.88	0.079	0.255
80.8	80.9	80.9	80.9	81	81.1	81.1	80.9	81	81	81	80.98	0.079	0.223
90.9	91.1	91.1	91.1	91.1	91.3	91.3	91.1	91.2	91.2	91.2	91.17	0.082	0.297
101	101.1	101.1	101.2	101.2	101.4	101.4	101.2	101.3	101.3	101.3	101.3	0.108	0.248
111.1	111.2	111.3	111.3	111.3	111.5	111.6	111.5	111.6	111.4	111.6	111.4	0.149	0.297
121.2	121.5	121.6	121.5	121.5	121.8	121.8	121.6	121.7	121.6	121.6	121.6	0.114	0.347
131.3	131.6	131.6	131.6	131.6	131.8	131.8	131.8	131.8	131.7	131.7	131.7	0.094	0.305
141.4	141.7	141.7	141.7	141.7	141.8	141.8	141.8	141.8	141.8	141.8	141.8	0.052	0.255
151.5	151.6	151.6	151.6	151.6	151.9	151.9	151.9	151.9	151.7	151.7	151.7	0.143	0.158

H(mm)	7/7/98		8/7/98		9/7/98		15/7/98		15/7/98		MD	D.P.	ER %
	11:10	10:40	15:40	15:40	10:45	10:45	13:45	13:45					
0	0.1	0.1	0	0.1	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.06	0.052	0
10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.2	10.2	10.2	10.2	10.3	10.16	0.07	0.594
20.2	20.2	20.3	20.3	20.3	20.2	20.2	20.3	20.4	20.3	20.3	20.28	0.063	0.396
30.3	30.4	30.4	30.5	30.4	30.3	30.3	30.3	30.4	30.3	30.3	30.36	0.07	0.198
40.4	40.5	40.6	40.6	40.5	40.4	40.4	40.5	40.5	40.4	40.4	40.48	0.079	0.198
50.5	50.7	50.7	50.7	50.6	50.5	50.5	50.6	50.7	50.7	50.7	50.64	0.084	0.277
60.6	61	61.1	61.1	60.9	60.6	60.5	60.7	60.7	60.8	60.9	60.83	0.206	0.38
70.7	71	71	71.1	71.1	70.7	70.7	70.8	70.8	70.8	70.9	70.89	0.152	0.269
80.8	81.1	81.1	81.1	81	80.7	80.9	80.8	80.9	81	81	80.96	0.135	0.198
90.9	91.2	91.2	91.1	91.1	90.9	90.9	90.9	91	91.1	91.1	91.05	0.118	0.165
101	101.3	101.4	101.3	101.4	101	101	100.9	101	101.1	101.1	101.2	0.184	0.149
111.1	111.5	111.6	111.6	111.5	111	111	111.1	111.1	111.3	111.3	111.3	0.24	0.18
121.2	121.6	121.7	121.5	121.7	121.2	121.2	121.3	121.3	121.4	121.4	121.4	0.189	0.19
131.3	132	132	131.8	131.9	131.3	131.3	131.2	131.3	131.5	131.6	131.6	0.314	0.221
141.4	142	141.8	141.7	141.8	141.4	141.4	141.3	141.4	141.6	141.6	141.6	0.226	0.141
151.5	152	151.9	151.8	151.7	151.4	151.4	151.4	151.4	151.7	151.7	151.6	0.227	0.092

DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE DEFLÚVIO SUPERFICIAL :

TESTE DE CALIBRAÇÃO E SENSIBILIDADE TÉRMICA

SENSOR - NO. ----- **04** ----- DATA -----/-----/----- DELTA - T: 100 ms

H(mm)	1/7/98		2/7/98		2/7/98		2/7/98		5/7/98		MD	D.P.	ER %
	16:30	09:40	11:00	11:00	17:30	17:30	17:50	17:50	17:50	17:50			
0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0	0.04	0.052	0
10.1	10.1	10.1	10.2	10.2	10.2	10.2	10.1	10.1	10.1	10.1	10.14	0.052	0.396
20.2	20.2	20.2	20.3	20.3	20.2	20.3	20.2	20.2	20.2	20.2	20.23	0.048	0.149
30.3	30.2	30.3	30.4	30.4	30.4	30.4	30.3	30.3	30.2	30.3	30.32	0.079	0.066
40.4	40.4	40.4	40.5	40.5	40.5	40.5	40.3	40.4	40.3	40.3	40.41	0.088	0.025
50.5	50.5	50.5	50.6	50.6	50.6	50.7	50.5	50.5	50.5	50.5	50.55	0.071	0.099
60.6	60.6	60.6	60.7	60.7	60.7	60.8	60.6	60.7	60.6	60.6	60.66	0.07	0.099
70.7	70.8	70.7	70.8	70.8	70.8	70.9	70.8	70.8	70.7	70.7	70.78	0.063	0.113
80.8	80.9	80.9	81	81	81	81	81	81	80.9	80.9	80.96	0.052	0.198
90.9	91.1	91.1	91	91	91.1	91.1	91.1	91.1	91	91	91.06	0.052	0.176
101	101.1	101.1	101.2	101.2	101.3	101.3	101.3	101.3	101.2	101.2	101.2	0.079	0.218
111.1	111.4	111.4	111.3	111.3	111.4	111.5	111.5	111.6	111.4	111.5	111.4	0.095	0.297
121.2	121.6	121.6	121.4	121.4	121.6	121.6	121.6	121.7	121.5	121.5	121.6	0.097	0.289
131.3	131.7	131.7	131.4	131.4	131.6	131.6	131.8	131.8	131.6	131.6	131.6	0.14	0.244
141.4	141.9	141.9	141.6	141.7	141.9	141.9	142	142.1	141.8	141.8	141.9	0.143	0.325
151.5	151.9	152	151.7	151.7	151.9	151.9	152.2	152.2	151.8	151.8	151.9	0.179	0.271

H(mm)	7/7/98		8/7/98		9/7/98		15/7/98		15/7/98		MD	D.P.	ER %
	11:15	10:50	10:50	15:50	15:50	10:50	10:50	13:50	13:50	13:50			
0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.02	0.042	0
10.1	10.1	10.2	10	10.1	10	10.1	10.2	10.2	10.2	10.3	10.14	0.097	0.396
20.2	20.2	20.3	20.1	20.2	20.1	20.1	20.4	20.4	20.2	20.3	20.23	0.116	0.149
30.3	30.3	30.4	30.3	30.4	30.2	30.2	30.4	30.4	30.4	30.4	30.34	0.084	0.132
40.4	40.4	40.5	40.4	40.4	40.2	40.3	40.6	40.6	40.5	40.5	40.44	0.126	0.099
50.5	50.5	50.5	50.6	50.7	50.3	50.4	50.7	50.8	50.6	50.6	50.57	0.149	0.139
60.6	60.6	60.6	60.7	60.8	60.4	60.5	61	61	60.8	60.8	60.72	0.199	0.198
70.7	70.6	70.7	70.9	70.9	70.4	70.5	71.1	71.1	70.9	70.9	70.8	0.24	0.141
80.8	80.8	80.8	81.1	81.1	80.5	80.6	81.2	81.2	81.1	81.1	80.95	0.255	0.186
90.9	90.8	90.9	91.1	91.2	90.6	90.6	91.4	91.4	91.1	91.1	91.02	0.29	0.132
101	101	101	101.3	101.3	100.7	100.7	101.5	101.5	101.2	101.2	101.1	0.288	0.139
111.1	111.2	111.2	111.5	111.6	110.8	110.8	111.5	111.6	111.4	111.4	111.3	0.298	0.18
121.2	121.2	121.2	121.7	121.7	120.9	120.9	121.9	121.9	121.4	121.4	121.4	0.374	0.182
131.3	131.2	131.2	131.6	131.8	130.7	130.7	132	132	131.6	131.6	131.4	0.477	0.107
141.4	141.4	141.4	141.8	141.7	140.9	140.9	142.5	142.5	141.8	141.8	141.7	0.554	0.191
151.5	151.4	151.4	152.1	152.2	150.9	150.9	152.6	152.6	151.9	151.9	151.8	0.623	0.191

DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE DEFLÚVIO SUPERFICIAL :

TESTE DE CALIBRAÇÃO E SENSIBILIDADE TÉRMICA

SENSOR - NO. ---- **05** ---- DATA -----/-----/----- DELTA - T: 100 ms

H(mm)	1/7/98		2/7/98		2/7/98		2/7/98		5/7/98		MD	D.P.	ER %
	0	16:35	0	09:50	0.1	0	0.1	0	0	0.1			
0	0	0	0	0.1	0	0.1	0	0	0.1	0.1	0.04	0.052	0
10.1	10.2	10.2	10.2	10.3	10.2	10.3	10.2	10.2	10.3	10.3	10.24	0.052	1.386
20.2	20.2	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.29	0.032	0.446
30.3	30.3	30.3	30.4	30.4	30.3	30.4	30.4	30.4	30.4	30.4	30.37	0.048	0.231
40.4	40.3	40.3	40.5	40.5	40.4	40.4	40.4	40.4	40.4	40.4	40.4	0.067	-0
50.5	50.5	50.5	50.6	50.6	50.6	50.6	50.5	50.5	50.6	50.6	50.56	0.052	0.119
60.6	60.4	60.5	60.6	60.7	60.6	60.6	60.5	60.5	60.6	60.6	60.56	0.084	-0.07
70.7	70.5	70.5	70.8	70.8	70.7	70.7	70.6	70.6	70.7	70.7	70.66	0.107	-0.06
80.8	80.6	80.6	80.9	80.9	80.7	80.8	80.7	80.6	80.7	80.7	80.72	0.114	-0.1
90.9	90.7	90.7	91	91	90.9	90.9	90.8	90.8	90.9	90.9	90.86	0.107	-0.04
101	100.8	100.8	101.1	101.2	101.1	101.2	101	101	101	101.1	101	0.142	0.03
111.1	110.8	110.8	111.3	111.3	111.1	111.2	111	111	111.1	111.1	111.1	0.177	-0.03
121.2	121	121.1	121.5	121.5	121.3	121.3	121.2	121.2	121.2	121.2	121.3	0.158	0.041
131.3	131	131	131.5	131.4	131.3	131.3	131.1	131.1	131.1	131.1	131.2	0.173	-0.08
141.4	141	141	141.5	141.5	141.3	141.4	141.2	141.2	141.2	141.2	141.3	0.178	-0.11
151.5	151.1	151.2	151.7	151.7	151.5	151.5	151.3	151.4	151.4	151.3	151.4	0.197	-0.06

H(mm)	7/7/98		8/7/98		9/7/98		15/7/98		15/7/98		MD	D.P.	ER %
	0	11:20	0	11:00	0	15:55	0	10:55	0	13:55			
0	0.1	0.1	0	0.1	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.06	0.052	0
10.1	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.1	10.2	10.3	10.3	10.21	0.057	1.089
20.2	20.3	20.3	20.3	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.3	20.4	20.26	0.07	0.297
30.3	30.4	30.4	30.4	30.4	30.3	30.4	30.4	30.4	30.5	30.5	30.41	0.057	0.363
40.4	40.4	40.4	40.4	40.4	40.3	40.4	40.4	40.4	40.5	40.5	40.41	0.057	0.025
50.5	50.6	50.5	50.6	50.6	50.5	50.5	50.6	50.6	50.7	50.7	50.59	0.074	0.178
60.6	60.5	60.5	60.7	60.7	60.5	60.5	60.6	60.7	60.7	60.8	60.62	0.114	0.033
70.7	70.6	70.6	70.8	70.8	70.6	70.6	70.7	70.7	70.8	70.9	70.71	0.11	0.014
80.8	80.7	80.7	80.9	80.9	80.7	80.7	80.8	80.9	81	81	80.83	0.125	0.037
90.9	90.8	90.8	90.9	91.1	90.8	90.8	91	90.9	91	91	90.91	0.11	0.011
101	100.9	100.9	101.1	101.2	100.9	101	101.2	101.3	101.2	101.3	101.1	0.163	0.099
111.1	111	111	111.1	111.2	111.1	111.1	111.4	111.4	111.5	111.5	111.2	0.2	0.117
121.2	121.2	121.1	121.2	121.4	121.3	121.3	121.6	121.7	121.6	121.6	121.4	0.211	0.165
131.3	131.1	131.1	131.4	131.4	131.1	131.1	131.5	131.5	131.6	131.6	131.3	0.217	0.03
141.4	141.2	141.2	141.7	141.7	141	141	141.6	141.6	141.6	141.6	141.4	0.286	0.014
151.5	151.2	151.2	151.8	151.7	151	151.1	151.7	151.7	151.7	151.8	151.5	0.321	-0.01

DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE DEFLÚVIO SUPERFICIAL :

TESTE DE CALIBRAÇÃO E SENSIBILIDADE TÉRMICA

SENSOR - NO. ----- 06 ----- DATA -----/-----/----- DELTA - T: 100 ms

H(mm)	1/7/98		2/7/98		2/7/98		2/7/98		5/7/98		MD	D.P.	ER %
	0	16:45	0	09:55	0	11:15	0	17:45	0	18:00			
0	0	0	0.1	0.2	0	0	0	0	0	0	0.03	0.067	0
10.1	10.1	10.1	10.3	10.3	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	0.067	0.99
20.2	20.2	20.2	20.4	20.4	20.3	20.3	20.2	20.3	20.3	20.3	20.29	0.074	0.446
30.3	30.3	30.4	30.5	30.5	30.4	30.4	30.4	30.4	30.4	30.4	30.41	0.057	0.363
40.4	40.4	40.5	40.6	40.6	40.5	40.5	40.6	40.5	40.6	40.6	40.54	0.07	0.347
50.5	50.6	50.6	50.7	50.8	50.7	50.6	50.6	50.6	50.6	50.6	50.64	0.07	0.277
60.6	60.7	60.7	60.9	60.9	60.8	60.8	60.8	60.8	60.8	60.8	60.8	0.067	0.33
70.7	70.8	70.8	71	71	70.9	70.9	70.9	71	71	71	70.93	0.082	0.325
80.8	80.9	80.9	81.1	81.1	81	81	81.1	81.1	81	81	81.02	0.079	0.272
90.9	91.1	91.1	91.3	91.3	91.1	91.1	91.2	91.2	91.2	91.2	91.18	0.079	0.308
101	101.2	101.2	101.4	101.4	101.4	101.4	101.4	101.4	101.4	101.5	101.4	0.095	0.366
111.1	111.4	111.4	111.6	111.6	111.6	111.6	111.6	111.6	111.6	111.6	111.6	0.084	0.414
121.2	121.6	121.6	121.6	121.6	121.6	121.6	121.7	121.7	121.7	121.7	121.6	0.052	0.363
131.3	131.7	131.7	131.7	131.7	131.8	131.7	131.9	131.9	131.8	131.8	131.8	0.082	0.358
141.4	141.8	141.8	141.8	141.8	141.9	141.9	142.1	142.1	142.1	142.1	141.9	0.143	0.382
151.5	151.9	151.9	152	152	152	152	152.2	152.2	152.1	152.2	152.1	0.118	0.363

H(mm)	7/7/98		8/7/98		9/7/98		15/7/98		15/7/98		MD	D.P.	ER %
	0	11:25	0	11:05	0	16:00	0	11:00	0.1	14:00			
0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.03	0.048	0
10.1	10.2	10.2	10.2	10.2	10.3	10.3	10.3	10.3	10.2	10.3	10.25	0.053	1.485
20.2	20.2	20.2	20.4	20.4	20.3	20.3	20.4	20.5	20.4	20.4	20.35	0.097	0.743
30.3	30.3	30.3	30.5	30.4	30.4	30.4	30.5	30.5	30.5	30.5	30.43	0.082	0.429
40.4	40.4	40.4	40.6	40.5	40.5	40.5	40.6	40.6	40.6	40.6	40.53	0.082	0.322
50.5	50.6	50.6	50.8	50.8	50.5	50.6	50.7	50.7	50.7	50.7	50.67	0.095	0.337
60.6	60.6	60.7	60.9	60.9	60.6	60.6	60.8	60.8	60.7	60.7	60.73	0.116	0.215
70.7	70.8	70.8	71.1	71	70.6	70.6	70.8	70.8	70.8	70.8	70.81	0.152	0.156
80.8	80.8	80.8	81.1	81	80.6	80.6	80.8	80.9	80.9	80.9	80.84	0.158	0.05
90.9	91	91	91.3	91.2	90.7	90.7	91	91	91	91	90.99	0.185	0.099
101	101.1	101.2	101.5	101.4	100.7	100.7	100.9	101	101.1	101.1	101.1	0.263	0.069
111.1	111.3	111.3	111.7	111.5	110.8	110.7	111	111.1	111.1	111.2	111.2	0.302	0.063
121.2	121.4	121.4	121.9	121.8	120.8	120.9	121.1	121.2	121.2	121.3	121.3	0.35	0.083
131.3	131.5	131.5	131.7	131.7	130.8	130.8	131.3	131.3	131.5	131.5	131.4	0.324	0.046
141.4	141.6	141.6	141.8	141.7	140.8	140.9	141.3	141.3	141.5	141.6	141.4	0.335	0.007
151.5	151.6	151.6	151.9	151.8	150.7	150.7	151.3	151.3	151.6	151.6	151.4	0.418	-0.06

DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE DEFLÚVIO SUPERFICIAL :

TESTE DE CALIBRAÇÃO E SENSIBILIDADE TÉRMICA

SENSOR - NO. ----- 07 ----- DATA -----/-----/----- DELTA - T: 100 ms

H(mm)	5/7/98	6/7/98	6/7/98	6/7/98	6/7/98								MD	D.P.	ER %
	18:05	10:30	11:00	12:10	14:35										
0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0.04	0.052	0		
10.1	10.1	10	10.1	10.1	10.1	10.2	10.2	10.3	10.1	10.2	10.14	0.084	0.396		
20.2	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.4	20.3	20.3	20.31	0.032	0.545		
30.3	30.3	30.4	30.3	30.3	30.3	30.4	30.4	30.4	30.3	30.4	30.35	0.053	0.165		
40.4	40.5	40.5	40.4	40.4	40.4	40.4	40.5	40.5	40.4	40.5	40.45	0.053	0.124		
50.5	50.6	50.6	50.5	50.6	50.6	50.6	50.6	50.6	50.6	50.7	50.6	0.047	0.198		
60.6	60.8	60.8	60.6	60.7	60.6	60.7	60.7	60.7	60.7	60.7	60.7	0.067	0.165		
70.7	70.9	70.9	70.7	70.8	70.7	70.8	70.8	70.9	70.8	70.8	70.81	0.074	0.156		
80.8	81.1	81.1	80.8	80.9	80.9	80.9	80.9	81	80.9	81	80.95	0.097	0.186		
90.9	91.2	91.2	90.9	90.9	91	91	91	91.1	91	91.1	91.04	0.107	0.154		
101	101.5	101.5	101.1	101.1	101.1	101.1	101.2	101.2	101.2	101.2	101.2	0.155	0.218		
111.1	111.6	111.6	111.2	111.2	111.3	111.3	111.4	111.4	111.4	111.4	111.4	0.14	0.252		
121.2	121.7	121.7	121.2	121.3	121.4	121.3	121.4	121.4	121.4	121.4	121.4	0.162	0.182		
131.3	132	132	131.4	131.4	131.5	131.5	131.7	131.7	131.7	131.7	131.7	0.217	0.274		
141.4	142.1	142.1	141.5	141.5	141.5	141.5	141.7	141.7	141.7	141.7	141.7	0.231	0.212		
151.5	152.2	152.1	151.6	151.6	151.6	151.6	151.8	151.8	151.8	151.8	151.8	0.213	0.191		

H(mm)	7/7/98	8/7/98	9/7/98	15/7/98	15/7/98								MD	D.P.	ER %
	11:30	11:15	16:05	11:05	14:05										
0	0	0.1	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.06	0.07	0		
10.1	10.1	10.2	10.1	10.2	10.1	10.2	10.3	10.2	10.3	10.3	10.2	0.082	0.99		
20.2	20.3	20.3	20.2	20.2	20.2	20.2	20.4	20.4	20.4	20.4	20.3	0.094	0.495		
30.3	30.3	30.3	30.3	30.3	30.2	30.2	30.5	30.5	30.5	30.5	30.36	0.126	0.198		
40.4	40.4	40.4	40.4	40.5	40.3	40.3	40.6	40.6	40.6	40.6	40.47	0.125	0.173		
50.5	50.5	50.6	50.5	50.6	50.2	50.3	50.8	50.8	50.8	50.8	50.59	0.218	0.178		
60.6	60.6	60.6	60.6	60.7	60.3	60.4	60.9	61	60.9	60.9	60.69	0.233	0.149		
70.7	70.7	70.8	70.7	70.8	70.4	70.4	71.1	71.2	71	71	70.81	0.273	0.156		
80.8	80.8	80.9	80.8	80.9	80.5	80.5	81.2	81.3	81.1	81.1	80.91	0.273	0.136		
90.9	90.9	91	91	91	90.5	90.5	91.3	91.4	91.3	91.2	91.01	0.314	0.121		
101	101.1	101.2	101.1	101	100.5	100.7	101.4	101.4	101.3	101.3	101.1	0.298	0.099		
111.1	111.3	111.3	111.1	101.2	110.5	110.6	111.6	111.5	111.5	111.5	110.2	3.189	-0.8		
121.2	121.4	121.4	121.2	121.3	120.6	120.6	122	122	121.5	121.5	121.4	0.477	0.124		
131.3	131.5	131.5	131.3	131.3	130.6	130.7	132.1	132.1	131.5	131.5	131.4	0.491	0.084		
141.4	141.5	141.5	141.4	141.5	141	141	142.3	142.3	141.8	141.9	141.6	0.459	0.156		
151.5	151.6	151.6	151.5	151.7	151.2	151.2	152.4	152.5	151.9	151.9	151.8	0.44	0.165		

DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE DEFLÚVIO SUPERFICIAL :

TESTE DE CALIBRAÇÃO E SENSIBILIDADE TÉRMICA

SENSOR - NO. ----- 08 ----- DATA -----/-----/----- DELTA - T: 100 ms

H(mm)	5/7/98	6/7/98	6/7/98	6/7/98	6/7/98								MD	D.P.	ER %
	18:10	10:40	11:10	12:15	14:40										
0	0.2	0.2	0	0	0	0.2	0.2	0.2	0	0	0.1	0.105	0		
10.1	10.3	10.3	10.1	10.1	10.1	10.3	10.3	10.3	10.2	10.3	10.23	0.095	1.287		
20.2	20.5	20.5	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.3	20.3	20.28	0.123	0.396		
30.3	30.4	30.4	30.3	30.3	30.3	30.3	30.3	30.4	30.3	30.3	30.33	0.048	0.099		
40.4	40.5	40.6	40.3	40.3	40.3	40.4	40.3	40.4	40.4	40.4	40.39	0.099	-0.02		
50.5	50.7	50.7	50.4	50.4	50.5	50.5	50.4	50.4	50.5	50.5	50.5	0.115	0		
60.6	60.7	60.7	60.4	60.5	60.5	60.5	60.5	60.5	60.6	60.6	60.55	0.097	-0.08		
70.7	70.9	70.9	70.5	70.6	70.6	70.6	70.6	70.6	70.7	70.7	70.67	0.134	-0.04		
80.8	81	81.1	80.7	80.7	80.8	80.8	80.8	80.8	80.9	80.9	80.85	0.127	0.062		
90.9	91.1	91.2	90.8	90.8	90.7	90.8	90.7	90.8	91	91	90.89	0.173	-0.01		
101	101.3	101.4	100.8	100.9	100.8	100.9	100.8	100.9	100.9	100.9	101	0.212	-0.04		
111.1	111.6	111.6	110.8	110.8	110.9	110.9	110.9	110.9	111	111	111	0.303	-0.05		
121.2	121.6	121.6	121	121	121.1	121.1	121.1	121.1	121.1	121.1	121.2	0.225	-0.02		
131.3	131.8	131.8	131.1	131.1	131.1	131.2	131.1	131.1	131.2	131.2	131.3	0.283	-0.02		
141.4	141.8	141.8	141.3	141.3	141.3	141.3	141.3	141.3	141.4	141.4	141.4	0.204	0.014		
151.5	151.8	151.8	151.4	151.5	151.4	151.4	151.4	151.4	151.5	151.6	151.5	0.162	0.013		

H(mm)	7/7/98	8/7/98	9/7/98	15/7/98	15/7/98								MD	D.P.	ER %
	11:35	11:20	16:10	11:10	14:15										
0	0	0	0	0.2	0	0.2	0.2	0.2	0	0	0.08	0.103	0		
10.1	10.1	10.1	10	10	10.1	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.18	0.132	0.792		
20.2	20.4	20.4	20.1	20.1	20.4	20.4	20.3	20.3	20.2	20.2	20.28	0.123	0.396		
30.3	30.4	30.4	30.1	30.2	30.4	30.4	30.3	30.4	30.4	30.4	30.34	0.107	0.132		
40.4	40.5	40.5	40.2	40.2	40.5	40.5	40.2	40.3	40.4	40.4	40.37	0.134	-0.07		
50.5	50.5	50.5	50.3	50.4	50.5	50.5	50.4	50.4	50.5	50.5	50.45	0.071	-0.1		
60.6	60.6	60.7	60.4	60.4	60.6	60.6	60.4	60.4	60.6	60.6	60.53	0.116	-0.12		
70.7	70.7	70.7	70.5	70.6	70.6	70.7	70.5	70.5	70.7	70.7	70.62	0.092	-0.11		
80.8	80.8	80.9	80.6	80.6	80.9	80.9	80.5	80.5	80.9	81	80.76	0.19	-0.05		
90.9	91	90.9	90.7	90.7	90.9	90.9	90.7	90.7	91	91	90.85	0.135	-0.06		
101	101	101.1	100.8	100.9	100.8	100.9	100.7	100.8	101.1	101.1	100.9	0.148	-0.08		
111.1	111.2	111.2	110.9	110.9	110.9	111	110.7	110.7	111.2	111.2	111	0.202	-0.1		
121.2	121.3	121.4	121.1	121.1	121.2	121.1	120.9	120.9	121.3	121.3	121.2	0.171	-0.03		
131.3	131.4	131.4	131.4	131.4	131.1	131.1	131	131.1	131.3	131.4	131.3	0.165	-0.03		
141.4	141.5	141.5	141.3	141.3	141.2	141.2	141.1	141.1	141.6	141.6	141.3	0.196	-0.04		
151.5	151.6	151.6	151.5	151.5	151.3	151.3	151.2	151.2	151.6	151.7	151.5	0.184	-0.03		

DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE DEFLÚVIO SUPERFICIAL :

TESTE DE CALIBRAÇÃO E SENSIBILIDADE TÉRMICA

SENSOR - NO. ----- 09 ----- DATA -----/-----/----- DELTA - T: 100 ms

H(mm)	5/7/98		6/7/98		6/7/98		6/7/98		6/7/98		MD	D.P.	ER %	
	18:20	10:45	11:15	11:15	12:20	12:20	14:50	14:50	14:50					
0	0.1	0.1	0	0.1	0	0	0	0	0	0.1	0.04	0.052	0	
10.1	10.2	10.2	10.1	10.2	10	10	10.1	10.1	10.2	10.2	10.13	0.082	0.297	
20.2	20.4	20.4	20.1	20.3	20.1	20.1	20.2	20.2	20.3	20.3	20.24	0.117	0.198	
30.3	30.5	30.5	30.3	30.3	30.3	30.3	30.2	30.3	30.4	30.4	30.36	0.097	0.198	
40.4	40.7	40.7	40.3	40.4	40.4	40.4	40.4	40.5	40.5	40.6	40.5	0.133	0.248	
50.5	50.8	50.8	50.4	50.5	50.5	50.5	50.4	50.6	50.6	50.8	50.7	50.61	0.16	0.218
60.6	61	61	60.5	60.6	60.7	60.6	60.7	60.7	60.7	61	60.9	60.77	0.189	0.281
70.7	71.1	71.1	70.6	70.6	70.7	70.7	70.7	70.8	70.8	71.1	70.9	70.84	0.201	0.198
80.8	81.3	81.2	80.7	80.7	80.8	80.8	80.8	81	81	81.3	81.1	80.99	0.233	0.235
90.9	91.5	91.5	90.8	90.9	91	91.1	91.2	91.1	91.4	91.3	91.3	91.18	0.244	0.308
101	101.7	101.7	100.8	100.9	101	101.2	101.2	101.2	101.2	101.3	101.2	0.297	0.218	
111.1	111.9	111.9	110.9	110.9	111	111.2	111.3	111.3	111.3	111.3	111.3	111.3	0.356	0.18
121.2	122	122	121	121	121.1	121.2	121.4	121.5	121.4	121.6	121.4	121.4	0.368	0.182
131.3	132.2	132.2	131.2	131.3	131.3	131.4	131.7	131.7	131.6	131.8	131.6	0.357	0.259	
141.4	142.3	142.3	141.3	141.3	141.4	141.5	141.9	141.9	141.7	141.8	141.7	0.372	0.24	
151.5	152.5	152.5	151.4	151.5	151.6	151.6	152	152	151.8	151.9	151.9	0.385	0.251	

H(mm)	7/7/98		8/7/98		9/7/98		15/7/98		15/7/98		MD	D.P.	ER %
	11:40	11:25	16:15	16:15	11:15	14:20	14:20	14:20					
0	0.1	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0	0.1	0.1	0.06	0.052	0
10.1	10.2	10.2	10.2	10.2	10	10	10.1	10.1	10.2	10.2	10.14	0.084	0.396
20.2	20.3	20.3	20.4	20.4	20.2	20.2	20.2	20.2	20.4	20.4	20.3	0.094	0.495
30.3	30.3	30.4	30.5	30.4	30.2	30.2	30.3	30.3	30.5	30.5	30.36	0.117	0.198
40.4	40.4	40.4	40.6	40.6	40.3	40.3	40.3	40.4	40.6	40.6	40.45	0.135	0.124
50.5	50.5	50.5	50.7	50.8	50.4	50.4	50.5	50.5	50.8	50.8	50.59	0.166	0.178
60.6	60.6	60.6	60.8	60.8	60.4	60.4	60.6	60.6	60.9	60.8	60.65	0.172	0.083
70.7	70.7	70.7	70.9	71	70.4	70.5	70.7	70.8	71	71	70.77	0.211	0.099
80.8	80.6	80.6	81	81.1	80.4	80.5	80.8	80.8	81.1	81.1	80.8	0.267	-0
90.9	90.7	90.6	91.2	91.2	90.4	90.4	90.9	91	91.3	91.3	90.9	0.356	-0
101	100.6	100.6	101.3	101.3	100.5	100.5	101	101.1	101.4	101.5	101	0.397	-0.02
111.1	110.7	110.7	111.4	111.4	110.7	110.7	111	111.1	111.4	111.5	111.1	0.344	-0.04
121.2	120.7	120.7	121.5	121.6	120.8	120.8	121.2	121.3	121.7	121.7	121.2	0.419	0
131.3	130.6	130.7	131.7	131.8	130.7	130.7	131.2	131.2	131.7	131.8	131.2	0.509	-0.07
141.4	140.6	140.7	141.9	141.8	140.8	140.8	141.3	141.4	141.9	141.9	141.3	0.547	-0.06
151.5	150.7	150.7	152	151.9	150.8	150.7	151.4	151.4	152	152	151.4	0.591	-0.09

DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE DEFLÚVIO SUPERFICIAL :

TESTE DE CALIBRAÇÃO E SENSIBILIDADE TÉRMICA

SENSOR - NO. ----- 10 ----- DATA -----/-----/----- DELTA - T: 100 ms

H(mm)	1/7/98 16:50		2/7/98 10:00		2/7/98 11:20		2/7/98 17:50		5/7/98 18:25		MD	D.P.	ER %
	0	10	0	0.1	0.1	0	0	0	0	0			
0	0	0	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	0.02	0.042	0
10.1	10	10	10.2	10.2	10.2	10.2	10.1	10.2	10	10.2	10.13	0.095	0.297
20.2	20.1	20.2	20.4	20.4	20.3	20.4	20.2	20.2	20.2	20.2	20.26	0.107	0.297
30.3	30.2	30.2	30.4	30.5	30.4	30.4	30.2	30.3	30.3	30.3	30.32	0.103	0.066
40.4	40.3	40.3	40.5	40.6	40.5	40.5	40.3	40.3	40.4	40.4	40.41	0.11	0.025
50.5	50.3	50.3	50.6	50.6	50.6	50.6	50.4	50.4	50.4	50.5	50.47	0.125	-0.06
60.6	60.5	60.5	60.7	60.8	60.8	60.8	60.5	60.5	60.5	60.6	60.62	0.14	0.033
70.7	70.5	70.5	70.9	70.9	70.8	70.8	70.5	70.6	70.6	70.6	70.67	0.164	-0.04
80.8	80.6	80.6	80.8	80.9	80.9	80.9	80.6	80.6	80.7	80.7	80.73	0.134	-0.09
90.9	90.6	90.6	91	91	90.9	91	90.7	90.8	90.8	90.8	90.82	0.155	-0.09
101	100.7	100.8	101.3	101.3	101.2	101.2	100.9	100.9	100.9	100.9	101	0.218	0.01
111.1	110.8	110.9	111.4	111.4	111.3	111.3	111	111	111	111	111.1	0.218	0.009
121.2	120.8	120.8	121.5	121.4	121.4	121.4	121.1	121.1	121	121.1	121.2	0.255	-0.03
131.3	131	131	131.6	131.6	131.4	131.4	131.2	131.2	131.2	131.2	131.3	0.215	-0.02
141.4	141.1	141.1	141.6	141.7	141.5	141.5	141.3	141.3	141.3	141.3	141.4	0.2	-0.02
151.5	151.2	151.2	151.8	151.8	151.7	151.7	151.4	151.4	151.5	151.5	151.5	0.225	0.013

H(mm)	7/7/98 11:45		8/7/98 11:30		9/7/98 16:20		15/7/98 11:20		15/7/98 14:20		MD	D.P.	ER %
	0	0.1	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2			
0	0	0.1	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.08	0.079	0
10.1	10.2	10.2	10.1	10.1	10.2	10.2	10.3	10.3	10.3	10.3	10.22	0.079	1.188
20.2	20.3	20.3	20.1	20.2	20.2	20.2	20.4	20.4	20.4	20.4	20.29	0.11	0.446
30.3	30.4	30.4	30.2	30.3	30.3	30.4	30.5	30.6	30.6	30.5	30.42	0.139	0.403
40.4	40.5	40.5	40.3	40.3	40.3	40.4	40.5	40.5	40.6	40.6	40.45	0.118	0.124
50.5	50.5	50.6	50.3	50.4	50.4	50.5	50.7	50.7	50.6	50.6	50.53	0.134	0.059
60.6	60.7	60.7	60.5	60.6	60.5	60.5	60.8	60.8	60.7	60.7	60.65	0.118	0.083
70.7	70.7	70.8	70.6	70.6	70.6	70.6	70.9	70.9	70.8	70.8	70.73	0.125	0.042
80.8	80.7	80.8	80.7	80.7	80.6	80.6	81	81	80.8	80.9	80.78	0.148	-0.02
90.9	90.9	90.9	90.8	90.8	90.7	90.7	91.1	91.1	90.9	91	90.89	0.145	-0.01
101	100.9	100.9	101	101	100.7	100.7	101.2	101.2	101.1	101.1	101	0.181	-0.02
111.1	111.2	111.2	111.1	111.1	110.8	110.8	111.3	111.3	111.2	111.2	111.1	0.181	0.018
121.2	121.2	121.2	121.2	121.2	120.9	120.9	121.6	121.7	121.4	121.5	121.3	0.27	0.066
131.3	131.3	131.3	131.4	131.4	131.1	131	131.6	131.7	131.4	131.5	131.4	0.211	0.053
141.4	141.4	141.4	141.4	141.5	141.1	141.1	141.8	141.8	141.6	141.6	141.5	0.245	0.05
151.5	151.5	151.5	151.6	151.6	151.4	151.3	151.8	151.8	151.7	151.7	151.6	0.166	0.059

DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE DEFLÚVIO SUPERFICIAL :

TESTE DE CALIBRAÇÃO E SENSIBILIDADE TÉRMICA

SENSOR - NO. ----- 11 ----- DATA -----/-----/----- DELTA - T: 100 ms

H(mm)	1/7/98	2/7/98	2/7/98	2/7/98	2/7/98	2/7/98	2/7/98	2/7/98	5/7/98	MD	D.P.	ER %		
	17:00	10:10	11:25	11:25	17:55	17:55	17:55	17:55	18:25					
0	0	0.1	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0.1	0	0.05	0.053	0
10.1	10.2	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.2	10.2	10.2	10.2	10.25	0.053	1.485
20.2	20.3	20.4	20.3	20.3	20.4	20.4	20.4	20.3	20.3	20.3	20.3	20.33	0.048	0.644
30.3	30.5	30.5	30.4	30.5	30.5	30.6	30.4	30.4	30.4	30.4	30.4	30.46	0.07	0.528
40.4	40.5	40.5	40.5	40.5	40.5	40.6	40.5	40.5	40.6	40.5	40.5	40.52	0.042	0.297
50.5	50.8	50.8	50.6	50.7	50.7	50.8	50.7	50.7	50.7	50.7	50.7	50.72	0.063	0.436
60.6	60.8	60.8	60.7	60.8	60.8	60.8	60.8	60.8	60.8	60.9	60.8	60.8	0.047	0.33
70.7	70.9	70.9	70.8	70.8	70.9	70.9	70.9	70.9	71	71	70.9	70.9	0.067	0.283
80.8	81	81	80.9	80.9	81	81	81	81	81	81.1	81	80.99	0.057	0.235
90.9	91.1	91.1	90.9	90.9	91.1	91	91.1	91.1	91.2	91.1	91.1	91.06	0.097	0.176
101	101.2	101.2	101.1	101.1	101.3	101.3	101.2	101.2	101,5	101.3	101.3	101.2	0.078	0.209
111.1	111.3	111.3	111.3	111.3	111.4	111.4	111.5	111.5	111.4	111.3	111.3	111.4	0.082	0.243
121.2	121.4	121.4	121.4	121.4	121.6	121.7	121.7	121.7	121.6	121.4	121.4	121.5	0.142	0.272
131.3	131.8	131.8	131.7	131.7	131.9	131.9	131.9	132	132.1	132	132	131.9	0.132	0.442
141.4	142.1	142.1	142	142	142.2	142.2	142.2	142.2	142	142.1	142.1	142.1	0.088	0.502
151.5	152.1	152.1	152	152	152.2	152.2	152.2	152.2	152.2	152.1	152.1	152.1	0.082	0.416

H(mm)	7/7/98	8/7/98	9/7/98	15/7/98	15/7/98	MD	D.P.	ER %						
	11:50	11:35	16:25	11:25	14:30									
0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.08	0.092	0	
10.1	10.1	10.1	10.2	10.1	10.1	10.2	10.4	10.4	10.2	10.2	10.2	10.2	0.115	0.99
20.2	20.1	20.2	20.3	20.2	20.1	20.1	20.3	20.3	20.3	20.3	20.22	0.092	0.099	
30.3	30.3	30.4	30.5	30.3	30.2	30.2	30.4	30.5	30.3	30.4	30.35	0.108	0.165	
40.4	40.4	40.4	40.6	40.4	40.2	40.2	40.5	40.5	40.4	40.4	40.4	0.125	-0	
50.5	50.6	50.7	50.8	50.5	50.4	50.4	50.5	50.6	50.5	50.5	50.55	0.127	0.099	
60.6	60.7	60.7	61	60.6	60.5	60.5	60.6	60.6	60.6	60.6	60.64	0.143	0.066	
70.7	70.9	71	71.1	70.8	70.7	70.7	70.7	70.7	70.7	70.7	70.8	0.149	0.141	
80.8	81.1	81.1	81.1	80.8	80.7	80.8	80.8	80.8	80.8	80.8	80.88	0.155	0.099	
90.9	91.3	91.3	90.9	90.8	90.8	90.8	90.7	90.8	90.8	90.8	90.9	0.216	-0	
101	101.6	101.6	101	101	100.9	100.9	100.9	100.9	100.9	100.9	101.1	0.288	0.059	
111.1	111.9	111.9	111.1	111.2	110.8	110.9	110.7	110.8	110.9	110.9	111.1	0.441	0.009	
121.2	122.2	122.2	121.3	121.4	120.8	120.8	120.9	120.9	121.1	121.1	121.3	0.529	0.058	
131.3	132.4	132.4	131.3	131.3	131	131.1	130.9	130.8	131	131.1	131.3	0.585	0.023	
141.4	142.6	142.6	141.5	141.5	141.2	142.3	140.9	140.9	141.1	141.2	141.6	0.671	0.127	
151.5	152.8	152.8	151.4	151.5	151.4	151.4	150.8	150.8	151.2	151.2	151.5	0.712	0.02	

DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE DEFLÚVIO SUPERFICIAL :

TESTE DE CALIBRAÇÃO E SENSIBILIDADE TÉRMICA

SENSOR - N0. ----- 12 ----- DATA -----/-----/----- DELTA - T: 100 ms

H(mm)	5/7/98		6/7/98		6/7/98		6/7/98		6/7/98		MD	D.P.	ER %
	18:30		10:50		11:20		12:30		15:00				
0	0	0	0.1	0.1	0	0.1	0	0	0	0	0.03	0.048	0
10.1	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.1	10.2	10.19	0.032	0.891
20.2	20.3	20.3	20.4	20.4	20.4	20.4	20.2	20.2	20.2	20.2	20.3	0.094	0.495
30.3	30.3	30.4	30.4	30.4	30.5	30.5	30.3	30.4	30.3	30.3	30.38	0.079	0.264
40.4	40.5	40.6	40.6	40.6	40.6	40.7	40.5	40.5	40.4	40.4	40.54	0.097	0.347
50.5	50.7	50.7	50.7	50.7	50.8	50.8	50.6	50.6	50.5	50.6	50.67	0.095	0.337
60.6	60.8	60.7	60.8	60.8	60.8	60.8	60.6	60.6	60.6	60.7	60.72	0.092	0.198
70.7	70.9	70.9	70.9	70.9	70.9	70.9	70.7	70.8	70.8	70.8	70.85	0.071	0.212
80.8	81	81	81	81	81	81	80.8	80.8	80.9	80.9	80.94	0.084	0.173
90.9	91.1	91.1	91	91	91.1	91.1	90.9	91	91	91	91.03	0.067	0.143
101	101.1	101.1	101	101	101.1	101.1	100.9	100.9	101	101	101	0.079	0.02
111.1	111.2	111.2	111.1	111.1	111.2	111.3	111.1	111.1	111.1	111.2	111.2	0.07	0.054
121.2	121.3	121.3	121.1	121.1	121.3	121.3	121.1	121.2	121.3	121.3	121.2	0.095	0.025
131.3	131.5	131.5	131.5	131.3	131.5	131.5	131.3	131.3	131.5	131.4	131.4	0.095	0.099
141.4	141.6	141.6	141.4	141.4	141.4	141.4	141.3	141.3	141.6	141.7	141.5	0.142	0.05
151.5	151.7	151.7	151.4	151.5	151.5	151.5	151.4	151.5	151.8	151.8	151.6	0.155	0.053

H(mm)	7/7/98		8/7/98		9/7/98		15/7/98		15/7/98		MD	D.P.	ER %
	11:55		11:40		16:30		11:30		14:35				
0	0.2	0.2	0.2	0.2	0	0	0.3	0.3	0.1	0	0.15	0.118	0
10.1	10.3	10.3	10.2	10.2	10.2	10.2	10.4	10.4	10.1	10.2	10.25	0.097	1.485
20.2	20.3	20.3	20.3	20.3	20.2	20.2	20.5	20.5	20.2	20.2	20.3	0.115	0.495
30.3	30.3	30.3	30.4	30.4	30.2	30.2	30.6	30.6	30.2	30.3	30.35	0.151	0.165
40.4	40.6	40.6	40.6	40.5	40.5	40.5	40.8	40.8	40.4	40.4	40.57	0.142	0.421
50.5	50.7	50.7	50.6	50.6	50.6	50.6	50.9	50.9	50.5	50.6	50.67	0.134	0.337
60.6	60.8	60.8	60.8	60.7	60.7	60.7	61	61	60.7	60.7	60.79	0.12	0.314
70.7	70.8	70.9	70.9	70.8	70.7	70.8	71.1	71.1	70.8	70.8	70.87	0.134	0.24
80.8	80.9	80.9	80.8	80.8	80.8	80.8	81.2	81.2	80.9	80.9	80.92	0.155	0.149
90.9	91	91.1	91	90.9	90.9	90.9	91.3	91.3	91	91	91.04	0.151	0.154
101	101	101	101.1	100.9	100.9	100.9	101.2	101.3	101	101	101	0.134	0.03
111.1	111.2	111.2	111.2	111.1	110.8	110.9	111.3	111.3	111.1	111.1	111.1	0.162	0.018
121.2	121.2	121.2	121.3	121.2	121	121	121.4	121.6	121.3	121.3	121.3	0.178	0.041
131.3	131.3	131.3	131.4	131.3	131.1	131.2	131.6	131.6	131.5	131.5	131.4	0.169	0.061
141.4	141.3	141.3	141.3	141.3	141.1	141.1	141.6	141.7	141.6	141.6	141.4	0.218	-0.01
151.5	151.4	151.4	151.4	151.4	151.2	151.2	151.7	151.7	151.7	151.7	151.5	0.204	-0.01

DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE DEFLÚVIO SUPERFICIAL :

TESTE DE CALIBRAÇÃO E SENSIBILIDADE TÉRMICA

SENSOR - N0. -----13 ----- DATA -----/-----/----- DELTA - T: 100 ms

H(mm)	1/7/98		2/7/98		2/7/98		2/7/98		5/7/98		MD	D.P.	ER %
	17:05	10:15	11:30	18:00	18:35								
0	0	0	-0.1	-0.1	0	0	0	0	0	0	-0.02	0.042	0
10.1	10.2	10.2	10	10.1	10.1	10.2	10.2	10.2	10.3	10.2	10.17	0.082	0.693
20.2	20.4	20.4	20.2	20.2	20.3	20.3	20.4	20.3	20.4	20.3	20.32	0.079	0.594
30.3	30.5	30.5	30.3	30.4	30.4	30.4	30.5	30.4	30.4	30.4	30.42	0.063	0.396
40.4	40.5	40.6	40.4	40.4	40.5	40.5	40.5	40.4	40.4	40.5	40.47	0.067	0.173
50.5	50.6	50.7	50.5	50.5	50.6	50.6	50.7	50.6	50.6	50.6	50.6	0.067	0.198
60.6	60.7	60.8	60.6	60.7	60.7	60.7	60.8	60.7	60.8	60.8	60.73	0.067	0.215
70.7	70.8	70.9	70.7	70.8	70.8	70.8	70.9	70.8	71	70.9	70.84	0.084	0.198
80.8	80.9	80.9	80.8	80.9	80.9	80.9	81	81	81	80.9	80.92	0.063	0.149
90.9	91	91.1	90.9	91	91	91	91.1	91	91	91.1	91.02	0.063	0.132
101	101.2	101.2	101.1	101.1	101.2	101.2	101.2	101.1	101.2	101.1	101.2	0.052	0.158
111.1	111.3	111.3	111.3	111.3	111.4	111.4	111.4	111.4	111.4	111.4	111.4	0.052	0.234
121.2	121.3	121.3	121.2	121.3	121.4	121.4	121.4	121.4	121.3	121.4	121.3	0.07	0.116
131.3	131.4	131.4	131.3	131.3	131.5	131.5	131.4	131.5	131.4	131.5	131.4	0.079	0.091
141.4	141.5	141.5	141.4	141.4	141.5	141.6	141.5	141.5	141.6	141.5	141.5	0.067	0.071
151.5	151.6	151.6	151.6	151.5	151.7	151.7	151.6	151.6	151.7	151.7	151.6	0.067	0.086

H(mm)	7/7/98		8/7/98		9/7/98		15/7/98		15/7/98		MD	D.P.	ER %
	12:00	11:45	16:35	11:35	14:35								
0	0	0	0	0.1	0	0	0	0.1	0	0	0.02	0.042	0
10.1	10.3	10.3	10.2	10.2	10.1	10.2	10.3	10.3	10.2	10.2	10.23	0.067	1.287
20.2	20.3	20.3	20.3	20.2	20.2	20.2	20.4	20.4	20.3	20.3	20.29	0.074	0.446
30.3	30.4	30.4	30.4	30.4	30.2	30.3	30.5	30.6	30.4	30.4	30.4	0.105	0.33
40.4	40.6	40.6	40.5	40.5	40.4	40.4	40.8	40.8	40.4	40.5	40.55	0.151	0.371
50.5	50.6	50.6	50.7	50.6	50.4	50.4	50.8	50.8	50.6	50.6	50.61	0.137	0.218
60.6	60.8	60.8	60.8	60.7	60.6	60.6	61	61	60.8	60.8	60.79	0.137	0.314
70.7	70.9	70.9	70.8	70.7	70.7	70.7	71.2	71.2	70.9	70.9	70.89	0.185	0.269
80.8	81	81	80.9	80.9	80.8	80.8	81.3	81.3	81	81	81	0.176	0.248
90.9	91.1	91.1	91	91	90.9	90.9	91.4	91.5	91	91.1	91.1	0.2	0.22
101	101.2	101.2	101	101	100.8	100.9	101.5	101.6	100.9	101.2	101.1	0.263	0.129
111.1	111.4	111.3	111.2	111.1	110.9	111	111.6	111.7	111.4	111.5	111.3	0.26	0.189
121.2	121.5	121.5	121.4	121.3	121.1	121.1	121.8	121.9	121.5	121.6	121.5	0.263	0.223
131.3	131.6	131.6	131.6	131.5	131.1	131.1	131.8	131.9	131.6	131.6	131.5	0.259	0.183
141.4	141.7	141.7	141.8	141.7	141.3	141.3	142	142.1	141.6	141.6	141.7	0.257	0.198
151.5	151.7	151.7	151.8	151.7	151.3	151.3	152.2	152.2	151.7	151.7	151.7	0.302	0.152

DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE DEFLÚVIO SUPERFICIAL :

TESTE DE CALIBRAÇÃO E SENSIBILIDADE TÉRMICA

SENSOR - N0. ----- 14 ----- DATA -----/-----/----- DELTA - T: 100 ms

H(mm)	1/7/98		2/7/98		2/7/98		2/7/98		5/7/98		MD	D.P.	ER %
	17:15	10:20	11:40	18:05	18:40								
0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0.2	0.03	0.067	0
10.1	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	0	0.99
20.2	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	0	0.495
30.3	30.4	30.4	30.4	30.5	30.5	30.5	30.5	30.4	30.5	30.4	30.45	0.053	0.495
40.4	40.5	40.5	40.6	40.6	40.6	40.6	40.6	40.5	40.6	40.6	40.57	0.048	0.421
50.5	50.6	50.5	50.6	50.6	50.7	50.7	50.7	50.7	50.8	50.7	50.66	0.084	0.317
60.6	60.8	60.8	60.9	60.9	60.9	60.9	60.9	60.9	60.9	61	60.89	0.057	0.479
70.7	70.8	70.9	70.9	70.9	70.9	70.9	71	70.9	71	71	70.92	0.063	0.311
80.8	81	81	81.1	81.1	81.1	81.1	81.1	81.1	81.1	81.1	81.08	0.042	0.347
90.9	91.2	91.1	91.2	91.2	91.2	91.2	91.2	91.2	91.1	91.2	91.18	0.042	0.308
101	101.1	101.1	101.4	101.3	101.3	101.3	101.3	101.3	101.3	101.4	101.3	0.103	0.277
111.1	111.3	111.2	111.5	111.4	111.4	111.4	111.3	111.3	111.4	111.3	111.4	0.085	0.225
121.2	121.5	121.4	121.6	121.6	121.6	121.6	121.5	121.6	121.5	121.6	121.6	0.071	0.289
131.3	131.6	131.5	131.7	131.7	131.7	131.7	131.5	131.5	131.7	131.7	131.6	0.095	0.251
141.4	141.7	141.7	141.9	141.9	141.8	141.8	141.8	141.9	141.9	141.9	141.8	0.082	0.304
151.5	151.7	151.7	151.9	152	151.9	151.9	151.8	151.8	152	151.9	151.9	0.107	0.238

H(mm)	7/7/98		8/7/98		9/7/98		15/7/98		15/7/98		MD	D.P.	ER %
	12:05	11:50	16:40	11:40	14:40								
0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0.01	0.032	0
10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.4	10.4	10.1	10.2	10.17	0.125	0.693
20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.1	20.2	20.4	20.4	20.3	20.3	20.25	0.097	0.248
30.3	30.3	30.4	30.3	30.3	30.2	30.3	30.5	30.5	30.4	30.4	30.36	0.097	0.198
40.4	40.4	40.4	40.4	40.4	40.4	40.4	40.5	40.6	40.5	40.5	40.45	0.071	0.124
50.5	50.5	50.6	50.5	50.5	50.5	50.5	50.6	50.6	50.7	50.7	50.57	0.082	0.139
60.6	60.7	60.7	60.7	60.6	60.6	60.7	60.7	60.8	60.8	60.8	60.71	0.074	0.182
70.7	70.8	70.8	70.8	70.8	70.8	70.8	70.8	70.8	70.8	70.8	70.8	1E-06	0.141
80.8	81	81	80.9	80.9	80.9	80.9	80.8	80.9	80.9	80.9	80.91	0.057	0.136
90.9	91.1	91.1	91.1	91	91	91.1	90.9	90.9	91	91	91.02	0.079	0.132
101	101.1	101.1	101	101	101.1	101.1	100.9	101	101.1	101.2	101.1	0.084	0.059
111.1	111.3	111.3	111.3	111.3	111.2	111.2	111	111	111.2	111.3	111.2	0.12	0.099
121.2	121.5	121.4	121.4	121.4	121.4	121.4	121.1	121.1	121.4	121.4	121.4	0.135	0.124
131.3	131.5	131.5	131.5	131.5	131.5	131.5	131.1	131.2	131.4	131.4	131.4	0.145	0.084
141.4	141.7	141.7	141.7	141.6	141.7	141.7	141.1	141.2	141.6	141.6	141.6	0.222	0.113
151.5	151.8	151.7	151.7	151.8	151.7	151.7	151.2	151.2	151.7	151.7	151.6	0.225	0.079

DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE DEFLÚVIO SUPERFICIAL :

TESTE DE CALIBRAÇÃO E SENSIBILIDADE TÉRMICA

SENSOR - NO. ----- 15 ----- DATA -----/-----/----- DELTA - T: 100 ms

H(mm)	1/7/98		2/7/98		2/7/98		2/7/98		5/7/98		MD	D.P.	ER %
	0	17:20	0	10:25	0.1	11:45	0.1	18:10	0	18:45			
0	0	0	0.1	0.2	0.1	0.1	0	0.1	0	0	0.06	0.07	0
10.1	10.1	10.2	10.3	10.3	10.3	10.3	10.2	10.2	10.1	10.2	10.22	0.079	1.188
20.2	20.2	20.2	20.4	20.4	20.4	20.4	20.3	20.3	20.2	20.2	20.3	0.094	0.495
30.3	30.4	30.4	30.6	30.6	30.6	30.6	30.5	30.5	30.4	30.4	30.5	0.094	0.66
40.4	40.4	40.4	40.6	40.7	40.6	40.6	40.4	40.5	40.4	40.4	40.5	0.115	0.248
50.5	50.5	50.6	50.8	50.8	50.8	50.8	50.6	50.7	50.6	50.6	50.68	0.114	0.356
60.6	60.7	60.7	61	61	60.9	60.9	60.8	60.8	60.7	60.7	60.82	0.123	0.363
70.7	70.8	70.8	71.1	71	71	71	70.9	70.9	70.8	70.8	70.91	0.11	0.297
80.8	80.9	80.9	81.1	81.1	81.1	81.1	81	81	80.9	80.9	81	0.094	0.248
90.9	91	91	91.3	91.3	91.2	91.2	91.1	91.1	91.1	91.1	91.14	0.107	0.264
101	101	101	101.4	101.4	101.3	101.3	101.2	101.2	101.1	101.1	101.2	0.149	0.198
111.1	111.2	111.2	111.5	111.5	111.4	111.4	111.3	111.3	111.2	111.2	111.3	0.123	0.198
121.2	121.4	121.4	121.7	121.7	121.6	121.6	121.5	121.5	121.3	121.2	121.5	0.166	0.239
131.3	131.5	131.5	131.8	131.9	131.8	131.7	131.6	131.6	131.5	131.5	131.6	0.151	0.259
141.4	141.6	141.6	142	142	141.9	141.9	141.8	141.9	141.7	141.7	141.8	0.152	0.29
151.5	151.7	151.8	152.2	152.2	152.1	152.1	152	152	151.9	151.9	152	0.166	0.323

H(mm)	7/7/98		8/7/98		9/7/98		15/7/98		15/7/98		MD	D.P.	ER %
	0	12:10	0	11:55	0	16:45	0.1	11:45	0	14:50			
0	0	0	0	0.1	0	0	0.1	0.2	0	0	0.04	0.07	0
10.1	10.2	10.2	10.2	10.2	10.1	10.2	10.3	10.3	10.2	10.2	10.21	0.057	1.089
20.2	20.3	20.3	20.3	20.2	20.2	20.2	20.4	20.4	20.3	20.3	20.29	0.074	0.446
30.3	30.4	30.4	30.4	30.3	30.3	30.3	30.6	30.6	30.4	30.3	30.4	0.115	0.33
40.4	40.4	40.4	40.5	40.5	40.4	40.4	40.6	40.6	40.5	40.5	40.48	0.079	0.198
50.5	50.5	50.6	50.5	50.6	50.5	50.5	50.8	50.8	50.7	50.6	50.61	0.12	0.218
60.6	60.7	60.8	60.8	60.6	60.6	60.6	60.9	60.9	60.9	60.9	60.77	0.134	0.281
70.7	70.8	70.8	70.9	70.8	70.6	70.6	71	71	71	71	70.85	0.158	0.212
80.8	80.8	80.9	81	81	80.7	80.7	81.1	81.1	81.1	81	80.94	0.158	0.173
90.9	91	91	91	90.9	90.8	90.8	91.3	91.3	91.3	91.3	91.07	0.211	0.187
101	101	101	101	101	100.8	100.9	101.3	101.3	101.4	101.3	101.1	0.205	0.099
111.1	111.2	111.2	111.1	111.1	110.9	110.9	111.5	111.5	111.6	111.5	111.3	0.259	0.135
121.2	121.3	121.3	121.1	121.1	121.1	121	121.7	121.7	121.6	121.6	121.4	0.276	0.124
131.3	131.5	131.5	131.4	131.4	131.2	131.2	131.9	132	132.1	132	131.6	0.346	0.244
141.4	141.6	141.6	141.5	141.4	141.1	141.2	142.2	142.2	142.3	142.2	141.7	0.455	0.233
151.5	151.7	151.7	151.6	151.5	151.3	151.3	152.3	152.3	152.5	152.4	151.9	0.467	0.238

DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE DEFLÚVIO SUPERFICIAL :

TESTE DE CALIBRAÇÃO E SENSIBILIDADE TÉRMICA

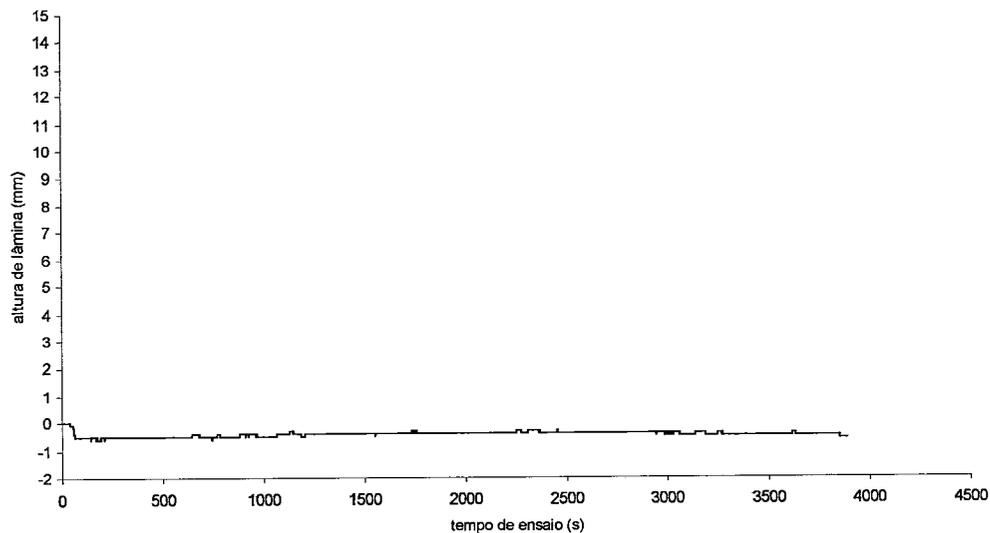
SENSOR - N0. ----- 16 ----- DATA -----/-----/----- DELTA - T: 100 ms

1/7/98 2/7/98 2/7/98 2/7/98 5/7/98

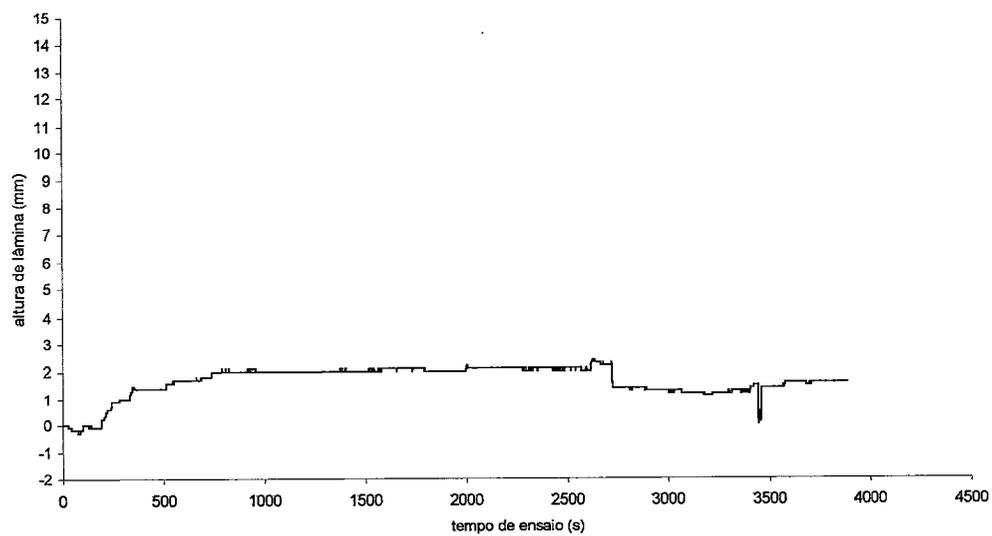
H(mm)	MD	D.P.	ER %
0	#####	#####	0
10.1	#####	#####	#####
20.2	#####	#####	#####
30.3	#####	#####	#####
40.4	#####	#####	#####
50.5	#####	#####	#####
60.6	#####	#####	#####
70.7	#####	#####	#####
80.8	#####	#####	#####
90.9	#####	#####	#####
101	#####	#####	#####
111.1	#####	#####	#####
121.2	#####	#####	#####
131.3	#####	#####	#####
141.4	#####	#####	#####
151.5	#####	#####	#####

ANEXO – 2

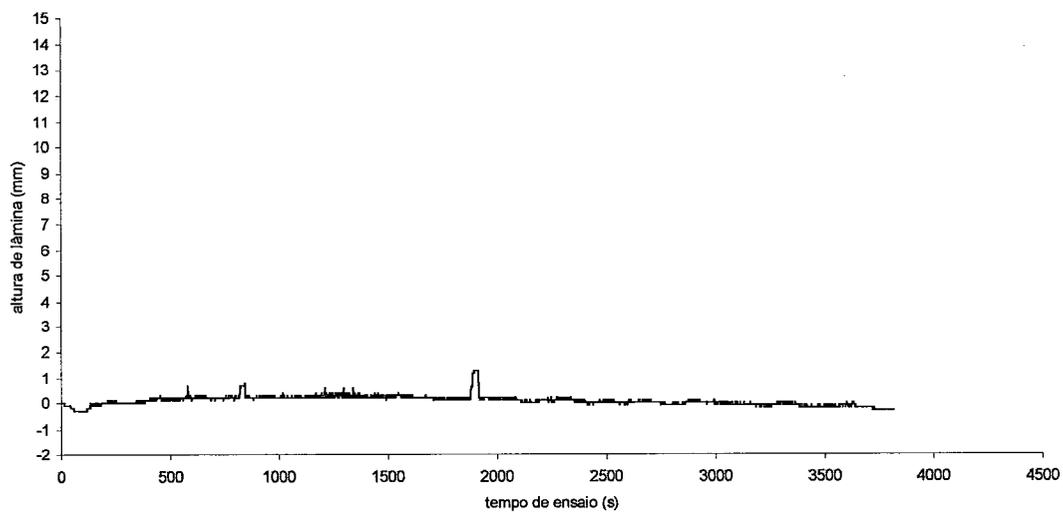
MONITORAMENTO DA ALTURA DO DEFLÚVIO SUPERFICIAL
NO DOMÍNIO EXPERIMENTAL: *Hidrogramas locais de escoamento.*
(Seções: 4, 5, 6, 7, 9)

Seção – 04 / Simulação 06

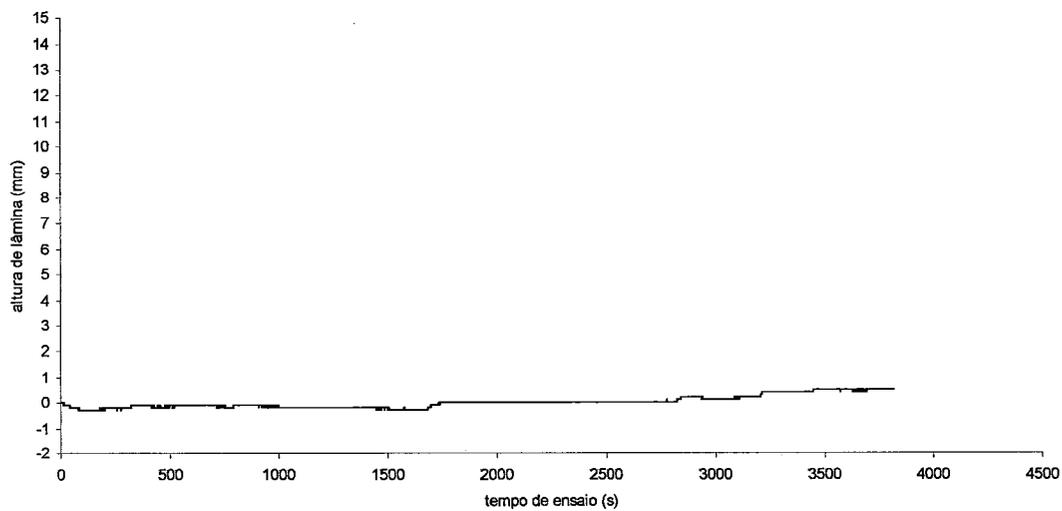
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 04/SR8 - SIMULAC 6



Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 04/SR14 - SIMULAC 6

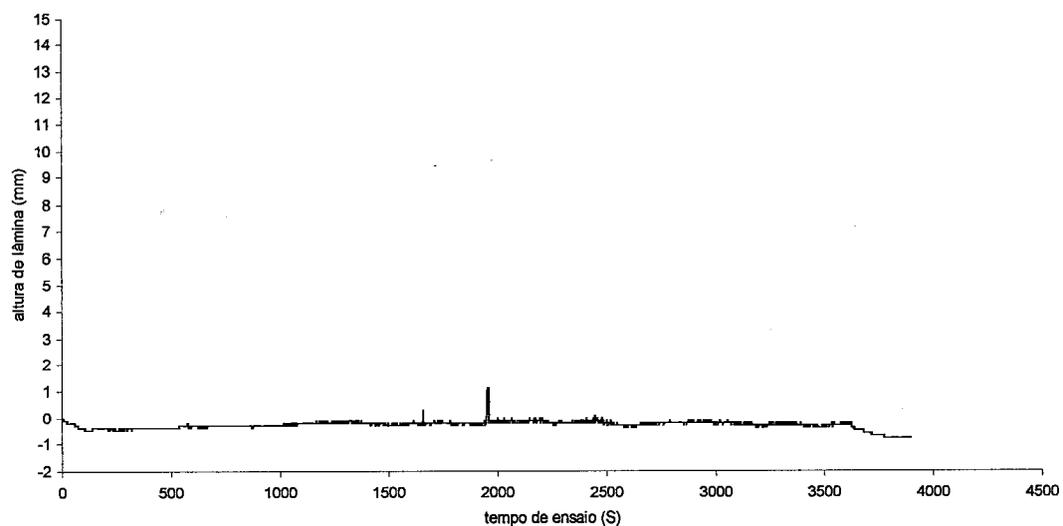
Seção – 04 / Simulação 07

Variação da altura de escoamento no domínio experimental - seção 04/SR8 - SIMULAC 07

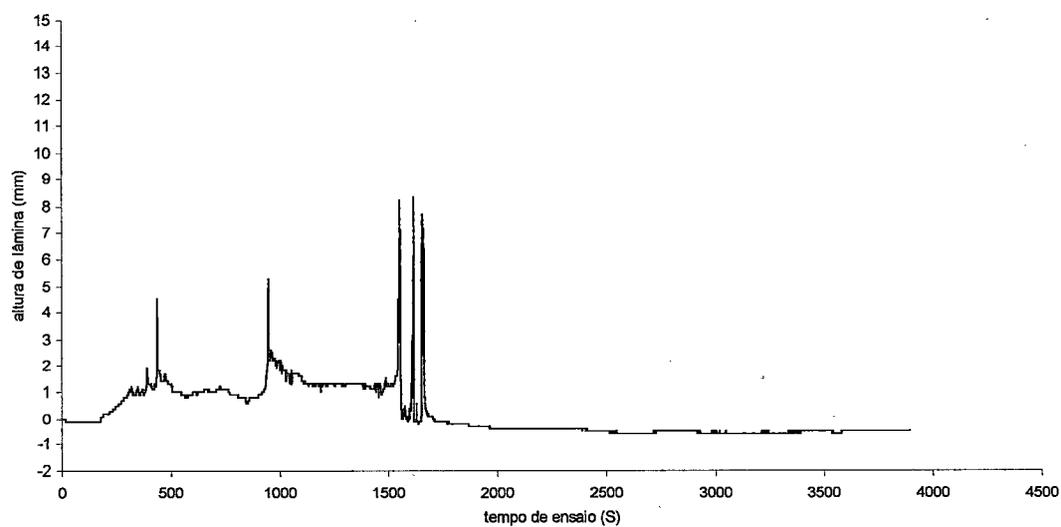


Variação da altura de escoamento no domínio experimental - seção 04/SR14 - SIMULAC 07



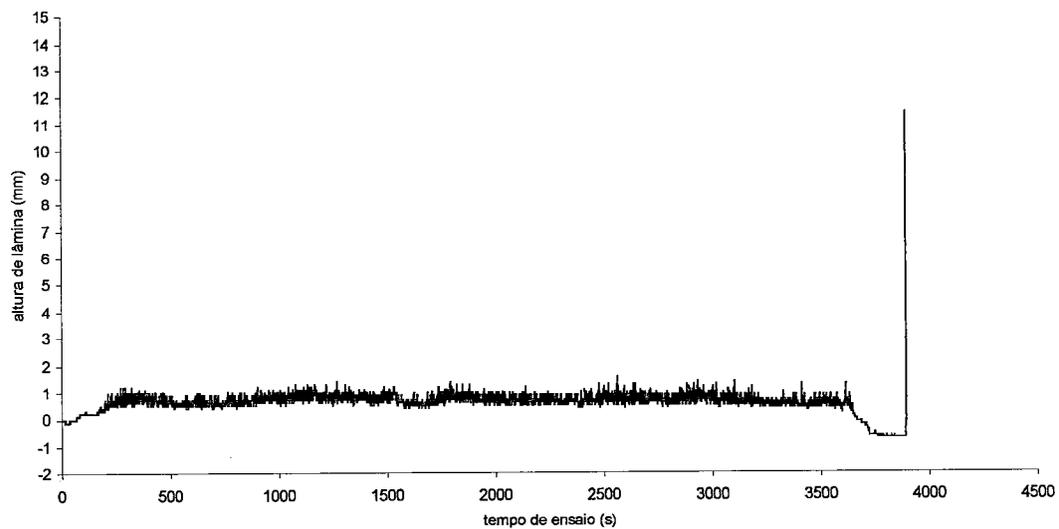
Seção – 04 / Simulação 08

Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 04/SR8 - SIMULAC 08

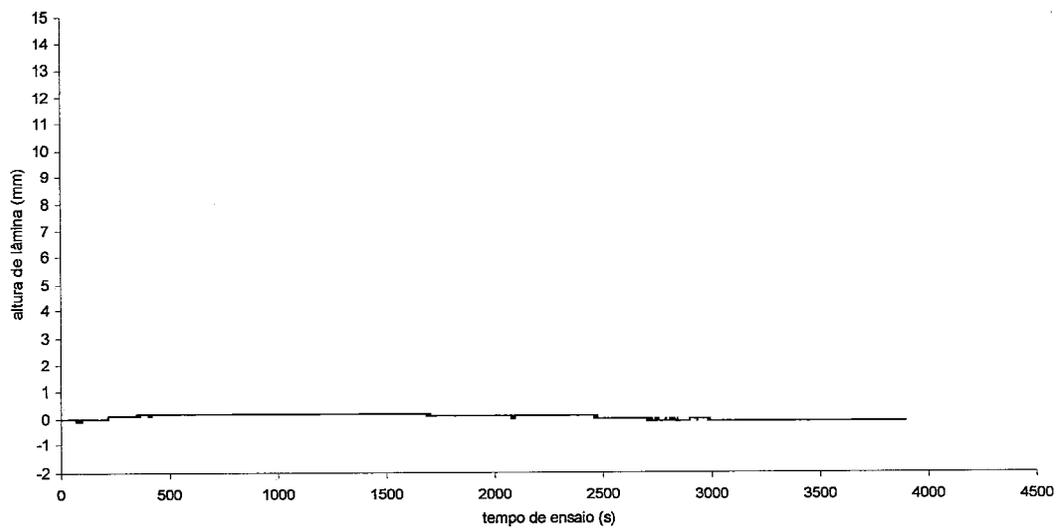


Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 04/SR14 - SIMULAC 08

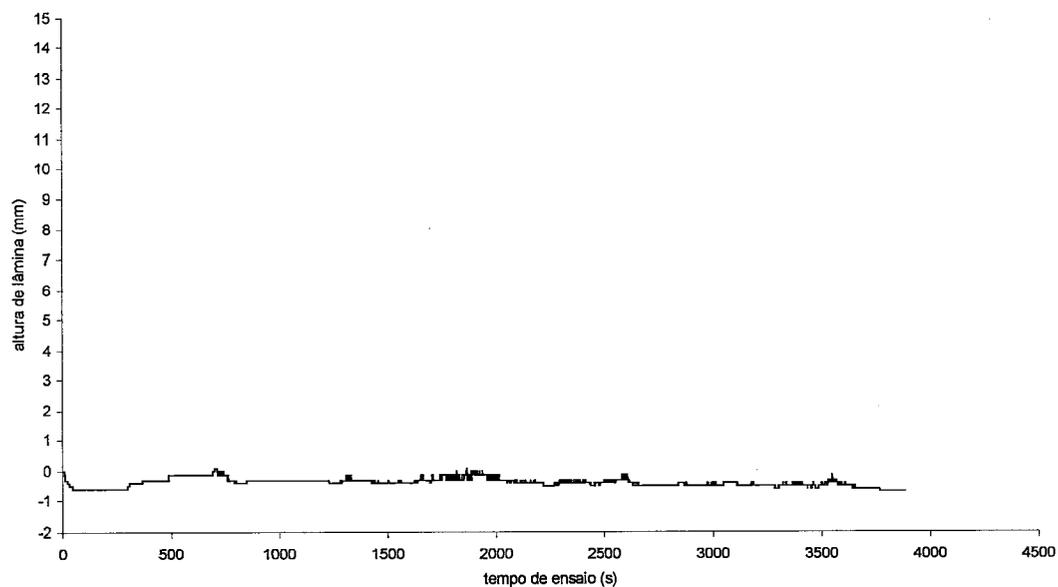
Seção - 04 / Simulação 11



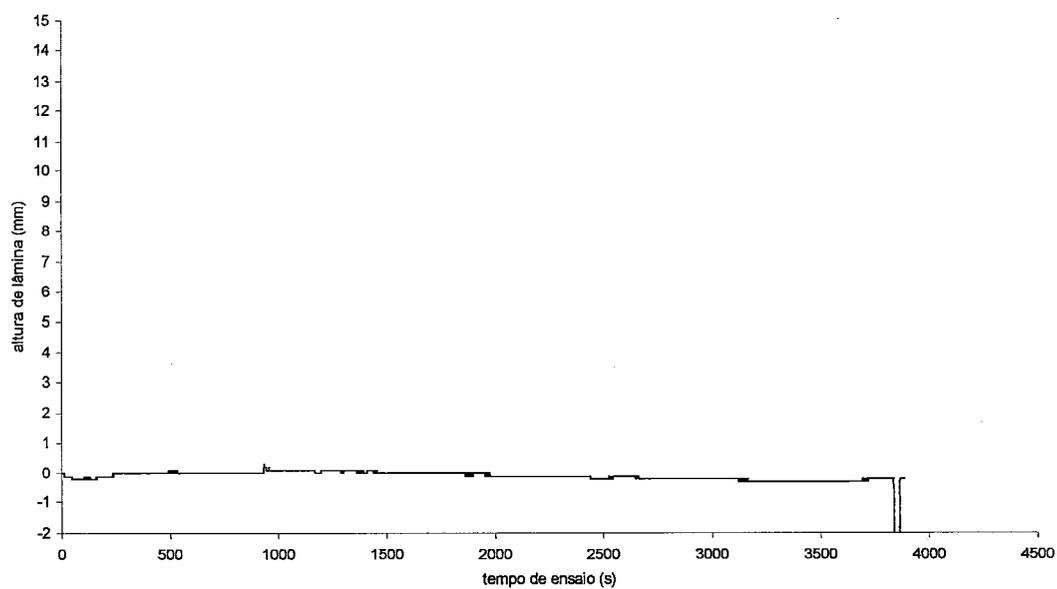
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 04/SR8 - SIMULAC 11



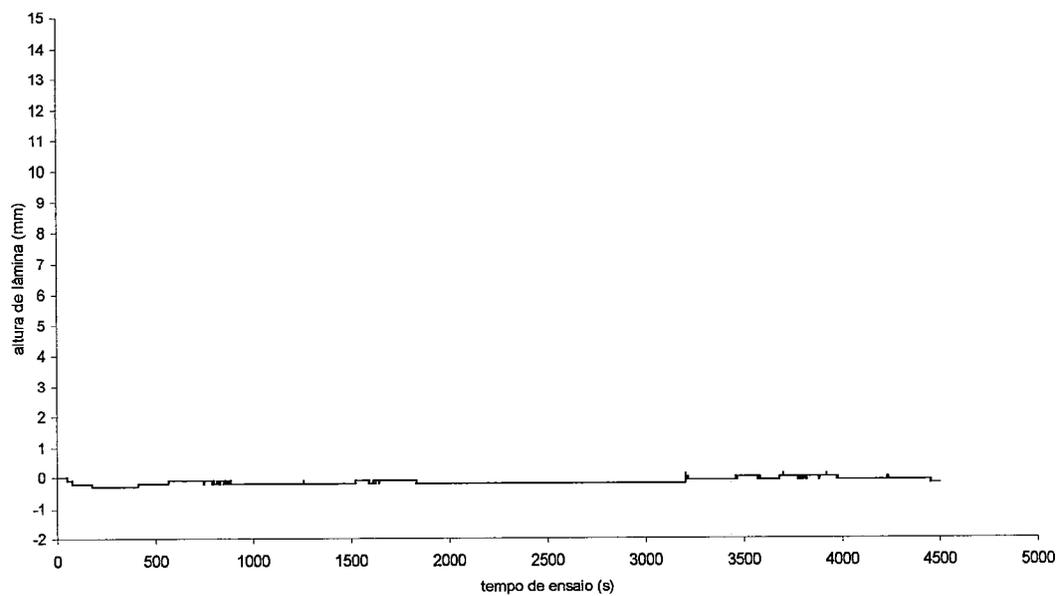
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 04/SR14 - SIMULAC 11

Seção – 04 / Simulação 15

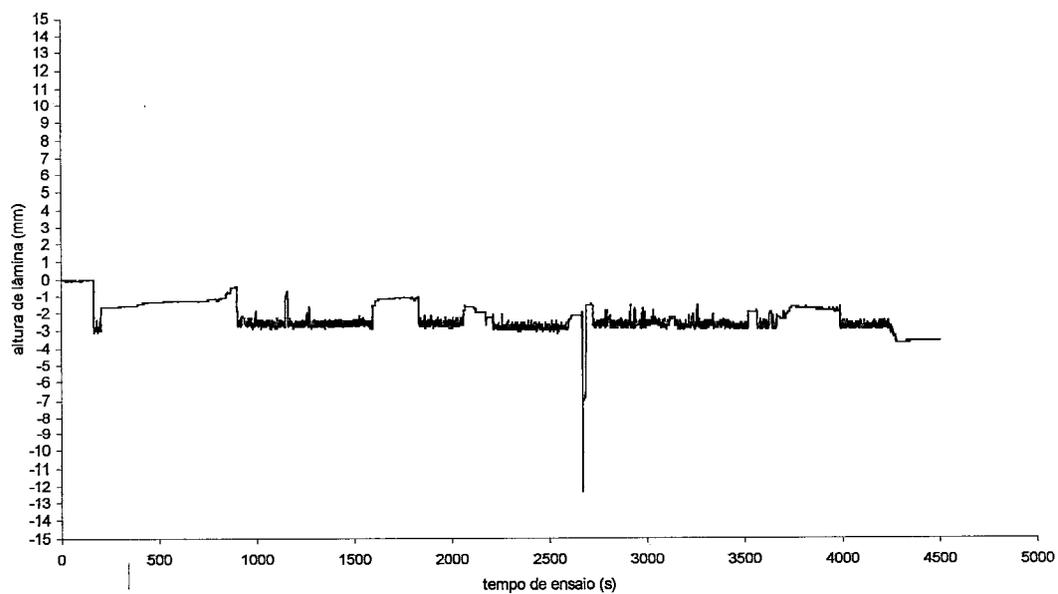
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 04/SR8 - SIMULAC 15



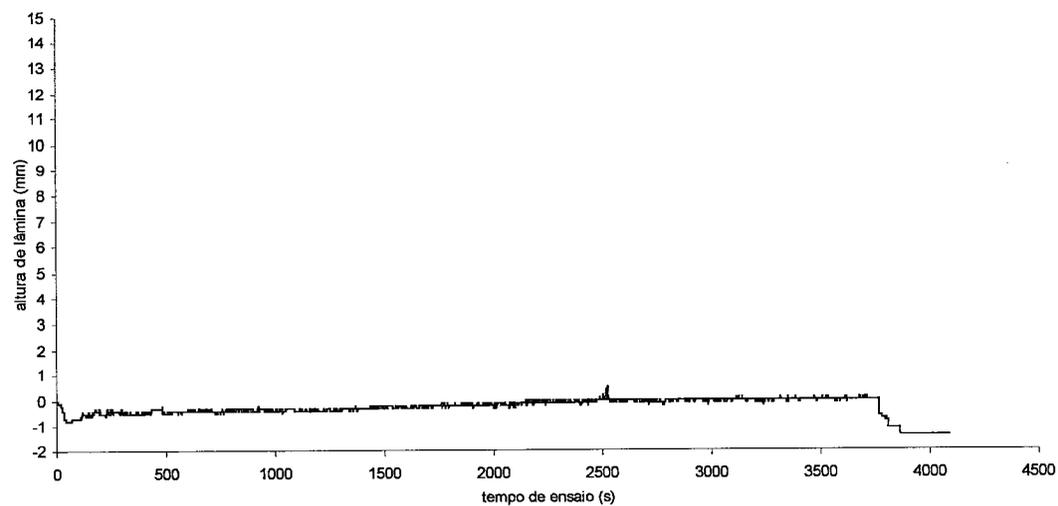
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 04/SR14 - SIMULAC 15

Seção – 04 / Simulação 16

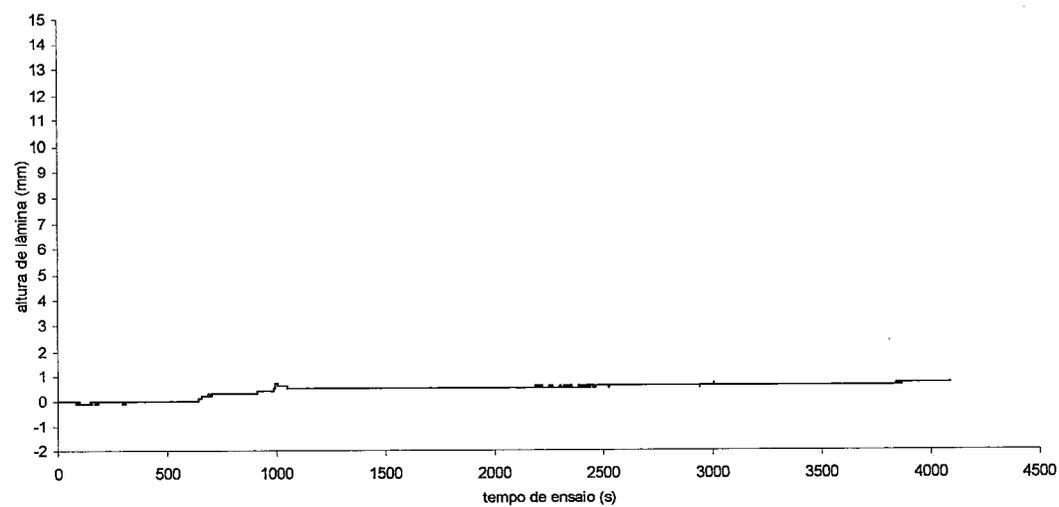
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 04/SR8 - SIMULAC 16



Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 04/SR14 - SIMULAC 16

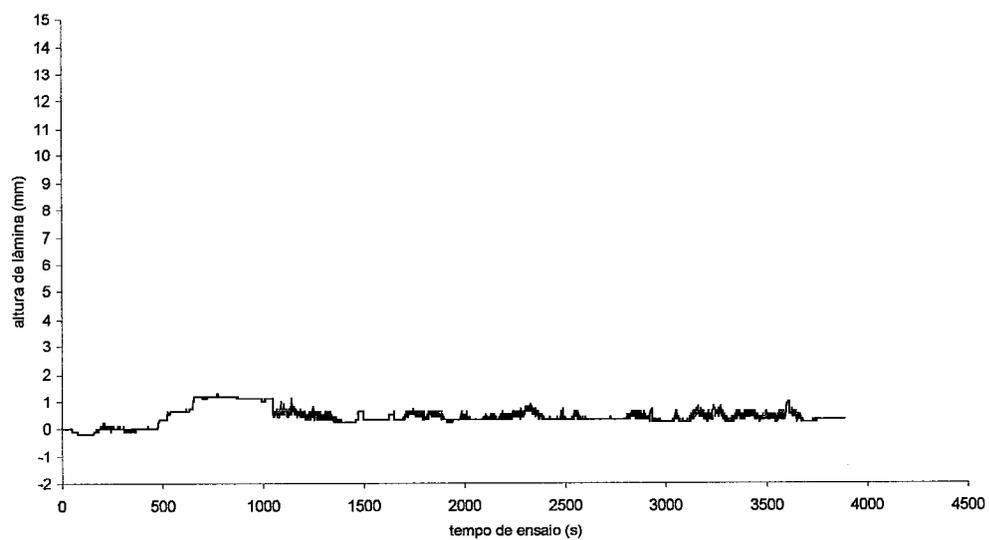
Seção – 04 / Simulação 18

Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 04/SR8 - SIMULAC 18

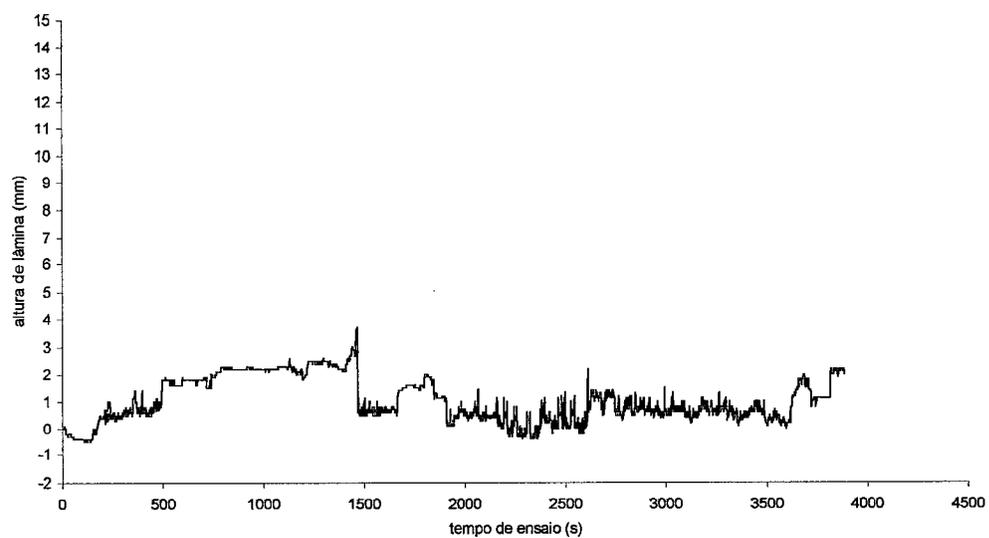


Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 04/SR14 - SIMULAC 18

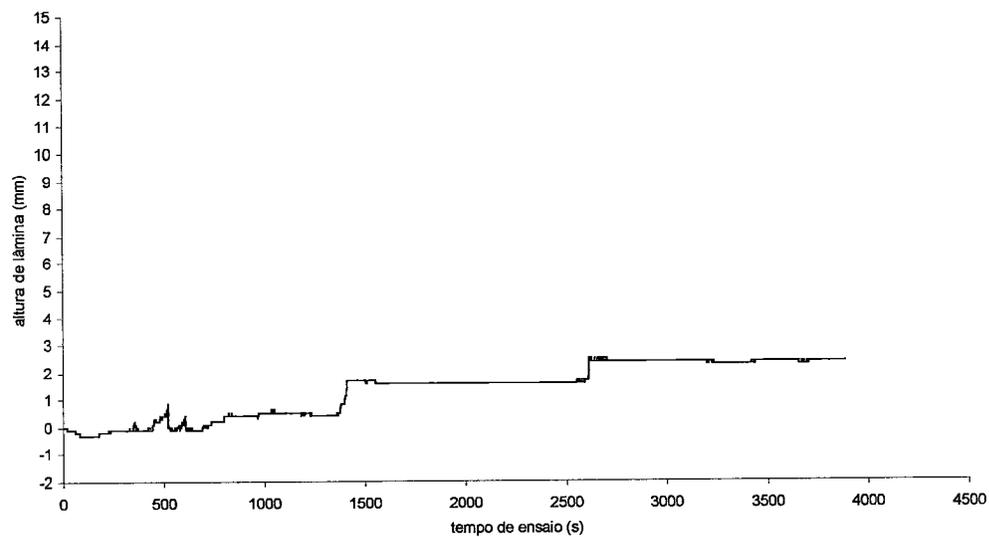
Seção – 05 / Simulação 06



Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 05/SR11 - SIMULAC 6

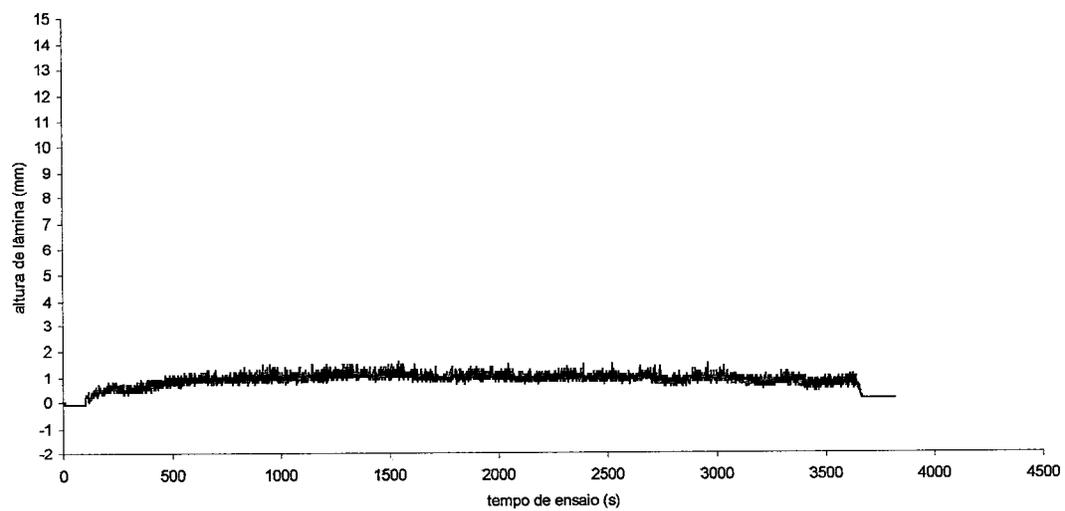


Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 05/SR12 - SIMULAC 6

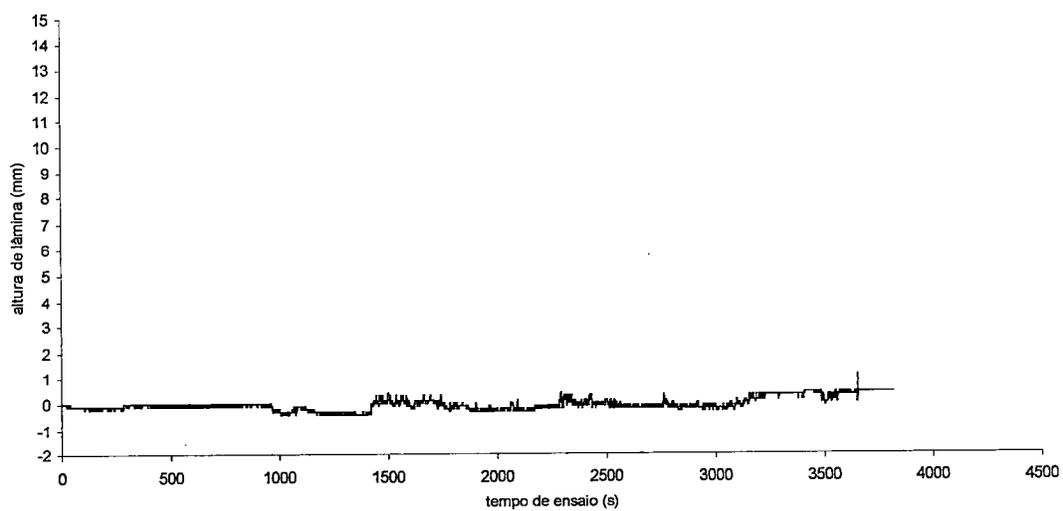


Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 05/SR13 - SIMULAC 6

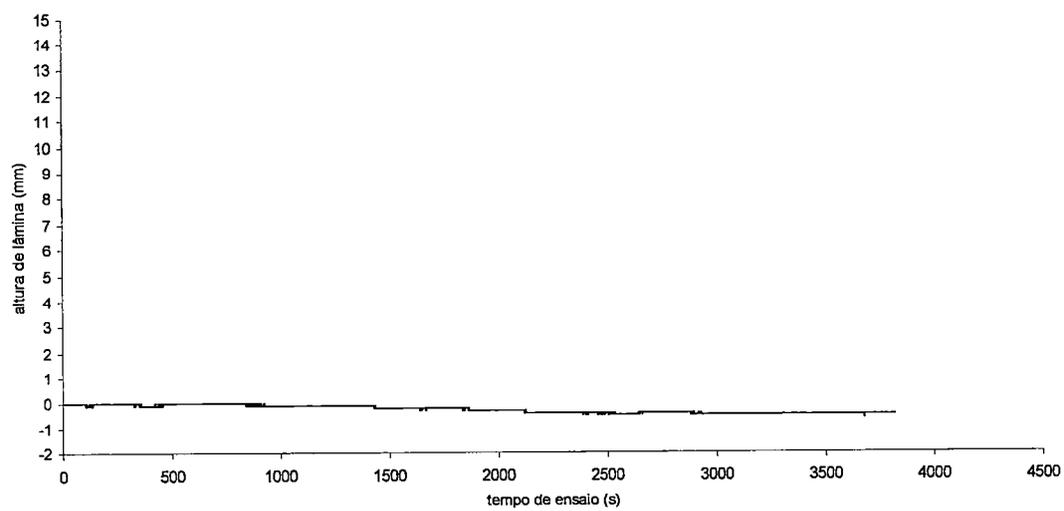
Seção – 05 / Simulação 07



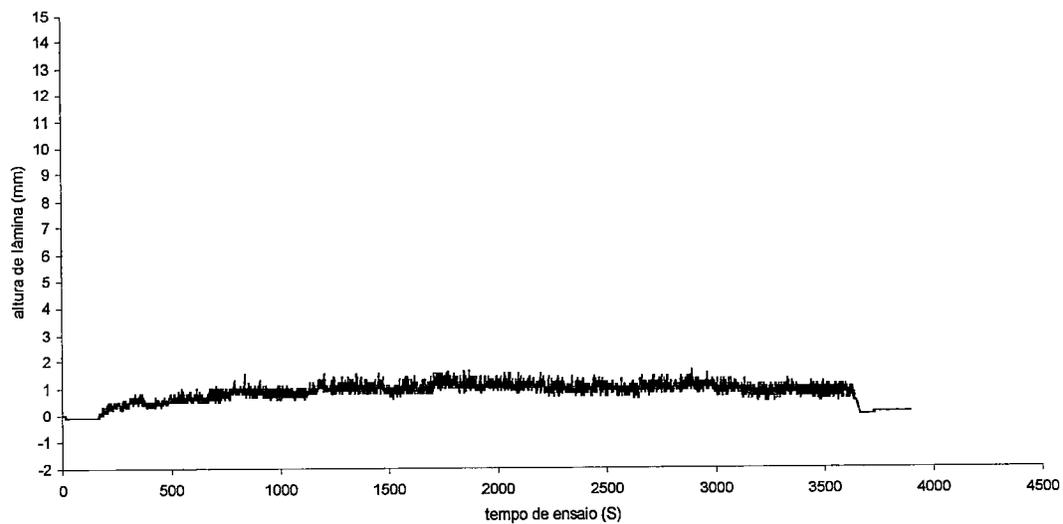
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - seção 05/SR11 - SIMULAC 07



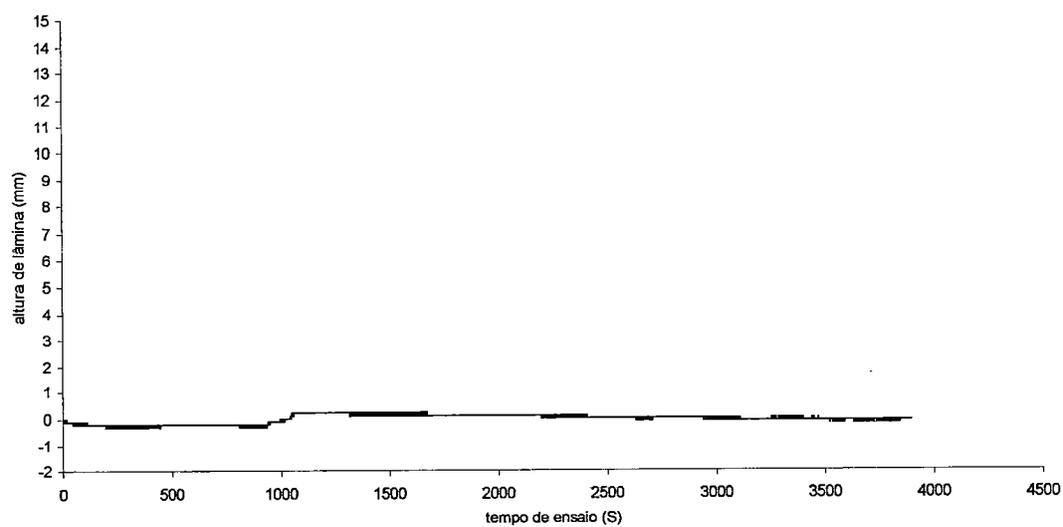
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - seção 05/SR12 - SIMULAC 07



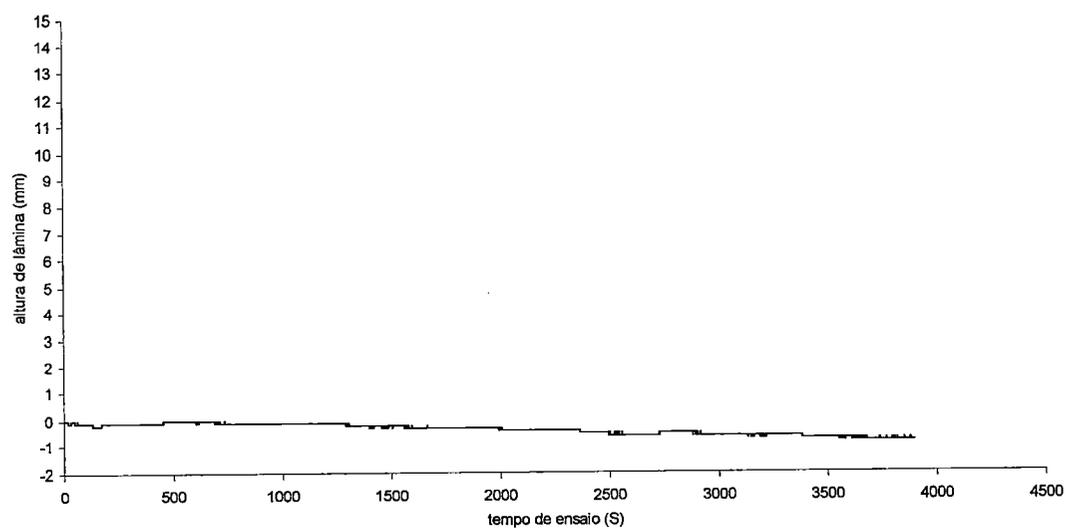
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - seção 05/SR13 - SIMULAC 07

Seção – 05 / Simulação 08

Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 05/SR11 - SIMULAC 08

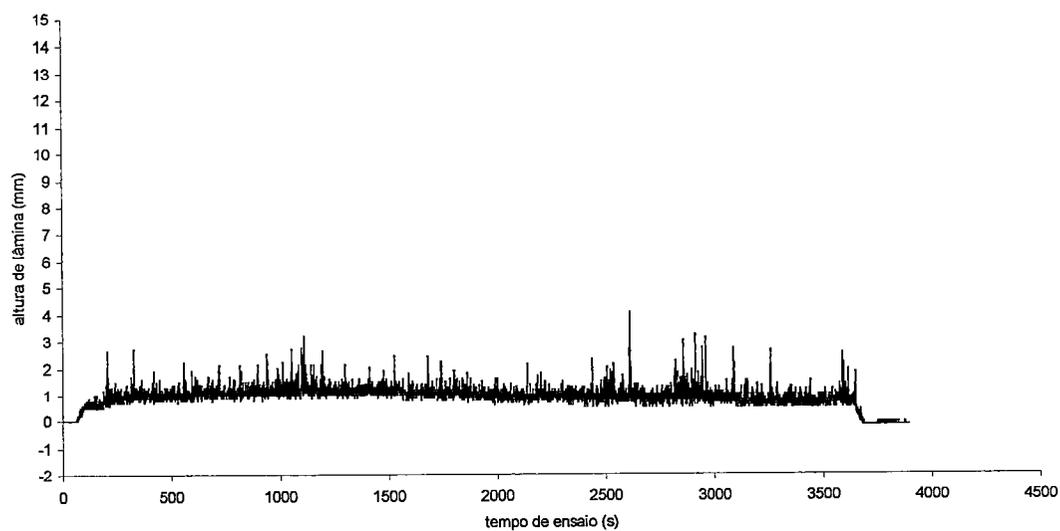


Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 05/SR12 - SIMULAC 08

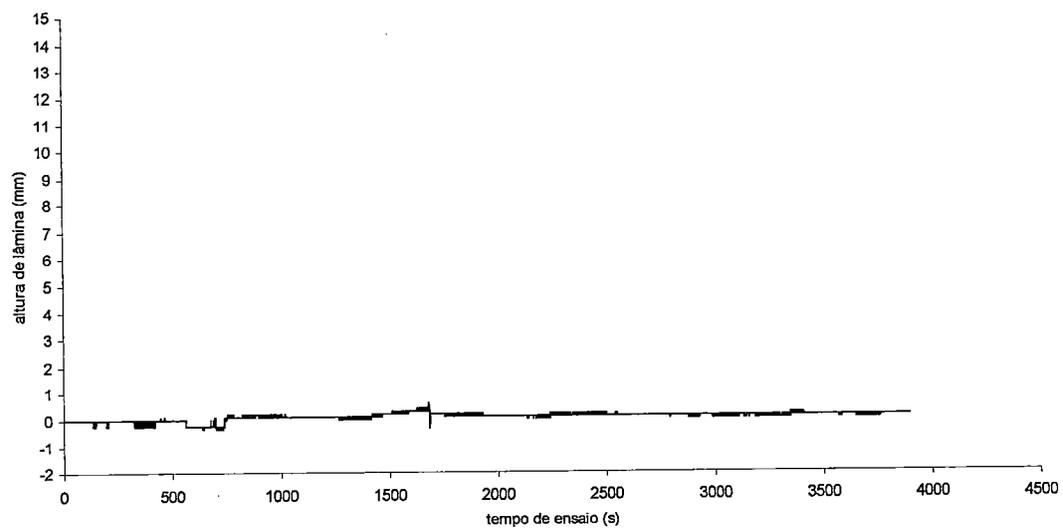


Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 05/SR13 - SIMULAC 08

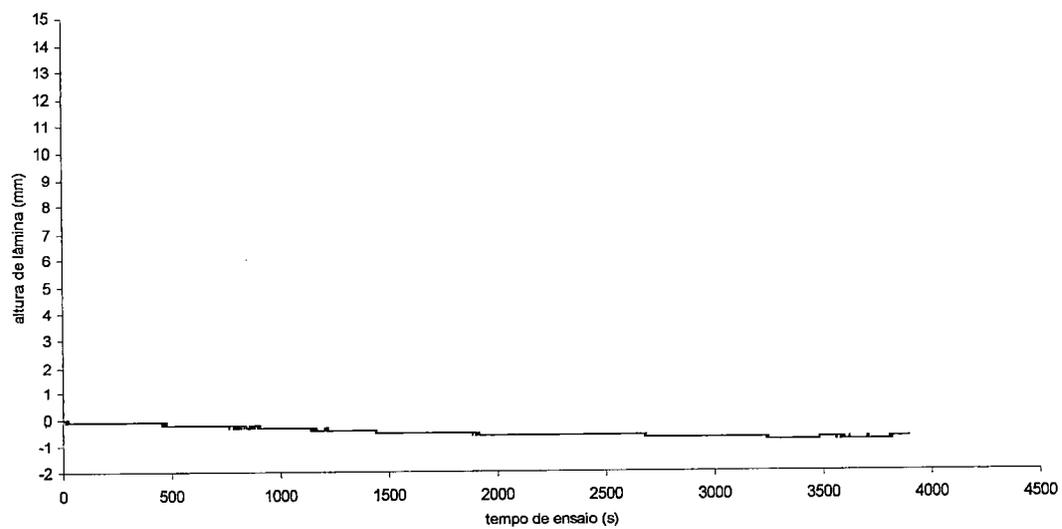
Seção – 05 / Simulação 11



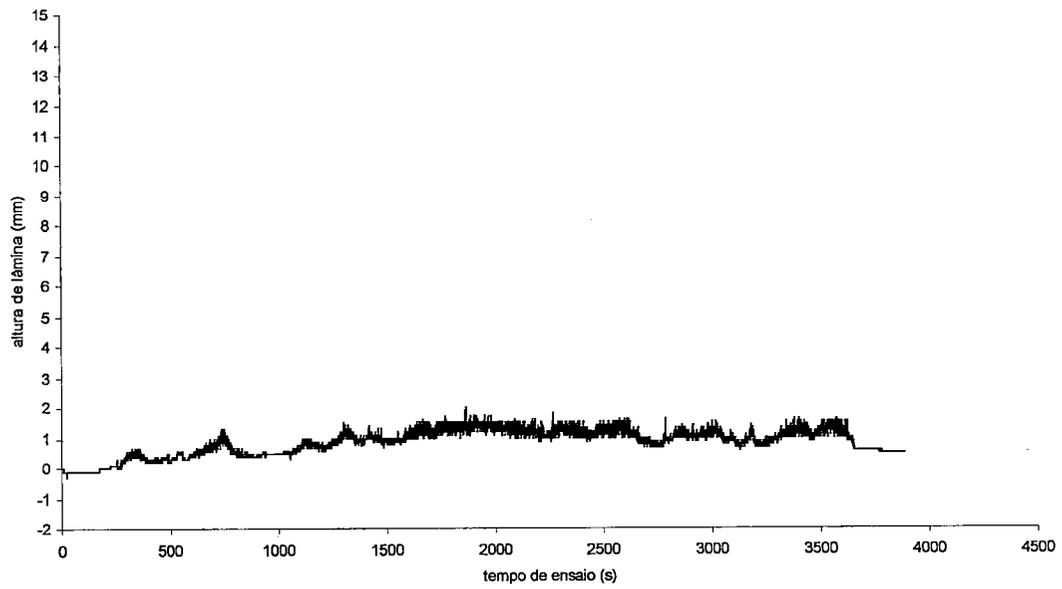
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 05/SR11 - SIMULAC 11



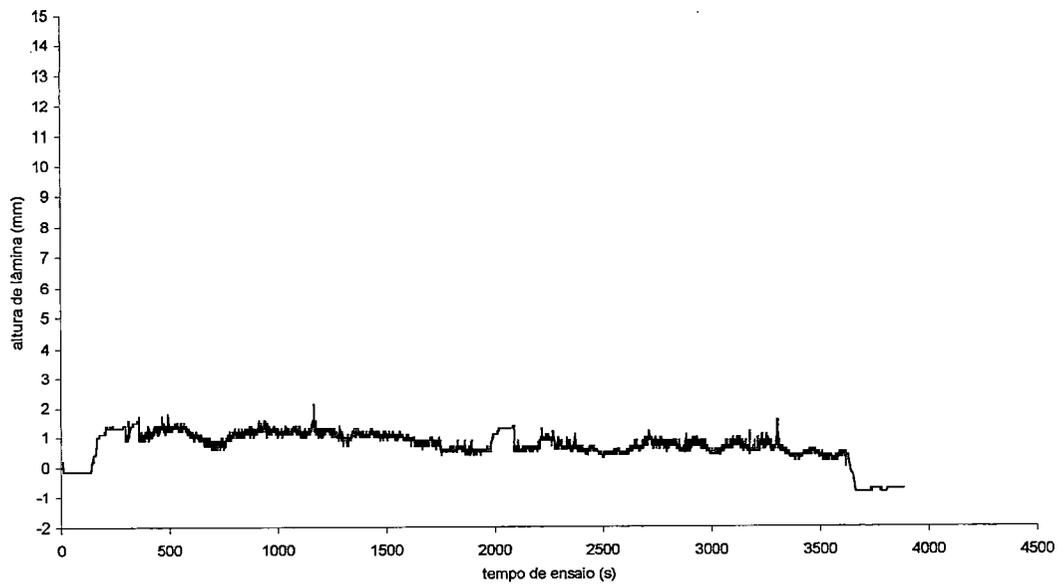
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 05/SR12 - SIMULAC 11



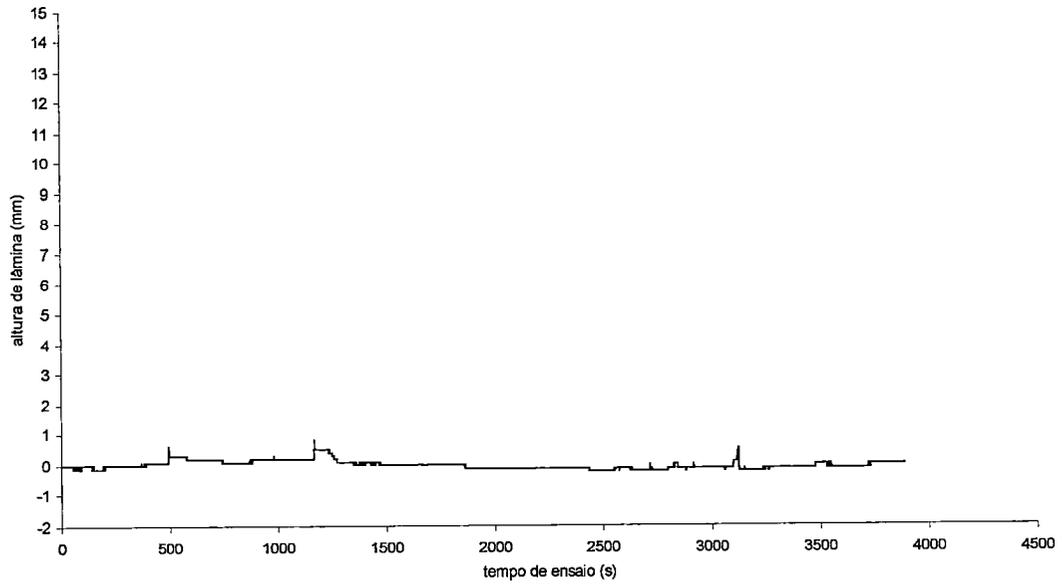
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 05/SR13 - SIMULAC 11

Seção – 05 / Simulação 15

Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 05/SR11 - SIMULAC 15

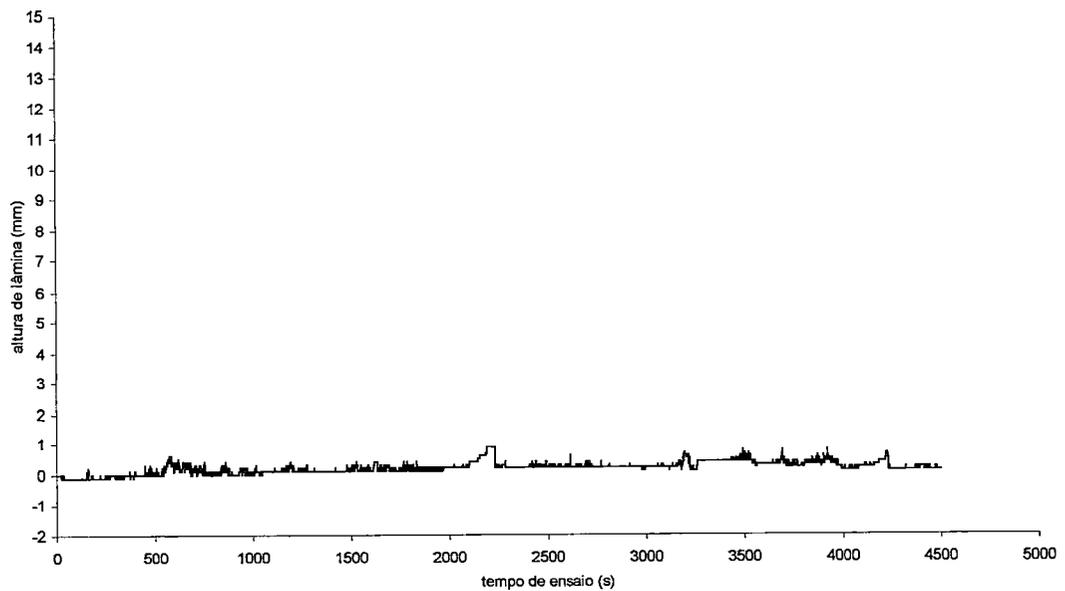


Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 05/SR12 - SIMULAC 15

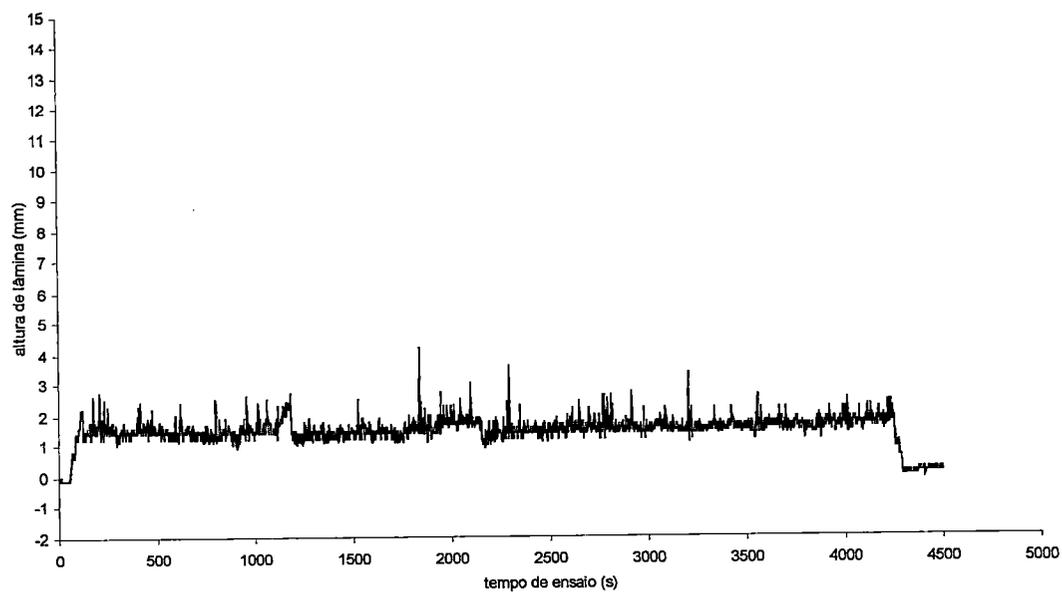


Varição da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 05/SR13 - SIMULAC 15

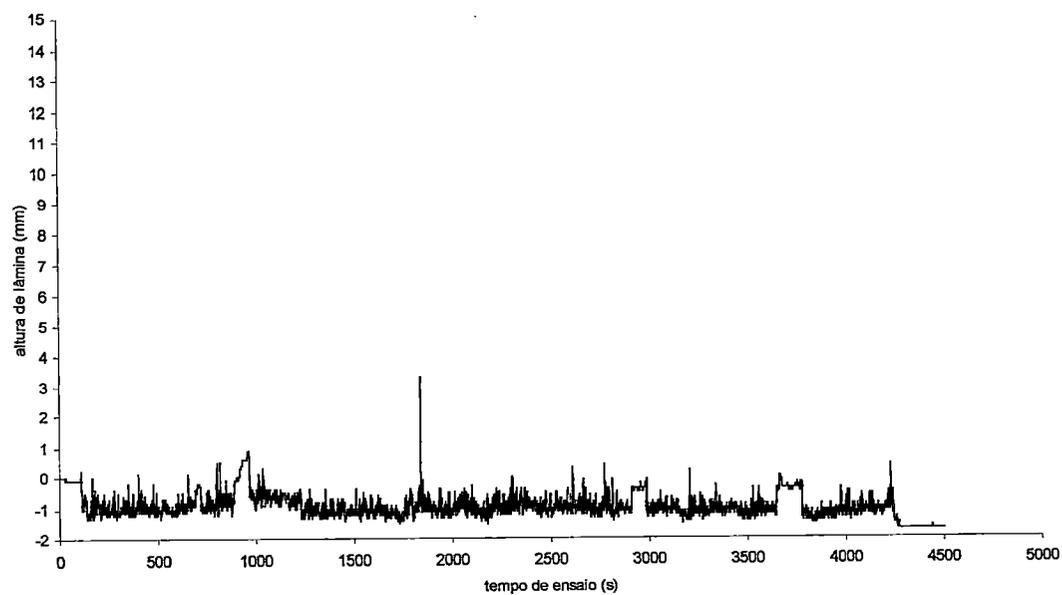
Seção - 05 / Simulação 16



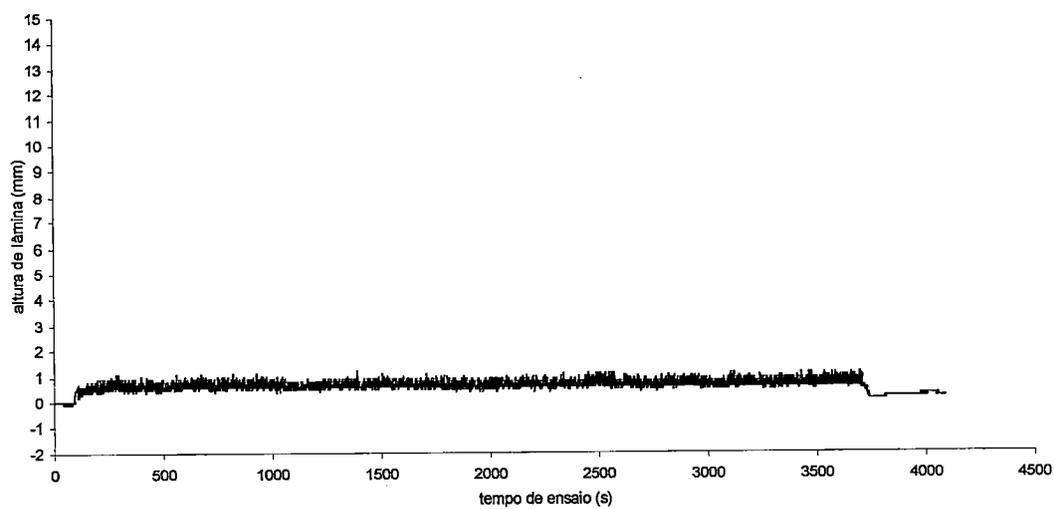
Varição da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 05/SR11 - SIMULAC 16



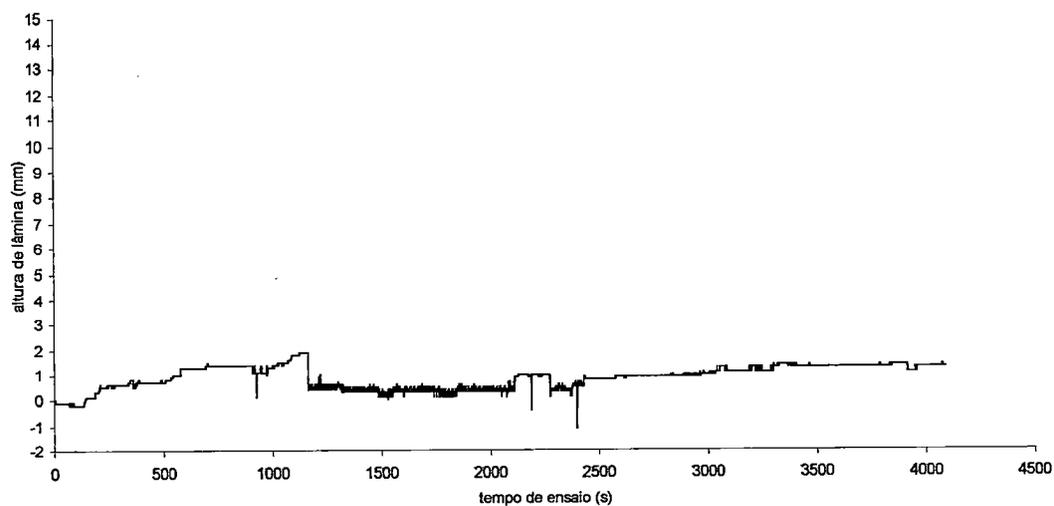
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 05/SR12 - SIMULAC 16



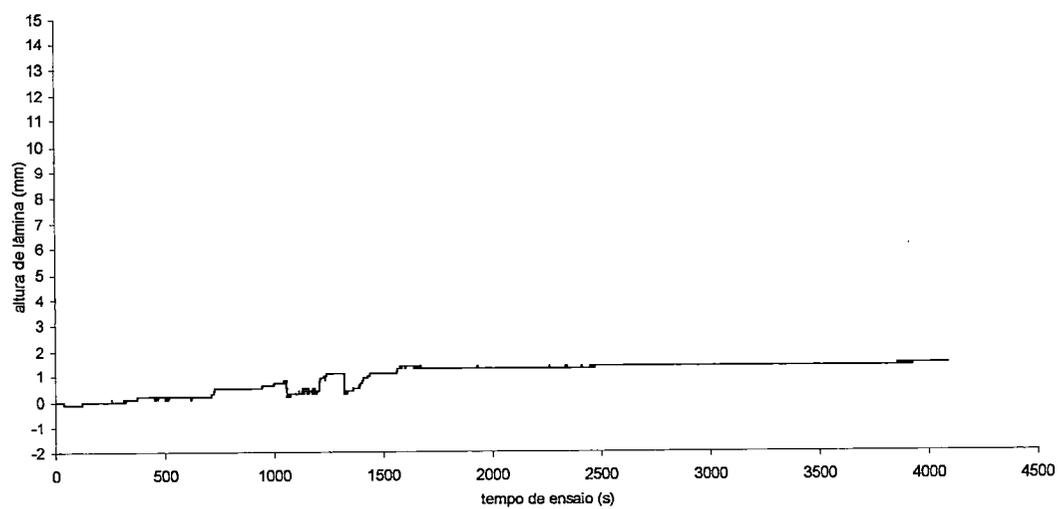
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 05/SR13 - SIMULAC 16

Seção – 05 / Simulação 18

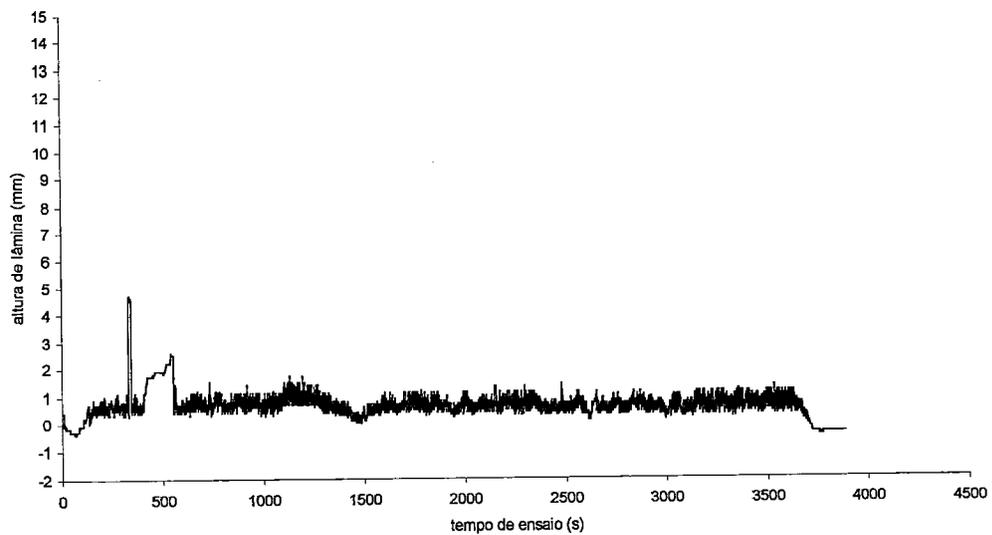
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 05/SR11 - SIMULAC 18



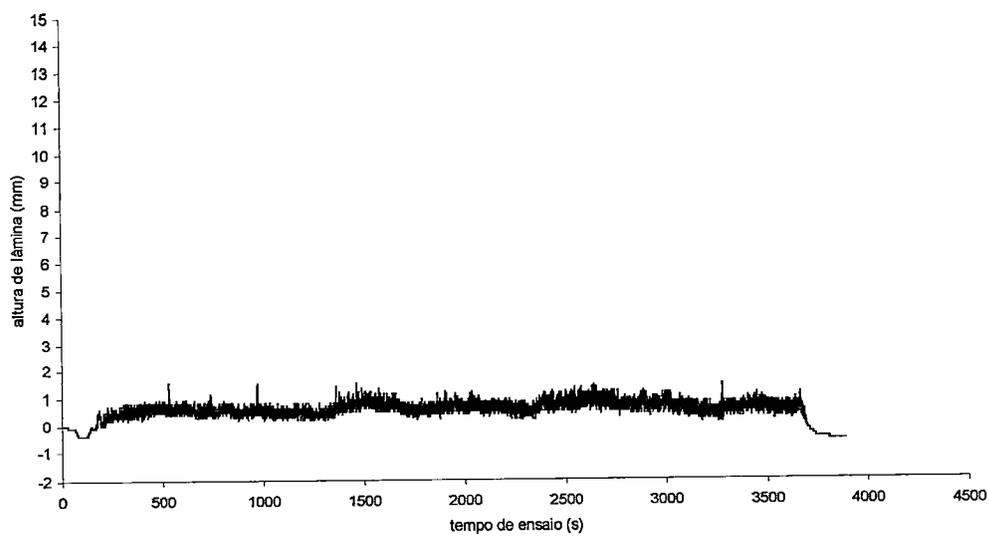
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 05/SR12 - SIMULAC 18



Varição da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 05/SR13 - SIMULAC 18

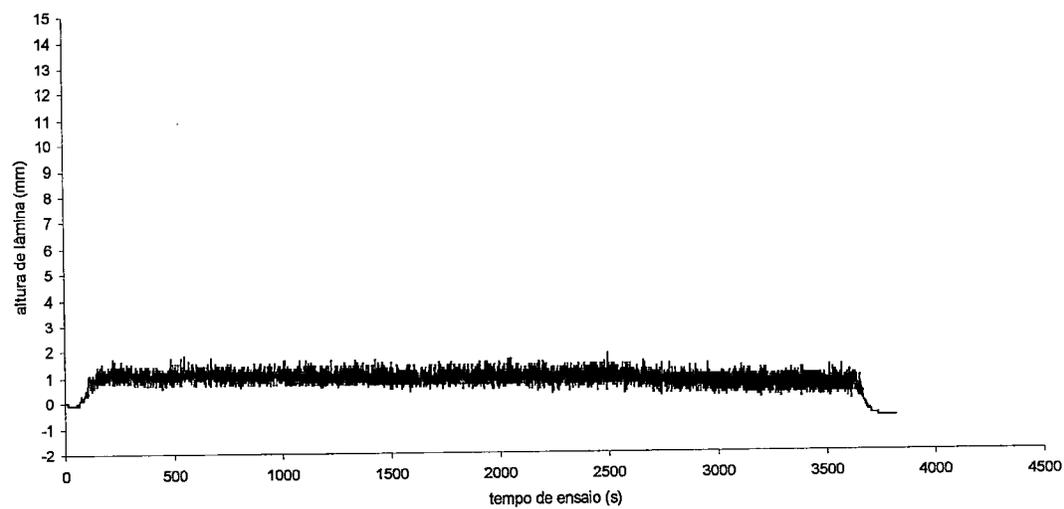
Seção – 6 / Simulação 06

Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 06/SR9 - SIMULAC 6

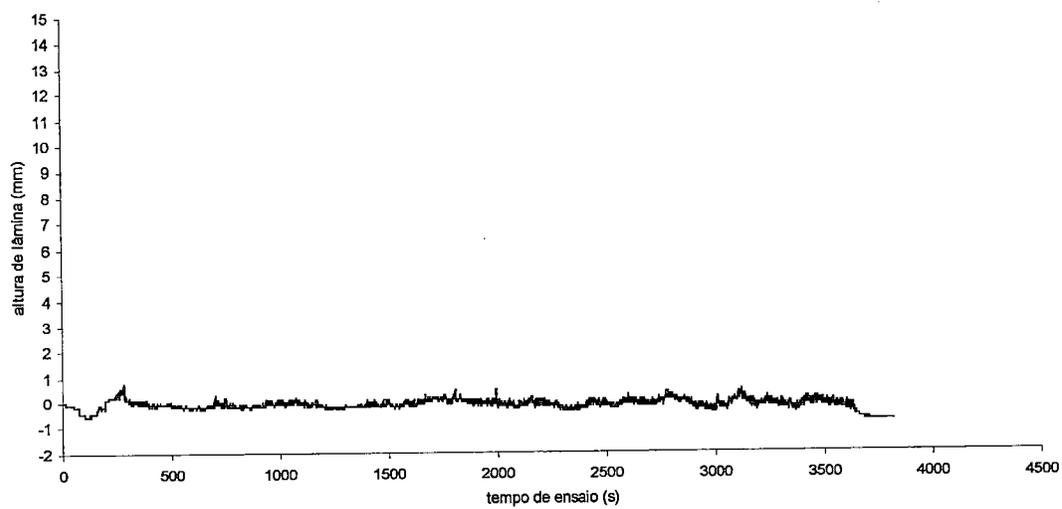


Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 06/SR10 - SIMULAC 6

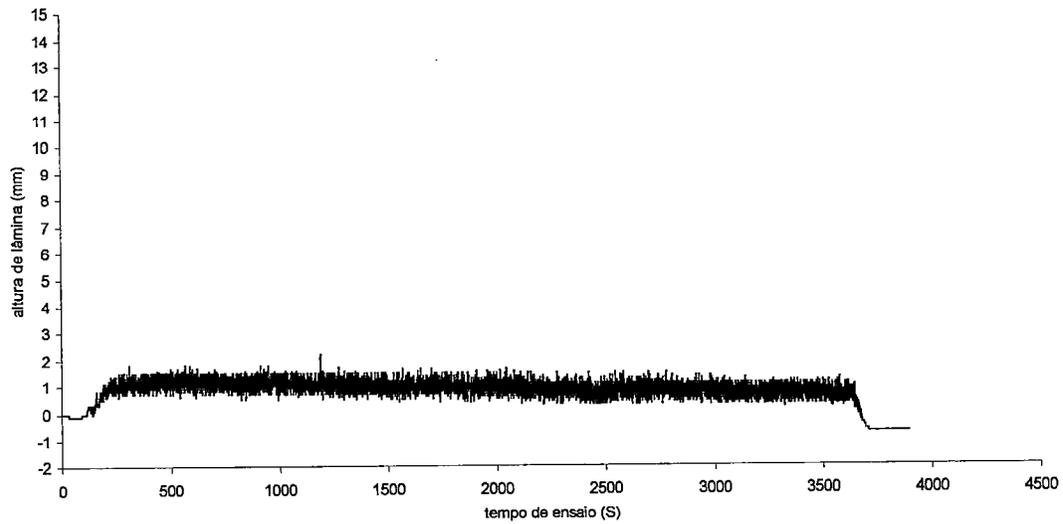
Seção – 06 / Simulação 07



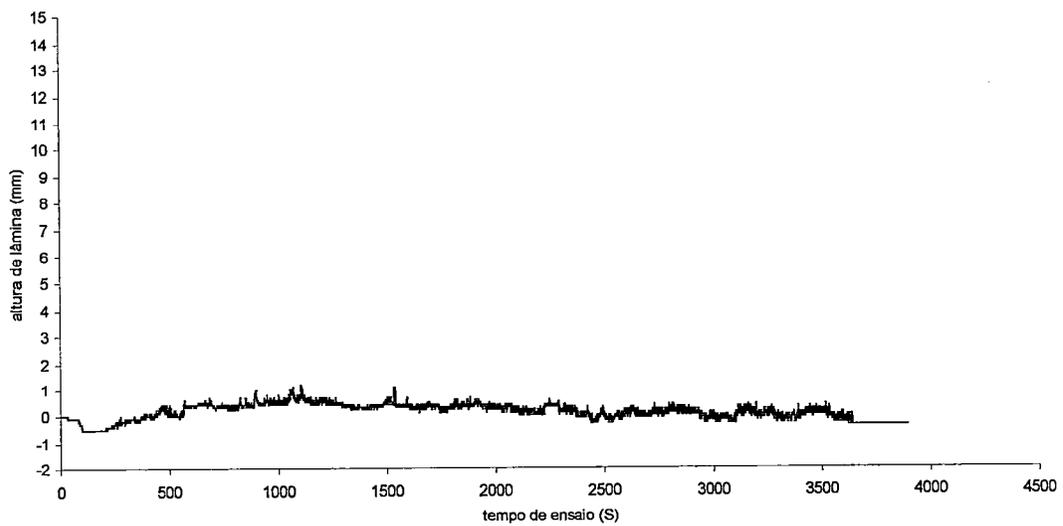
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - seção 06/SR9 - SIMULAC 07



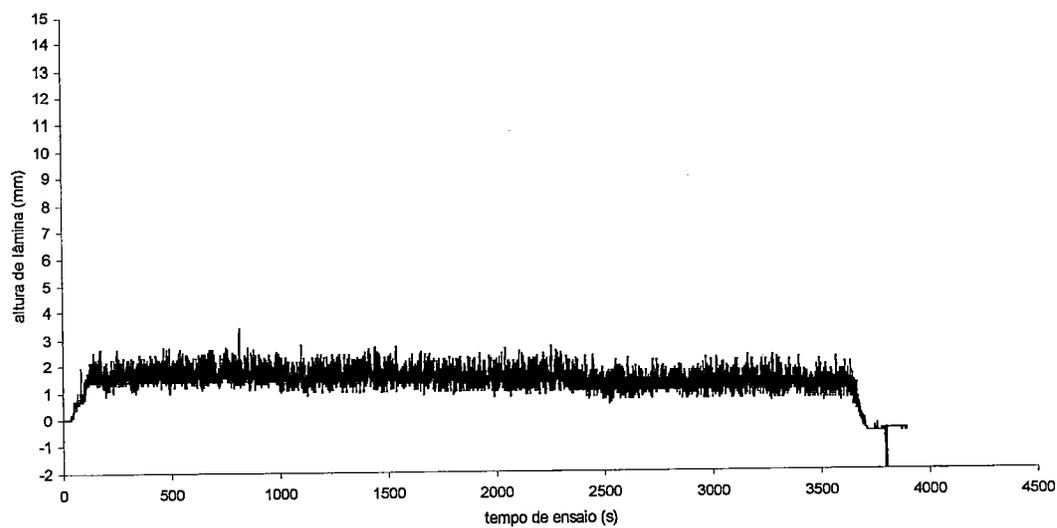
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - seção 06/SR10 - SIMULAC 07

Seção – 06 / Simulação 08

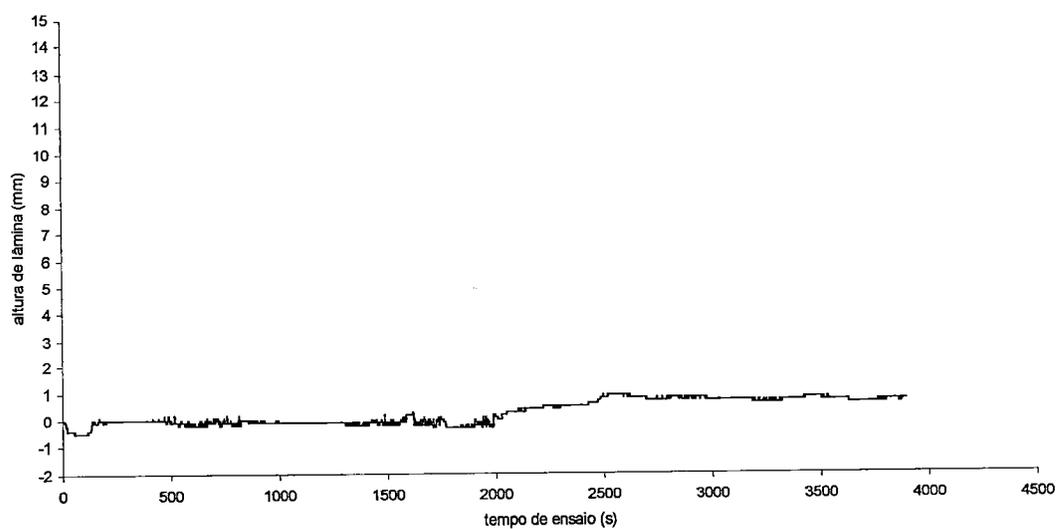
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 06/SR9 - SIMULAC 08



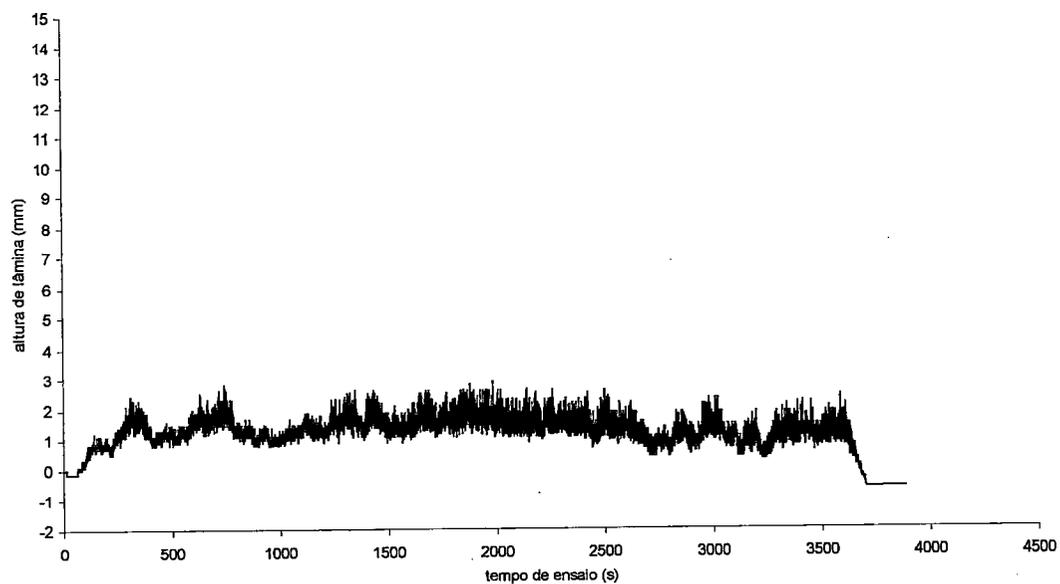
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 06/SR10 - SIMULAC 08

Seção – 06 / Simulação 11

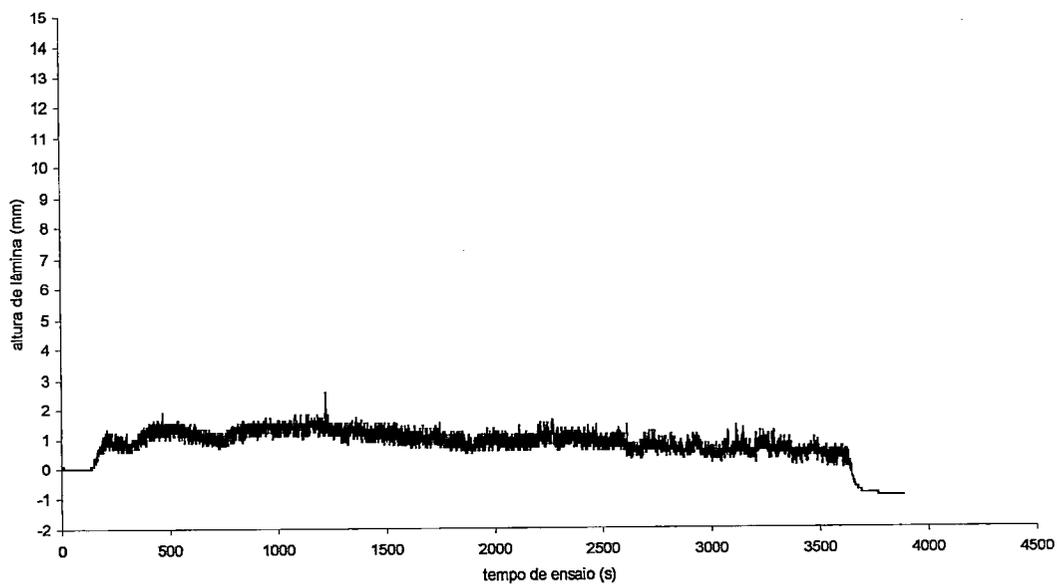
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 06/SR9 - SIMULAC 11



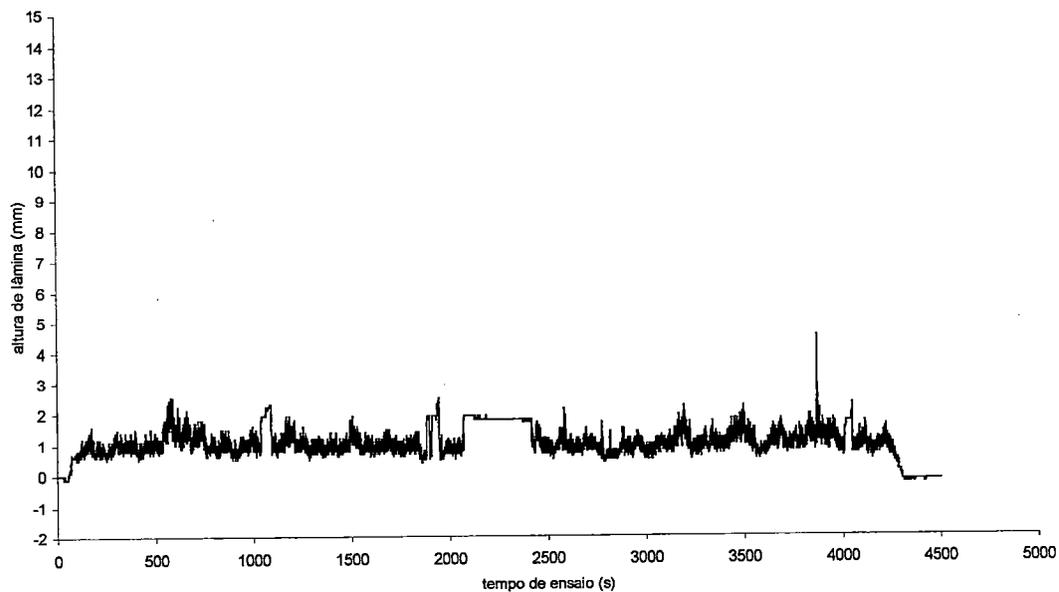
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 06/SR10 - SIMULAC 11

Seção – 06 / Simulação 15

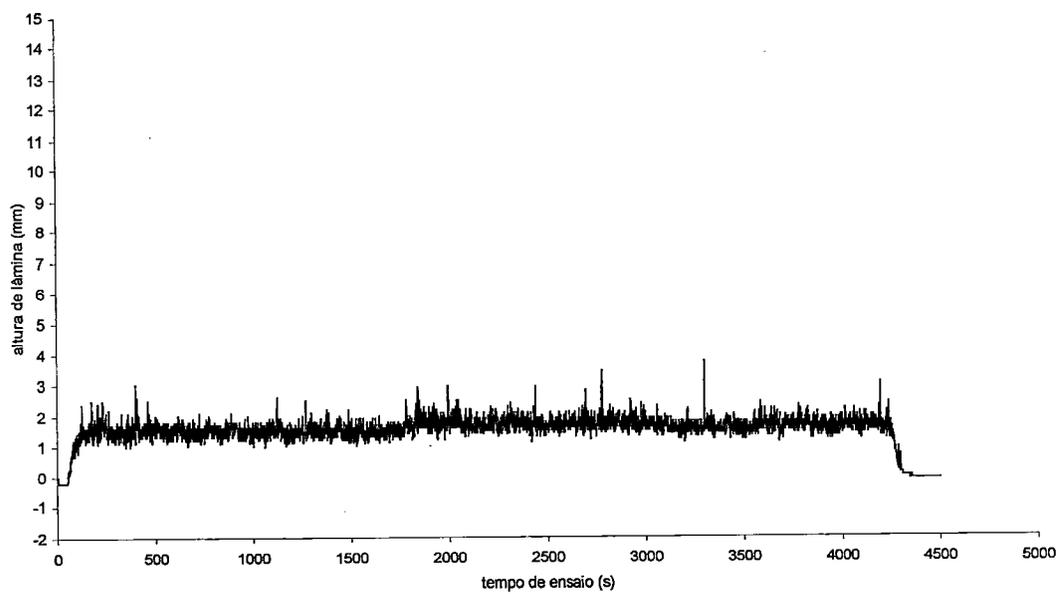
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 06/SR9 - SIMULAC 15



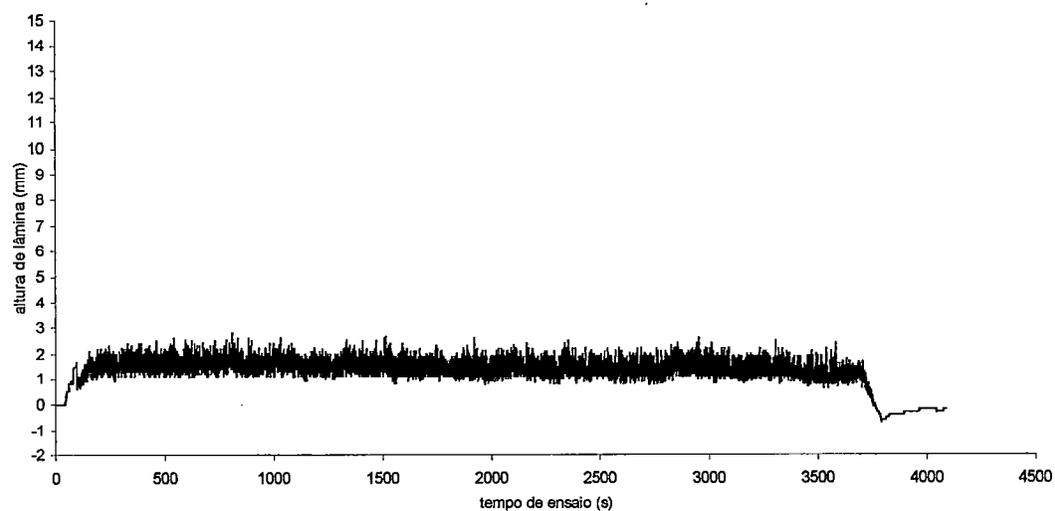
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 06/SR10 - SIMULAC 15

Seção – 06 / Simulação 16

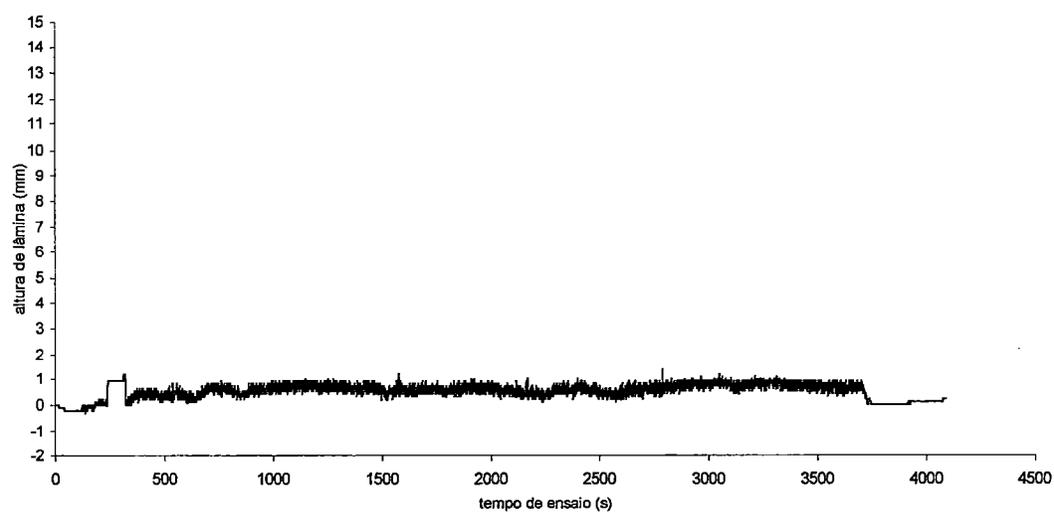
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 06/SR9 - SIMULAC 16



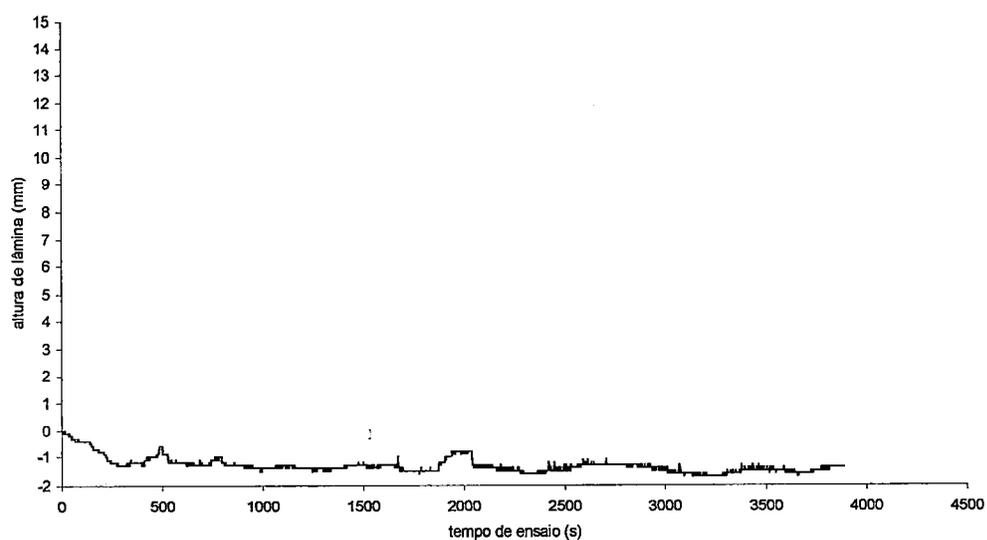
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 06/SR10 - SIMULAC 16

Seção – 06 / Simulação 18

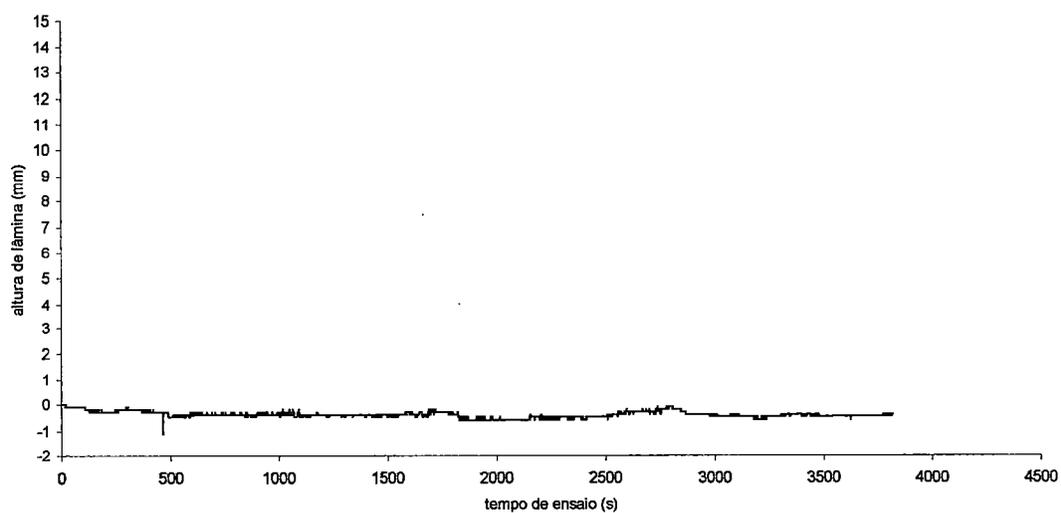
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 06/SR9 - SIMULAC 18



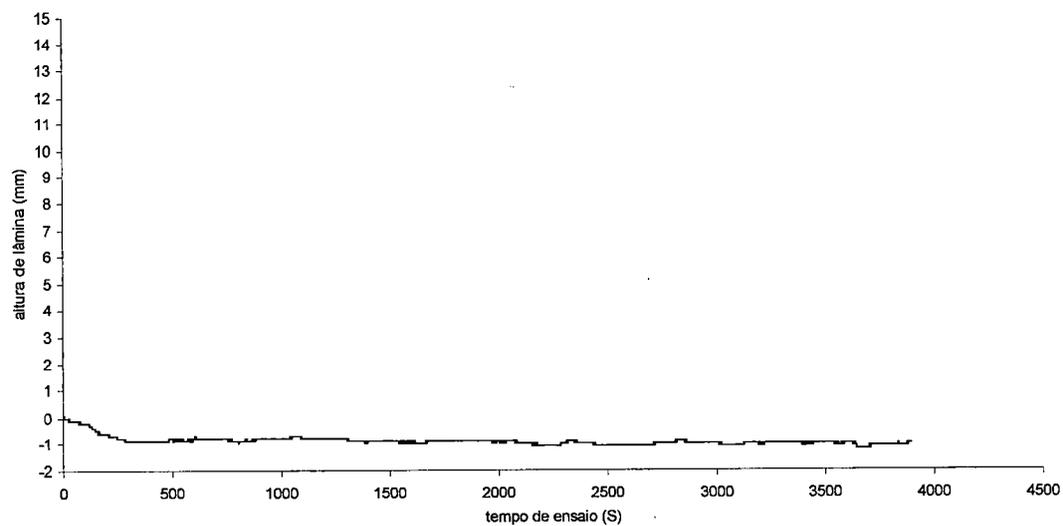
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 06/SR10 - SIMULAC 18

Seção – 07 / Simulação 06

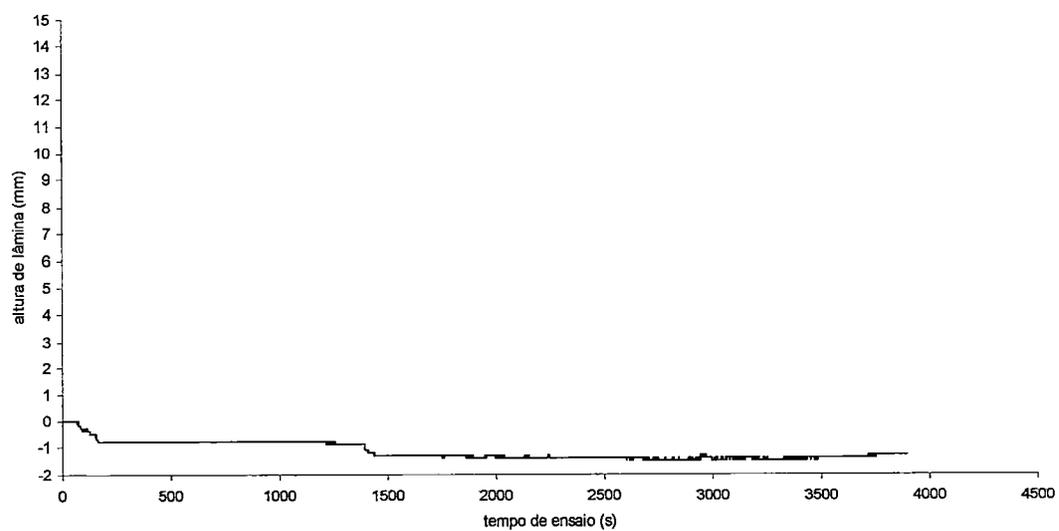
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 07/SR7 - SIMULAC 6

Seção – 07 / Simulação 07

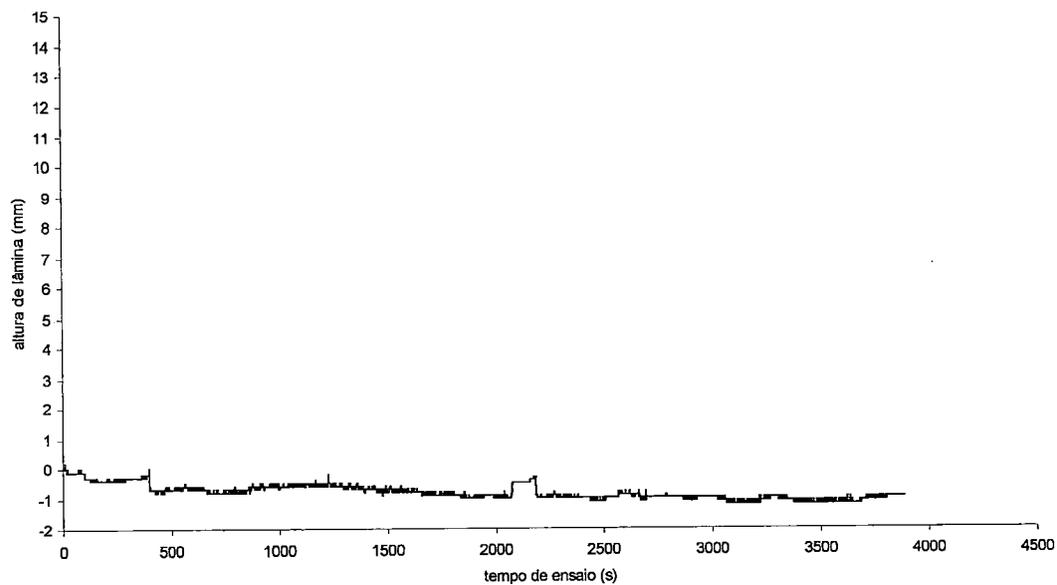
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - seção 07/SR7 - SIMULAC 07

Seção – 07 / Simulação 08

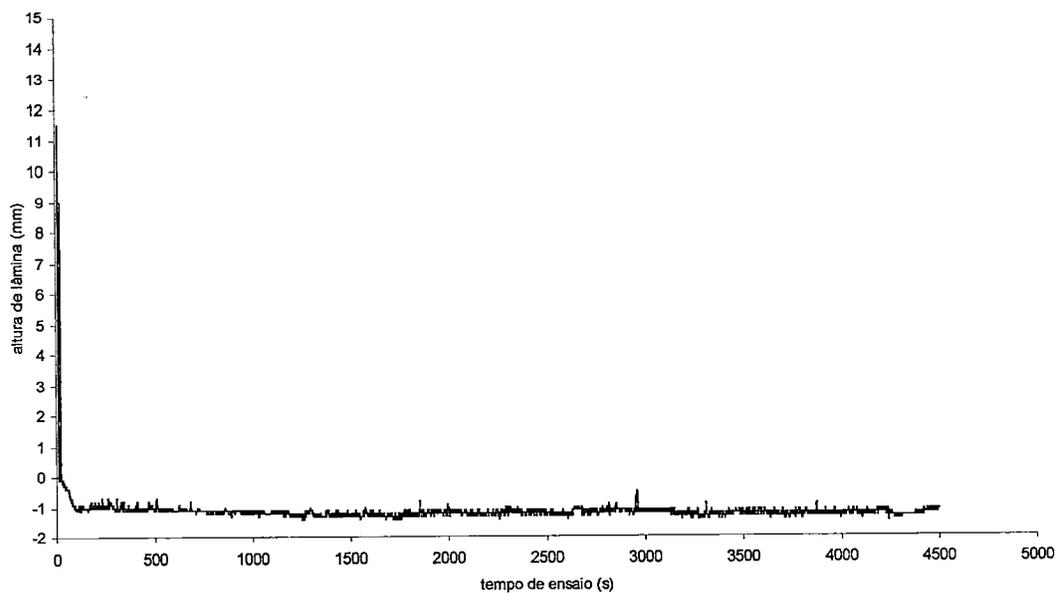
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 07/SR7 - SIMULAC 08

Seção – 07 / Simulação 11

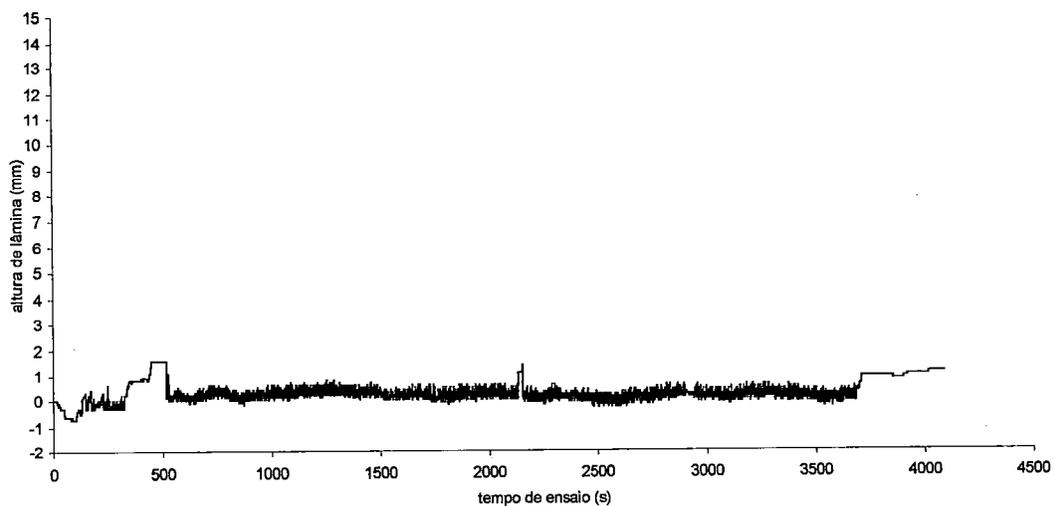
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 07/SR7 - SIMULAC 11

Seção – 07 / Simulação 15

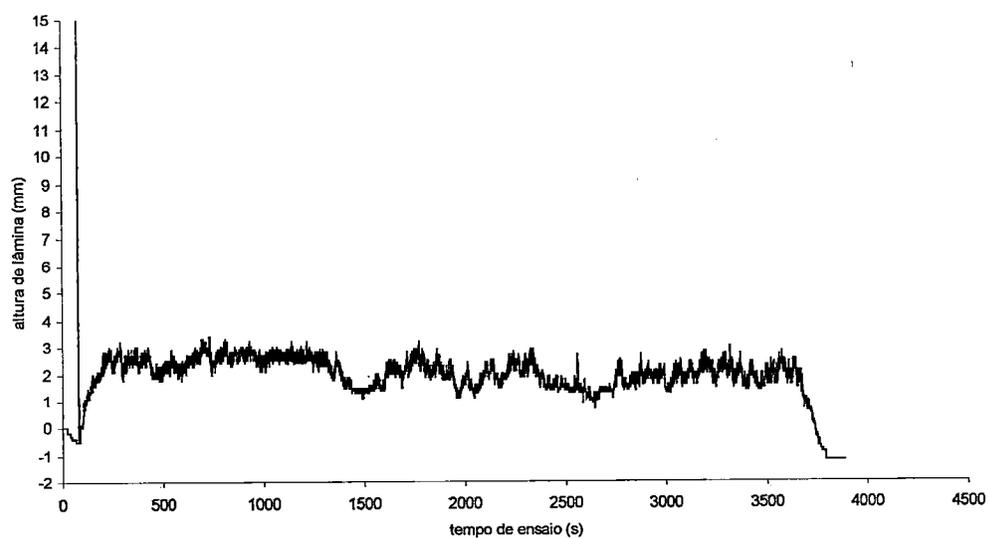
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 07/SR7 - SIMULAC 15

Seção – 07 / Simulação 16

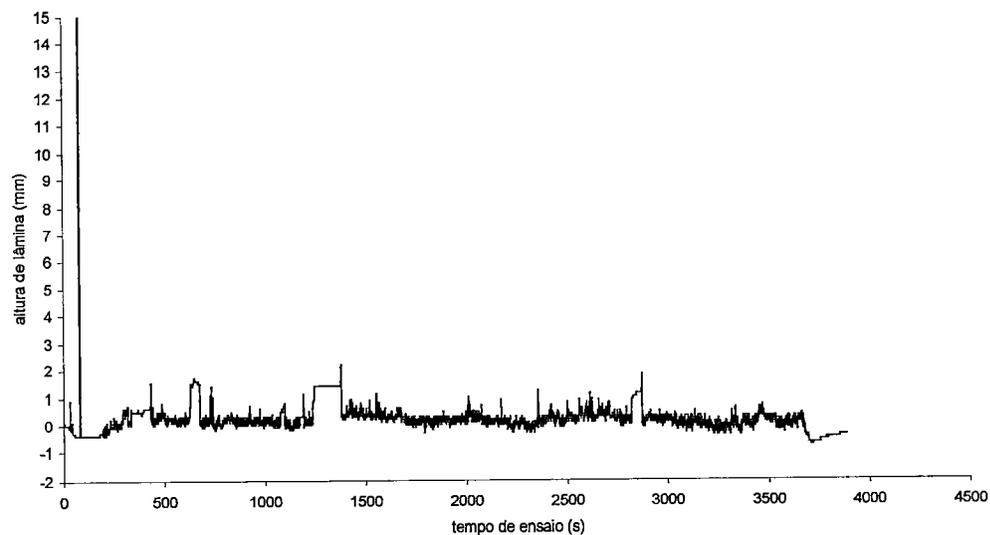
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 07/SR7 - SIMULAC 16

Seção – 07 / Simulação 18

Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 07/SR7 - SIMULAC 18

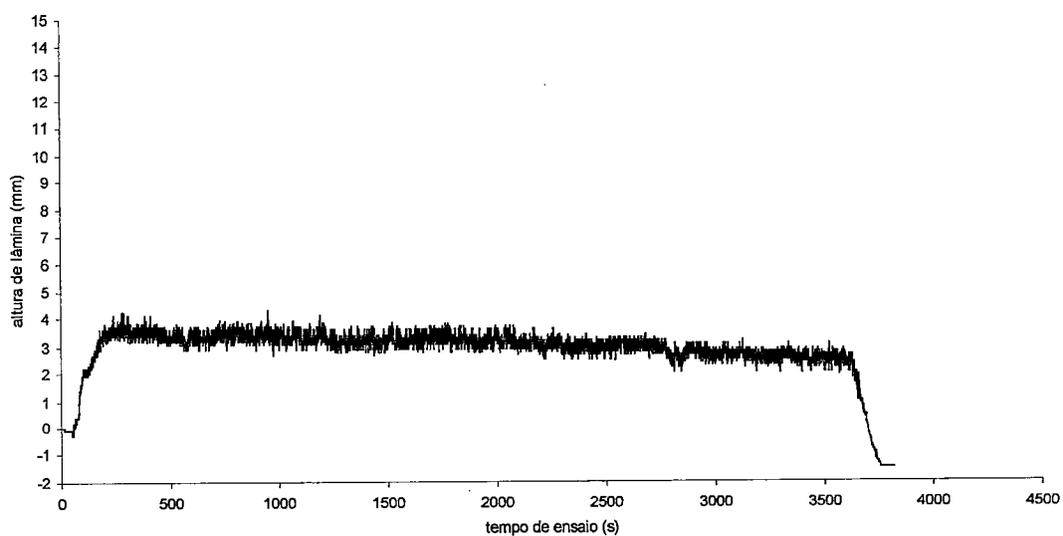
Seção – 9 / Simulação 06

Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 09/SR3 - SIMULAC 6

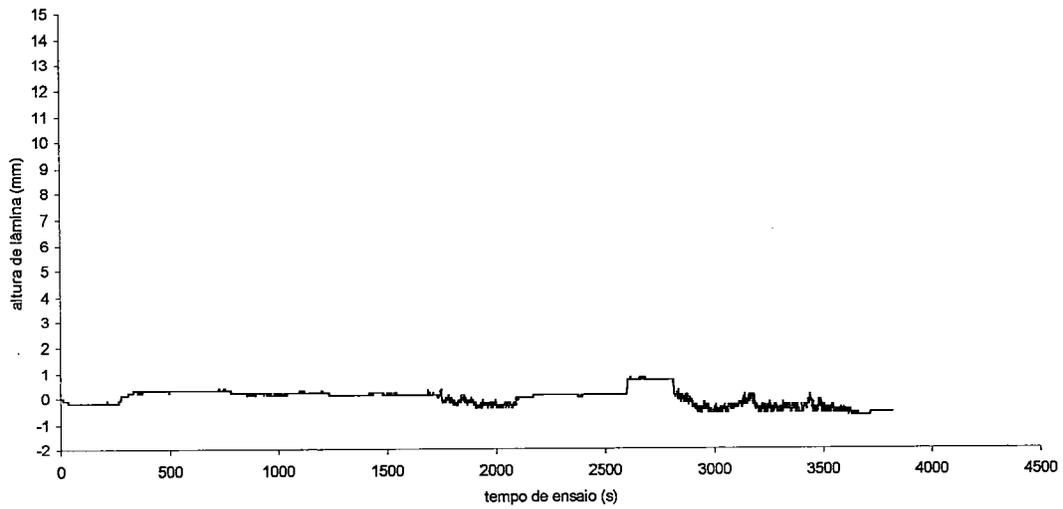


Varição da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 09/SR4 - SIMULAC 6

Seção – 09 / Simulação 07

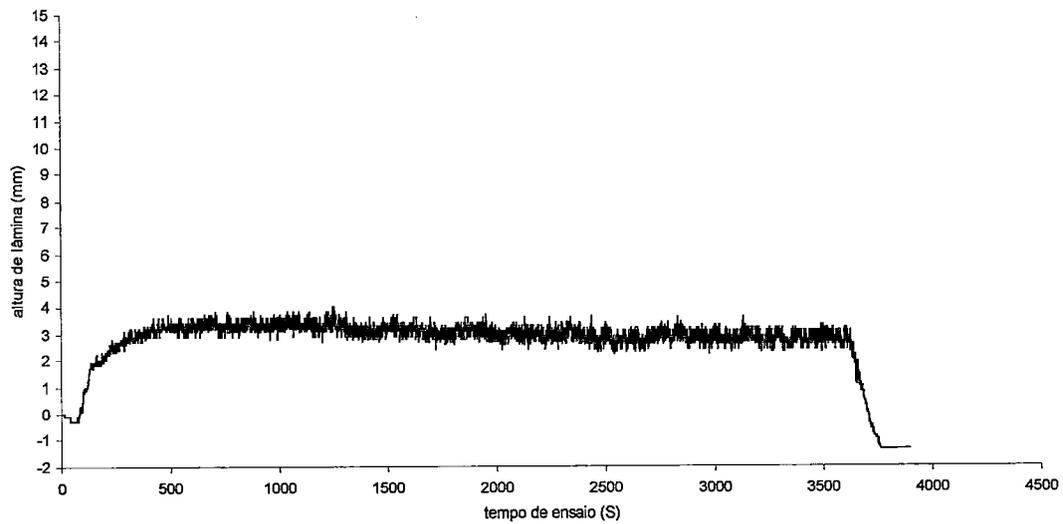


Varição da altura de escoamento no domínio experimental - seção 09/SR3 - SIMULAC 07

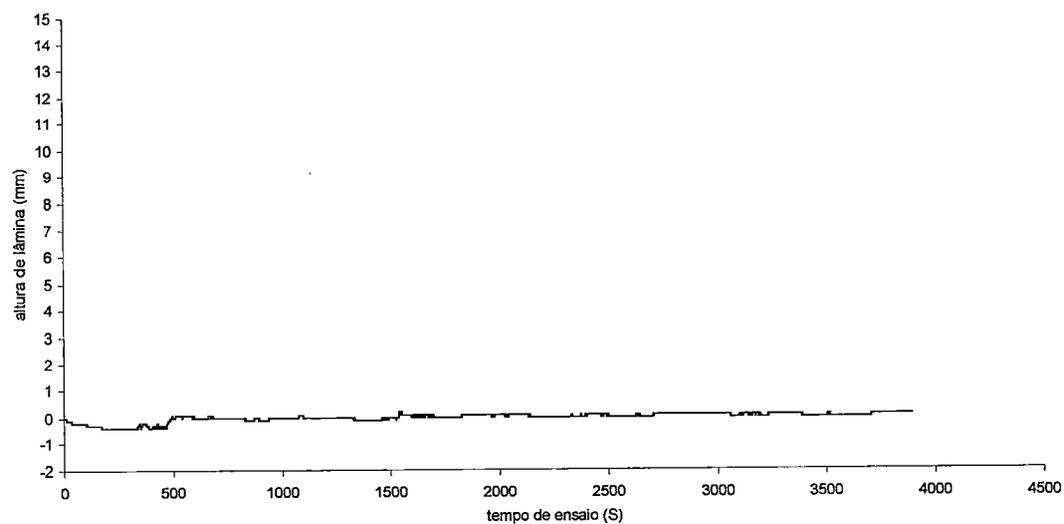


Variação da altura de escoamento no domínio experimental - seção 09/SR4 - SIMULAC 07

Seção – 09 / Simulação 08

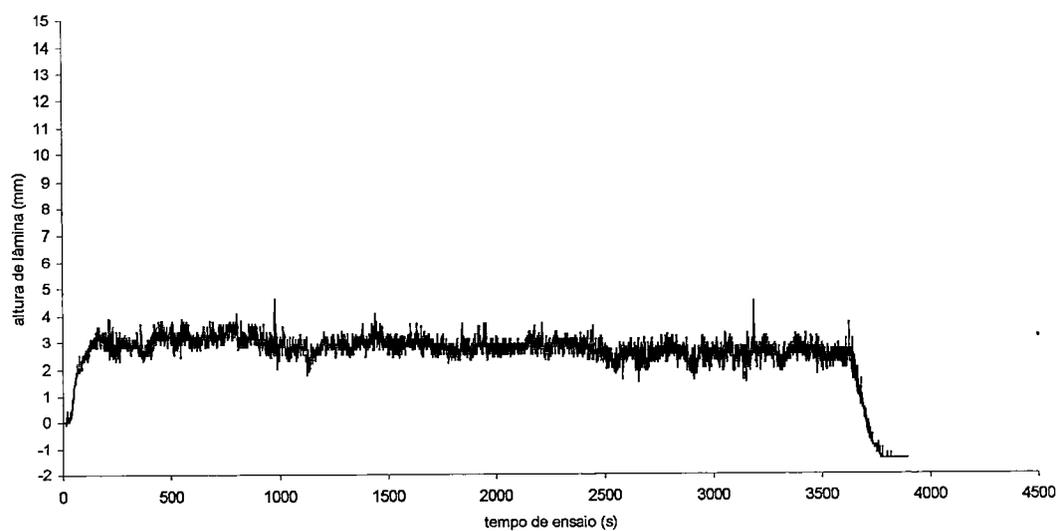


Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 09/SR3 - SIMULAC 08

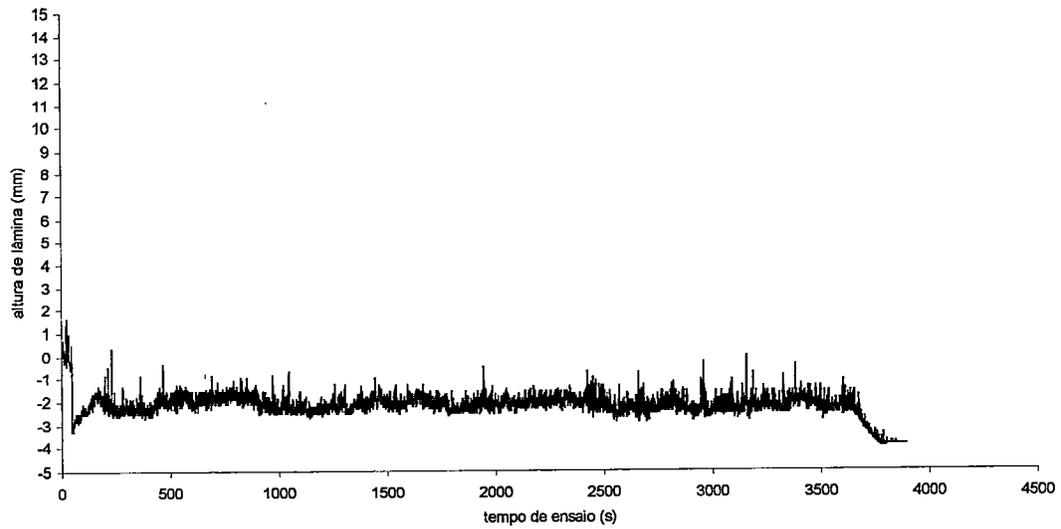


Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 09/SR4 - SIMULAC 08

Seção - 09 / Simulação 11

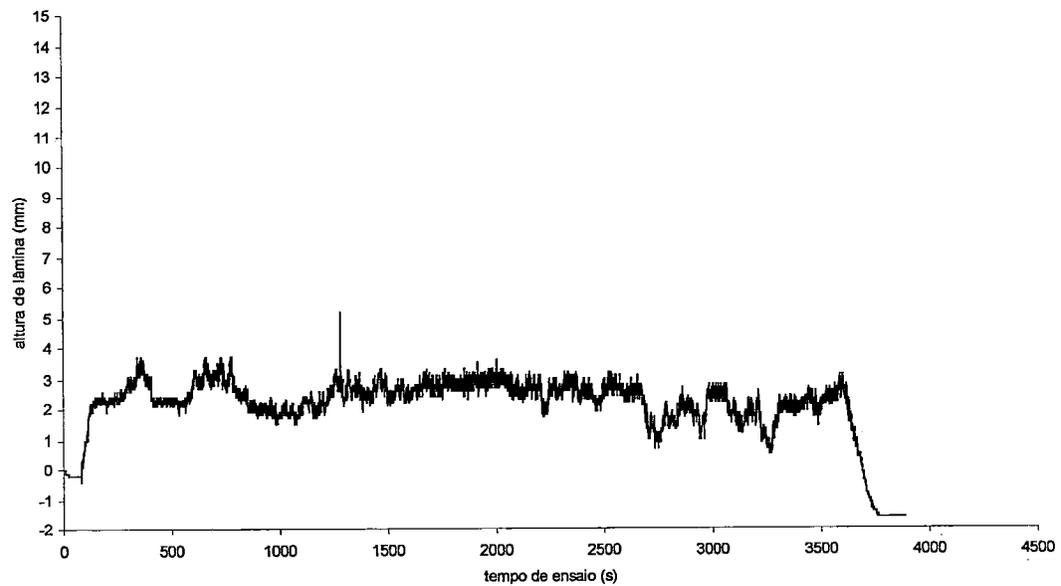


Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 09/SR3 - SIMULAC 11

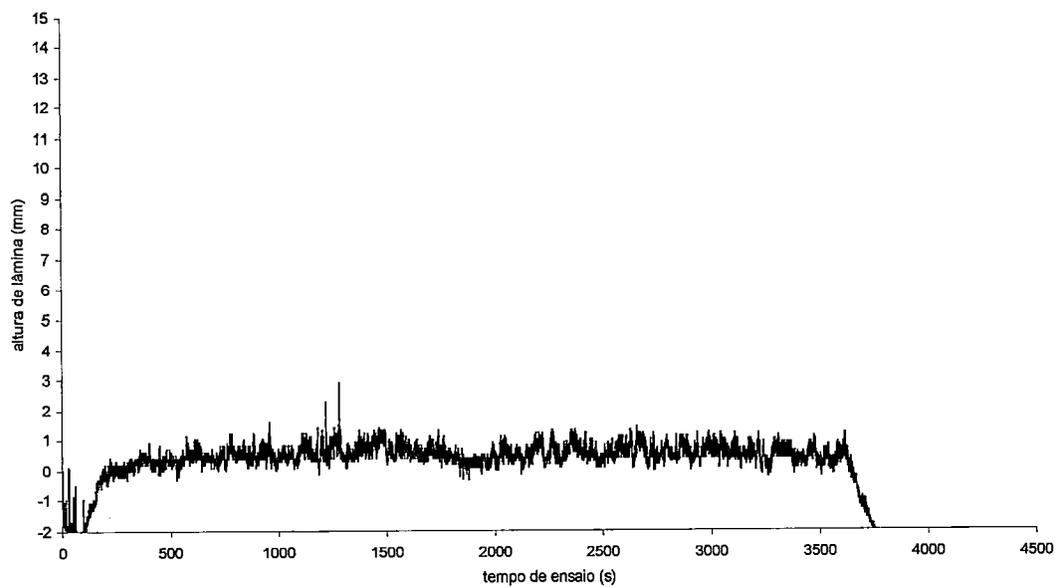


Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 09/SR4 - SIMULAC 11

Seção – 09 / Simulação 15

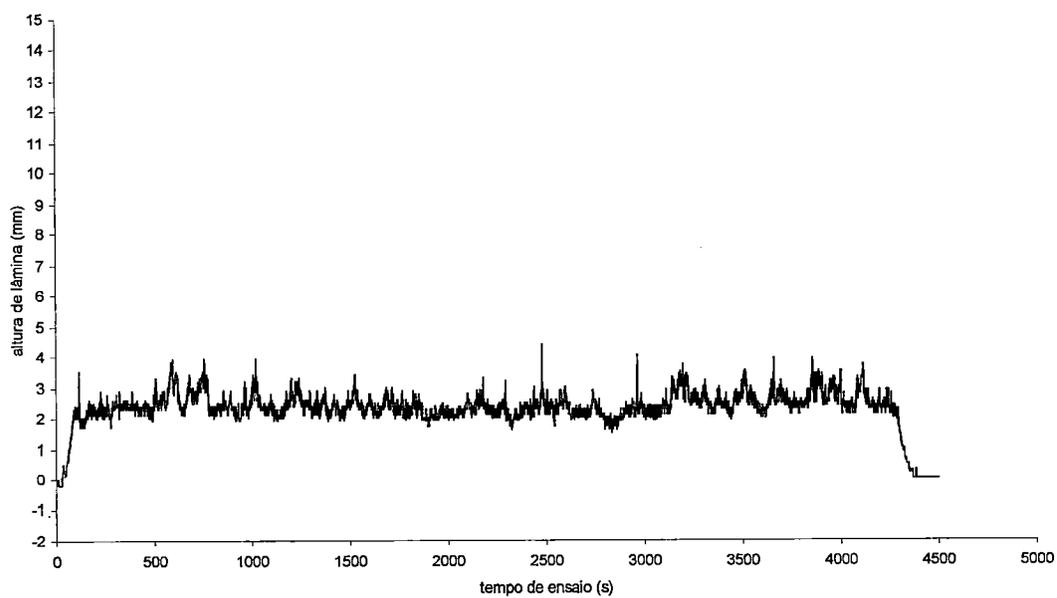


Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 09/SR3 - SIMULAC 15

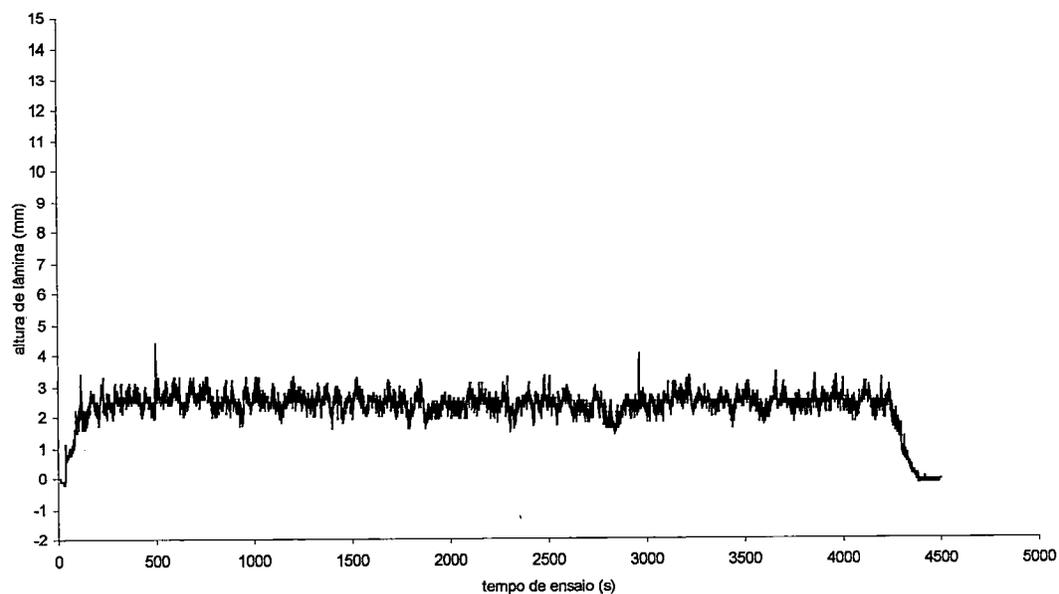


Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 09/SR4 - SIMULAC 15

Seção – 09 / Simulação 16

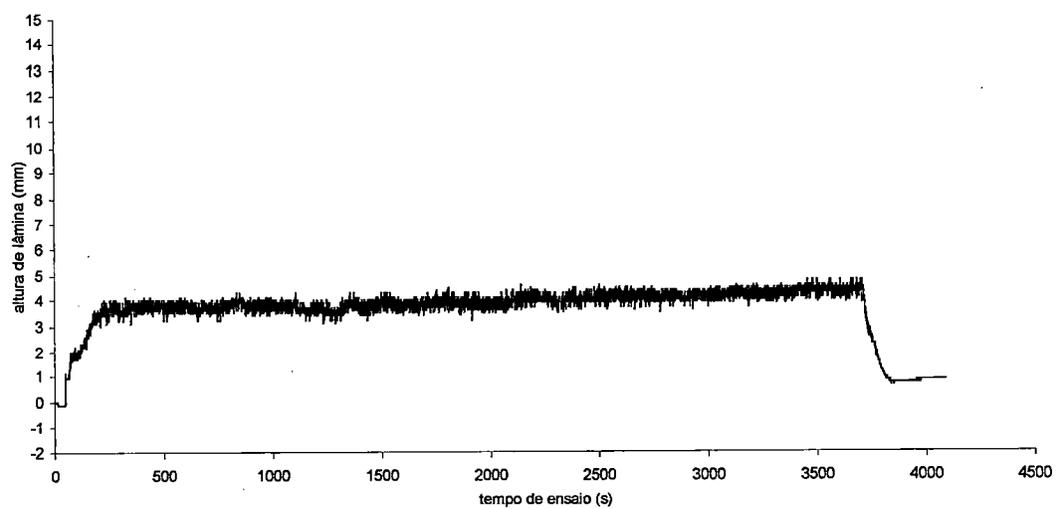


Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 09/SR3 - SIMULAC 16

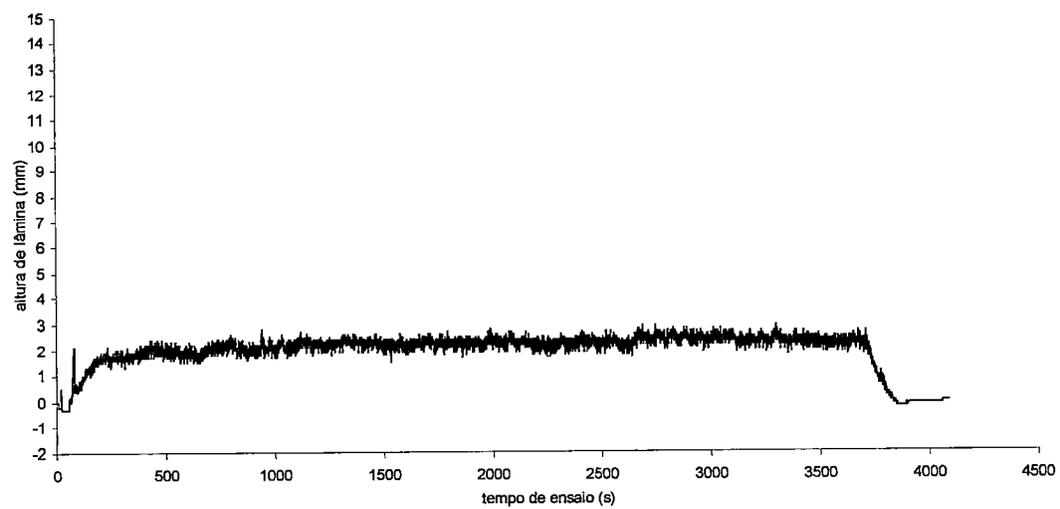


Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 09/SR4 - SIMULAC 16

Seção – 09 / Simulação 18



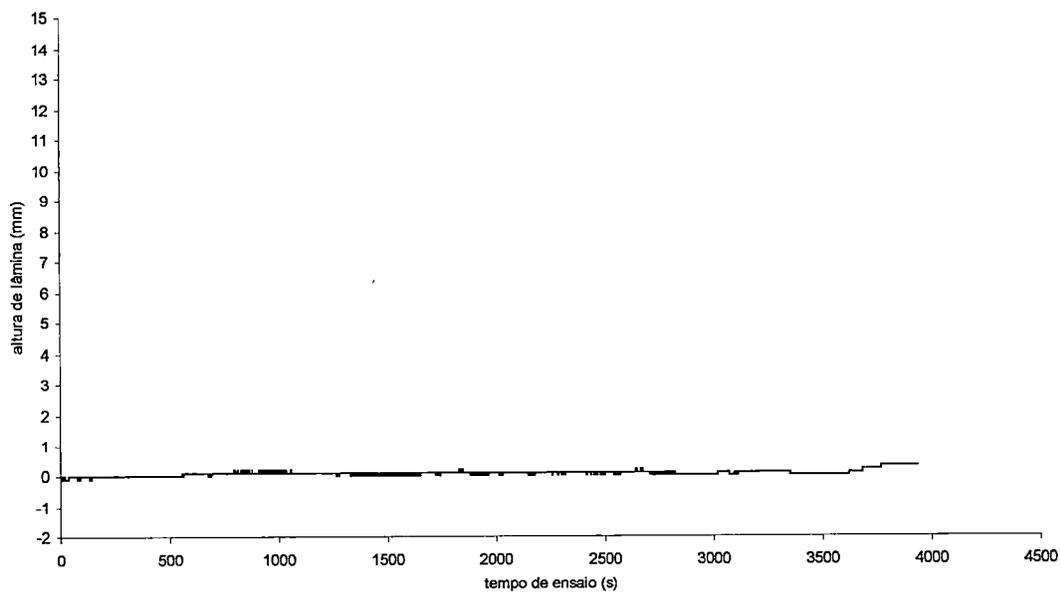
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 09/SR3 - SIMULAC 18



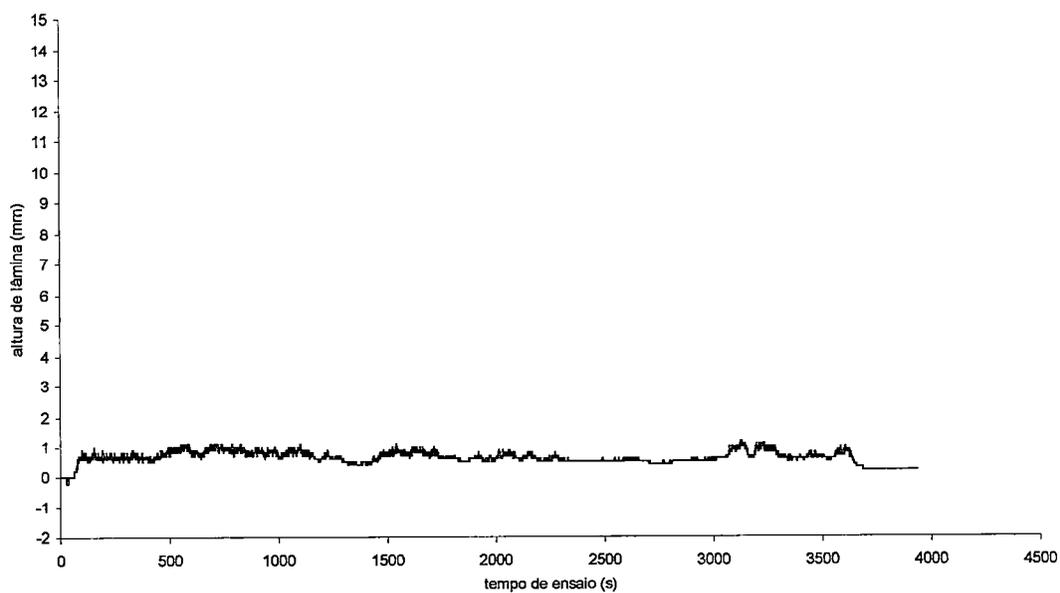
Varição da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 09/SR4 - SIMULAC 18

ANEXO – 2B

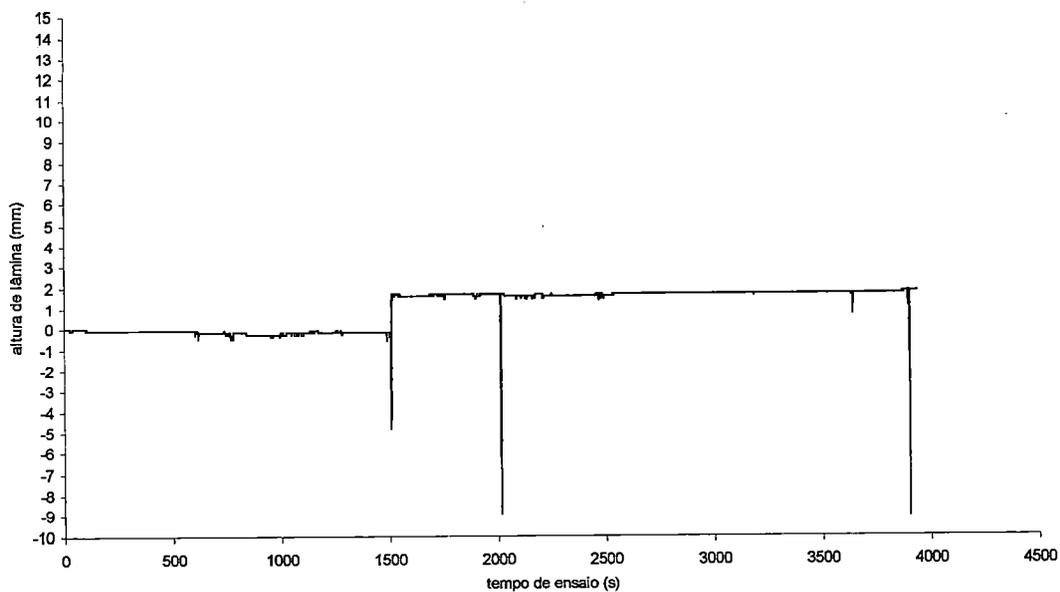
MONITORAMENTO DA ALTURA DO DEFLÚVIO SUPERFICIAL
NO DOMÍNIO EXPERIMENTAL: *Hidrogramas locais de escoamento.*
(ENSAIO – 13)

Seção - 03

Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 03/SR15 - SIMULAC 13 A

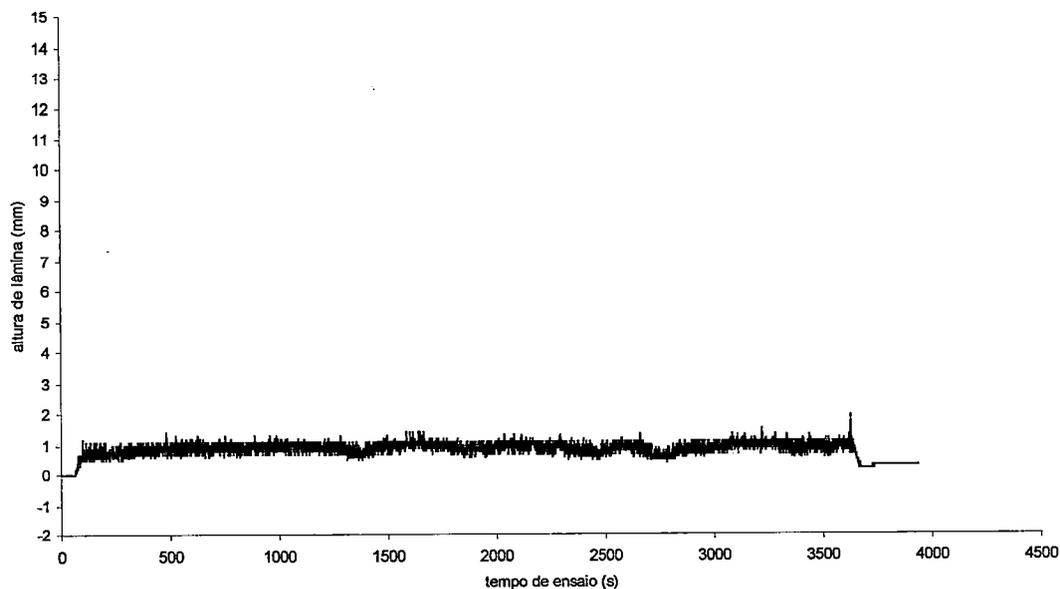
Seção - 04

Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 04/SR8 - SIMULAC 13 A

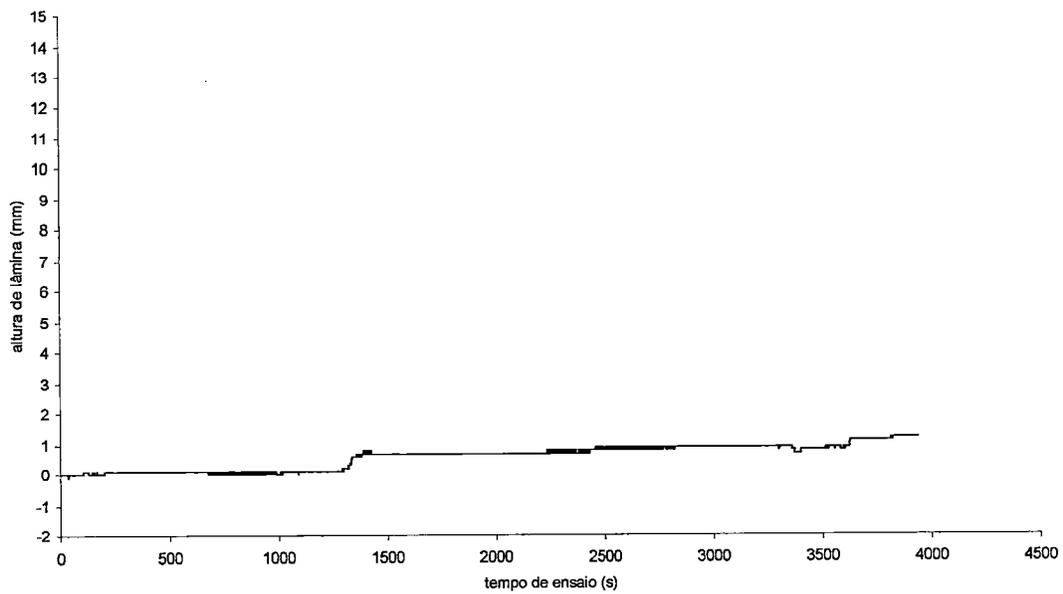


Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 04/SR14 - SIMULAC 13 A

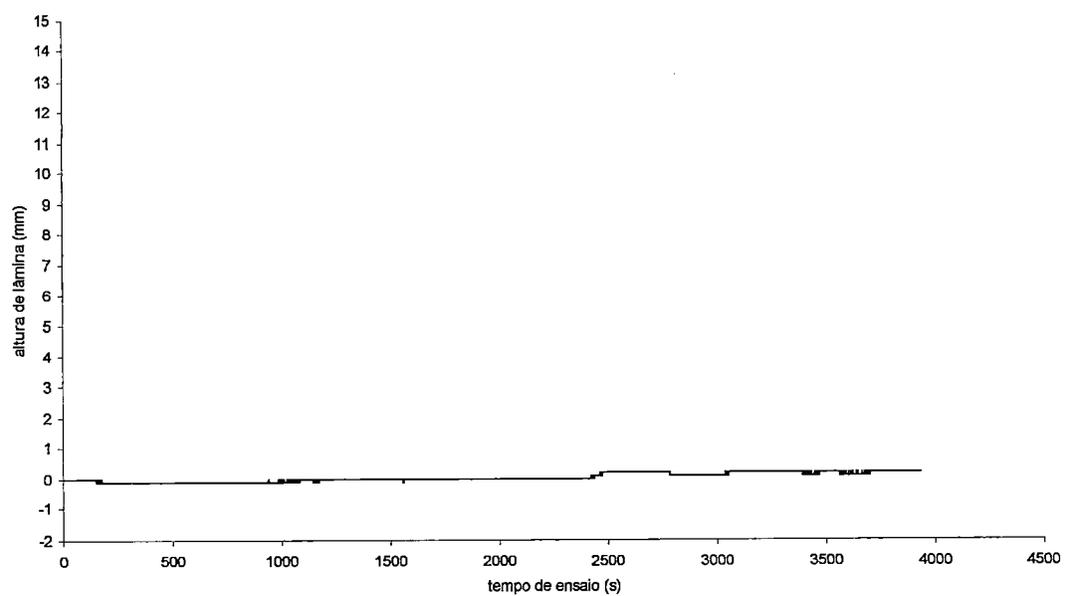
Seção - 05



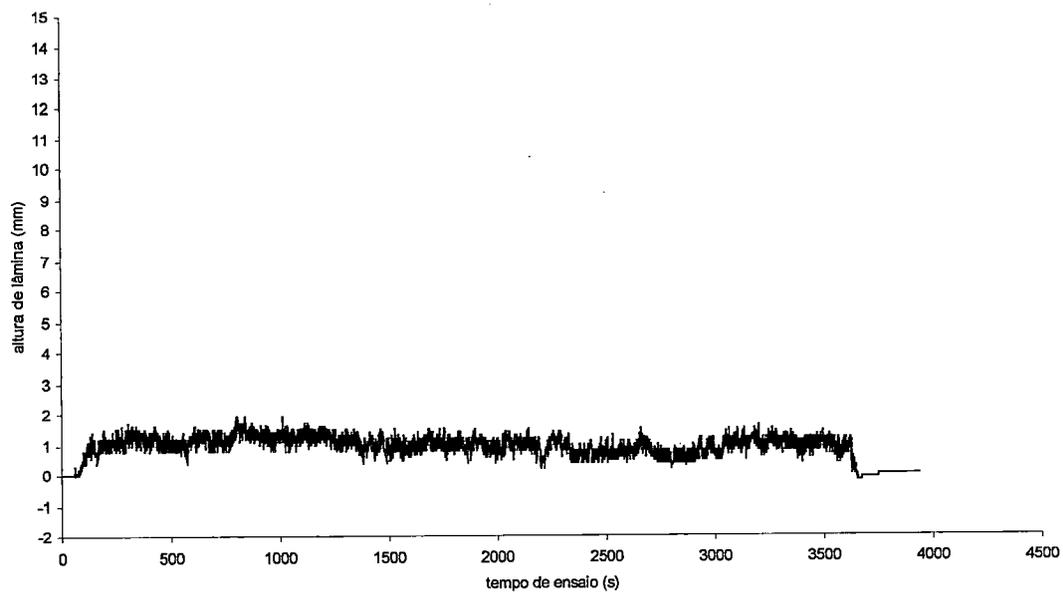
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 05/SR11 - SIMULAC 13 A



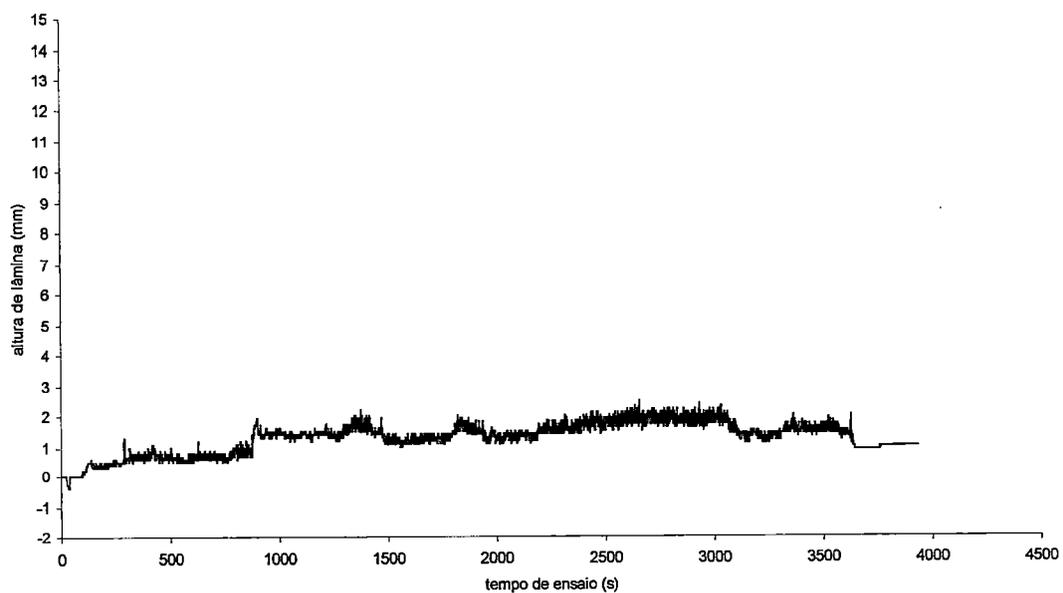
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 05/SR12 - SIMULAC 13 A



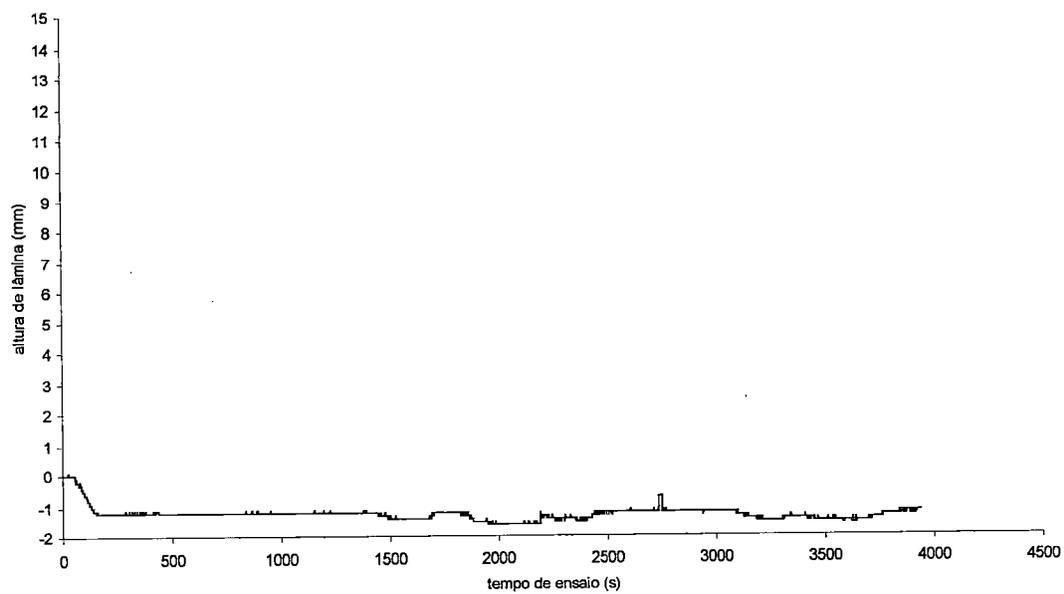
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 05/SR13 - SIMULAC 13 A

Seção - 06

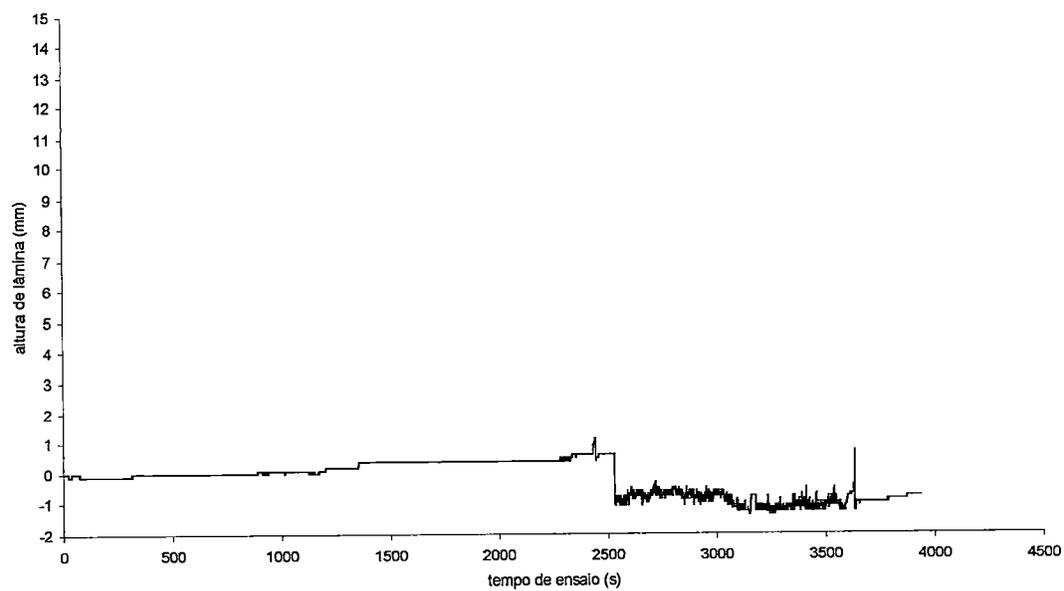
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 06/SR9 - SIMULAC 13 A



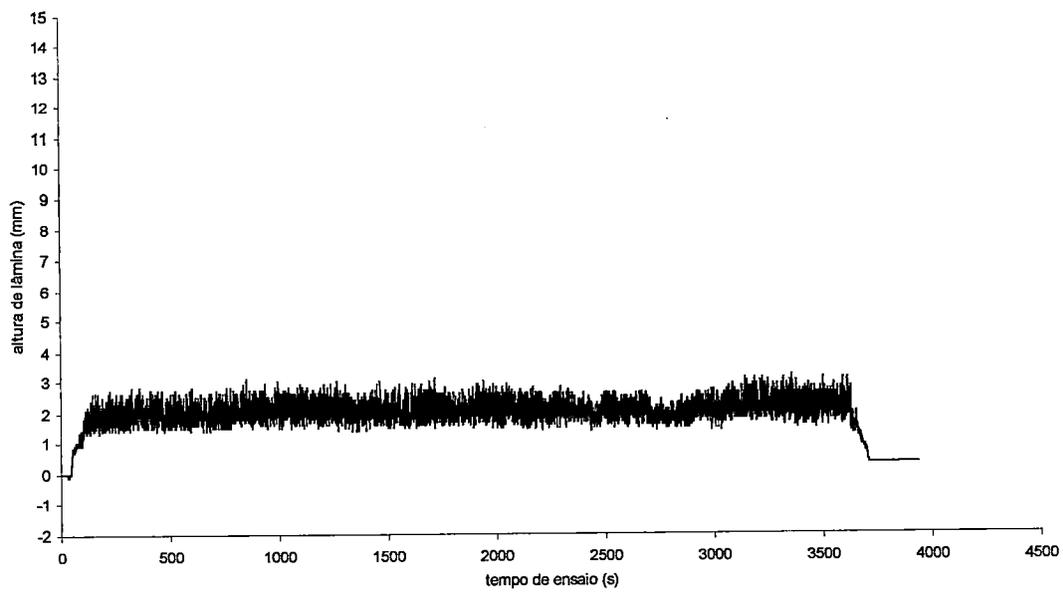
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 06/SR10 - SIMULAC 13 A

Seção - 07

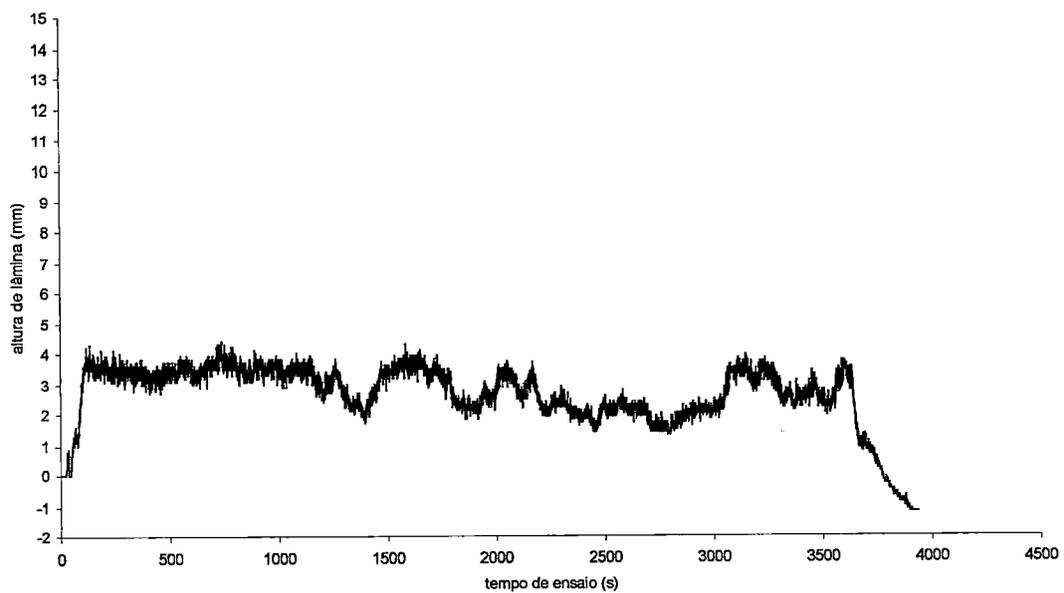
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 07/SR7 - SIMULAC 13 A

Seção - 08

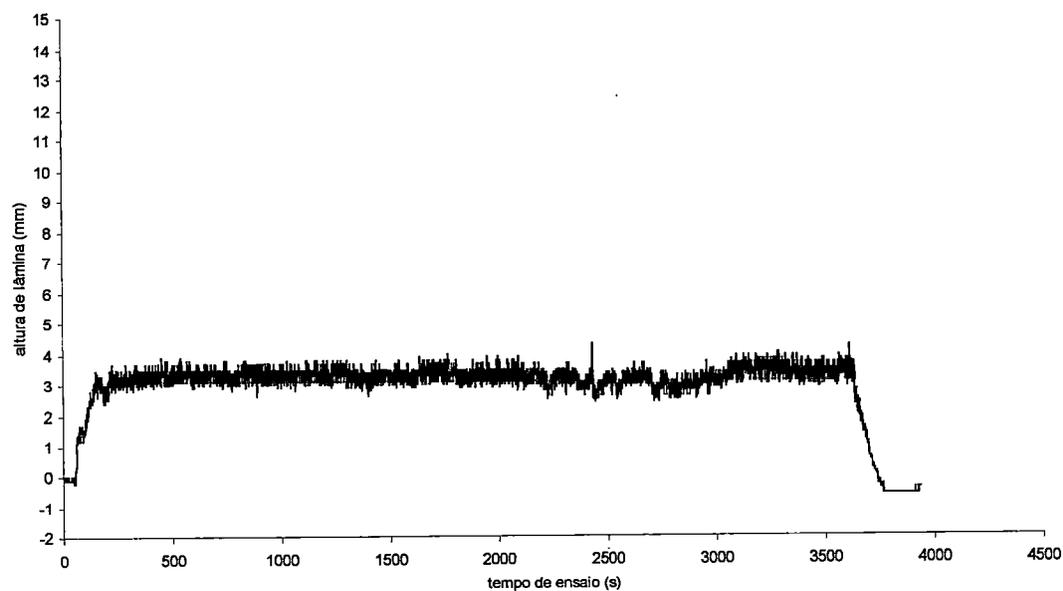
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 08/SR2 - SIMULAC 13 A



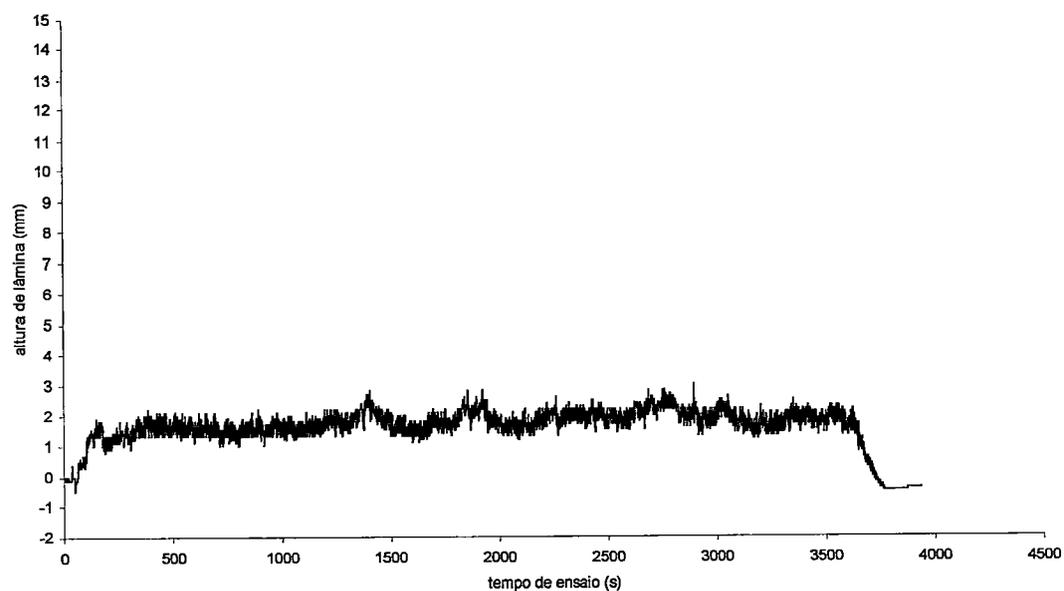
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 08/SR5 - SIMULAC 13 A



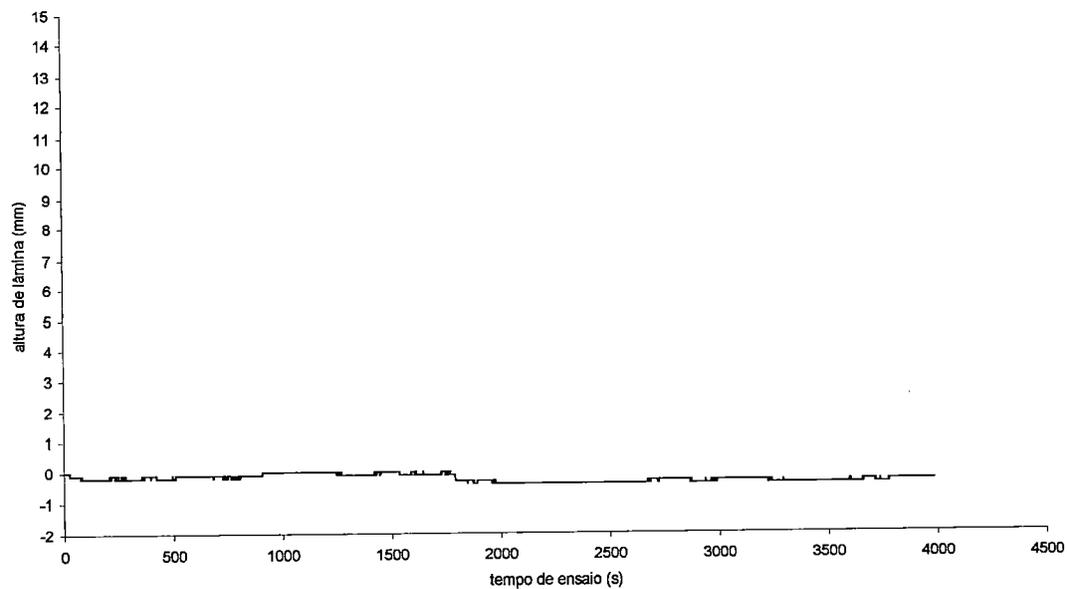
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 08/SR6 - SIMULAC 13 A

Seção - 09

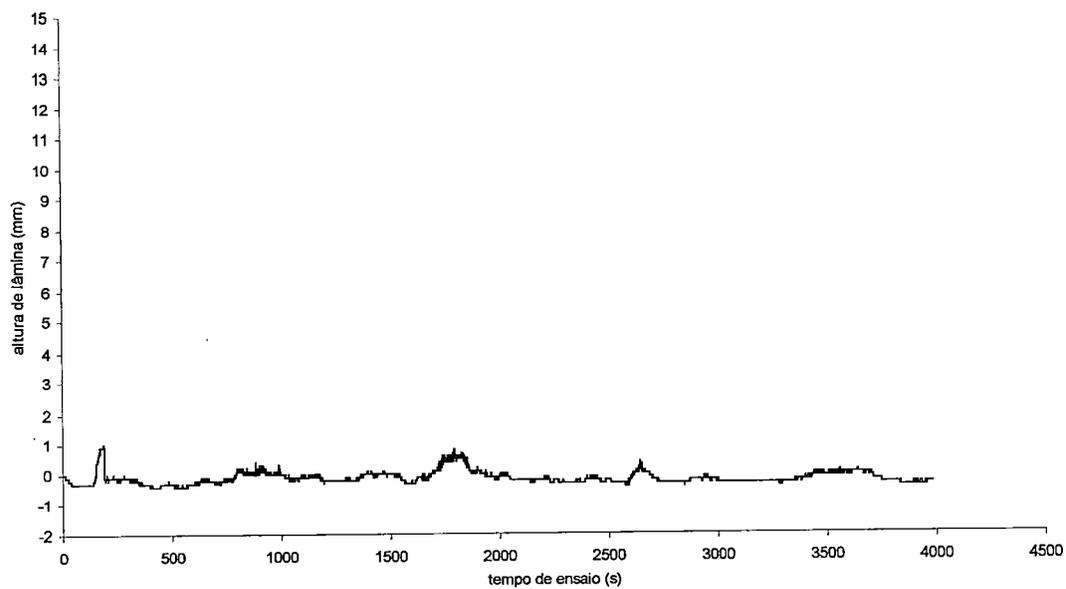
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 09/SR3 - SIMULAC 13 A



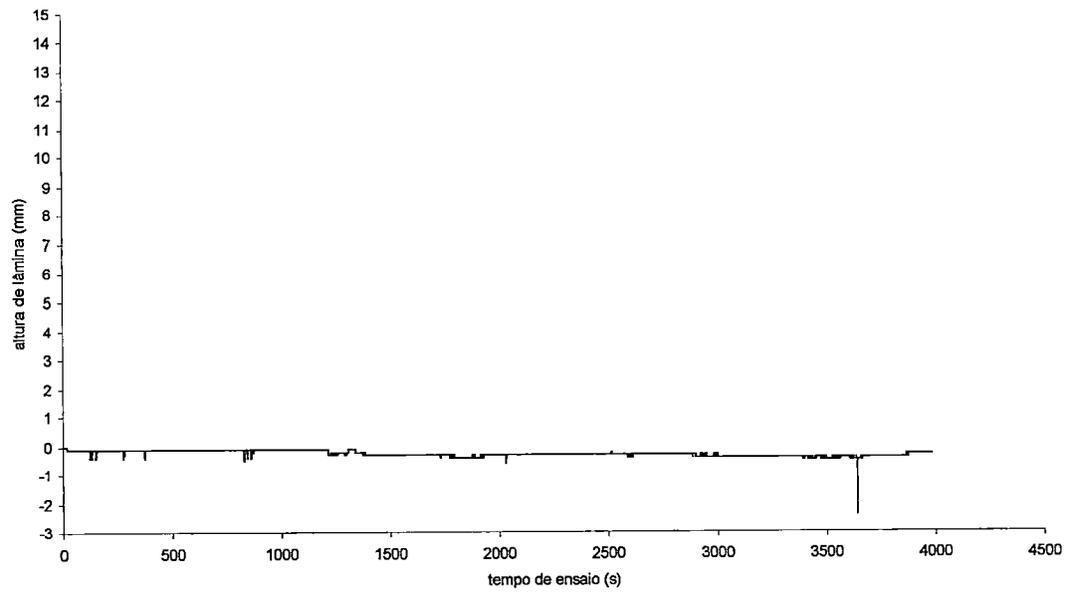
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 09/SR4 - SIMULAC 13 A

Seção - 03

Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 03/SR15 - SIMULAC 13 B

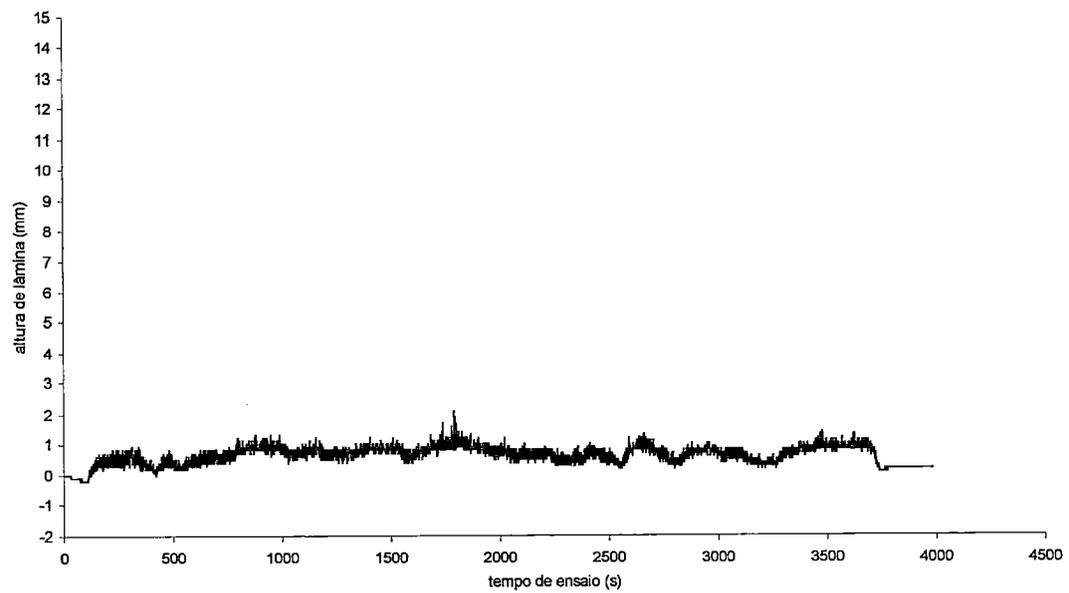
Seção - 04

Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 04/SR8 - SIMULAC 13 B

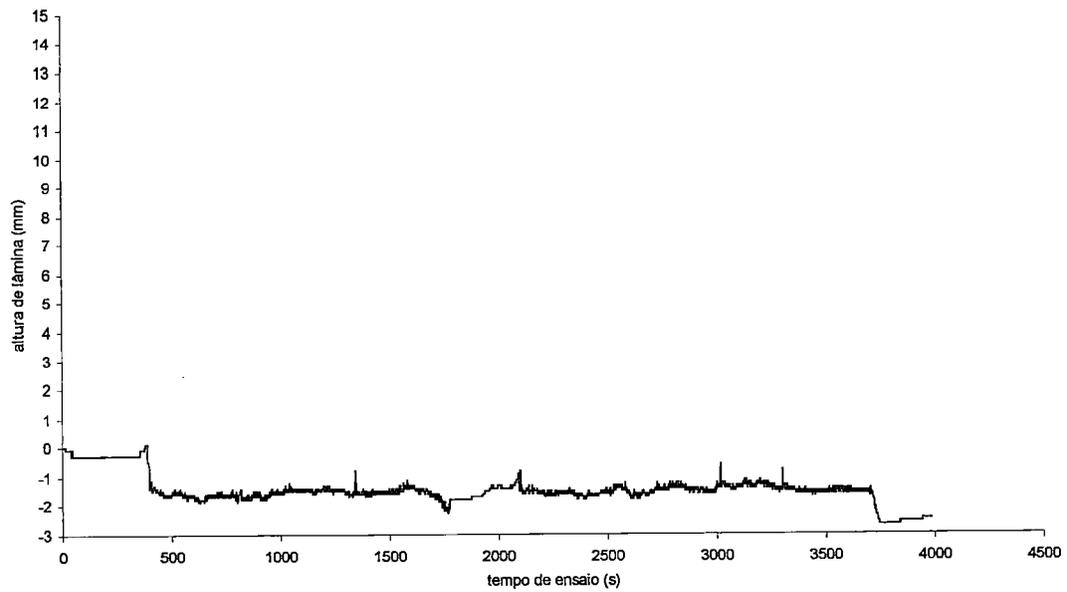


Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 04/SR14 - SIMULAC 13 B

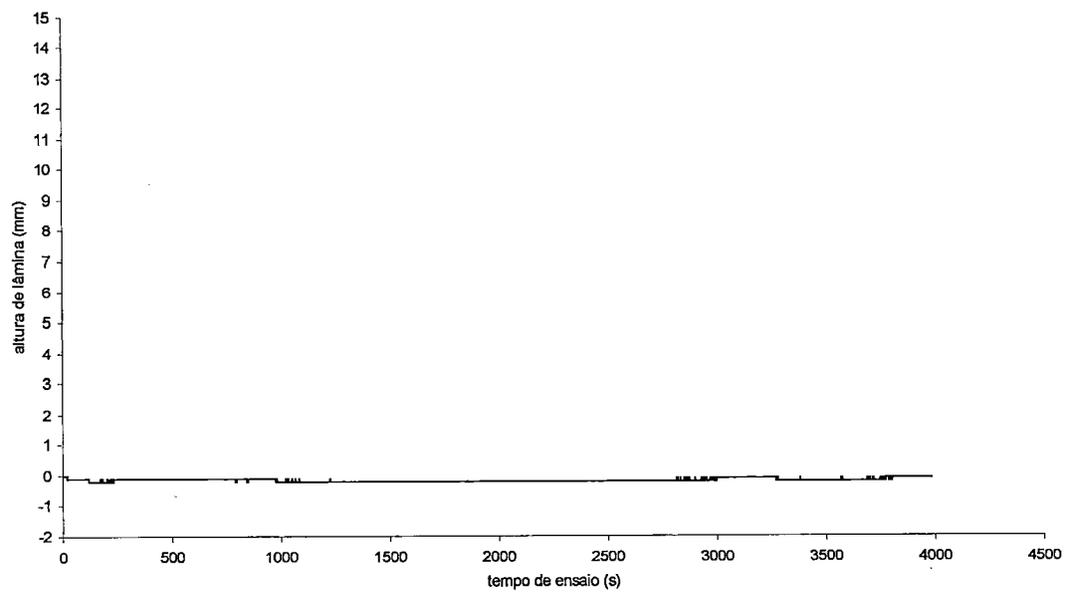
Seção - 05



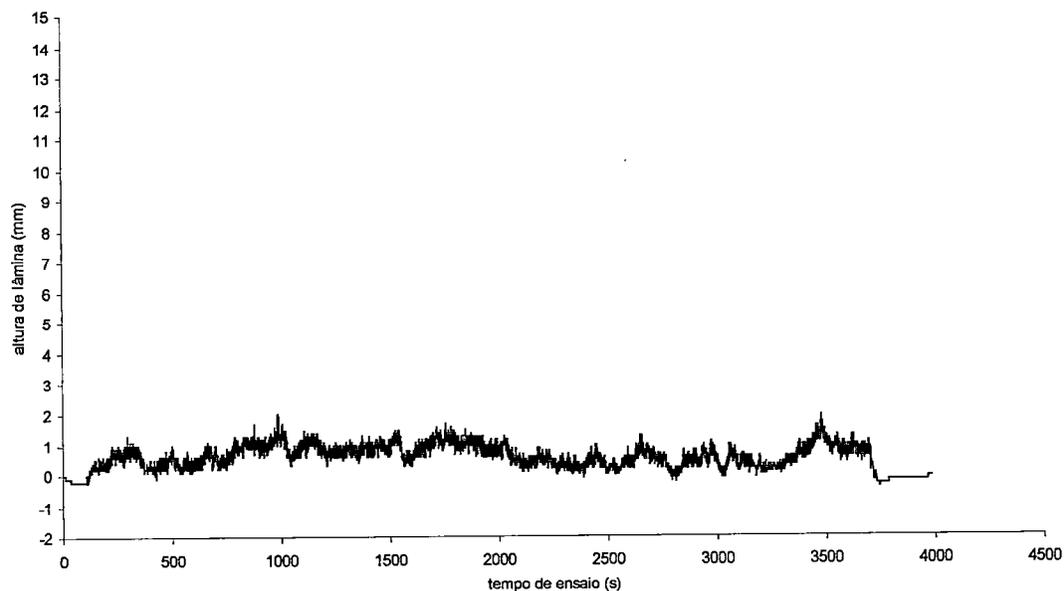
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 05/SR11 - SIMULAC 13 B



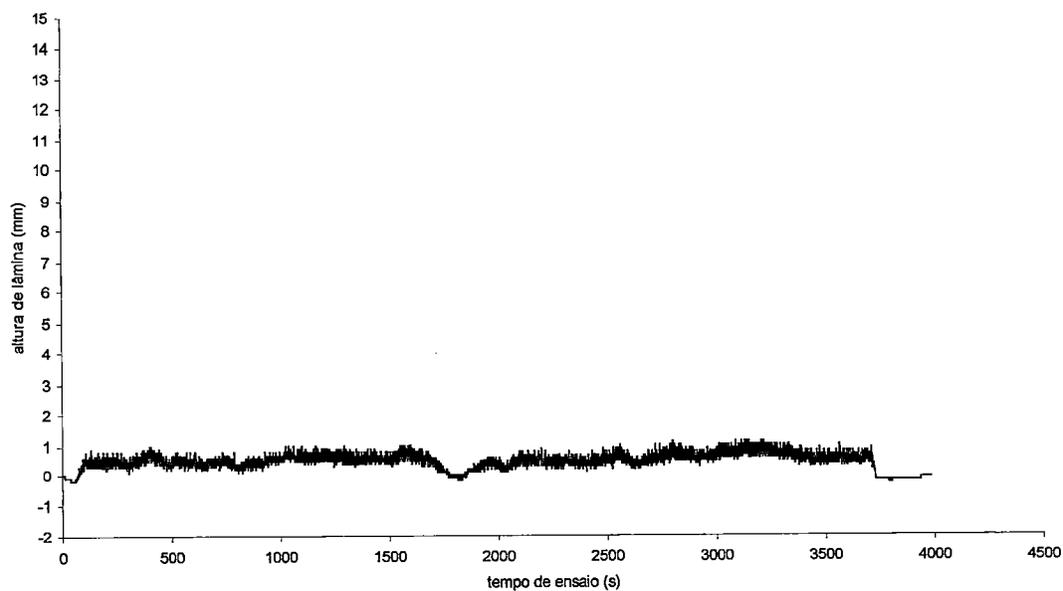
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 05/SR12 - SIMULAC 13 B



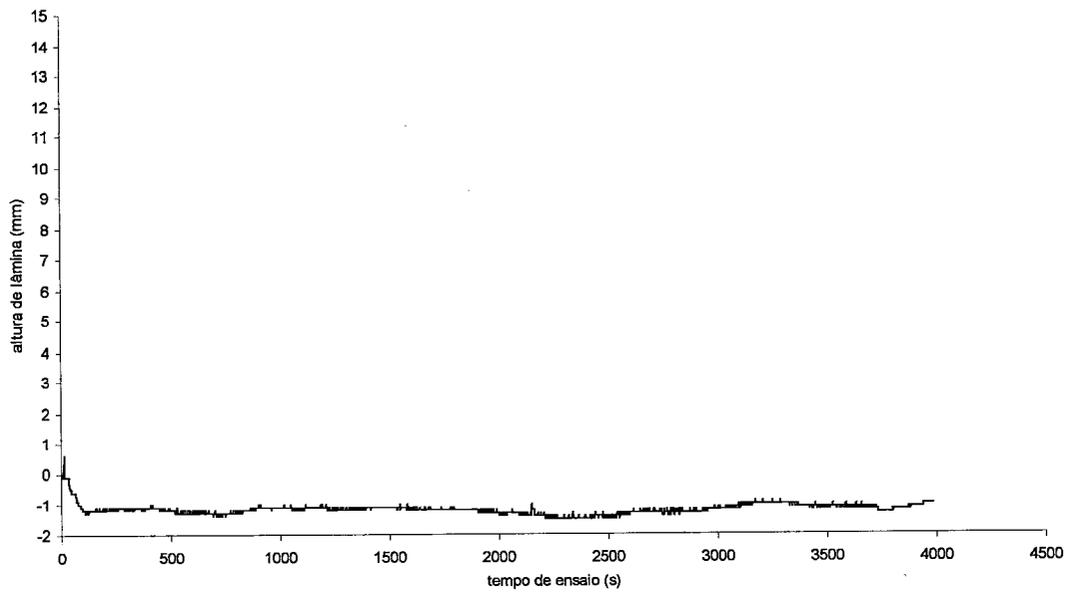
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 05/SR13 - SIMULAC 13 B

Seção - 06

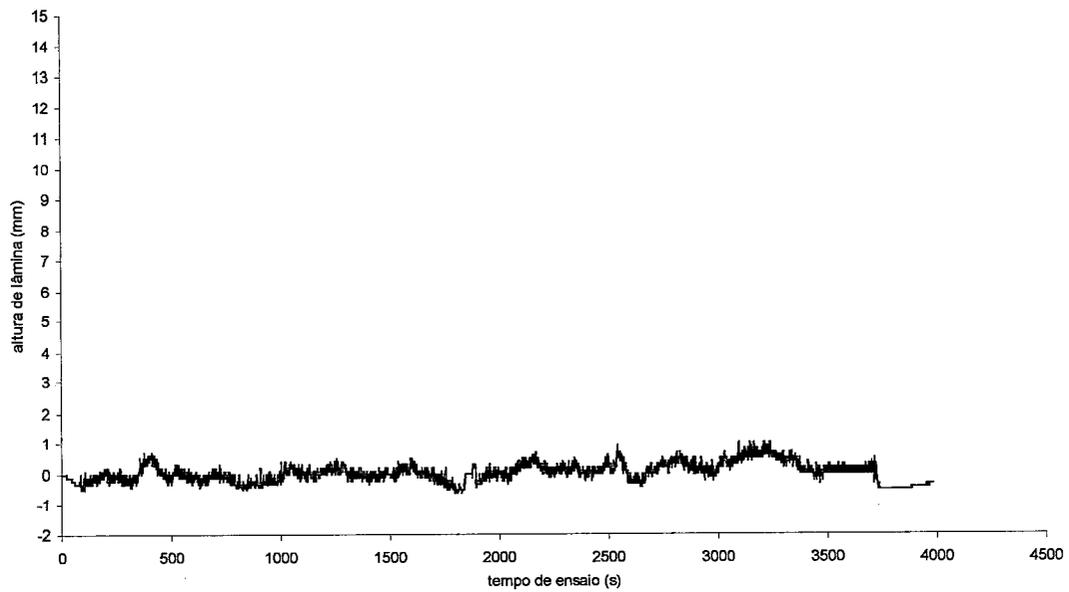
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 06/SR9 - SIMULAC 13 B



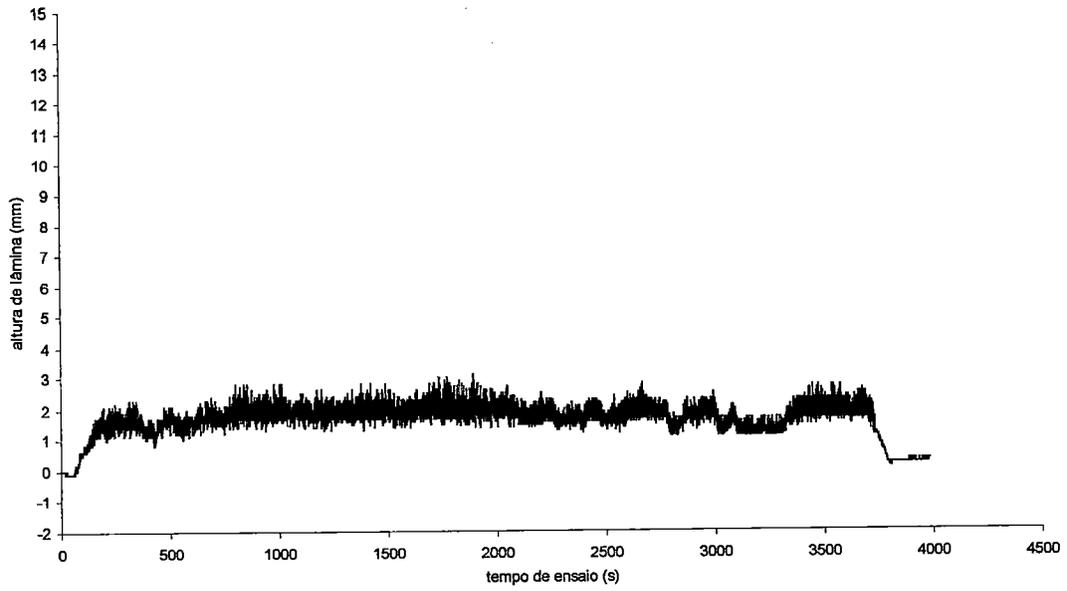
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 06/SR10 - SIMULAC 13 B

Seção - 07

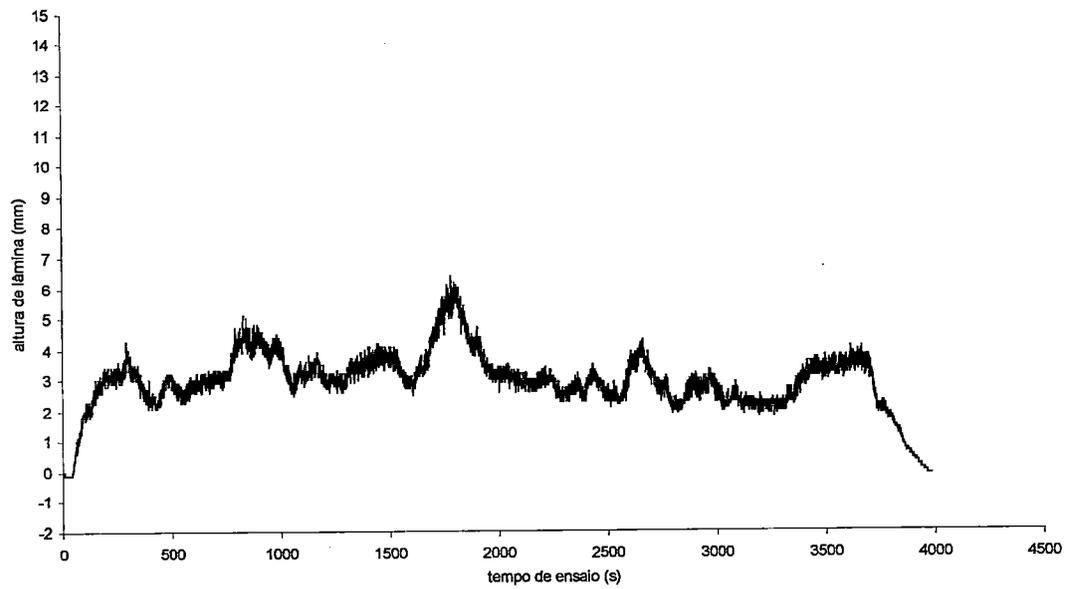
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 07/SR7 - SIMULAC 13 B

Seção - 08

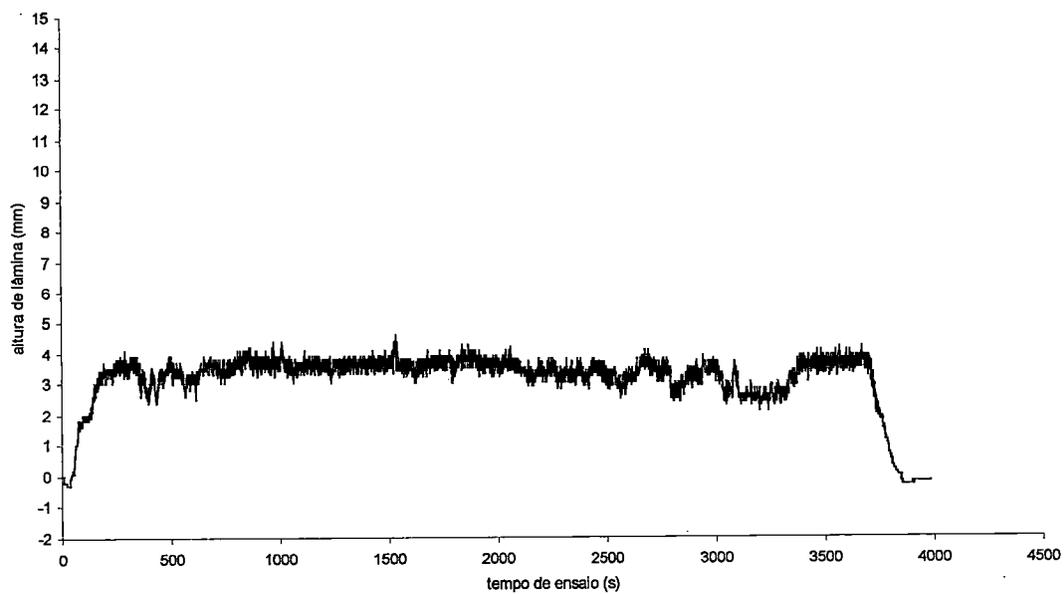
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 08/SR2 - SIMULAC 13 B



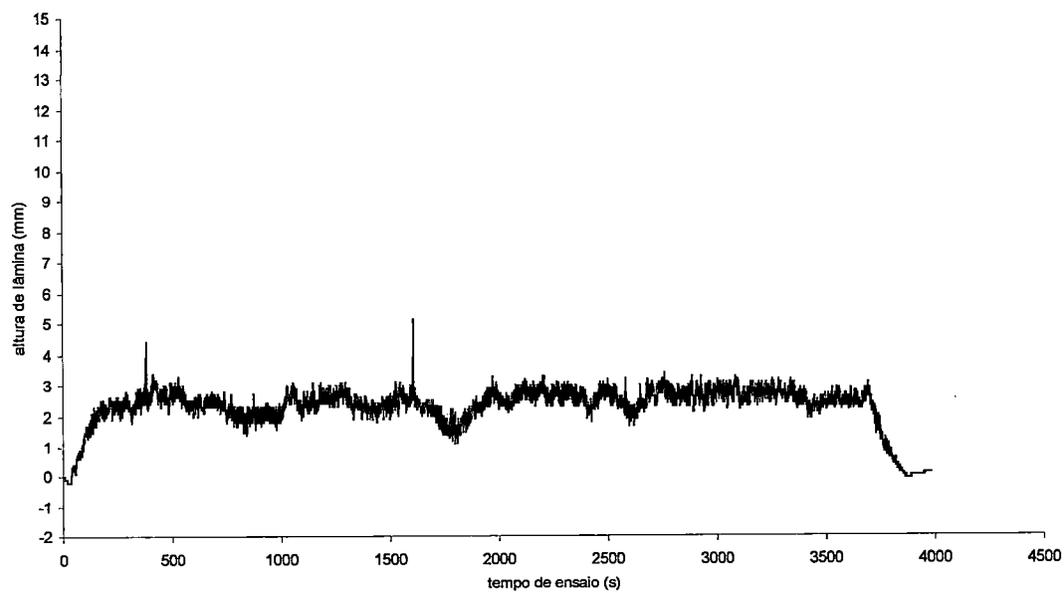
Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 08/SR5 - SIMULAC 13 B



Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 08/SR6 - SIMULAC 13 B

Seção - 09

Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 09/SR3 - SIMULAC 13 B



Variação da altura de escoamento no domínio experimental - Seção 09/SR4 - SIMULAC 13 B

ANEXO – 3

SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO DE LEVANTAMENTO DO MICRORRELEVO



SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO: levantamento do microrrelevo

O sistema fotogramétrico é constituído por um par de máquinas fotográficas, montado num suporte dentro de um mesmo plano, de modo a obter simultaneamente duas fotografias com uma área em comum, interseção das duas imagens formando o estereofotograma. A montagem das câmeras fotográficas e a área comum de um estereofotograma são apresentadas na Figura 1. A Figura 2 apresenta um sistema reprojetoado, mais apropriado para seções transversais mais largas, em substituição ao da Figura 1, com o objetivo principal de evitar de transitar na área experimental. Este novo sistema é formado por dois carrinhos conjugados, montados sobre rolamentos para um perfeito deslocamento. As câmeras são acopladas a um suporte, que por sua vez é fixado ao carrinho menor que faz o deslocamento transversal do equipamento. A montagem das câmeras e seu sistema de transporte são ilustrados nas Fotos 1 e 2 adiante. Com o carrinho maior, de deslocamento longitudinal sobre os trilhos apoiados em cima das muretas, toda a área ou qualquer seção de interesse pode ser facilmente levantada.

O sistema, baseado na fotogrametria, é um método de medição sem contato direto com o solo, pois evita a interferência direta dos equipamentos de medidas, preservando de modo fidedigno as mudanças microtopográficas ocorridas durante cada simulação, decorrentes da remoção de sedimentos. A dinâmica do microrrelevo pode então ser monitorada e registrada, simulação após simulação, durante todo o experimento. As imagens obtidas nos estereofotogramas, após a devida restituição via processamento digital, através do software DVP (Digital Video Plotter), possibilitam a obtenção das cotas do microrrelevo do domínio do escoamento. Os dados, assim obtidos, podem ser compilados na forma de mapas microtopográficos para possibilitar o estudo da influência do microrrelevo sobre as características hidráulicas do escoamento e as influências destas mudanças na remoção de sedimentos. O detalhamento do microrrelevo e o conhecimento da sua dinâmica de evolução, sob a ação do escoamento superficial, detem uma fundamental importância no processo de modelagem da erosão por fluxo superficial, com a abordagem hidrodinâmica que a erosão hídrica requer, para um avanço de conhecimento mais detalhado e cada vez mais aprofundado sobre o fenômeno. No entanto, o sistema fotogramétrico requer, para alta precisão, câmeras métricas,

dotadas de “reseau” e marcas fiduciais calibradas, indispensáveis para os procedimentos das orientações interior, relativa e absoluta, necessárias para reconstituição das imagens do microrrelevo.

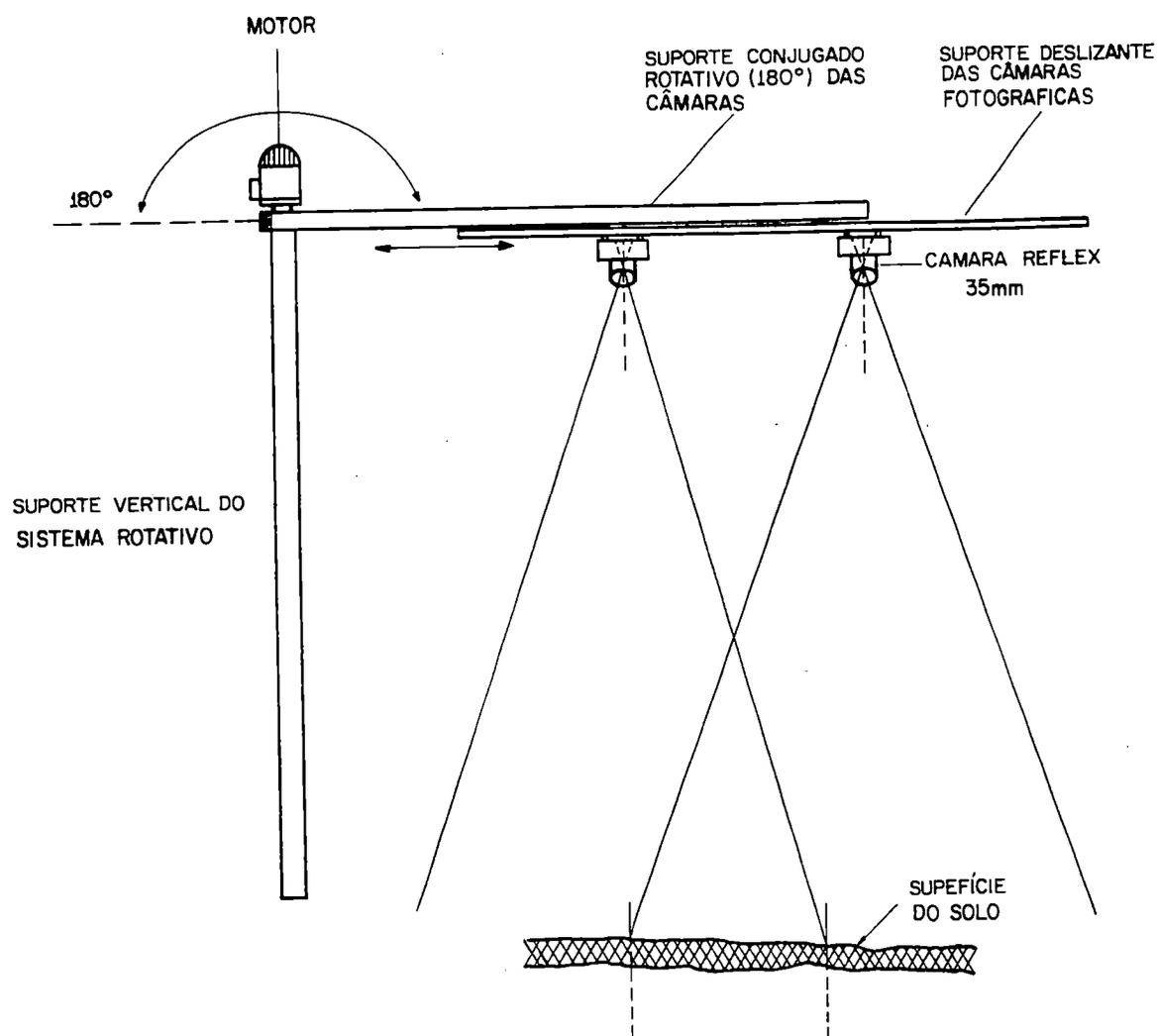
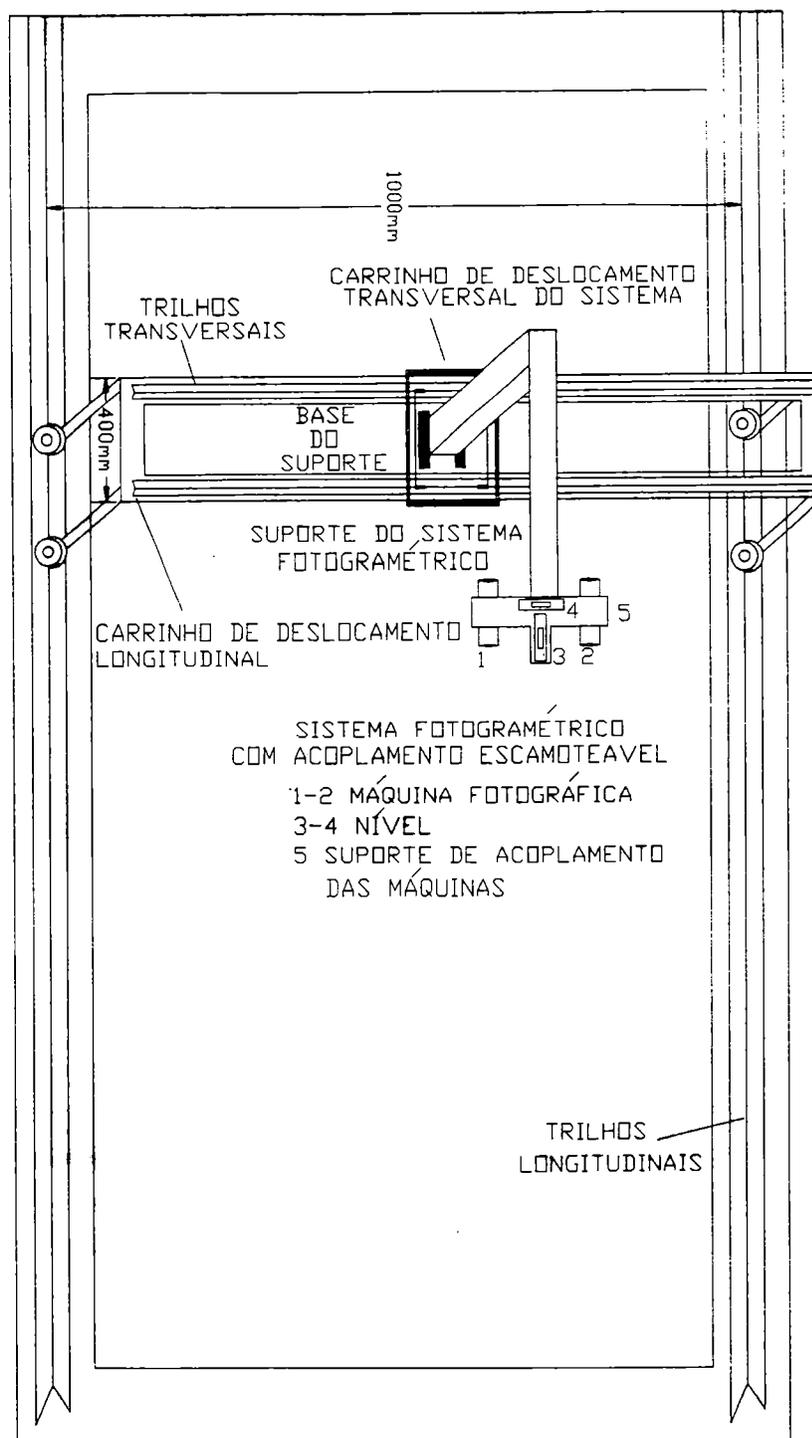


Figura 1 – Sistema fotogramétrico de aquisição de dados do microrrelevo

FIG. 2 - SISTEMA DESLIZANTE DO EQUIPAMENTO DE LEVANTAMENTO FOTOGRAMÉTRICO



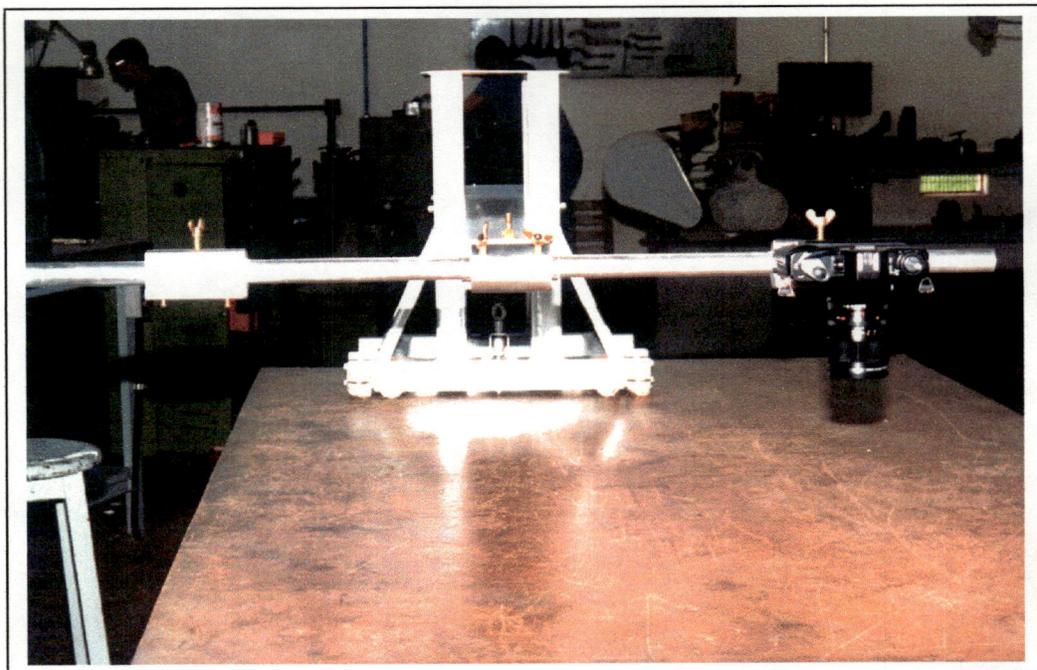


FOTO - 1. Barra de acoplamento do sistema fotogramétrico e o carrinho de transporte em montagem na Oficina Mecânica da Escola de Engenharia EESC - USP.

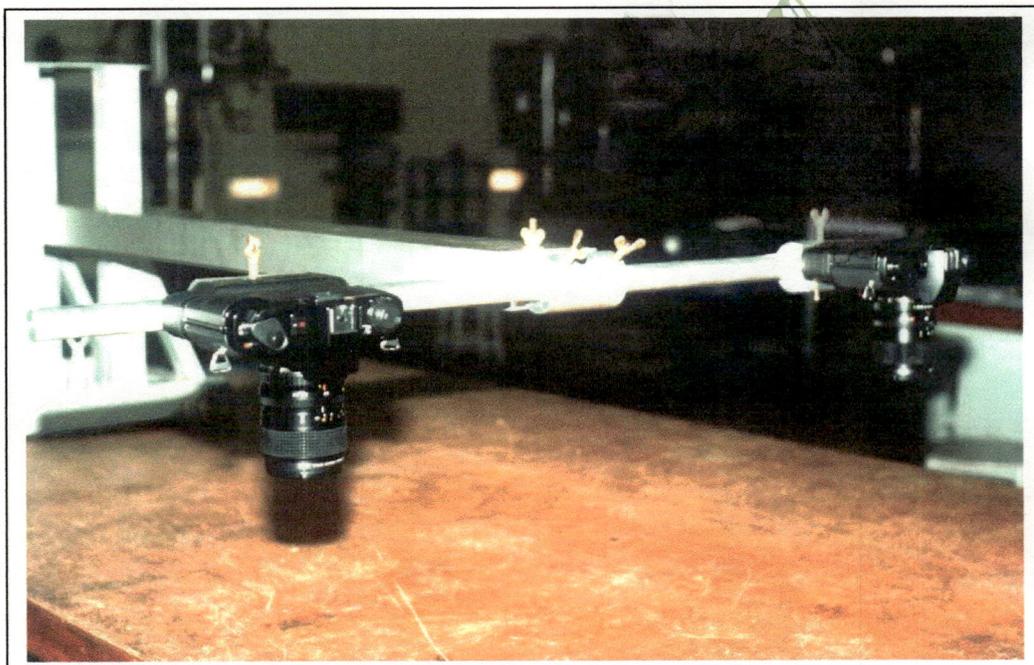


FOTO - 2. Sistema fotogramétrico montado com duas câmeras Minolta X-300S