

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Márcio Luis Dalmas Narvaez**

**CORRENTES DE DENSIDADE: CAMPO DE TENSÕES**

Porto Alegre

julho 2016



**MÁRCIO LUIS DALMAS NARVAEZ**

**CORRENTES DE DENSIDADE: CAMPO DE TENSÕES**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientador: Rafael Manica**  
**Coorientadora: Carolina Holz Boffo**

Porto Alegre  
julho 2016



**MÁRCIO LUIS DALMAS NARVAEZ**

**CORRENTES DE DENSIDADE: CAMPO DE TENSÕES**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor/a Orientador/a e pelo Coordenador da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2016

Prof. Rafael Manica  
Dr. em Recursos Hídricos e Saneamento  
Ambiental pela UFRGS  
Orientador

Eng. Carolina Holz Boffo  
Msc. em Recursos Hídricos e Saneamento  
Ambiental pela UFRGS  
Coorientadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Luiz Augusto Magalhães Endres**  
**(UFRGS)**  
Dr. em Engenharia Mecânica pela UFRGS

**Prof. Eduardo Puhl**  
**(UFRGS)**  
Dr. em Recursos Hídricos e Saneamento  
Ambiental pela UFRGS

**Prof. Rafael Manica**  
**(UFRGS)**  
Dr. em Recursos Hídricos e Saneamento  
Ambiental pela UFRGS

**Eng. Carolina Boffo**  
**(UFRGS)**  
Msc. em Recursos Hídricos e Saneamento  
Ambiental pela UFRGS



Dedico este trabalho a minha mãe, Daisi, que sempre me apoiou e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação esteve ao meu lado.





## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Rafael Manica, orientador deste trabalho, por ter aberto às portas do laboratório para mim e acreditado no meu trabalho desde o princípio, além de toda a atenção fornecida e a amizade construída nesse período.

Agradeço a minha coorientadora Carolina Boffo pelo empenho e dedicação nos gráficos dos campos de tensões que sintetizam este trabalho e, ao mesmo tempo, destacam a sua apresentação à comunidade científica, além de todas as dúvidas sanadas com relação aos ensaios realizados do projeto a qual fez parte.

Agradeço a toda equipe do Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade (Necod) por toda a atenção e amizade enquanto permaneci no mesmo na condição de estagiário.

Agradeço ao meu pai pela contribuição financeira no período da graduação.

Agradeço à minha irmã pelos conselhos e orientações ao longo do período da minha graduação.

Agradeço a minha mãe por todo o esforço e dedicação empregados para a minha criação e formação, além do exemplo de garra constantemente demonstrado e a todos os incentivos nos momentos mais difíceis que passei.



Caminante, son tus huellas el camino y nada más;  
Caminante, no hay camino, se hace camino al andar.

*Antônio Machado*



## RESUMO

Este trabalho versa sobre o desenvolvimento de procedimentos computacionais para modelar os métodos de cálculo para determinar as tensões de cisalhamento nas correntes de densidade geradas em laboratório. A partir da revisão da literatura que aborda os aspectos fundamentais de geração, desenvolvimento e dispersão desse fenômeno, adotaram-se os principais métodos de cálculo, que possivelmente trariam resultados relevantes com base na origem dos dados experimentalmente obtidos. Primeiramente, a modelagem exigiu um tratamento criterioso dos arquivos que continham os dados antes deles serem utilizados nos métodos para calcular as tensões propriamente ditas, justamente para garantir a consistência dos resultados finais, de acordo com o que era esperado. Na segunda parte do trabalho, foram criados procedimentos para selecionar os dados de maior interesse, com base em intervalos de tempo dos ensaios e em outros critérios correspondentes aos equipamentos de captação dos mesmos. Constatou-se que os procedimentos computacionais elaborados determinam satisfatoriamente alguns parâmetros hidráulicos mais corriqueiros com os dados experimentais analisados, como os perfis de velocidade e concentração das correntes de densidade ensaiadas, além do que as tensões de cisalhamento encontradas corroboram estudos anteriores realizados, utilizando os métodos de cálculo abordados neste trabalho. Conclui-se que foi necessário desenvolver um programa computacional, para conseguir reunir todas as funcionalidades exigidas para determinar as tensões no tempo e no espaço de uma corrente de densidade, devido ao grande número de dados que cada ensaio gerava. Desde os tratamentos dos arquivos até os cálculos efetuados, o programa foi elaborado para compreender e abranger alguns dos mecanismos mais importantes de funcionamento dos equipamentos de captação e disposição dos dados, para facilitar a sua utilização e garantir, assim, a consistência dos seus resultados finais. Por fim, se constata que, se assim for desejado, poderá se obter uma gama enorme de possibilidades de resultados através dessa ferramenta, bastando inserir os arquivos válidos e alguns parâmetros do ensaio considerado.

Palavras-chave: Correntes de densidade. Cálculo das tensões de cisalhamento.  
Procedimentos computacionais.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas do projeto de pesquisa.....	28
Figura 2 – Cronograma das etapas do trabalho.....	30
Figura 3 – Esquema ilustrativo de uma corrente de densidade.....	31
Figura 4 – Representação de uma corrente de turbidez em ambiente marinho profundo.	33
Figura 5 – Esboço detalhado da estrutura de uma corrente de turbidez (perfil longitudinal).....	35
Figura 6 – Quatro tipos de perfis de concentração e velocidade para correntes de turbidez .....	38
Figura 7 – Típica distribuição de velocidades do corpo de uma corrente de densidade...	42
Figura 8 – Perfis de velocidade, concentração e tensão de cisalhamento em um instante de tempo obtido por Altınakar (1988).....	46
Figura 9 – Canal unidirecional de porte médio (CUMP) e tanques de armazenamento de mistura.....	49
Figura 10 – Equipamento medidor de velocidades ultrassônico (UVP).....	50
Figura 11 – Medidor de alta concentração ultrassônico: a) Console; b) Sondas para medição .....	51
Figura 12 – Esquema adotado para a disposição dos equipamentos no ensaios.....	53
Figura 13 – Vista transversal de um grupo de equipamentos em uma posição do canal de ensaios.....	54
Figura 14 – Início de um típico arquivo do UVP.....	58
Figura 15 – Preenchimento até o fim do arquivo UVP com valores nulos.....	59
Figura 16 – Estrutura de um típico arquivo do UHCM.....	60
Figura 17 – Problema na ordem de preenchimento do arquivo com os dados das sondas do 1º grupo.....	64
Figura 18 – Colunas do arquivo de dados reordenadas pelo algoritmo desenvolvido.....	65
Figura 19 – Fluxograma das etapas realizadas pelo programa.....	67
Figura 20 – Diagrama de Clauser para alguns valores de $C_f$ 's estipulados.....	68
Figura 21 – Interface gráfica do programa.....	72
Figura 22 – Ícones da interface gráfica numerados.....	73
Figura 23 – Primeira tela de saída apresentada pelo programa.....	76
Figura 24 – Evolução das velocidades médias no tempo para cada sonda do UVP.....	77
Figura 25 – Dados de velocidades e concentrações selecionados pelo programa.....	78
Figura 26 – Perfis de velocidade no início meio e fim do intervalo de tempo.....	80
Figura 27 – Perfis de concentração no início, meio e fim do intervalo de tempo.....	81

Figura 28 – Resultados das tensões de cisalhamento pelo método de Clauser.....	82
Figura 29 – Perfis de tensões por Clauser, em três instantes de tempo do intervalo estipulado.....	82
Figura 30 – Resultados das tensões de cisalhamento pelo método de Michon et al.....	84
Figura 31 – Perfis de tensões por Michon et al, em três instantes de tempo.....	84
Figura 32 – Campo de velocidades obtido do ensaio E1.....	85
Figura 33 – Campo de velocidades obtido do ensaio E7.....	86
Figura 34 – Campo de velocidades obtido do ensaio E8.....	86
Figura 35 – Campo de tensões obtido do ensaio E1 pelo método de Clauser (1954).....	87
Figura 36 – Campo de tensões obtido do ensaio E7 pelo método de Clauser (1954).....	87
Figura 37 – Campo de tensões obtido do ensaio E8 pelo método de Clauser (1954).....	88
Figura 38 – Campo de tensões obtido do ensaio E1 pelo método de Michon et al. (1955).....	88
Figura 39 Campo de tensões obtido do ensaio E7 pelo método de Michon et al. (1955).....	89
Figura 40 – Campo de tensões obtido do ensaio E8 pelo método de Michon et al. (1955).....	89





## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Características técnicas do medidor de perfil de velocidades ultrassônico.....	50
Tabela 2 – Características técnicas do medidor de concentração.....	52
Tabela 3 – Ensaio com fluxos não coesivos.....	55
Tabela 4 – Curvas de calibração para composições com materiais sem coesão.....	57



## **LISTA DE SIGLAS**

VBA – *Visual Basic for Applications*

UVP – *Ultrasonic Doppler Velocity Profiler*

UHCM – *Ultrasonic High-Concentration Meter*

CUMP – Canal Unidirecional de Médio Porte

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

NECOD – Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade

IPH – Instituto de pesquisas hidráulicas



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\tau$  – tensão de cisalhamento (Pa)

S – declividade (m/m)

g – aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )

$h_m$  – altura da velocidade máxima da corrente (m)

$\Delta\rho$  – variação da massa específica entre o fluido ambiente e o fluido do fluxo ( $kg/m^3$ )

u – velocidade média da corrente (m/s)

$\rho_f$  – massa específica do fluido ( $kg/m^3$ )

$h_t$  – altura total da corrente (m)

$u_{*b}$  – velocidade de cisalhamento (m/s)

$\tau_i$  – tensão de cisalhamento de fundo ou inferior (Pa)

$\tau_s$  – tensão de cisalhamento superior (Pa)

$U_m$  – velocidade máxima da corrente (m/s)

$C_f$  – coeficiente de perda de carga

$\lambda$  = constante da lei de logarítmico

$\nu$  – viscosidade cinemática ( $m^2/s$ )

z – distância do fundo a um ponto na altura da corrente (m)

$f_i$  – coeficiente de resistência inferior

$f_s$  – coeficiente de resistência superior

$\rho_{cb}$  – massa específica da corrente abaixo da camada da velocidade máxima ( $kg/m^3$ )

a – limite inferior de integração

$b$  – limite superior de integração

$Y_+$  – distância adimensional (-)

$U_+$  – velocidade adimensional (-)

$f(a)$  – valor da função em um ponto “a” qualquer

$f(b)$  – valor da função em um ponto “b” qualquer

$CV$  – concentração volumétrica da mistura (%)

$\rho_m$  – massa específica da mistura ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\rho_a$  – massa específica da água ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\rho_s$  – massa específica do sedimento ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )





## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	25
<b>2 DIRETRIZES DE PESQUISA</b> .....	26
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA.....	26
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	26
<b>2.2.1 Objetivo principal</b> .....	26
<b>2.2.2 Objetivos secundários</b> .....	26
2.3 PRESSUPOSTO.....	27
2.4 PREMISA.....	27
2.5 DELIMITAÇÃO.....	27
2.6 LIMITAÇÕES.....	27
2.7 DELINEAMENTO.....	27
<b>3 CORRENTES DE DENSIDADE</b> .....	31
3.1 IMPORTÂNCIA DAS CORRENTES DE DENSIDADE.....	32
3.2 CARACTERIZAÇÃO DE UMA CORRENTE DE TURBIDEZ.....	34
<b>3.2.1 Perfil de Velocidades</b> .....	36
<b>3.2.2 Perfil de Concentração</b> .....	37
<b>4 TENSÕES DE CISALHAMENTO EM CORRENTES DE DENSIDADE</b> .....	39
4.1 MÉTODOS DE CÁLCULO DE TENSÕES DE CISALHAMENTO.....	40
<b>4.1.1 Método de Michon et al. (1955)</b> .....	40
<b>4.1.2 Método de Clauser (1954)</b> .....	42
4.2 PERFIL DE TENSÕES.....	44
<b>5 MODELAGEM FÍSICA</b> .....	47
5.1 MÉTODOS DE MODELAGEM FÍSICA.....	47
5.2 APARATOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	47
<b>6 METODOLOGIAS UTILIZADAS</b> .....	53
6.1 METODOLOGIAS DOS ENSAIOS REALIZADOS.....	53
<b>6.1.1 Materiais e concentrações volumétricas das misturas injetadas</b> .....	55
<b>6.1.2 Arquivos gerados pelo UVP</b> .....	58
<b>6.1.3 Arquivos gerados pelo UHCM</b> .....	60
6.2 METODOLOGIA COMPUTACIONAL ADOTADA.....	62
<b>6.2.1 Tratamento dos arquivos do UVP</b> .....	62
<b>6.2.2 Tratamento dos arquivos do UHCM</b> .....	63
<b>6.2.3 Agrupamento dos dados</b> .....	65

<b>6.2.4 Considerações sobre o método de Clauser (1954)</b> .....	68
<b>6.2.5 Considerações sobre o método de Michon et al (1955)</b> .....	69
6.3 INTERFACE GRÁFICA.....	70
<b>7 RESULTADOS ENCONTRADOS</b> .....	75
7.1 DADOS DE INTERESSE SELECIONADOS.....	75
7.2 PERFIL DE VELOCIDADES.....	79
7.3 PERFIL DE CONCENTRAÇÕES.....	80
7.4 PERFIL DE TENSÕES POR CLAUSER (1954).....	81
7.5 PERFIL DE TENSÕES POR MICHON ET AL (1955).....	83
<b>8 CAMPO DE TENSÕES E VELOCIDADES</b> .....	85
8.1 CAMPO DE VELOCIDADES.....	85
8.2 CAMPO DE TENSÕES PELO MÉTODO DE CLAUSER (1954).....	87
8.3 CAMPO DE TENSÕES PELO MÉTODO DE MICHON ET AL. (1955).....	88
<b>9 CONCLUSÕES</b> .....	90
REFERÊNCIAS.....	91

## 1 INTRODUÇÃO

As correntes de densidade são fluxos gravitacionais que fluem devido à diferença de densidade entre o fluxo e o fluido ambiente. Na natureza, as correntes de densidade são fenômenos importantes já que algumas reservas de hidrocarbonetos, exploradas no Brasil, foram formadas por depósitos sedimentares oriundas dessas correntes em alto mar, motivo pelo qual despertam o interesse da indústria do petróleo.

Com relação à sua hidrodinâmica, a determinação do perfil de velocidade para uma corrente de turbidez é significativamente diferente de escoamentos em canais, porque os efeitos cisalhantes na camada superior da corrente não podem ser desconsiderados. Apesar do grande avanço nas pesquisas dos fenômenos envolvidos no seu processo de formação, desenvolvimento e deposição de fluxos de densidade, ainda hoje, a dinâmica das tensões de cisalhamento não é bem compreendida.

Desta forma, esse trabalho contribui para ajudar a preencher essa lacuna, determinando o campo de velocidades e tensões de cisalhamento no tempo e espaço das correntes de densidade reproduzidas em laboratório. Espera-se, também, implementar procedimentos computacionais para análise e processamento dos dados provenientes dos equipamentos de medição das simulações físicas dessas correntes. Esse processamento tem por finalidade tornar mais eficiente e simples o mecanismo de obtenção das informações mais relevantes, para a obtenção dos resultados objetivados.

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa do trabalho é: o processamento computacional através da modelagem dos métodos teóricos de cálculo das tensões de cisalhamento em correntes de densidade são úteis para representar o perfil de tensões de cisalhamento e o campo de tensões no tempo e no espaço destes fluxos simulados em laboratório?

### **2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundário e são descritos a seguir.

#### **2.2.1 Objetivo principal**

O objetivo principal do trabalho é desenvolver procedimentos computacionais que auxiliem no cálculo das tensões de cisalhamento através de métodos teóricos e na análise das principais informações para a obtenção do campo de tensões, para quantificar os seus efeitos junto às interfaces inferior e superior de correntes de densidade simuladas em laboratório.

#### **2.2.2 Objetivos secundários**

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) criar uma metodologia computacional de análise de dados de simulação física geradas em laboratório;
- b) obter perfis de velocidades e de concentrações a partir dos dados brutos dos ensaios realizados em laboratório.
- c) verificar a adequabilidade dos equipamentos de medição utilizados na geração dos dados para gerar os campos de tensões.

## 2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que existe correlação entre as tensões de cisalhamento calculadas com dados de correntes de densidade simuladas em laboratório e o campo de tensões provenientes da ocorrência do fenômeno físico natural.

## 2.4 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que o entendimento da distribuição de tensões de cisalhamento é importante por se tratar de um parâmetro hidráulico fundamental do escoamento.

## 2.5 DELIMITAÇÃO

O trabalho delimita-se ao estudo de tensões de cisalhamento, perfil de velocidades e perfil concentrações em correntes de densidade.

## 2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

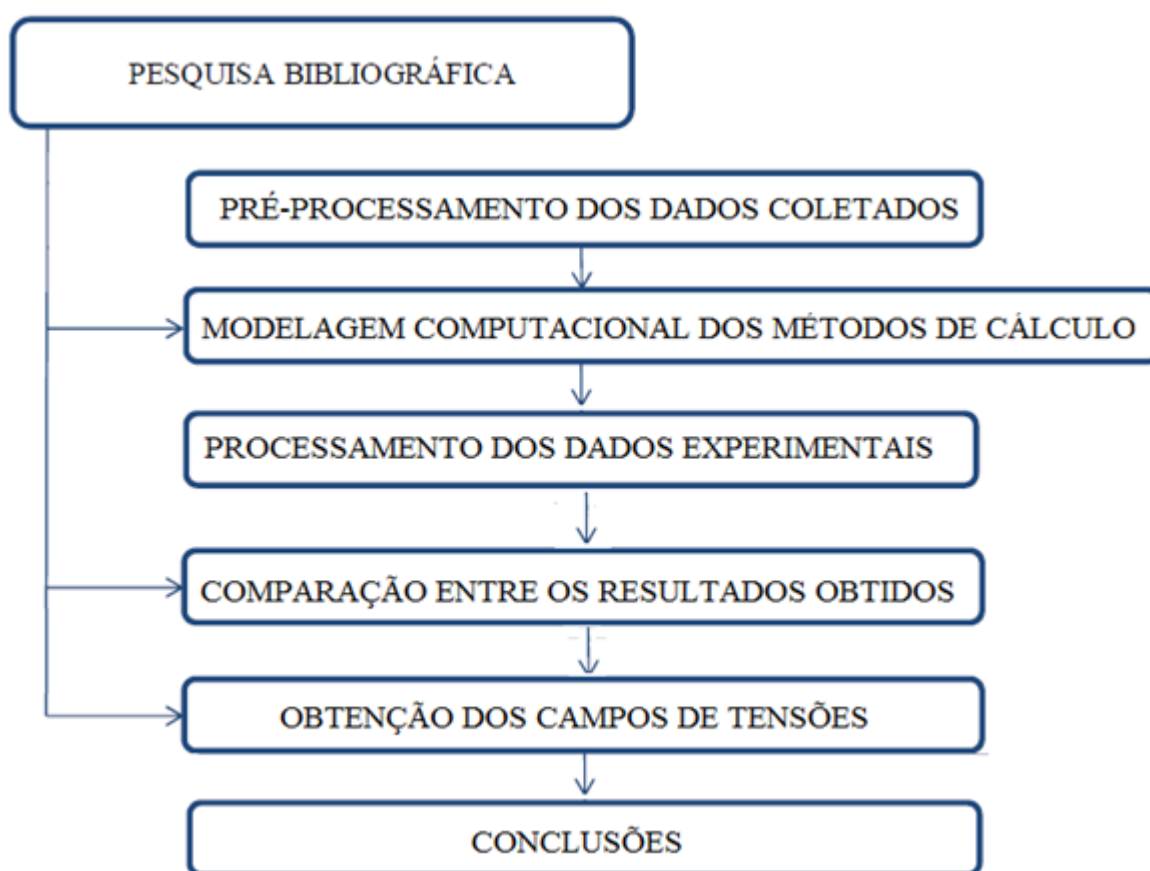
- a) dentre as correntes de densidade serão avaliadas aquelas formadas por água e sedimento (carvão);
- b) os experimentos foram realizados em canal retangular bidimensional (15 m comprimento x 0,4 m largura x 1,0 m altura);
- c) os dados brutos foram coletados a partir de equipamentos medidores de velocidade (UVP – Ultrasound Velocity Profile) e de concentração (UHCM – Ultrasound High Concentration Meter);
- d) o fluido ambiente utilizado foi a água;
- e) a análise das tensões de cisalhamento neste trabalho se restringe ao “corpo” da corrente, ficando de fora a cabeça e a cauda da mesma.

## 2.7 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) pré-processamento dos dados coletados em laboratório;
- c) modelagem computacional dos métodos de cálculo;
- d) processamento dos dados experimentais;
- e) comparação entre os resultados obtidos;
- f) obtenção dos campos de tensões;
- g) conclusões.

Figura 1 – Diagrama das etapas do trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

A **pesquisa bibliográfica**, além de ser a etapa inicial do presente trabalho, foi realizada durante todo o período de sua elaboração. Esta parte constituiu-se da busca, leitura e aprendizagem constante das informações referentes a cada etapa desenvolvida, por meio de livros, artigos e trabalhos acadêmicos, a fim de obter informações sobre o fenômeno das correntes de densidade, propriamente dito, e destacar, também, informações exclusivas sobre as tensões de cisalhamento que ocorrem nesse fenômeno. Os métodos de cálculo utilizados para calcular esse

parâmetro hidráulico também foram definidos nessa etapa do trabalho. Simultaneamente com a pesquisa bibliográfica, os dados coletados nos ensaios experimentais foram submetidos a um **pré-processamento**, devido à problemas estruturais observados nos arquivos detentores dos dados, que serviu posteriormente para desenvolver uma metodologia computacional que busca preparar esses arquivos para servirem como entrada nos procedimentos posteriores, tornando esse mecanismo sistemático para aumentar a eficiência e a precisão ao encontrar os resultados finais. A viabilidade da proposta do trabalho foi possível, pois se determinou uma infraestrutura computacional para tal, caso contrário ficaria insustentável executar todos os procedimentos manualmente, pois as dimensões das matrizes dos arquivos, provenientes de cada ensaio, são muito grandes, devido ao mecanismo de captação dos dados pelos aparelhos de medição, onde esses prosseguem as medições durante todo o tempo do ensaio de uma corrente de densidade, que, muitas vezes, chega a durar vários minutos, sendo que cada instante de tempo (menor que uma unidade de segundo) colocam um dado nessas matrizes. Fora o problema das dimensões dos arquivos de dados, as chances de ocorrerem erros nos procedimentos de cálculo, quando executados manualmente, justamente pelo número de interações necessárias, são altas, ainda mais quando se objetiva processar todos os dados disponíveis nos arquivos. Todo o desenvolvimento de programação foi feito na linguagem VBA (*visual basic for applications*) que é executada na plataforma *Microsoft Office Excel*.

Dando seguimento, a **modelagem computacional dos métodos** consistiu na programação dos métodos de cálculo pesquisados, utilizando as mesmas ferramentas da etapa anterior, para calcular as tensões de cisalhamento em correntes de densidade. O próximo ponto é referente à **processamento dos dados experimentais**, isto é, os arquivos de dados organizados e preparados na primeira etapa do trabalho foram processados com o objetivo de selecionar e agrupar os dados mais relevantes para que posteriormente servissem como entrada nos métodos modelados.

Em sequência, como pode ser observado na figura 2 – que apresenta um cronograma simplificado para as etapas de pesquisa do trabalho – foi feita a **comparação entre os resultados obtidos** a fim de relacionar e apresentar os resultados dos diferentes métodos teóricos de cálculo utilizados no trabalho e também fazer observações estatísticas dos resultados provenientes dos diferentes experimentos ensaiados em laboratório, uma vez que cada ensaio poderá retornar resultados diferentes, dependendo do intervalo de tempo analisado.

Por fim, com os dados selecionados, foram gerados **os campos de tensões** referentes a apenas alguns ensaios, com o intuito de demonstrar os resultados finais obtidos do processamento dos dados submetidos aos procedimentos computacionais desenvolvido neste trabalho. Nessa parte, os dados resultantes desse processamento foram aplicados em um programa específico de curvas de contorno para gerar esses campos.

Figura 2 – Cronograma das etapas do trabalho

ETAPAS	ago/15	set/15	out/15	nov/15	mar/16	abr/16	mai/16	jun/16
Pesquisa bibliográfica	X	X	X	X	X	X	X	X
Pré-processamento dos dados coletados	X	X	X	X				
Processamento dos dados experimentais					X	X	X	
Comparação entre os resultados obtidos							X	X
Obtenção dos campos de tensões								X
Conclusões								X

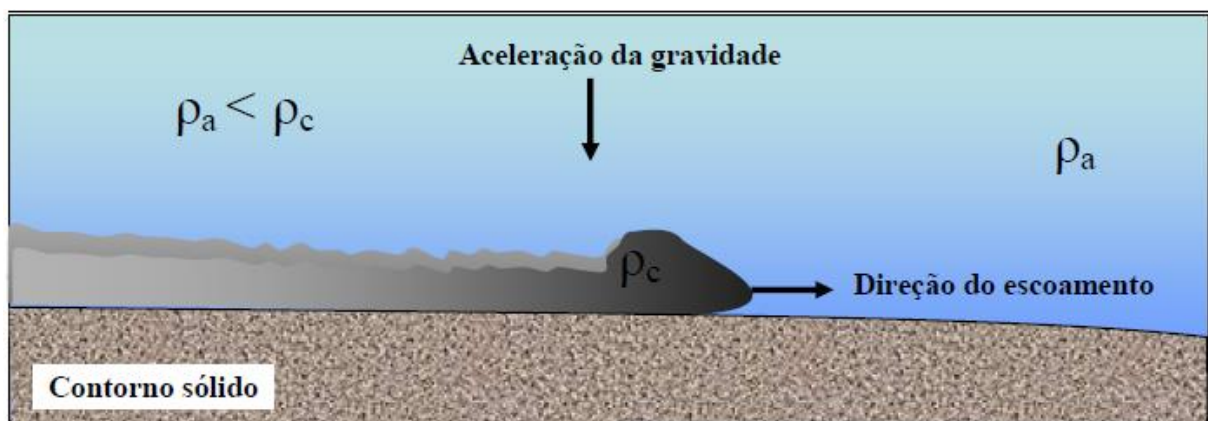
(fonte: elaborado pelo autor)



### 3 CORRENTES DE DENSIDADE

As correntes de densidade são geradas por um mecanismo de diferença de densidade entre um fluido e o fluido no entorno do mesmo. Middleton e Southard (1984, p. 327, tradução nossa) definem esse mecanismo como sendo “[...] correntes devido à ação da gravidade com diferenças relativamente pequenas na densidade entre diferentes camadas de um fluido.” Manica (2002, p. 1) também contribui nesta definição afirmando que “Esse movimento, governado principalmente pelas forças de empuxo, pode ocorrer junto às superfícies superior e inferior do fluido ambiente, bem como no seu interior.” Essa diferença na densidade entre fluidos pode ocorrer por diferença nas suas temperaturas, substâncias em solução, sólidos suspensos ou alguma combinação entre esses fatores. Alguns exemplos de ocorrência na natureza desse fenômeno são as plumas de rios, tempestades de poeira, avalanches entre outros. A figura 3 esboça uma típica corrente de densidade com seu esquema ilustrativo, “[...] na qual a geometria da corrente está bastante simplificada e não mostra a sua forte tridimensionalidade.” (BOFFO, 2010, p. 7).

Figura 3 – Esquema ilustrativo de uma corrente de densidade



(fonte: BOFFO, 2010, p. 7)

As correntes de densidade podem ser classificadas em dois grandes grupos com relação à hidrodinâmica das diferenças de densidade entre o fluido da corrente e o fluido ambiente. O primeiro grupo é chamado de correntes conservativas e abrange os casos onde existem substâncias dissolvidas no fluido, ou seja, a quantidade de material contido nesse fluido não varia ao longo do escoamento (um exemplo desse tipo de corrente seria o sal como substância

dissolvida na água e somente água no fluido ambiente). “Na evolução de correntes conservativas ocorre apenas a diminuição da concentração por efeito de aumento da diluição devido à incorporação de fluido ambiente.” (DÜCKER, 2007, p. 1). No segundo caso, mais conhecido como, por exemplo, correntes de turbidez, estão as correntes não conservativas, que possuem material granular presente em suspensão no fluido da corrente. Esse tipo de corrente sofre processos de deposição ou erosão ao longo do seu percurso, pois o material presente em suspensão no seu fluxo decanta ou é adicionado pela superfície inferior da corrente. Uma demonstração desse processo de troca de sedimento com o fundo a cima é descrita por Middleton e Southard (1984, p. 327, tradução nossa):

Primeiro, o fluxo deve ser iniciado por algum evento que toma um grande volume de sedimento em suspensão. As partículas em suspensão são suportadas pelo fluido, que faz com que ele atue como se tivesse uma densidade mais elevada do que a do fluido circundante livre de sedimento. A diferença de densidade efetiva, combinada com a ação da gravidade, produz um fluxo à jusante; esse movimento do fluido, por sua vez produz turbulência no fluido, o qual tende a manter o sedimento em suspensão e, portanto impedir que a corrente de turbidez dissipe-se por deposição. A manutenção da turbulência e, portanto, da suspensão e do fluxo da corrente de turbidez, depende de uma entrada de energia constante, que é derivada do fluxo de corrente em declives.

Os dados coletados em laboratório para a realização deste trabalho foram obtidos a partir de simulações físicas de correntes de turbidez. Portanto, o foco deste trabalho consiste nesse tipo específico de corrente de densidade.

### 3.1 IMPORTÂNCIA DAS CORRENTES DE DENSIDADE

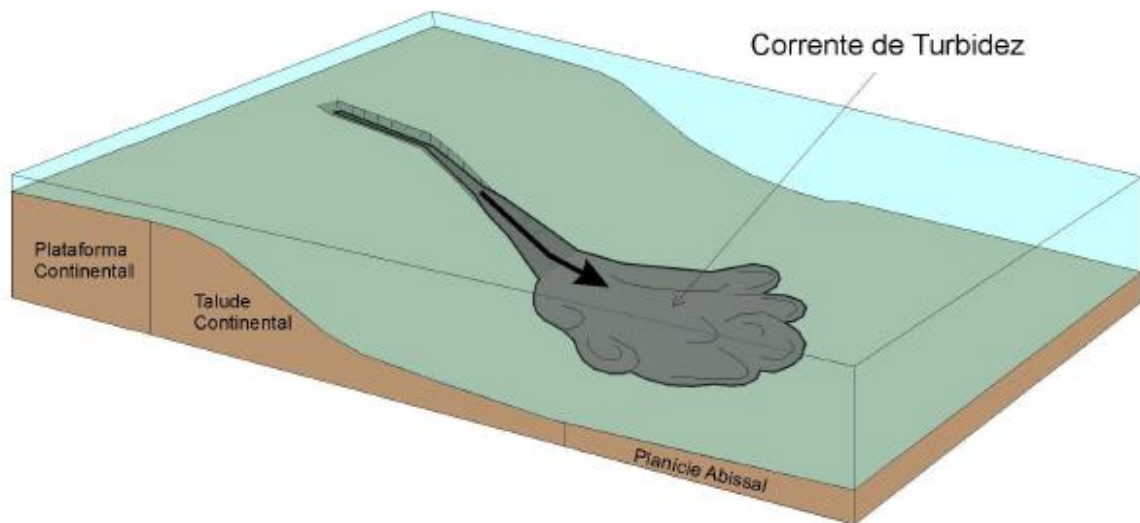
As correntes de densidade estão presentes em muitos eventos geradores de impactos ambientais no planeta terra. Podem ser citadas como exemplos a dispersão de poluentes na atmosfera e a propagação de derrames de óleo no mar ou em rios. Nas ocorrências naturais relacionadas a este fenômeno, como nas atividades vulcânicas ou em correntes originadas no fundo do mar, podem decorrer também transtornos de grande porte para a sociedade, como o rompimento de cabos submarinos ou acidentes industriais. Diante desse quadro impactante que envolve o estudo desse fenômeno, ele vem despertando, nos últimos anos, o interesse por parte de diferentes áreas da ciência, tais como a engenharia civil, meteorologia, oceanografia, geologia e termodinâmica.

Excluindo os fatos catastróficos associados às correntes de densidade, um dos principais mecanismos de formação do leito oceânico e, conseqüentemente, de algumas rochas sedimentares em ambiente marinho profundo são as correntes de turbidez não conservativas

(SIMPSON 1997, p. 219, tradução nossa). Esses sistemas de depósito de sedimentos encontrados no fundo do mar, normalmente são chamados de turbiditos. “Esses depósitos são importantes economicamente, pois constituem-se em reservatórios de hidrocarbonetos em diversos locais no mundo, despertando o interesse dos pesquisadores e da indústria de petróleo.” (MANICA, 2002, p. 5). Dücker (2007, p. 5), ainda afirma que:

As correntes de turbidez têm um papel importante na formação e modificação do leito oceânico. Estes fluxos são os principais responsáveis pelo transporte e deposição de sedimentos desde a plataforma continental até as águas oceânicas profundas, onde se localizam os principais sistemas turbidíticos. Este processo de transporte e deposição de sedimentos, que caracteriza as correntes de turbidez não conservativas, tem, como possível mecanismo de iniciação, a remobilização do sedimento depositado na plataforma continental ou na cabeça do talude continental. As correntes de turbidez também podem ser geradas diretamente pela descarga fluvial em oceanos, onde a carga de sedimentos está ligada à área fonte, ou ainda, por escorregamento do material presente no talude.

Figura 4 – Representação de uma corrente de turbidez em ambiente marinho profundo



(fonte: FICK, 2012, p. 2)

A questão econômica associada a estes tipos de depósitos específicos provenientes das correntes de turbidez, não só possui relevância no cenário mundial, mas principalmente no Brasil, pois o país possui uma grande área costeira (alta probabilidade de gerar reservatórios de hidrocarbonetos a partir desse fenômeno) e um potencial hídrico fluvial considerável. “Os sistemas deposicionais turbidíticos são responsáveis pelo armazenamento de grande parte dos hidrocarbonetos encontrados na costa brasileira, uma vez que, sob certas condições de porosidade e permeabilidade, eles se constituem em excelentes rochas reservatórios.”

(DÜCKER, 2007, p. 1). A figura 4 tenta reproduzir a iniciação e o transporte de sedimento em ambiente marinho profundo através da ocorrência de uma corrente de turbidez.

Assim, percebe-se a grande importância do estudo desse fenômeno, não só com relação aos benefícios econômicos e energéticos provenientes da exploração de petróleo nas profundezas oceânicas, mas também na prevenção e entendimento de alguns eventos naturais, que por ventura, podem ocorrer através da geração dessas correntes.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DE UMA CORRENTE DE TURBIDEZ

O processo de transporte e deposição de sedimento que caracteriza as correntes de turbidez tem como seu mecanismo de iniciação a remobilização do sedimento depositado na plataforma continental ou na cabeça do talude continental devido principalmente pela ocorrência de eventos catastróficos, como terremotos, falhas sedimentares, tempestades, erupções vulcânicas etc. (Noward e Piper apud Mutti et al., 1999); ou pela descarga fluvial em oceanos, onde a carga de sedimentos está ligada à fonte fluvial (Manica, 2002). A dinâmica do escoamento de uma corrente de densidade é menos compreendida do que a dinâmica de canais a superfície livre, porque, segundo Manica (2009, p. 31):

Numa visão geral, ou seja, analisando desde a fonte até a deposição, ainda hoje, nota-se que há dúvidas quanto a sua inicialização (formação), transporte e deposição. Um motivo para que isso ocorra é que esses eventos são raros, inacessíveis (grande magnitudes) e de difícil monitoramento *in loco*.

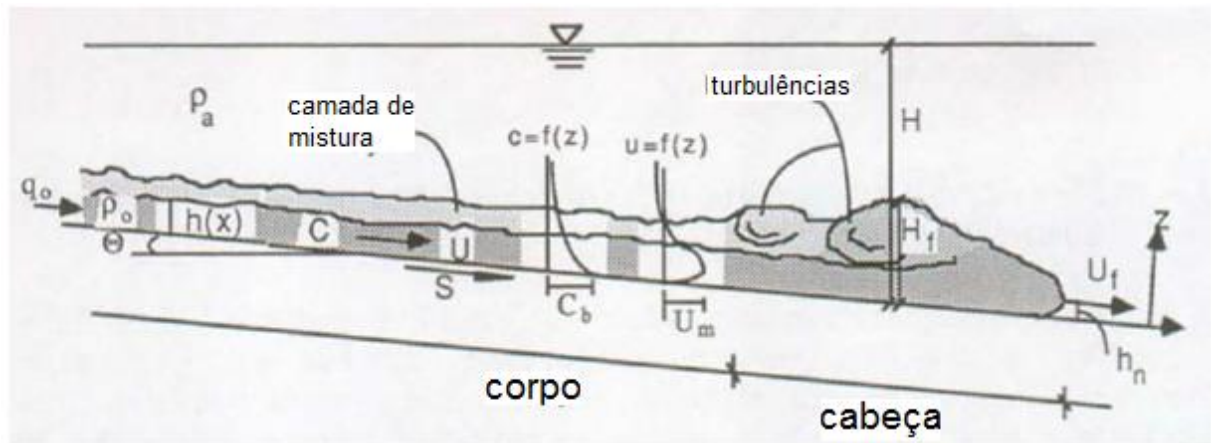
Kneller e Buckee (2000, p. 65, tradução nossa) afirmam ainda que “Muitos sistemas turbidíticos, em especial sistemas de leques submarinos (*fan*), mostram conexões óbvias com rios. O crescimento dos sistemas turbidíticos ocorre quando sistemas fluviais podem descarregar diretamente na quebra da plataforma.”.

No que diz respeito ao transporte de sedimentos por esses fluxos, Middleton e Southard (1984, p. 327, tradução nossa) afirmam que “A maioria dos fluxos que transportam sedimentos são turbulentos.”. Disso, surgem novas dificuldades para analisar e modelar esse tipo de fluxo, como explicado por Kneller e Buckee (2000, p. 67, tradução nossa) dizendo que “A estrutura da turbulência afeta o modo pelo qual o sedimento é suspenso e transportado e, conseqüentemente, a maneira em que o comportamento de correntes de turbidez e a deposição de sedimento é modelado.”. A turbulência torna “[...] o fenômeno não uniforme (variação no espaço), não permanente (variação no tempo), não linear e com condições de contorno livres

(diferença de densidade entre o fluido ambiente e corrente que varia, não se conservando ao longo do fluxo).” (MANICA, 2009, p. 31).

As correntes de turbidez geralmente apresentam uma forma específica, podendo ser dividida em três partes: a cabeça, o corpo e, às vezes, uma cauda finalizando a sua estrutura (figura 5).

Figura 5 – Esboço avançado da estrutura de uma corrente de turbidez (perfil longitudinal)



(fonte: modificado de ALTINAKAR, 1988, p. [2.1])

Dücker (2007, p. 8) analisa esse aspecto do fluxo da seguinte forma:

O movimento contínuo da cabeça da corrente com velocidade constante requer a transferência de fluido mais denso da cauda para a cabeça, no intuito de compensar a perda de carga, a mistura de fluidos e a perda de fluido denso na região da cabeça. Ainda é pouco conhecida a distribuição de velocidades e a natureza das condições de contorno na corrente de densidade. O fluxo dentro da cabeça é muito instável e não uniforme por causa da entrada de fluido proveniente do corpo e cauda da corrente, da incorporação de fluido ambiente e do desprendimento de vórtices.

O presente trabalho vai se concentrar apenas no corpo de uma corrente de turbidez, ficando de fora a cabeça e a cauda. Dessa forma, nos próximos itens, a seguir, serão desenvolvidos os temas sobre perfil de velocidades e perfil de concentrações de correntes de turbidez, com enfoque maior no corpo da mesma. Os dados dos ensaios analisados para concepção deste trabalho foram selecionados a partir de correntes de turbidez simuladas em laboratório, de forma que abrangessem somente o corpo da mesma.

### 3.2.1 Perfil de Velocidades

Manica (2009, p. 35) comenta essa grandeza da seguinte forma:

O perfil de velocidades de uma corrente de turbidez apresenta um formato com valores nulos nas interfaces e com crescimento de valores em direção ao meio da camada, até atingir um valor máximo. A altura onde ocorre essa velocidade máxima é controlada pela razão das forças de arraste nas interfaces superior e inferior ocorrendo, em muitos experimentos, em 0,2 a 0,3 vezes a altura da corrente.

Para determinar o perfil de velocidades de uma corrente de turbidez (Figura 6) os efeitos cisalhantes, nas interfaces inferior e superior, não podem ser desconsiderados, enquanto que nos canais de escoamento à superfície livre, os efeitos cisalhantes entre a água e o ar podem ser descartados. Esse fato apresenta uma significativa diferença entre esses dois tipos de escoamentos, que deve sempre ser levado em conta na análise do perfil de velocidade das correntes de turbidez.

O perfil de velocidades das correntes de turbidez possui um caráter altamente dinâmico devido às variações temporais e espaciais do fluxo, que estão relacionadas diretamente com a dinâmica das partículas imersas no mesmo, como melhor exprime McCaffrey et al. (2003, p. 852, tradução nossa):

[...] a estrutura de qualquer região particular (tal como a cabeça) medida em um tempo, não pode ser comparada diretamente com a estrutura de outra região (tal como o corpo) medido em um tempo diferente, a menos que a taxa de variação espacial da corrente seja pequena ou zero, de tal modo que a estrutura de qualquer região particular seja essencialmente a mesma, independente da posição de medição. Na prática esta condição é improvável de ser alcançada porque a maioria das correntes de turbidez não são uniformes ao longo do seu comprimento (mesmo na ausência de efeitos de batimetria) por causa da deposição e/ou arrastamento de sedimentos e/ou fluido.

“Tipicamente, a velocidade da corrente, que passa por um ponto fixo, vai atingir muito rapidamente o seu valor máximo quando a cabeça chegar, em seguida o fluxo diminui, durante a passagem do corpo e da cauda.” (KNELLER; BUCKEE, 2000, p. 65, tradução nossa).

Kneller e Buckee (2000, p. 72, tradução nossa) comparam ainda os efeitos do perfil de velocidades com um jato de parede plano:

Correntes de gravidade (e jatos de parede) são descritos como tendo uma região interior e exterior dividida pela velocidade máxima. A região interior, delimitada por uma parede, tem um gradiente de velocidade positivo e é geralmente inferior a metade da espessura da zona externa, que tem um gradiente de velocidade negativo.

Middleton e Southard (1984, p. 97, tradução nossa) descrevem a importância dos dados experimentais para obter informações relevantes dos perfis verticais de velocidades, comparando e relacionado essas informações com as equações que descrevem essa grandeza no escoamento dessas correntes:

[...] nós sabemos quais são as equações que temos que resolver, porém não podemos resolvê-las por causa da incerteza que a turbulência introduz quando elas forem aplicadas. O grande número de equações a serem encontradas em livros e artigos sobre o fluxo turbulento são semi-empíricas: a forma geral da equação pode ser sugerida pelo raciocínio físico, mas as constantes numéricas da equação e, portanto, sua forma específica, deve ser encontrada a partir de experimentos. Em muitos casos, nem mesmo a forma geral da equação é conhecida e a curva deve ser obtida exclusivamente por experimento.

Na figura 5, está representado também um típico perfil de velocidade, situado no corpo de uma corrente de turbidez genérica.

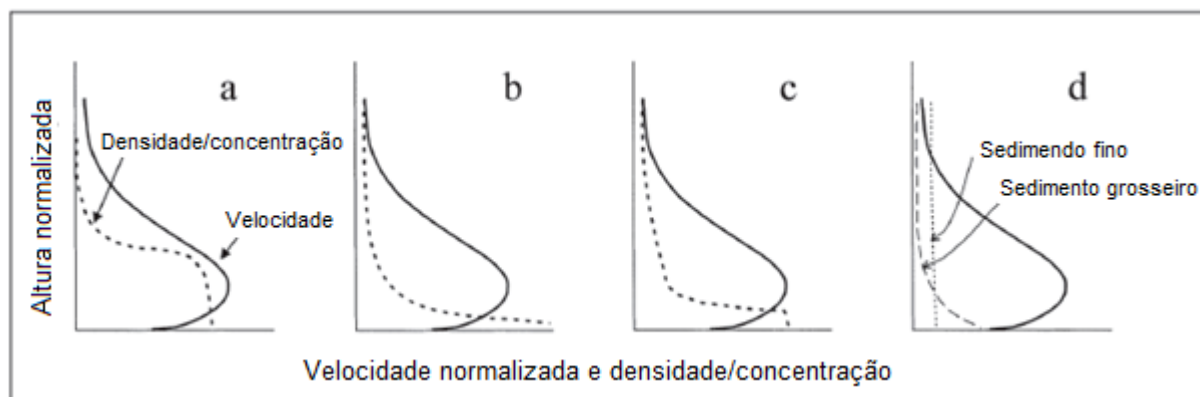
### 3.2.2 Perfil de Concentração

O perfil vertical de concentrações de uma corrente de turbidez é outro parâmetro importante no estudo desse fenômeno. Kneller e Buckee (2000, p. 72, tradução nossa) explicam que “Foram propostos vários modelos para a distribuição de densidade em correntes de gravidade.” e expõem que “Correntes de gravidade tem uma estratificação de densidade (existe um gradiente vertical na concentração) que tem uma densa camada basal de fluido e sedimento, com uma região mista menos densa, mais homogênea acima.”.

Kneller e Buckee (2000, p. 73, tradução nossa) também apresentaram quatro tipos de perfis de concentração nas correntes de gravidade, como mostra a figura 6. Manica (2009, p. 36) explica essa figura da seguinte forma:

No primeiro caso, um modelo bidimensional típico, o fluxo é dividido em uma região inferior, uma zona mais densa de espessura constante e uma região superior, a qual é mais diluída por causa do carregamento de água ambiente. No segundo, o perfil é típico de correntes de densidade não conservativas com baixa concentração, as quais são fortemente estratificadas, com o gradiente de densidade maior perto da base da corrente e decrescendo rapidamente perto dos níveis de velocidade máxima. Na terceira parte, a distribuição da densidade apresenta um perfil de concentração inclinado sendo frequentemente observado em correntes erosivas ou em correntes com a alta taxa de carregamento na camada superior. O último perfil foi baseado em experimentos em que a distribuição granulométrica foi medida, mostrando que o material fino é mais uniforme distribuído na vertical do que o material mais grosso, o qual tende a se tornar concentrado na camada de baixo do fluxo.

Figura 6 – Quatro tipos de perfis de concentração e velocidade para correntes de turbidez



(fonte: KNELLER; BUCKEE, 2000, p. 73)

Dessa forma, como os experimentos que subsidiaram esse trabalho correspondem à correntes de turbidez deposicionais, que depositam grande parte do sedimento originalmente misturado e injetado no ensaio, espera-se encontrar perfis de concentração como os da figura 6-C, que possuem a maior densidade na sua base, decrescendo com a altura até próximo à velocidade máxima, onde a sua concentração começa a ficar próxima da água à 20° C.



## 4 TENSÕES DE CISALHAMENTO EM CORRENTES DE DENSIDADE

Em correntes de densidade com sedimentos suspensos no fluxo algumas vezes é necessário associar a velocidade do fluxo com o sedimento (acumulado ou depositado) pela passagem da corrente, para melhor entender a hidrodinâmica do fenômeno. As tensões de cisalhamento entram como uma parte intermediária no estudo desse processo.

A capacidade de carregar partículas sólidas de uma corrente de densidade é reduzida quando a velocidade do fluxo diminui. Após uma fase de aceleração, a velocidade da corrente tende a desacelerar, tornando, também a turbulência menos intensa. Dessa forma, a corrente diminui sua capacidade de suspender sedimentos, ficando, logicamente, os menos pesados por último na ordem de deposição de partículas sobre o leito (HISCOTT, 1994, p. 213).

Boffo (2010, p. 84) observa ainda nos seus experimentos que:

A força de interação é proporcional à tensão de cisalhamento, transmitida entre os grãos, que se contrapõe à tendência dos grãos de se afastarem. No experimento em que foram utilizados os sedimentos mais grossos, ou seja, com maiores tamanhos médios de grãos, a maior distância entre os grãos não produzia uma interação efetiva, permitindo, assim, uma rápida expansão da corrente, e fazendo com que os grãos fossem carregados juntamente com o fluido que ascendia dentro do canal.

Existe uma região próxima à parede (contorno sólido) de um escoamento, que as forças de viscosidade são preponderantes sobre as forças de inércia, sendo essa região chamada de subcamada viscosa, dentro da camada limite. A velocidade do escoamento é adimensionalizada pela velocidade de cisalhamento e a distância à parede, para determinar a subcamada viscosa, é adimensionalizada em função das tensões que ocorrem junto às mesmas (MANICA, 2009, p. 37).

Assim, as tensões de cisalhamento estão diretamente associadas na relação da hidrodinâmica de uma corrente de turbidez com a forma do leito. A forma do leito, por conseguinte, está associada também com o tipo de partícula contida no fluxo da corrente. Essas relações, provenientes dos estudos de correntes de turbidez, remetem a grande importância de encontrar os parâmetros hidráulicos do fluxo.

Nesse contexto, o presente trabalho busca determinar o campo de tensões das correntes de densidade, através de processamento de uma série de dados medidos. Os dados foram coletados

em laboratório, por simulação de correntes de turbidez. Todos os esforços se concentram na criação de um código de computador que manipule e analise estatisticamente esses dados, retornando as tensões de cisalhamento no tempo e no espaço dessas correntes simuladas. Os principais fatores que influenciam no cálculo desse parâmetro hidráulico é o perfil de concentração e o perfil de velocidade do escoamento. Isso será melhor observado e explicado nos próximos itens.

## 4.1 MÉTODOS DE CÁLCULO DE TENSÕES DE CISALHAMENTO

As correntes de densidade são fenômenos físicos, logo o cálculo das tensões de cisalhamento possuem equações com origem nas leis de Newton. É comum tentar comparar ou relacionar esse tipo de fluxo com escoamento em canais abertos, por exemplo, escoamentos em rios, entretanto existe uma significativa diferença entre esses dois escoamentos. Em correntes de turbidez os efeitos cisalhantes não podem ser desprezados nas interfaces superior e inferior do fluxo, enquanto que em escoamentos à superfície livre, a interface superior está em contato com o ar, logo as tensões de cisalhamento serão nulas e assim os seus efeitos podem ser desprezados. (MANICA, 2009, p. 39).

### 4.1.1 Método de Michon et al. (1955)

O primeiro método de cálculo abordado neste trabalho foi desenvolvido por Michon et al. (1955). Nesse método foi criado, pelos autores, uma metodologia de cálculo da tensão de cisalhamento ao longo da vertical para correntes de densidade em um canal de seção retangular e com declividade constante (MANICA, 2009, p. 40). A distribuição vertical de tensões de cisalhamento é calculada a partir dos perfis de velocidade e concentração, utilizando a equação que segue para  $0 \leq z \leq h_m$ , teremos:

$$\tau_b = S \cdot g \cdot \int_0^{h_m} \Delta\rho \cdot dz \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

$z$  = distância ao fundo (m);

$\tau_b$  = tensão de cisalhamento junto ao fundo (Pa);

$S$  = declividade (m/m);

$g$  = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);

$h_m$  = altura do ponto da velocidade máxima (m);

$\Delta\rho$  = variação da massa específica entre o fluido ambiente e o fluido do fluxo (kg/m<sup>3</sup>);

Ou seja, essa parte da equação utiliza as tensões do perfil longitudinal do fundo até a altura onde a velocidade é máxima na corrente. A equação 2 exprime a outra parte do perfil de tensões, ou seja, da altura onde a velocidade máxima até a altura total da corrente:

$$\tau = S \cdot g \cdot \int_{h_m}^z \Delta\rho \cdot dz + \rho_f \cdot \frac{\varphi'}{\varphi} \cdot \left( \int_{h_m}^z u^2 \cdot dz - u \cdot \int_{h_m}^z u \cdot dz \right) \quad (\text{equação 2})$$

Sendo que:

$$\frac{\varphi'}{\varphi} = - \frac{S \cdot g \int_{h_m}^{h_t} \Delta\rho \cdot dz}{\rho_f \int_{h_m}^{h_t} u^2 \cdot dz} \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

$u$  = velocidade média na altura  $z$  (m/s);

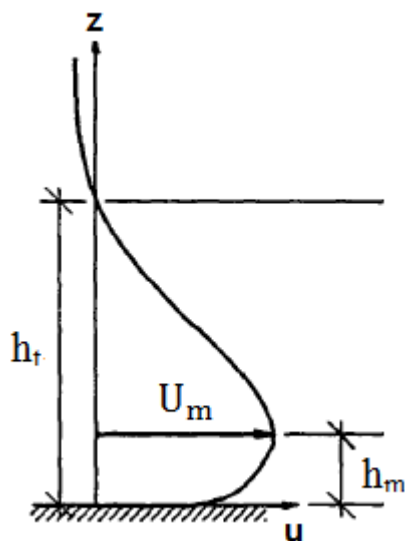
$\rho_f$  = massa específica do fluido ambiente (kg/m<sup>3</sup>);

$h_t$  = altura total da corrente (m).

A figura 7 esboça um típico perfil de velocidades do corpo de uma corrente de densidade. Para melhor visualização de alguns parâmetros do perfil foram representadas na figura a altura da velocidade máxima, a altura total da corrente, além da própria velocidade máxima.

Segundo Altinakar (1988) a parte superior do perfil de velocidades da figura 7, depois da altura total, representa o retorno da corrente no líquido ambiente, com velocidades menores que zero.

Figura 7 – Típica distribuição de velocidades do corpo de uma corrente de densidade



(fonte: modificado de ALTINAKAR, 1988)

#### 4.1.2 Método de Clauser (1954)

O segundo e último método encontrado na literatura para calcular as tensões de cisalhamento das correntes de densidade, neste trabalho, foi o método de Clauser (1954). Esse método foi adaptado do uso com água limpa para calcular as tensões de fundo em correntes de densidade (MANICA, 2009, p. 228).

O método utiliza uma função adimensional do perfil de velocidades da corrente. As velocidades e as suas distâncias ao fundo são convergidas em grandezas adimensionais mediante a aplicação das seguintes equações: Segundo Manica (2009, p. 228), “São arbitrados diferentes valores de  $C_f$  e calculados os perfis, sendo determinados, a sentimento, os pontos dos dados medidos que se enquadram dentro do intervalo delimitado por duas curvas com diferentes valores de  $C_f$ ”. Dessa forma, as equações seguintes foram utilizadas neste trabalho para a aplicação direta do método.

$$U_+ = \frac{u}{U_m} \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

$U_+$  = velocidade adimensional no ponto de cálculo (-);

$u$  = velocidade da corrente no ponto de cálculo (m/s);

$U_m$  = velocidade máxima da corrente (m/s).

Sendo que:

$$\frac{u}{U_m} = \lambda \left[ 2,5 \cdot \ln \frac{z \cdot U_m}{\nu} \cdot \lambda + 6,25 \right] \quad (\text{equação 5})$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{C_f}{2}} \quad (\text{equação 6})$$

$$C_f = 2 \cdot \left( \frac{u^*}{U_m} \right)^2 \quad (\text{equação 7})$$

Onde:

$\lambda$  = constante da lei de logarítmico

$C_f$  = coeficiente de perda de carga;

$z$  = distância ao fundo do ponto de cálculo da tensão (m);

$u^*$  = velocidade de cisalhamento (m/s);

$\nu$  = viscosidade cinemática (m<sup>2</sup>/s).

Altınakar (1988), coloca ainda que conhecida a tensão de cisalhamento de fundo podemos encontrar a velocidade de cisalhamento utilizando a equação 8.

$$u * = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho_{cb}}} \quad (\text{equação 8})$$

Onde:

$\tau_b$  = tensão de cisalhamento junto ao fundo;

$\rho_{cb}$  = massa específica da corrente abaixo da camada da velocidade máxima.

Logo, para o cálculo das tensões de cisalhamento pelo método de Clauser (1954), a sequência de equações sugere que, conhecidas as massas específicas em pontos abaixo da velocidade máxima de uma corrente de densidade, é possível encontrar as tensões de cisalhamento nesses pontos, desde que se tenha os valores das velocidades de cisalhamento (obtidos através da equação 7). Neste trabalho será utilizado justamente este mecanismo algébrico para calcular as tensões de fundo de uma corrente de densidade pelo método de Clauser (1954).

As distâncias adimensionais são obtidas pela equação 9 e entram na análise da função adimensional, exigida pelo método, gerada para admitir os  $C_f$ 's da equação 7. Isso será melhor explicado nas seções seguintes, quando o método for aplicado diretamente nos dados de laboratório.

$$Y_+ = \frac{z \cdot U_m}{\nu} \quad (\text{equação 9})$$

Onde:

$Y_+$  = distância adimensional no ponto de cálculo (-).

## 4.2 PERFIL DE TENSÕES

As dinâmicas básicas do suporte de sedimentos por fluxos de gravidade são governadas pelo balanço entre a força gravitacional agindo na direção da declividade da corrente e a distribuição vertical das tensões de cisalhamento na coluna de água (PARSONS et al., 2009, p. 307-308).

Segundo Middleton e Southard (1984, p. 339, tradução nossa):

Nós podemos dividir um fluxo de gravidade em duas partes usando o nível em que a velocidade atinge um máximo e a tensão de cisalhamento cai a zero. Assumindo que a densidade do fluxo não depende da altura acima do leito (uma suposição que provavelmente corresponde somente a uma realidade grosseira), então para um fluxo uniforme a tensão de cisalhamento varia linearmente com a profundidade, e ela permite que a taxa entre a espessura da parte superior do escoamento ( $d_b$ ) e da parte inferior ( $d_a$ ) seja a mesma que a relação entre a tensão de cisalhamento da fronteira inferior e superior, que por sua vez é a mesma que a relação entre  $f_i$  e  $f_o$ .

$$\tau_i/\tau_s = f_i/f_s \quad (\text{equação 10})$$

Onde:

$\tau_i$  = tensão de cisalhamento inferior (Pa);

$\tau_s$  = tensão de cisalhamento superior (Pa);

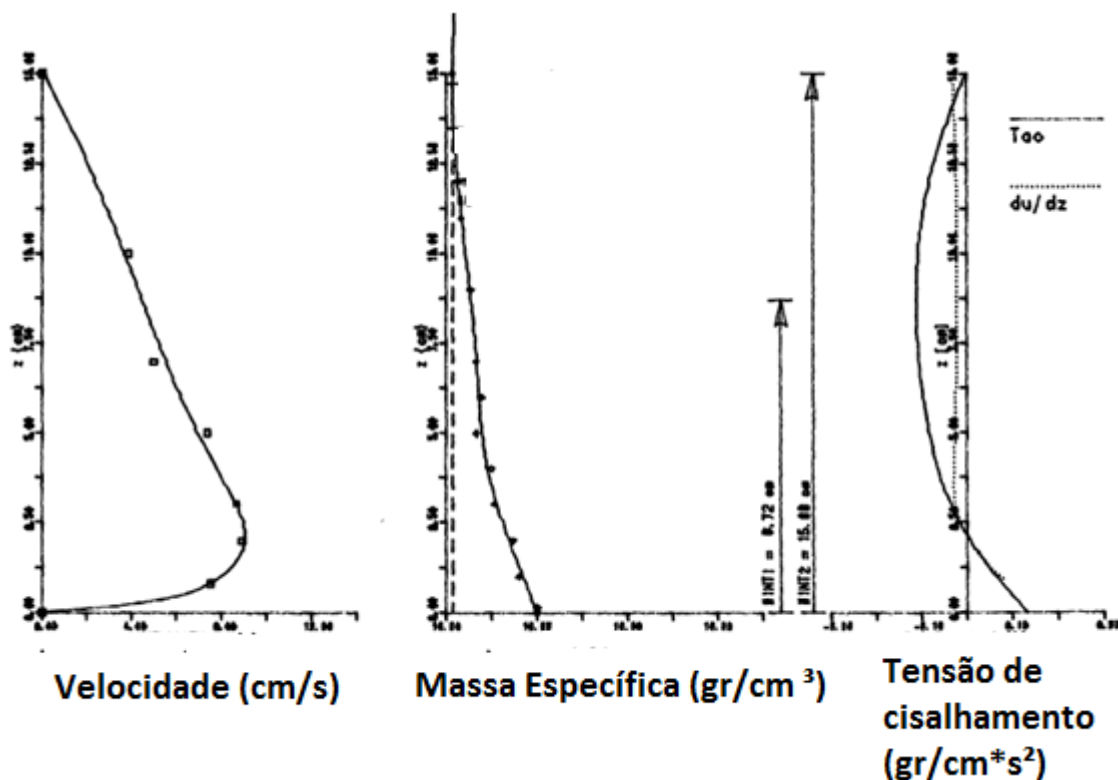
$f_i$  = coeficiente de resistência inferior;

$f_s$  = coeficiente de resistência superior.

Altinakar (1988) demonstrou, através de dados experimentais, a distribuição de tensões verticais de correntes de densidade simuladas em laboratório. Os resultados foram obtidos através da aplicação do método teórico de cálculo de Michon et al. (1955), conforme apresentado na seção anterior. No presente trabalho espera-se, então, encontrar resultados semelhantes aos do autor citado, com os dados dos experimentos realizados no Necod. A figura 8 apresenta um resultado que diz respeito a um único instante de tempo na distribuição vertical dos parâmetros hidráulicos obtidos por Altinakar (1988). Na ordem dos perfis da figura 8 (seguindo da esquerda para a direita) estão o perfil de velocidades, o perfil de concentrações e o perfil de tensões, respectivamente da corrente ensaiada. Pode ser notado também nessa figura que as três grandezas estudadas estão em função da altura da corrente e que os dois pontos onde a tensão de cisalhamento é nula, ocorrem respectivamente no ponto onde a velocidade é máxima e na extremidade superior dessa corrente. Já na cota onde a velocidade é nula, ou seja, na base do canal de ensaios ocorre o maior valor da tensão de fundo. Na distribuição vertical de concentrações observa-se um nítido decréscimo, quanto maior é a altura em relação ao fundo do canal. Isso ocorre porque, geralmente, nas correntes de densidade a parte mais densa fica mais perto do fundo, justamente porque o sedimento sofre uma espécie de decantação pela ação

da força gravitacional ao longo do tempo de passagem da corrente, fazendo com que as partículas mais pesadas se depositem nessa região, saindo da parte menos densa nas maiores espessuras na vertical e ao mesmo tempo diminuindo a concentração dessa região pela diluição da água do fluido ambiente.

Figura 8 – Perfis de velocidade, concentração e tensões de cisalhamento em um instante de tempo obtidos por Altinakar (1988)



(fonte: modificado de ALTINAKAR, 1988, p. A10)



## 5 MODELAGEM FÍSICA

A modelagem física serve para analisar e explicar sistemas físicos, ou seja, a modelagem física propõe estudar experimentalmente os processos em escala reduzida ou natural de um fenômeno físico, efetuando observações a partir do modelo, para tentar prever o comportamento em um protótipo. A principal vantagem desta técnica é que as condições do experimento podem ser totalmente controladas diretamente pelo investigador e ainda permite repetições. Dessa forma, enquanto uma variável do fenômeno é estudada as outras podem ser mantidas constantes. A grande preocupação no uso deste tipo de técnica é com relação à redução de escalas física e temporal e a dificuldade de reproduzir em laboratório todos os fatores complexos que ocorrem na natureza (MANICA, 2009, p. 65).

### 5.1 MÉTODOS DE MODELAGEM FÍSICA

Em busca de determinar o entendimento hidrodinâmico e deposicional das correntes de gravidade de sedimentos naturais, alguns modelos físicos do fenômeno são construídos nas dependências do NECOD. É através dessa prática que esse fenômeno é simulado em laboratório. Segundo Manica (2009, p. 70), existem quatro tipos de modelos principais utilizados nos vários centros de pesquisa para estudos de correntes de turbidez:

- a) modelos tipo canal: sua capacidade volumétrica geralmente é pequena, sendo que uma dimensão é bem maior que as outras. A sua principal vantagem é a boa visualização do fenômeno, por serem constituídos de material transparente e a fácil operacionalização. Como desvantagem possui ruim condição de escala, comprometendo a semelhança;
- b) modelos tipo canal e/ou bacia: possuem grande capacidade volumétrica. Objetiva descrever o fenômeno tridimensionalmente sem simplificações. Como desvantagem tem a difícil operacionalização e visualização dos resultados;
- c) modelos tridimensionais de grande porte com efeitos de subsidência: tem como principal característica a variação espacial de subsidência. Como desvantagem possui o grande porte, necessitando de um grande espaço para a sua instalação;
- d) modelos em escala reduzida: consistem em considerar escalas reduzidas no modelo, utilizando a teoria de semelhança para reproduzir em laboratório um ambiente natural.

O ajuste da melhor metodologia a ser usada nos experimentos, para que os ensaios se comportem da maneira desejada é um desafio para os pesquisadores (MANICA, 2009, p. 72).

As metodologias aplicadas em correntes de turbidez podem ser divididas em dois aspectos:

- a) quanto ao tipo de inicialização: nas correntes de turbidez ocorre pela remobilização de volume de material com duração quase instantânea e por uma grande quantidade de material distribuído ao longo do tempo;
- b) quanto à conservação de massa: nos ensaios de correntes de turbidez, envolve o preparo de material sedimentar a ser empregado nas simulações. Para não haver problemas de deposição desse material nos tanques de armazenamento, é necessário um dispositivo de agitação do mesmo.

A técnica mais usual, para fluxos confinados no ambiente, é fazer simulações em canais estreitos, cujo escoamento é considerado bidimensional e com uma injeção contínua no tempo. Os dados experimentais em que este trabalho se baseia foram obtidos a partir desta metodologia.

## 5.2 APARATOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Os ensaios sobre correntes de densidade, que forneceram os dados para a realização deste trabalho, foram executados no NECOD, vinculado ao setor de Hidráulica Aplicada do IPH/UFRGS. O laboratório é equipado com vários tamanhos de tanques e canais para a realização dos ensaios experimentais.

O canal utilizado nas simulações físicas de correntes de densidade está apresentado na figura 9. Ele é constituído por uma estrutura de ferro e vidro, cujas dimensões são: 15,4 m (comprimento) x 0,4 m (largura) x 1,0 m (altura). O canal possui um fundo nivelado horizontalmente (fundo plano). A inclinação do canal pode ser alterada, devido a um apoio pivotado e suportes com altura variável (FERREIRA, 2013, p. 43).

Os dados de velocidades, extraídos dos ensaios realizados no canal, foram obtidos através de um equipamento de medição, que funciona pelo princípio do efeito Doppler, o UVP (*Ultrasonic Velocity Profiler*). Esse aparelho possui transdutores, que medem valores de velocidades pontuais no espaço, através da emissão de ondas ultrassônicas. Cada onda tem uma faixa de medição de 128 canais, lendo, para cada canal, um valor de velocidade em mm/s.

Figura 9 – Canal unidirecional de porte médio (CUMP) e tanques de armazenamento de mistura



(fonte: BOFFO, 2015)

O UVP pode funcionar com um número variável de transdutores de medição. Os experimentos que subsidiaram este trabalho foram elaborados de forma que o número de transdutores dispostos longitudinalmente, bem no eixo do canal, ficasse entre 11 e 12, sendo que o aparelho permite utilizar até 20 transdutores no máximo. Os dados são lidos de forma periódica, do primeiro até o último transdutor e retornando para o primeiro novamente, e assim por diante. O ciclo de medição pode ser ajustado em Hz. Cabos conectam os transdutores ao aparelho UVP, por onde os dados serão interpretados e, logo em seguida, enviados para um microcomputador, que possui um programa específico, que apresentará as informações na tela do computador. Os dados provenientes desse equipamento são disponibilizados de forma matricial, para posteriores estudos, análises ou tratamentos dos mesmos. O equipamento completo, então, consiste no aparelho UVP (console), nos transdutores de medição e um microprocessador, como mostra a figura 10.

O perfil de concentração para o presente estudo foi também obtido a partir de dados coletados nos ensaios realizados no canal da figura 9. Os dados medidos, tanto os de velocidades como os de concentração, foram combinados nas mesmas simulações, ou seja, para as mesmas correntes de densidade simuladas se obteve medições de velocidades e concentrações, perfilando lado à lado os equipamentos.

Na tabela 1 estão algumas especificações técnicas do UVP.

Figura 10 – Equipamento medidor de velocidades ultrassônico (UVP)



(fonte: FERREIRA, 2013, p. 47)

Tabela 1 – Características técnicas do medidor de perfil de velocidades ultrassônico

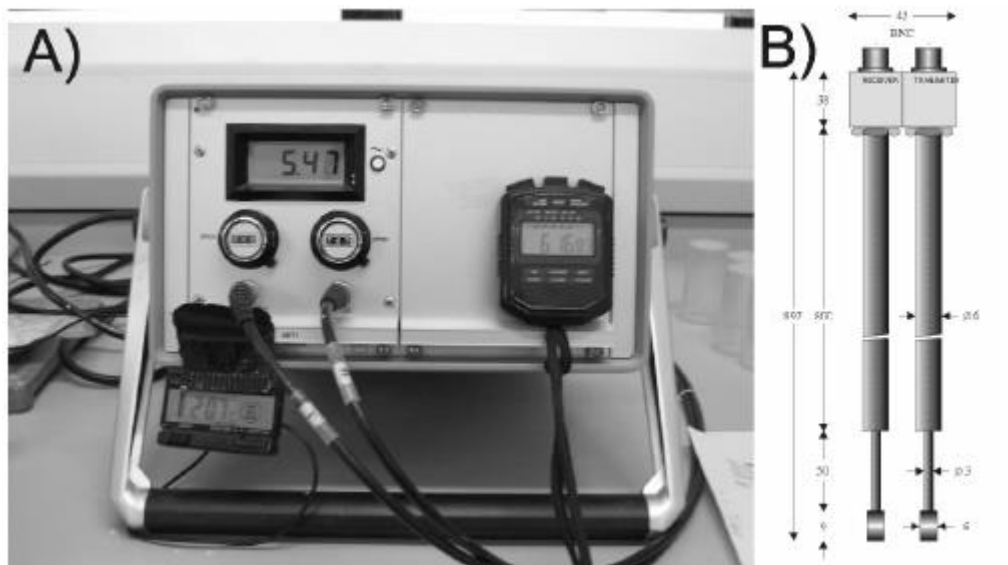
<b>Característica</b>	<b>Descrição</b>
Fabricante	Met flow S.A - Suíça
Frequência emitida	2 MHz
Resolução espacial	1,48 mm
Número de canais	128
Distância do canal	Variável, a partir de 0,37 mm
Profundidade de medida	1000 mm
Resolução da velocidade	1/256 da velocidade máxima
Taxa de repetição	8 à 240
Tempo de aquisição	Mínimo de 4 ms por perfil
Dimensões	0,55 x 0,25 x 0,47 m (C x L x A)
Peso	18 kilos

(fonte: MANICA, 2009, p. 84)

Para medir as concentrações das misturas empregadas nos ensaios se fez uso dos medidores de alta concentração ultrassônicos (UHCM). “O equipamento é composto por um console de alimentação, aquisição, processamento e saída de dados e uma sonda de medição conectada por um fio, a esse console e posicionada dentro do fluxo a ser medido.” (MANICA, 2009, p. 80).

Da mesma forma que o UVP as sondas do UHCM são também, além de transmissoras, receptoras de sinais elétricos. Esses sinais significam as atenuações das ondas ultrassônicas emitidas, convertidas de decibéis para volts, medindo, dessa forma, a concentração do ponto de atenuação de onda (FERREIRA, 2013). Após a captura dos dados nos ensaios (à uma taxa de aquisição de 20Hz), eles foram interpretados no console do aparelho (UHCM), logo após, enviados para um microcomputador, onde serão armazenados em arquivo. No computador os dados podem ser analisados e manipulados por um programa do próprio equipamento, que facilita a interface com o usuário. Esse software permite também a configuração dos parâmetros utilizados nos ensaios, bem como a visualização da saída na tela, em tempo real, dos resultados. Afigura 11 apresenta o equipamento completo.

Figura 11 – Medidor de alta concentração ultrassônico: a) Console; b) Sondas para medição



(fonte: modificado de MANICA, 2009, p. 81)

Manica (2009, p. 81) aprofunda sobre o funcionamento desse equipamento:

O princípio de funcionamento do medidor de concentração se baseia na atenuação da energia do ultrassom pelas partículas suspensas entre um par de transdutores acústicos (transmissor e receptor), a qual é proporcional à concentração de material sólido que passa entre eles. Quando o transdutor transmissor emite uma energia acústica (ultrassom) na região do volume de controle do equipamento, as partículas presentes no fluido atenuam estas ondas sonoras e o transdutor receptor capta essa atenuação, gerando um sinal elétrico proporcional em volts. Este sinal passa, então, por um processamento interno de forma a ser convertido em variação de voltagem de saída do aparelho em faixa de 0 a 10 volts, que é equivalente à atenuação da energia acústica na faixa de 0 a 40 decibéis.

Para que os valores medidos sejam convertidos em valores de concentração é necessário realizar uma calibração prévia do equipamento, com o mesmo material utilizado no experimentos e com valores de concentrações conhecidos, permitindo assim, que seja ajustada uma lei de calibração entre esta concentração e a voltagem de saída do aparelho.

Algumas características técnicas do UHCM são mostradas na tabela 2.

Tabela 2 – Características técnicas do medidor de concentração

<b>Característica</b>	<b>Descrição</b>
Fabricante	WL Delf Hydraulics - Holanda
Dimensões do console	0,39 x 0,30 x 0,17 m (C x L x A)
Frequência da sonda	5 MHz
Dimensão do Transdutor	0,096 m
Comp. do Caminho	0,11 m
Comprimento da sonda	0,90 m
Faixa dinâmica	40 dB
Precisão	0,5 dB
Controle	Zero 0-6 dB – Span 4-40 dB
Saída análoga	Voltagem: 0 – 10 V
Resposta	10 Hz (display 1 Hz)

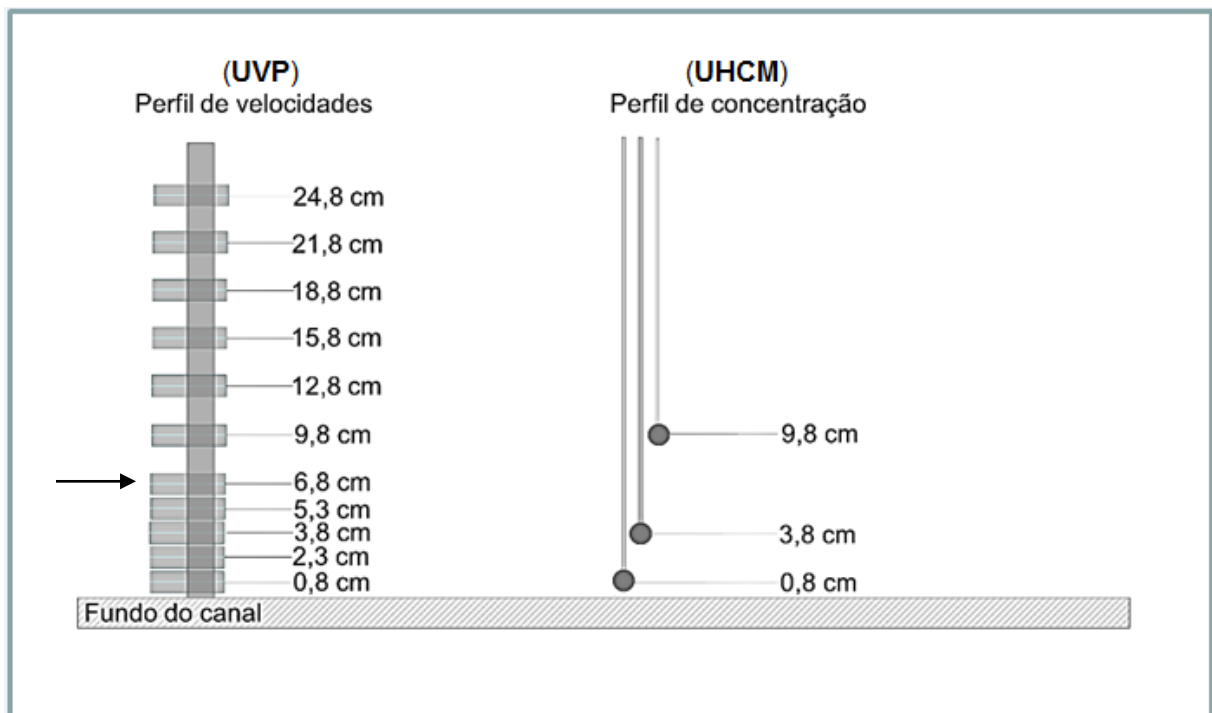
(fonte: MANICA, 2009, p. 82)

## 6 METODOLOGIAS UTILIZADAS

### 6.1 METODOLOGIA DOS ENSAIOS REALIZADOS

Para a obtenção dos dados de velocidade e de concentração das correntes de densidade ensaiadas foram dispostos, em duas seções de medição do canal unidirecional, dois grupos de equipamentos (UVP e UHCM), um grupo mais próximo e o outro mais afastado da fonte. Através da fonte é injetado o fluido de mistura, que por sua vez gera o modelo físico da corrente de densidade do ensaio. Um grupo de equipamentos consiste no alinhamento de um UVP e um UHCM na mesma posição do canal para a captura dos dados. A figura 12 apresenta o esquema concebido nos ensaios para disposição dos equipamentos, sendo apresentado em uma seção do canal.

Figura 12 – Esquema adotado para a disposição dos equipamentos no ensaios



(fonte: modificado de BOFFO, 2015)

Na figura 12 também é possível identificar as distâncias de cada sonda dos equipamentos que foram adotadas nos ensaios do projeto, em relação ao fundo do canal. Se utilizou nos ensaios



avaliados 11 e 12 sondas do UVP e 6 sondas no UHCM.. Na figura 13 pode ser visualizada a disposição real dos equipamentos perfilados no canal de ensaios, em vista transversal, na direção do escoamento.

Figura 13 – Vista transversal de um grupo de equipamentos em uma posição do canal de ensaios



(fonte: BOFFO, 2015)

O posicionamento de cada grupo de equipamentos, em relação à fonte, segue a seguinte configuração: O primeiro grupo foi composto por um UVP com 12 sondas e mais 3 sondas do UHCM perfiladas lateralmente, distando à 6,40 metros da fonte, ambos aparelhos. O segundo grupo ficou posicionado à 12,45 metros da fonte e continha um UVP com 11 sondas e mais 3 sondas do UHCM perfiladas da mesma forma que o grupo anterior, bem como mostra a foto da figura13.



Os ensaios tiveram outros equipamentos instalados no canal. Para não estender muito este texto o autor optou por não comentar sobre os demais equipamentos que fizeram parte deste projeto, devido à conjuntura do tema, onde a origem dos dados utilizados neste trabalho provém única e exclusivamente dos equipamentos mencionados acima.

### 6.1.1 Materiais e concentrações volumétricas das misturas injetadas

O projeto disposto concretizou um total de dez ensaios. Cada ensaio, no entanto, teve uma caracterização com relação à concentração volumétrica do material utilizado na mistura para gerar os fluxos. Para fazer os dez ensaios foram utilizados dois tipos de materiais nas combinações de misturas do fluxo: carvão e caulim. Dessa maneira foi possível classificar cada ensaio em fluxos coesivos e fluxos não coesivos. No presente trabalho foram considerados somente fluxos não coesivos, ou seja, que contém somente carvão. A tabela 3 apresenta os resultados das misturas dos ensaios realizados com esse tipo de fluxo.

Tabela 3 – Ensaios com fluxos não coesivos

Ensaio	CV [%]	Composição	Volume [l]	Vazão [l/min]
E1	11,9	100% C	200	50
E2	30,6	100% C	200	50
E7	7,7	100% C	400	60
E8	1,84	100% C	400	50
E9	18,99	100% C	400	50
E10	37	100% C	200	50

(fonte: BOFFO, 2015)

A coluna CV exprime a concentração volumétrica das misturas dos ensaios, em relação á uma unidade de volume. Dessa forma, para se determinar a massa específica da mistura, se fez uso da seguinte equação:

$$\rho_m = \rho_a + (\rho_s - \rho_a) \times CV \quad (\text{equação 11})$$

Onde:

$\rho_m$  = massa específica da mistura ( $\text{kg/m}^3$ );

$\rho_a$  = massa específica da água à 20 °C ( $\text{kg/m}^3$ );

$\rho_s$  = massa específica do sedimento ( $\text{kg/m}^3$ ).

CV = concentração volumétrica

Na coluna Composição da tabela 3 aparece uma porcentagem seguida de uma letra C. Isso significa a quantidade de material presente na composição da mistura, ou seja, para todos os ensaios da tabela 3, foi colocado 100% de carvão. Como não existe recomendação na literatura, com relação aos métodos de cálculo das tensões de cisalhamento em correntes de densidade deste tipo, foi considerado, neste trabalho, que os métodos de caçulo são válidos para encontrar as tensões das correntes dos ensaios da tabela 3.

Para cada sonda do UHCM disposta no canal de ensaios (como na figura 12) existem curvas de calibração determinadas previamente (Boffo, 2015), relacionadas com os diferentes tipos de composições de materiais para as misturas utilizadas nos ensaios. Isso se deve ao fato de que todas as leituras foram registradas e armazenadas pelo equipamento em volts. Assim, para se conseguir passar essas medidas para concentrações em volume, os dados (de cada sonda) devem ser submetidos às equações de calibração da tabela 4, que determinam as curvas de calibração para as composições de mistura sem coesão (somente carvão). Essas equações seguem a lei da função apresentada na equação 12.

$$CV = a.X^k \quad (\text{equação 12})$$

Onde:

a = coeficiente de base;

k = coeficiente exponencial;

X = concentração lida (volt);

CV = concentração volumétrica.

Assim, para conseguir obter a massa específica da leitura efetuada pela sonda do UHCM, foi necessário inserir os valores resultantes da equação 12 na equação 11. Efetuada essa conversão, os cálculos podem prosseguir, já que nas equações dos métodos, todas as aplicações de massa específica estão em quilograma por metro cúbico, conforme apresentado na seção anterior.

Tabela 4 – Curvas de calibração para composições de misturas com materiais sem coesão

Mistura	100% CARVÃO: 0% CAULIM		<b>0</b>	
Conjunto	a	k	EQUAÇÃO	
SET1	1,2032	0,9877	$1,2032x^{0,9877}$	0,9883
SET2	0,0224	3,243	$0,0224x^{3,243}$	0,9168
SET2_0	0,7438	1,6122	$0,7438x^{1,6122}$	0,885
SET3	1,0552	1,1836	$1,0552x^{1,1836}$	0,9445
SET4	1,2431	1,0768	$1,2431x^{1,0768}$	0,9756
SET5	1,0457	1,0457	$1,241x^{1,0457}$	0,9906
SET6	1,1371	1,1371	$1,0912x^{1,1371}$	0,9787
SET6*	1,1764	1,1764	$0,6039x^{1,1764}$	0,9732

\*SPAN 100

(fonte: BOFFO, 2015)

A coluna Conjunto da tabela 4 relaciona cada curva de calibração com as respectivas sondas, numeradas de acordo com a sua disposição no canal de ensaios. Foi adotado que as três primeiras sondas ficaram junto ao grupo de equipamentos mais próximo da fonte (SET1, SET2 e SET3) e as demais sondas foram colocadas no grupo mais afastado (SET4, SET5, SET6).

A equação da curva de calibração referente à SET2\_0, na coluna Conjunto da tabela 4, somente será utilizada caso não for possível zerar a segunda sonda de medição. Nesses casos, uma constante aparece somada na leitura dos dados da segunda sonda do aparelho. Para os valores de constantes foram observados 1 e 2 volts em alguns ensaios. Entretanto, caso não ocorrer nenhuma constante incrementada nessas leituras deve-se utilizar a curva SET2 para converter os dados para concentração em volume. Na última linha da tabela 4 existe um tipo de curva SET6\*. Essa curva está associada com outra funcionalidade do equipamento correspondente a um ganho, que melhora a resolução dos valores medidos. Os experimentos abordados neste trabalho não farão referência a esta funcionalidade.

Cabe ressaltar aqui que o presente trabalho manipulou somente os dados brutos dos equipamentos (tanto do UVP quanto do UHCM), ou seja, os mesmos não sofreram qualquer tipo de filtro ou tratamento antes de serem utilizados nos métodos de cálculo.

## 6.1.2 Arquivos gerados pelo UVP

Nos experimentos que geraram dados de velocidade para a realização deste trabalho, foram utilizadas sondas de 2 MHz do UVP. O tempo de um ciclo completo (leituras de baixo para cima da primeira até a última sonda conforme figura 11) fica na ordem de 0,77 segundos, de acordo com o observado nos arquivos gerados pelo console. Ou seja, existe um intervalo de tempo entre a emissão de uma onda por uma sonda para a emissão de outra onda por outra sonda na sequência. Foram adotadas também distâncias entre canais de aproximadamente 0,92 mm (um espaçamento teórico, devido à ocorrências de variações dessas distâncias). Na figura 14 pode ser observado o início de um típico arquivo do UVP.

Figura 14 – Início de um típico arquivo do UVP

	Channel #	0	1	2		
	Distance [mm]	9,99	10,92	11,84	...	
	Distance*cos [mm]	0	0	0		
Profile #	Time [s]	Velocity [mm/s]				
0	0	-8,2	0	0	-8,2	
1	0,067	0	0	0	-8,2	
2	0,137	0	-32,7	-40,8	-24,5	...
3	0,207	-8,2	-8,2	-16,3	-32,7	
4	0,277	0	0	-8,2	8,2	
5	0,347	0	8,2	0	0	
6	0,417	-8,2	-8,2	-8,2	0	
7	0,488	0	8,2	8,2	0	...
8	0,558	0	8,2	8,2	0	
9	0,628	0	0	0	-8,2	
10	0,698	0	-8,2	-8,2	-16,3	
11	0,768	0	0	0	8,2	
12	0,838	-8,2	-65,3	32,7	8,2	
13	0,908	-8,2	0	-8,2	-24,5	
14	0,978	-8,2	-49	-16,3	0	
15	1,048	0	8,2	-8,2	-8,2	...
.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	

(fonte: elaborado pelo autor)

Assim, depois que o console termina de interpretar as medições, essas serão enviadas imediatamente para o computador acoplado no mesmo através de cabos ethernet. O *software* do equipamento instalado no computador analisa e armazena os dados em arquivos com formato texto. Esses arquivos possuem uma natureza matricial ordenando as leituras realizadas por cada sonda numericamente crescente, de zero até a última leitura, na primeira coluna da

matriz (*profile*). A segunda coluna (da esquerda para direita) marca o instante de tempo de cada leitura, obedecendo, logicamente, a frequência de trabalho configurada inicialmente pelo usuário. Da terceira coluna em diante, até o fim das colunas do arquivo, é onde serão armazenados os valores de velocidades lidos pelo equipamento, ou seja, serão 128 colunas com dados de velocidade para um único instante de tempo (canais).

O número de perfis ou de instantes de tempo de medições vai depender diretamente do tempo que o aparelho irá ficar trabalhando, estipulado pelo operador. Dessa forma, caso um aparelho UVP com 12 sondas ficar trabalhando por 10 minutos e fazendo uma aproximação do período de tempo (ou tempo de ciclo) por um segundo, serão 12 leituras por segundo, ou seja, 921600 leituras realizadas e armazenadas nesse experimento hipotético.

Figura 15 – Preenchimento até o fim do arquivo UVP com valores nulos

8107	568,304	0	-8,2	220,5	49	16,3 . . .
8108	568,374	0	0	0	0	16,3
8109	568,444	-8,2	0	0	-8,2	8,2
8110	568,514	-8,2	0	0	0	0
8111	568,584	0	0	0	0	0 . . .
8112	568,655	0	0	0	0	0
8113	568,725	0	0	-8,2	0	-8,2
8114	0	0	0	0	0	0
8115	0	0	0	0	0	0
8116	0	0	0	0	0	0
8117	0	0	0	0	0	0
8118	0	0	0	0	0	0 . . .
8119	0	0	0	0	0	0
8120	0	0	0	0	0	0
8121	0	0	0	0	0	0
8122	0	0	0	0	0	0 . . .
8123	0	0	0	0	0	0
8124	0	0	0	0	0	0
8125	0	0	0	0	0	0
8126	0	0	0	0	0	0 . . .
8127	0	0	0	0	0	0
8128	0	0	0	0	0	0
8129	0	0	0	0	0	0
8130	0	0	0	0	0	0 . . .
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.

(fonte: elaborado pelo autor)

Uma observação importante refere-se à finalização desses tipos de arquivos. Quando o operador desliga o aparelho por algum motivo antes de terminar o tempo previsto de trabalho, o

preenchimento dos campos subsequentes da matriz é executado automaticamente pelo console, anulando todos esses campos de medição pertencentes à matriz de velocidades, ou seja, o programa do equipamento preenche esses campos com zeros. A figura 15 apresenta esse comportamento do aparelho em um ensaio onde ocorreu um desligamento prematuro.

### 6.1.3 Arquivos gerados pelo UHCM

Assim como acontece no UVP o *software* que manipula as informações do UHCM também monta os arquivos de medidas em estrutura matricial, porém com a extensão *asc*. Esse tipo de extensão pode ser interpretada por qualquer sistema operacional em qualquer computador pessoal no formato texto. A primeira coluna desse arquivo fornece todos os instantes de tempo das leituras realizadas pelas sondas do equipamento. As leituras são realizadas simultaneamente por todas as sondas dispostas no ensaio, em cada instante de tempo. A figura 16 demonstra a estrutura de um típico arquivo gerado pelo console do UHCM.

Figura 16 – Estrutura de um típico arquivo do UHCM

+0.000	+0.006	+2.008	-0.002	-0.027	-0.004	+0.018	
+50.000	+0.011	+2.013	-0.004	-0.029	+0.001	+0.024	
+100.000		+0.010	+2.002	+0.000	-0.032	+0.000	+0.016
+150.000		+0.006	+2.003	-0.001	-0.038	+0.000	+0.011
+200.000		+0.013	+2.018	-0.006	-0.033	-0.004	+0.022
+250.000		+0.006	+2.014	+0.000	-0.034	+0.006	+0.015
+300.000		+0.005	+2.017	-0.006	-0.034	+0.001	+0.018
+350.000		+0.005	+2.017	+0.000	-0.034	-0.002	+0.022
+400.000		+0.005	+2.007	-0.009	-0.032	+0.000	+0.017
+450.000		+0.005	+2.010	-0.001	-0.033	-0.001	+0.021
+500.000		+0.013	+2.009	-0.010	-0.034	+0.000	+0.017
+550.000		+0.007	+2.013	-0.005	-0.032	+0.000	+0.013
+600.000		+0.012	+2.012	+0.001	-0.035	+0.000	+0.016
+650.000		+0.007	+2.006	-0.006	-0.034	-0.004	+0.021
+700.000		+0.001	+2.003	-0.006	-0.037	-0.005	+0.029
+750.000		+0.013	+1.997	-0.007	-0.033	+0.007	+0.023
+800.000		+0.010	+2.002	-0.001	-0.032	-0.005	+0.020
+850.000		+0.011	+1.996	-0.007	-0.032	-0.002	+0.024
+900.000		+0.007	+2.010	-0.015	-0.031	-0.004	+0.024
+950.000		+0.009	+2.009	-0.011	-0.034	-0.002	+0.018
+1000.000		+0.007	+2.001	-0.009	-0.032	+0.002	+0.018
+1050.000		+0.011	+2.000	-0.004	-0.034	+0.001	+0.023
.		.	.	.	.	.	.
.		.	.	.	.	.	.
.		.	.	.	.	.	.

(fonte: elaborado pelo autor)

No tratamento desses arquivos foram observados vários problemas estruturais que ocorriam na montagem dos mesmos pelo console do aparelho. Em alguns ensaios a primeira coluna de leituras de concentração dizia respeito à primeira sonda (SET1) colocada como sendo a mais próxima do fundo do canal. Já em outros ensaios essa mesma coluna do arquivo representava dados da terceira sonda (SET3), de baixo para cima. Entretanto, jamais qualquer uma dessas sondas era referenciada na segunda coluna (SET2 ou SET2\_0) pelo console. Outro problema observado foi também a ocorrência de uma espécie de quebra de fluxo da estrutura do arquivo, onde de tempos em tempos ocorriam trocas de colunas no fluxo de preenchimento de dados do mesmo. Ou seja, em determinadas linhas do arquivo (ou tempos) as colunas eram preenchidas com determinada sequência de sondas (SET1, SET2, SET3, SET4, SET5 e SET6) e seguiam nesse padrão até outro instante de tempo, onde havia uma quebra de ordenamento, preenchendo as colunas com outra sequência de sondas completamente diferente da anterior. Esse comportamento do fluxo de preenchimento tornava a estrutura do arquivo completamente caótica, inviabilizando qualquer procedimento computacional que precisasse utilizar os dados em uma estrutura logicamente mais confiável para a realização de cálculos futuros.

Todos esses problemas, tanto provenientes dos arquivos do UVP quanto do UHCM tiveram de ser tratados antes da realização dos cálculos das tensões de cisalhamentos nas correntes de densidades simuladas, conforme o objetivo deste trabalho. A organização desses arquivos em estrutura lógica e confiável é imprescindível para garantir a consistência dos resultados finais dos cálculos. A seção a seguir exprime todas as metodologias abordadas e criadas pelo autor para estabelecer soluções que tratem esses problemas de forma mais precisa e objetiva possível.

## 6.2 METODOLOGIA COMPUTACIONAL ADOTADA

O perfil de tensões de cisalhamento provenientes das correntes de densidade simuladas em laboratório não pode ser obtido diretamente por algum método de medição, seja através de aparelhos, como acontece com o perfil de velocidades e concentrações descrito acima, seja por algum outro processo de medição diretamente nos modelos físicos deste fenômeno. É dentro deste contexto que o autor propôs este trabalho, mediante uma abordagem computacional sobre o assunto.

Conforme foi visto na seção anterior, os arquivos de dados gerados nos ensaios fornecem, muitas vezes, centenas de milhares de registros armazenados a cada ensaio. Isso traz um grande

benefício na avaliação de quaisquer parâmetros hidráulicos das correntes ensaiadas, pois os mesmos podem ser determinados com um maior nível de detalhamento, tanto no tempo como no espaço. Porém, quando se trabalha com um grande volume de dados, alguns complicadores surgem, referentes ao número de procedimentos, pois a taxa de repetição dos mesmos cresce de acordo com a quantidade de dados existentes. Nesse caso, o autor vislumbrou a solução mais favorável para atingir o objetivo principal deste trabalho, fazendo o uso de infraestrutura computacional. Com a modelagem computacional se conseguiu adquirir uma visão mais global de todo o processo da evolução espaço temporal das tensões de cisalhamento das correntes de densidade simuladas, além de conseguir entender melhor o comportamento desse parâmetro hidráulico.

Os procedimentos computacionais foram construídos na plataforma de programação VBA, disponibilizada dentro do ambiente MS-Excel, *software* nativo do sistema operacional Windows. A versão do programa utilizado foi a 2007.

### **6.2.1 Tratamento dos arquivos do UVP**

As metodologias computacionais limitam-se em retirar um determinado tipo de dado de um lugar já esperado para ser utilizado em alguma operação matemática ou lógica bem determinada. Ou seja, caso o local de armazenamento desses dados contenha outro tipo de dado ou a localização de sua referência seja diferente da correta, pode gerar erros. Antes de serem utilizados nos procedimentos subsequentes os arquivos do UVP foram submetidos a procedimentos computacionais de tratamento de possíveis erros e correções de imperfeições com base no que é esperado pelo programa desenvolvido posteriormente.

Para começar o tratamento desses arquivos todo e qualquer campo de configuração será imediatamente excluído pelo programa, antes que qualquer procedimento subsequente seja iniciado. O mesmo vale para a parte final do arquivo, que caso o operador do aparelho desligue o mesmo antes de acabar o tempo previsto de trabalho, todos os campos zerados serão excluídos automaticamente também, quando o arquivo for carregado em uma planilha do ambiente Excel. Aqui, porém, houve uma preocupação extra com relação às exclusões das linhas da matriz que continham esses valores nulos. Como o equipamento pode funcionar com número de sondas variáveis, as exclusões deverão respeitar os ciclos que correspondem a esse número, caso contrário mais erros, de interpretação do programa, surgiriam em decorrência dessa alteração



estrutural do arquivo. Esse tipo de erro seria com relação ao travamento do programa em execução. Dito isso o programa excluirá automaticamente todas as linhas, desde a última até a primeira que contenha dados válidos e corresponda ao número de ciclos válido dentro do arquivo UVP.

## 6.2.2 Tratamento dos arquivos do UHCM

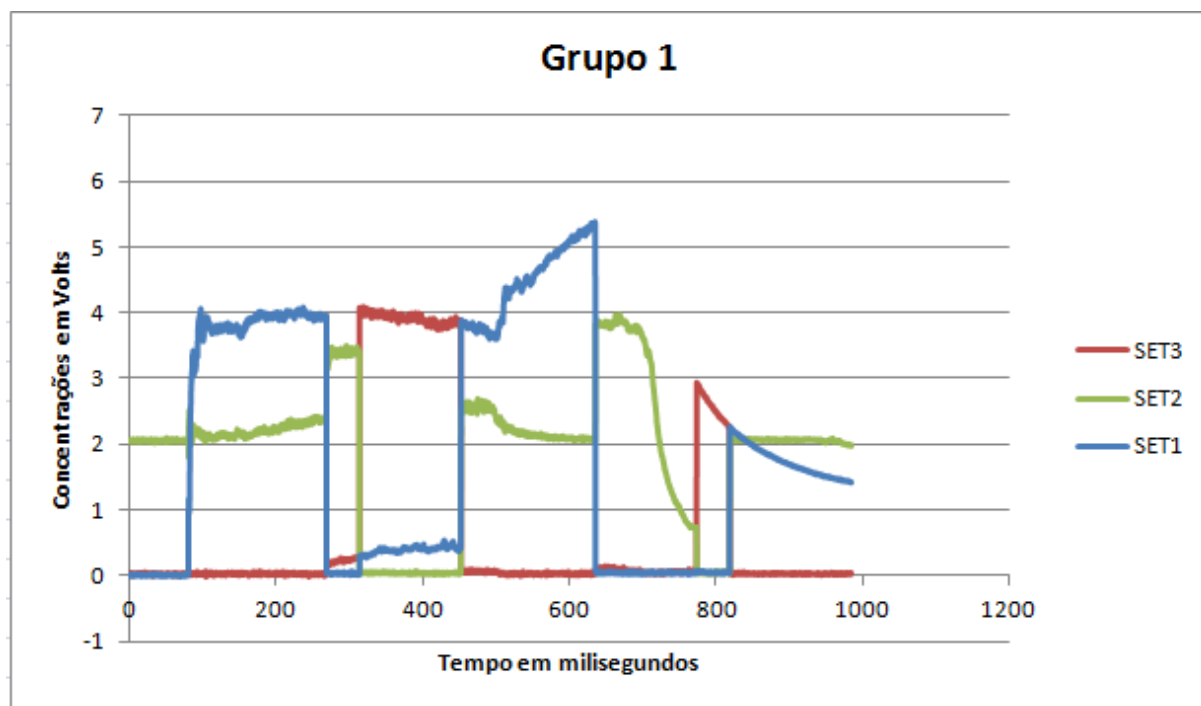
Os tratamentos dos arquivos do UHCM foram desenvolvidos com base nos problemas observados na seção 6.1.3.

O erro mais proeminente e difícil de ser corrigido nesses arquivos foi aquele com relação ao preenchimento desordenado do arquivo pelo console (a que veio saber ser um problema no *data logger* utilizado nos experimentos). Com base em um programa desenvolvido pelo técnico em microeletrônica do laboratório na tentativa de corrigir esse erro, o autor elaborou uma metodologia própria, dentro da linguagem do projeto (VBA). Essa metodologia consiste em criar uma rotina que tenta perceber quantas trocas indevidas de posições das colunas do arquivo foram executadas. Diferentemente do programa de referência, que retorna todos os valores organizados no tipo de dado *String*, o autor trabalhou com rotinas que não precisaram alterar o tipo de dado original do arquivo. O problema em se trabalhar com o tipo de dado *String* surge da impossibilidade de gerar qualquer mecanismo de cálculo, que possa ser efetuado com os dados disponíveis. Isso ocorre porque computadores não reconhecem esse tipo de dados como campos numéricos, mas sim como uma sequência de caracteres, inviabilizando, assim, o uso desse programa no presente trabalho.

No programa criado o algoritmo consegue inverter todas as trocas de posições, erroneamente executadas pelo console do aparelho, preenchendo novamente de forma ordenada e consistente todas as colunas da matriz do arquivo do UHCM. A figura 17 mostra um gráfico das concentrações em volts lidas pelas três primeiras sondas do aparelho pelo tempo em milissegundo com esse problema.

A figura 18 apresenta o mesmo gráfico da figura 17, porém com as colunas já reordenadas pela rotina do programa desenvolvido neste trabalho. Dessa forma as leituras seguem um padrão lógico nas colunas do tempo inicial até o final do ensaio realizado.

Figura 17 – Problema na ordem de preenchimento do arquivo com os dados das sondas do 1º grupo



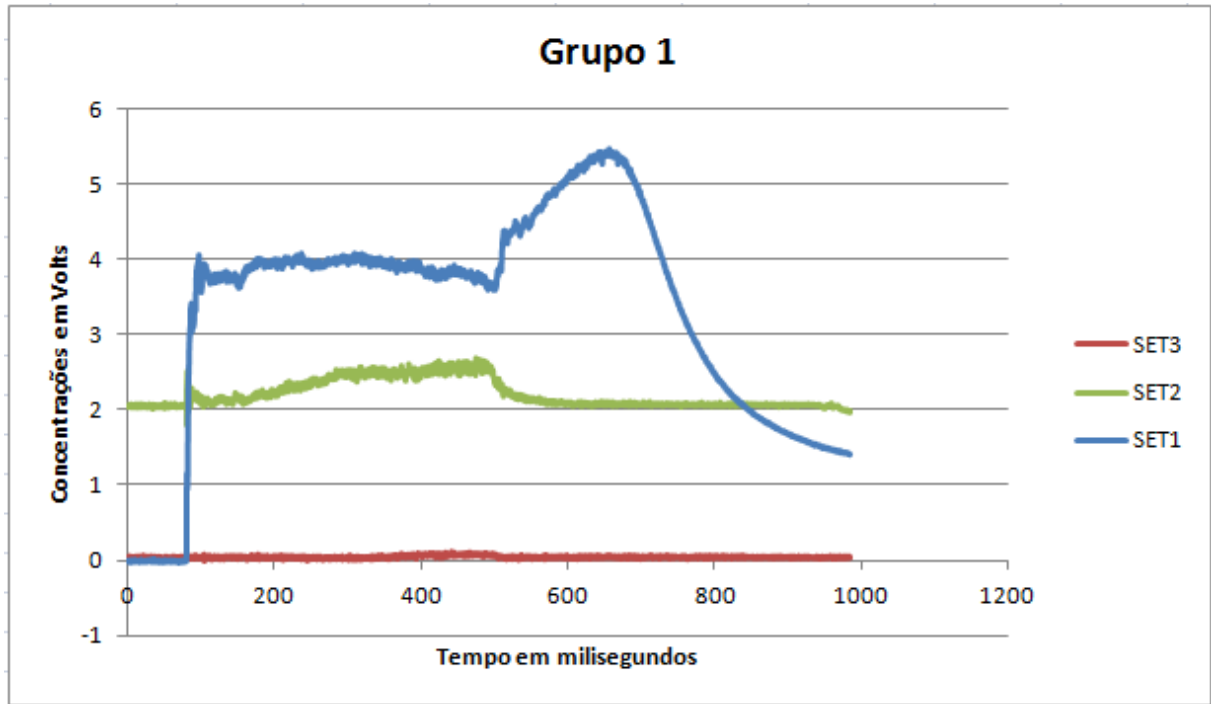
(fonte: elaborado pelo autor)

Além desses imprevistos, foi observado também que as colunas de leitura das sondas SET1 e SET3 podem ser preenchidas invertidas pelo problema do *datalogger* citado anteriormente. Todavia o programa deverá perceber em qual coluna (1ª ou 3ª) estarão essas sondas e reposicioná-las de forma correta. Nesse caso, porém, os procedimentos são mais simples, pois foi necessário apenas determinar em qual coluna estarão as leituras com as maiores concentrações. Feito isso, automaticamente ficam definidas as posições das colunas de cada sonda, pois as maiores leituras de concentrações foram observadas nas sondas que ficam mais ao fundo do canal, nas correntes não coesivas. Assim, caso a terceira coluna possua as maiores concentrações, esta ficará denominada como a sonda de leitura SET1 (mais próxima ao fundo do canal) e a primeira coluna como SET3 (mais distante do fundo).

O último problema observado nesses arquivos foi com relação à segunda sonda (SET2), que não pode ser zerada pelo regulador do equipamento. Para tratar esse problema o autor determinou que somente se adotará as curvas de calibração referentes à SET2\_0 na programação das rotinas de cálculo. Ou seja, caso o programa perceba oscilações de concentrações iniciais próximas a um valor diferente de zero na segunda sonda, automaticamente fará as correções necessárias de todos os valores contidos nesta coluna. Dessa

forma, não será necessário nunca utilizar as curvas para SET2, mesmo que essa sonda não possa ser zerada para a realização do ensaio. Um exemplo dessas oscilações próximas a dois volts da segunda sonda pode ser também vista na figura 18.

Figura 18 – Colunas do arquivo de dados reordenadas pelo algoritmo desenvolvido



(fonte: elaborado pelo autor)

### 6.2.3 Agrupamento dos dados

Para realmente iniciar os procedimentos de cálculos das tensões de cisalhamento, por algum dos métodos apresentados no capítulo 4, depois que os dados de velocidade e concentração foram carregados corretamente na plataforma do Excel, é necessário selecionar os dados de maior interesse.

Primeiramente as rotinas programadas executam as médias das velocidades de cada sonda do UVP, com base na escolha do intervalo de canais feita anteriormente pelo usuário. Ou seja, o utilizador do programa vai ter a oportunidade de determinar um intervalo de canais, dentre os 128 canais de leituras de velocidade disponibilizados para cada sonda do UVP. Esse procedimento será executado sucessivamente para todas as sondas (dispostas inicialmente no ensaio) até o fim de leituras do arquivo ou até a última linha do mesmo que contenha dados. Cada velocidade média de cada sonda corresponderá ao instante de tempo de um ciclo completo

de leituras, ou seja, dependendo da frequência de utilização do aparelho e do número de sondas dispostas no canal para medir os dados, esse tempo irá variar. Conforme já comentado anteriormente o aparelho UVP dispara as suas ondas ultrassônicas de sonda em sonda, sendo o intervalo de tempo entre um disparo e outro dependente diretamente da frequência configurada inicialmente no aparelho. Um ciclo completo significa o intervalo de tempo entre o primeiro disparo e o último. Geralmente a organização das sondas nos ensaios fica disposta da seguinte maneira: a sonda que sofrerá o primeiro disparo tem o seu posicionamento mais próximo do fundo do canal; já o último disparo será feito pela sonda mais afastada, no eixo transversal do canal, conforme esquema da figura 12. As sondas intermediárias seguirão essa hierarquia de profundidades nos disparos das ondas. Assim, o instante de tempo das médias das leituras dos canais estabelecido será justamente o tempo de um ciclo completo, ou seja, a sonda do primeiro disparo sempre marcará o tempo das médias de velocidades calculadas, não importando o número de sondas que foram dispostas no ensaio. Tendo as velocidades médias de cada sonda em vários instantes de tempo o programa desenvolvido nesse trabalho aproxima esses tempos, o máximo possível, dos tempos de leituras de concentração do UHCM, cruzando os registros dos dados de ambos os arquivos até chegar a um instante de tempo de leitura de ambos os aparelhos. Ou seja, todos esses esforços serão para cumprir o objetivo de determinar, para um ponto no tempo e no espaço a concentração e a velocidade de uma corrente de densidade simulada em laboratório. Esse procedimento será executado pelo programa para todos os instantes de tempo que estiverem dentro do intervalo de tempo estipulado pelo usuário. Em outras palavras, o usuário final definirá todas as configurações de seleção de dados inicialmente, antes que qualquer cálculo seja efetuado pelo programa.

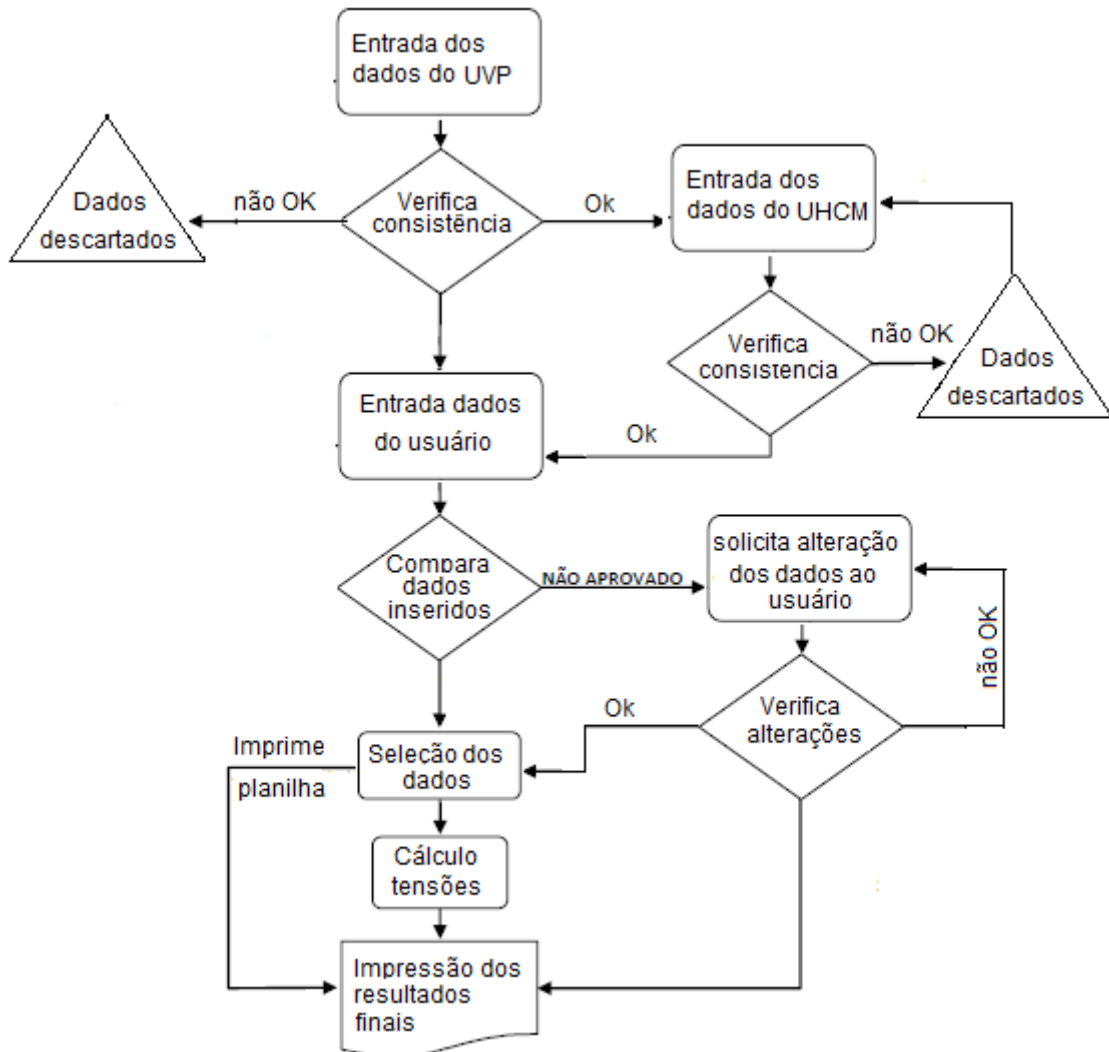
A altura da corrente será determinada automaticamente pelo programa porque esse parâmetro varia de ensaio para ensaio. O programa determina essa altura, para definir melhor as interfaces da corrente, através do mecanismo de leitura dos dados do UVP, uma vez que as leituras de medidas de velocidade na direção do fluxo possuem valores com sinal negativos e na direção oposta ao fluxo, valores positivos. Assim, fazendo a média entre as leituras médias de cada sonda do equipamento e avaliando o sinal desse resultado, pode-se estimar até que sonda a altura da corrente está contida. As demais sondas serão descartadas pelo programa.

Tendo-se estimada a altura, as velocidades e as concentrações no tempo e no perfil vertical do eixo longitudinal da corrente ensaiada, a seguir o programa agrupará todas essas informações

em uma planilha. Dessa forma, o prosseguimento com os cálculos se tornará possível, assegurando, assim, a consistência dos resultados finais.

Assim, resumindo, a figura 19 apresenta o fluxograma do programa com as etapas descritas acima.

Figura 19 – Fluxograma das etapas realizadas pelo programa



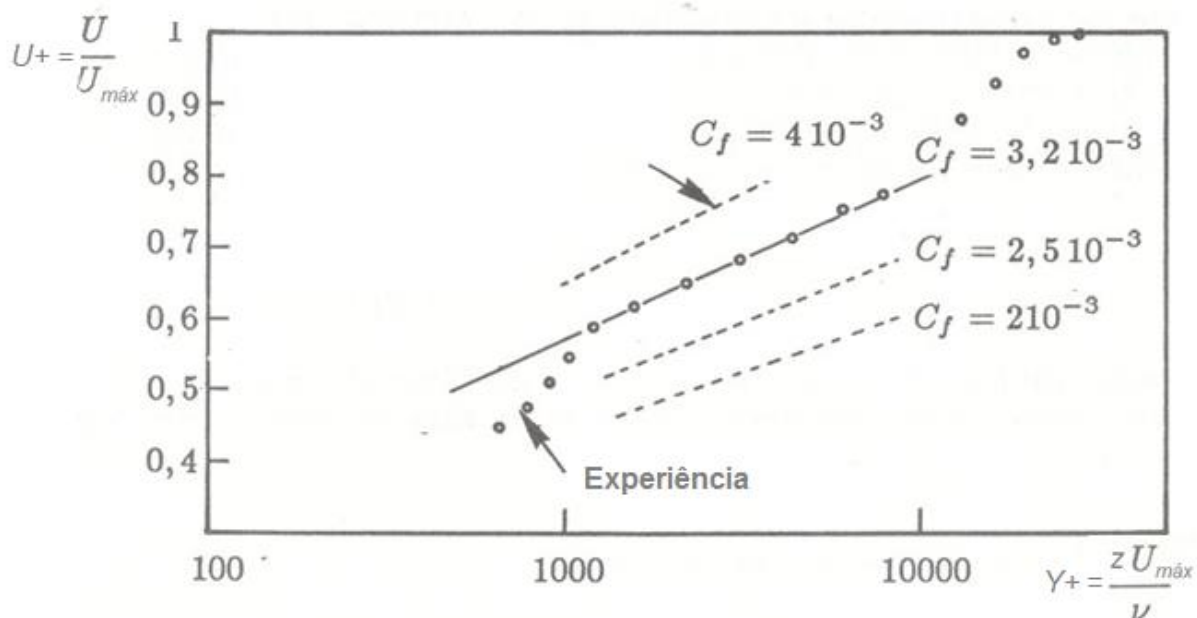
(fonte: elaborado pelo autor)

## 6.2.4 Considerações sobre o método de Clauser (1954)

Em princípio, a tensão de cisalhamento de fundo ( $\tau_b$ ) é dada pelo valor da derivada  $dU/dy$  em  $y = 0$ . Na prática, esta operação é delicada, pois a velocidade varia muito rapidamente na vizinhança de  $y = 0$  e é frequentemente muito difícil medir com precisão a velocidade dentro da zona onde  $Y_+ < 10$ . Dentro deste contexto o presente trabalho apresenta os mecanismos computacionais utilizados para determinar as tensões de cisalhamento das correntes ensaiadas, próximas ao fundo do canal, através do método adaptado de Clauser (1954).

Primeiramente esse método exige estabelecer as curvas  $U_+$  por  $Y_+$ , que são respectivamente as velocidades e distâncias adimensionais do perfil vertical de distribuição de velocidades. Como esse método foi adaptado para o cálculo das tensões em escoamentos à superfície livre, as tensões de cisalhamento de uma corrente de densidade somente podem ser encontradas do fundo até altura onde a velocidade do fluxo é máxima. Assim, as velocidades adimensionais do fluxo podem ser expressas pela razão entre cada velocidade do perfil longitudinal e a velocidade máxima desse mesmo perfil, conforme equação 4. Já as distâncias adimensionais são obtidas através da equação 9.

Figura 20 – Diagrama de Clauser para alguns valores de  $C_f$ 's estipulados



(fonte: modificado do diagrama de Clauser, 1954)

Tendo estabelecido as velocidades e distâncias adimensionais do perfil de velocidades o próximo procedimento se refere à determinação  $C_f$ 's. O método exige que sejam arbitrados valores de  $C_f$  (na equação 6) afim de gerar novas funções adimensionais, utilizando a equação 5, na tentativa de se aproximar da função obtida do perfil de velocidades. Do conjunto de curvas assim calculadas, uma delas deve coincidir, razoavelmente, com os dados medidos experimentalmente. É esta curva que conduzirá ao valor da tensão de cisalhamento junto ao fundo das correntes de densidade (figura 20).

Esse mecanismo foi implementado em ambiente computacional para ser executado quantas vezes forem necessárias, com base nos dados selecionados, dentro do intervalo de tempo estipulado inicialmente pelo usuário do programa. A rotina do algoritmo teve que absorver toda a sensibilidade do método, caso contrário, erros de cálculo poderiam surgir. As maiores dificuldades enfrentadas para modelar este método foram oriundas das várias tentativas de aproximações dos valores de  $C_f$  para encontrar a curva de pontos mais próxima do posicionamento da curva experimental. Através da análise qualitativa do gráfico (visual a olho nú) isso pode parecer trivial, entretanto, quando uma máquina deve ser instruída a conceber esse tipo de percepção, algumas complicações na definição do algoritmo criado podem aparecer.

### **6.2.5 Considerações sobre o método de Michon et al. (1955)**

Da mesma forma que o método de Clauser (1954), o método de Michon et al. (1955) deverá ser executado, se assim for requerido pelo usuário antes das operações. As implementações computacionais desse método não tiveram grandes dificuldades de serem construídas, pois como pode ser constatado pelas equações 1 a 3, o desenvolvimento do mesmo é de caráter puramente matemático, tornando, assim, a sua modelagem mais compatível com as instruções de máquina. Os maiores cuidados na criação do modelo foram tomados com relação às unidades de medidas. Como esse método foi desenvolvido tendo como base teórica as leis de Newton, cada unidade de medida deverá ser coerente com cada grandeza envolvida nos cálculos.

Como nos ensaios realizados somente foram obtidos valores discretizados no tempo e no eixo vertical de cada corrente simulada, para conseguir, então, aproximar as integrais definidas do método se recorreu a análise numérica. Dentro da integração numérica existe uma grande família de algoritmos, cujo principal objetivo é aproximar o valor de uma dada integral definida

de uma função sem o uso de uma expressão analítica para a sua primitiva. Dentre as regras possíveis de cálculo foi escolhida uma regra simples para implementação computacional, ou seja, aproximação por trapézios. Esta regra, que de acordo com alguns testes realizados se ajustou de forma adequada aos dados discretizados e aos resultados esperados. Outras regras mais complexas como a integração composta agregariam mais precisão nos resultados, porém essa precisão não exerce uma influência significativa nos mesmos. A equação 11 exprime a regra trapezoidal da integração numérica utilizada neste trabalho.

$$\int_a^b f(x). dx \approx (b - a). \frac{f(a) + f(b)}{2} \quad (\text{equação 11})$$

Onde:

$f(x)$  = função em sua forma analítica;

$f(a)$  = primeiro ponto discretizado da função no intervalo da integral definida;

$f(b)$  = segundo ponto discretizado da função no intervalo da integral definida;

$a$  = limite inferior de integração;

$b$  = limite superior de integração.

### 6.3 INTERFACE GRÁFICA

As linguagens computacionais são desenvolvidas para as máquinas (computadores) interpretá-las ou compilá-las, cabendo somente ao programador gerar as instruções necessárias para que o computador consiga atingir o objetivo almejado. Nesse contexto surge, com certa naturalidade, a necessidade de uma interação mais amigável com o usuário desses procedimentos, para que este consiga entender o que está acontecendo nos processos em execução ou que serão executados de forma mais intuitiva e clara. Essa interação do usuário com o programa e/ou sistema traz mais segurança e confiabilidade, além de mais conforto na utilização do mesmo. Assim, neste trabalho se viu a necessidade da criação de uma interface gráfica do programa desenvolvido, para que os futuros usuários possam desprover de todas as funcionalidades disponíveis no mesmo.



Não obstante, além de todos os esclarecimentos intuitivos do programa que a interface gráfica proporciona, ela também ajuda a garantir a consistência dos dados na hora da inserção dos mesmos pelo usuário. Essas garantias se resumem em restrições criadas para tentar barrar a entrada indevida de informações. Essas informações podem estar na forma de arquivos ou campos, onde o utilizador deverá preencher antes da execução do programa. A interface gráfica funciona, de certa forma, como um protocolo de segurança, onde o seu objetivo final também recai na consistência dos resultados, obtidos pela execução correta do programa, com dados consistentes de entrada. As restrições nada mais são que artifícios computacionais elaborados pelo autor que tratam os principais erros possíveis e passíveis do usuário cometer, o programa não executará as suas principais funções enquanto todas as restrições não forem satisfeitas.

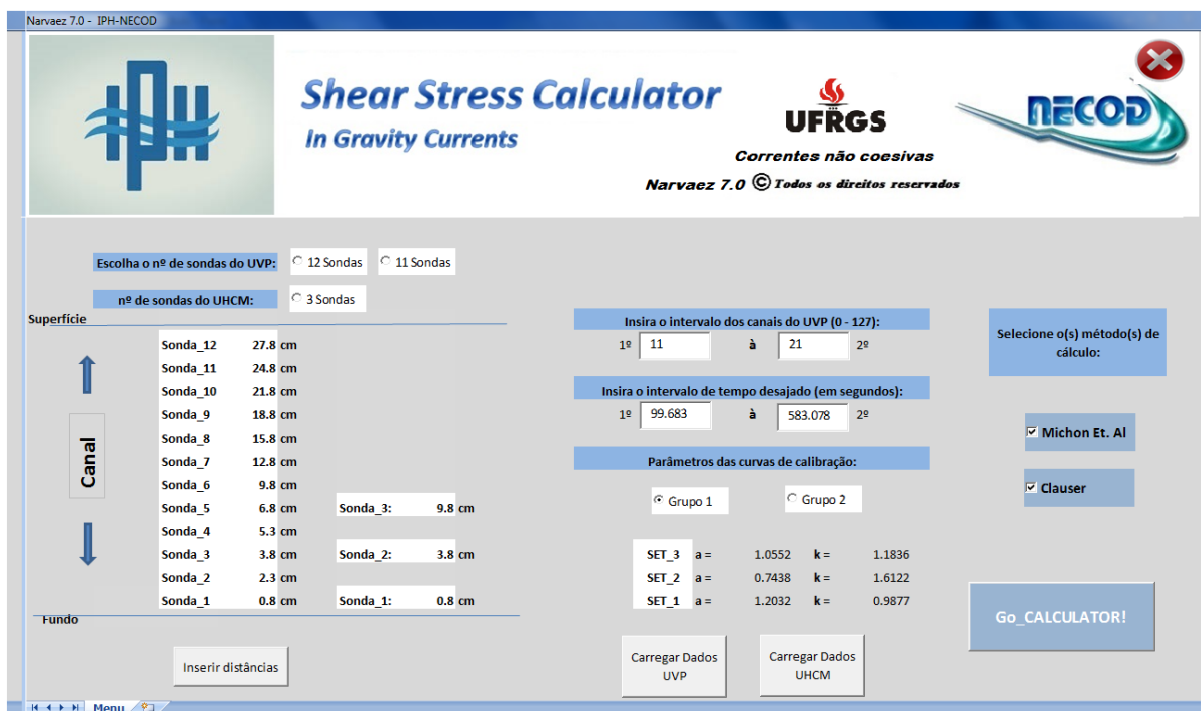
Na sequência desta seção será apresentada a interface gráfica do programa criado para calcular as tensões de cisalhamento de uma corrente de densidade simulada em laboratório e também fornecer outras informações importantes como a distribuição de velocidades e concentrações dessas correntes. A figura 21 é um *print screen* da primeira tela do programa. Nesta tela estarão programadas todas as restrições comentadas anteriormente e todas as informações necessárias que devem ser inseridas inicialmente pelo usuário no programa.

Na figura 22 foram numeradas todas as funcionalidades disponíveis nessa interface. Na sequência, cada funcionalidade recebe um comentário com caráter explicativo a fim de tirar qualquer dúvida dos futuros usuários na hora de operar o programa.

1 – Aqui o usuário pode optar dentre duas possibilidades de números de sondas do UVP (11 ou 12), que estarão dispostas no canal de ensaios. Essas duas possibilidades foram estipuladas com base nos ensaios do projeto. Essa funcionalidade poderá ser reprogramada, em código, uma vez que o proprietário do programa necessitar de outras combinações de equipamentos.

2 – Esse ícone é similar ao primeiro, pois a opção agora é para determinar o número de sondas do UHCM que estarão dispostas nos canal de ensaio. O número 3 surge com base na necessidade de avaliar os dados provenientes dos ensaios do projeto a qual este trabalho se baseia, no entanto, esta funcionalidade pode ser reprogramada também.

Figura 21 – Interface gráfica do programa



(fonte: elaborado pelo autor)

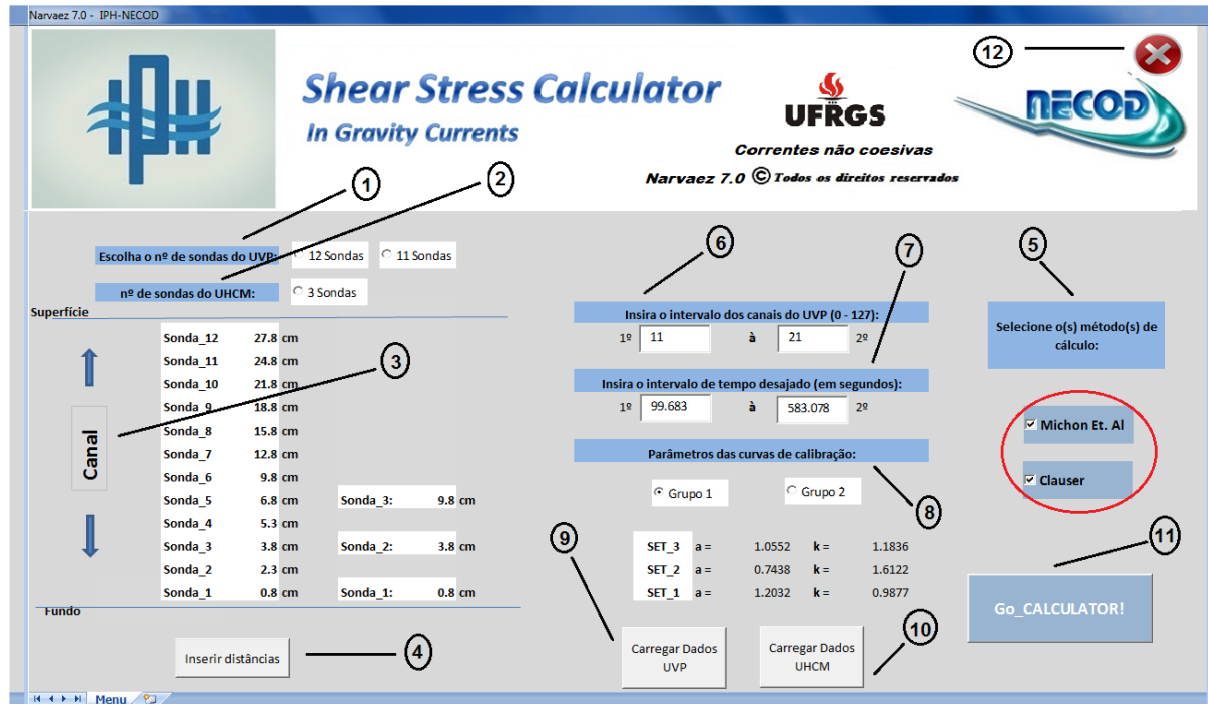
3 – Aqui foi representado o canal de ensaios, onde toda vez que o usuário trocar de opção das sondas do UVP, no ícone 1, ele preencherá automaticamente as células da planilha indicando a opção escolhida pelo usuário. Essa funcionalidade serve para garantir a entrada correta do número de sondas e ao mesmo tempo apresentá-la para o usuário, de forma a certificar a opção desejada.

4 – Esse ícone é um botão de comando. Sempre que o usuário acioná-lo serão preenchidos automaticamente os campos com os valores das distâncias de cada sonda do ícone 3, tanto das sondas do UVP quanto das do UHCM. Os valores padrão das distâncias inseridas automaticamente foram estabelecidas com base na figura 12.

5 – Nessa opção existem duas caixas de seleção, que permitirão selecionar o método de cálculo das tensões de cisalhamento desejado, podendo ser um deles ou ambos. Os métodos estão circundados por um círculo em cor vermelha.

6 – Aqui deverá ser inserido o intervalo de canais das sondas do UVP que se deseja processar nos cálculos das tensões. Existem, portanto, dois campos de preenchimento, um para o canal inicial, e o outro para o canal final. Nesses campos o programa não permitirá a inserção de caracteres não numéricos ou incompatíveis com os limites dos canais do aparelho.

Figura 22 – Ícones da interface gráfica numerados



(fonte: elaborado pelo autor)

7 – Nesse ponto, como no anterior, serão dispostos dois campos (inicial e final) para a captura do intervalo de tempo desejado para gerar os perfis de tensões das correntes simuladas. Todos os instantes de tempo que tiverem dentro desse intervalo, conforme o tempo de um ciclo de leituras do UVP, terão um perfil de tensão pelo método escolhido no ponto 5.

8 – Esse ponto diz respeito às curvas de calibração utilizadas para calcular, através das equações da tabela 5, as concentrações lidas de cada sonda do UHCM em volume. Logo, o usuário deverá escolher entre o grupo 1 e o grupo 2 de equipamentos para orientar o programa a utilizar corretamente os parâmetros de ajuste “a” e “k” para cada sonda que pertence ao grupo de aparelhos analisados.

9 – Botão para carregar os dados do UVP. Uma parte dos tratamentos realizados nos dados dos arquivos desse aparelho será executada quando esse botão for acionado. Aqui o programa não permitirá que os dados sejam carregados, caso reconhecer algum tipo de erro relatado na seção 6.2.1 (página 62).

10 – Basicamente segue o mesmo princípio de funcionamento do item 9, porém as análises realizadas ao carregar os dados do UHCM serão diferentes, justamente porque a estrutura desses arquivos é diferente. Essas análises foram relatadas na seção 6.2.2 (página 63).

11 – Botão que inicia os procedimentos subsequentes para começar a seleção dos dados e os cálculos, propriamente dito. Porém antes, serão executadas as instruções restantes de consistência de dados às informações agregadas pelo usuário, combinadas com as já carregadas. Caso o programa encontrar alguma inconsistência nos cruzamentos das informações de carregamento com as incluídas diretamente pelo usuário, será mostrada uma caixa de diálogo, avisando-o dos problemas encontrados e, assim, impedindo o prosseguimento das instruções.

12 – Como qualquer janela principal, este ícone se refere ao fechamento do programa. Ao ser clicado, uma janela perguntando se o usuário deseja salvar os dados carregados irá aparecer. Quando escolhida a opção de salvamento, o programa irá fechar, salvando os dados carregados, inseridos na interface. Caso contrário, irá fechar, descartando as planilhas de dados carregados.

## 7 RESULTADOS ENCONTRADOS

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos com base em testes do programa computacional desenvolvido neste trabalho. Devido à gama de possibilidades de resultados que o programa pode fornecer, apenas variando os intervalos dos canais do UVP ou os intervalos de tempo escolhidos dos ensaios, o autor achou por bem apresentar neste capítulo os resultados de apenas alguns ensaios sobre fluxos não coesivos, fixando os intervalos de tempo e os intervalos dos canais. Caso contrário, este texto se tornaria demasiadamente longo, fugindo o escopo do trabalho.

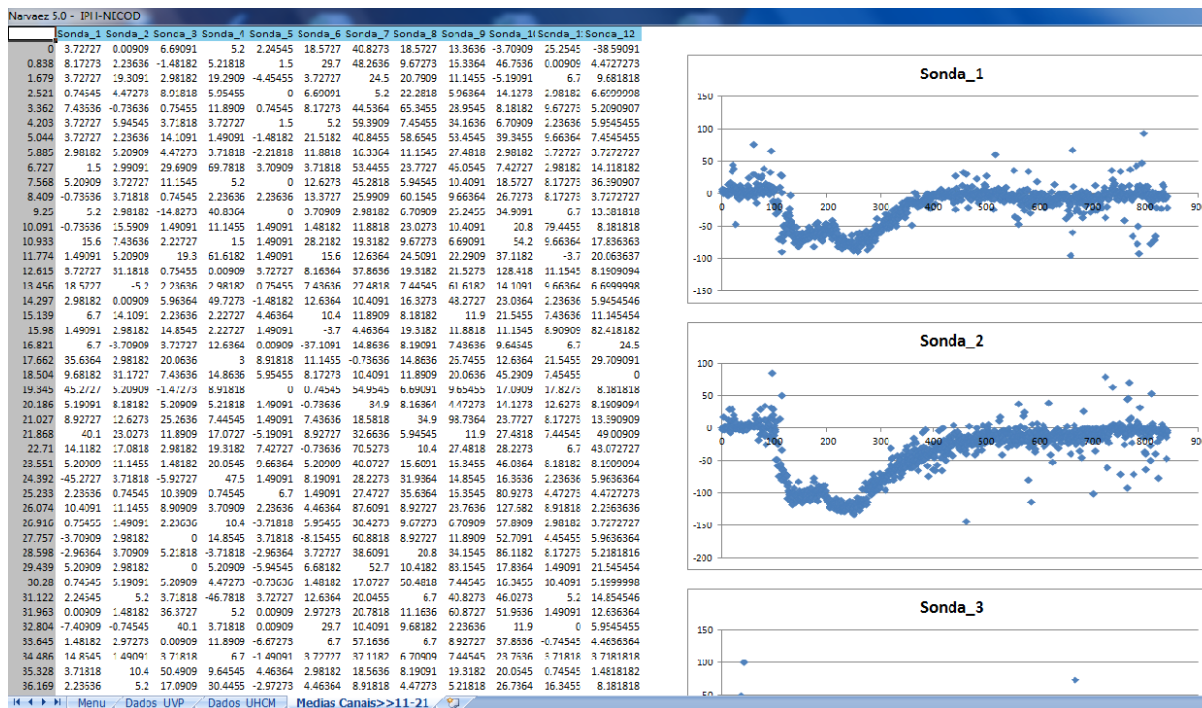
A seguir, então, serão apresentadas todas as saídas do programa quando inseridos os dados dos arquivos do UVP e do UHCM de um ensaio. A propósito, como foram colocados dois grupos de equipamentos no canal para a realização dos ensaios, foi escolhido o primeiro grupo como fonte de dados para gerar essas saídas. Dentro da família de fluxos não coesivos, que contabilizam seis de um total de dez ensaios, conforme tabela 3, se deu preferência para exemplificar os resultados dos fluxos com menor concentração, devido à ocorrência de soterramento das sondas dos aparelhos mais próxima ao fundo do canal, após um determinado período de tempo de um ensaio com mistura de alta concentração. Além do mais, foi verificado, pela equipe técnica do projeto responsável pelos ensaios, que o sensor de leitura das sondas do UHCM não consegue captar informação para meios aquosos com concentração em volume superior a 10%.

### 7.1 DADOS DE INTERESSE SELECIONADOS

Verificada a consistência dos dados inseridos, o programa irá executar todas as rotinas de seleção dos mesmos, conforme explicadas na seção 6.2.3, com base nos critérios de entrada, estipulados inicialmente pelo usuário. A figura 23 demonstra a primeira tela de saída do programa. O ensaio escolhido para gerar e apresentar essas saídas foi o E1 (ver tabela 3). Na primeira coluna da tabela da figura 23 estão os instantes de tempos, em que as velocidades médias foram calculadas (marcadas em cor diferente das demais) e nas colunas seguintes ficam contidos os dados de velocidades para cada sonda disposta no ensaio em todos instantes de tempo. Ao lado desse grupo de dados processados o programa ainda apresenta a evolução

desses valores de velocidades no tempo, para cada sonda, em forma de gráficos. A sequência desses gráficos pode ser melhor visualizada na figura 24.

Figura 23 – Primeira tela de saída apresentada pelo programa

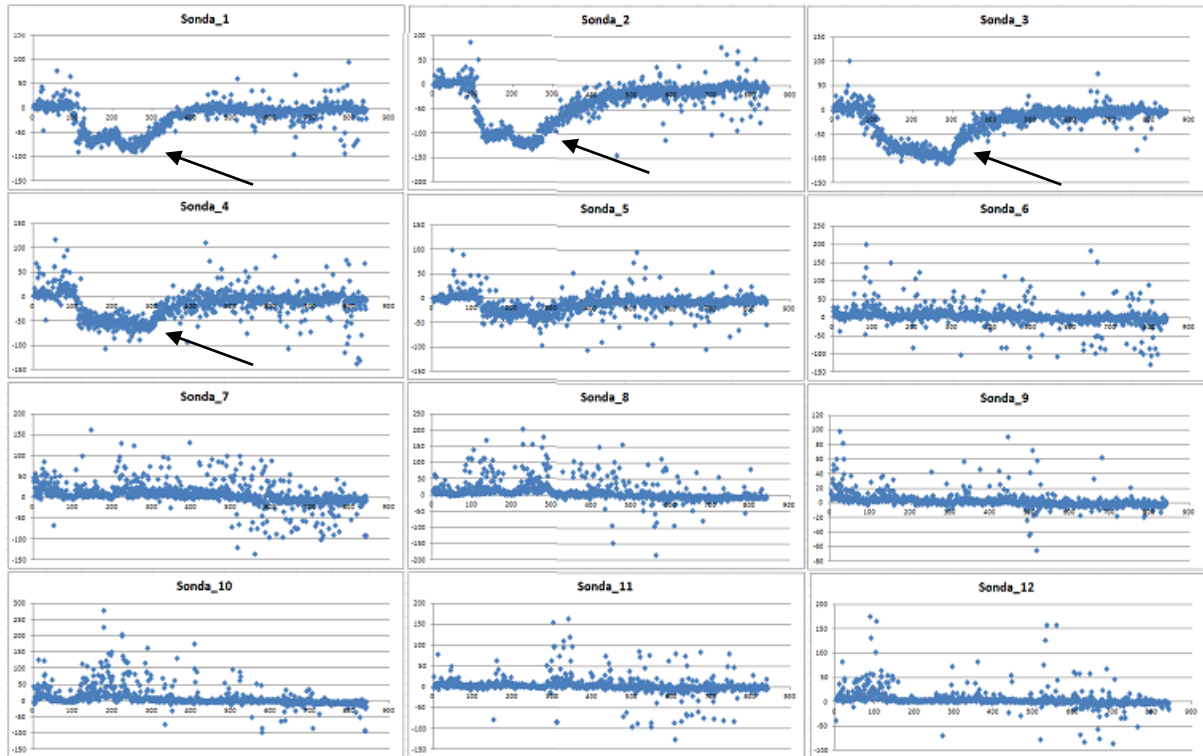


(fonte: elaborado pelo autor)

Na figura 24 foram demarcadas algumas protuberâncias (velocidades diferentes de zero) com setas, referentes aos gráficos das sondas mais inferiores no canal. Na medida em que as alturas das sondas de leitura aumentam, essas protuberâncias vão sendo atenuadas e a nuvem de pontos tende a se acumular em torno do eixo das abscissas ao longo do tempo. Isso ocorre justamente porque as velocidades médias ficam estabilizadas nessas cotas, não alterando suas medidas de velocidade efetivamente com a passagem da corrente, podendo-se estimar, dessa forma, que nessa região não há influência do fluxo ou ela deve ser muito mínima, marcando a altura limite da corrente do ensaio. O programa estabelece uma altura superior da encontrada para demarcar o limite do fluxo, justamente para garantir que o mesmo está totalmente contido neste limite.

Além da altura, pode-se estimar também o tempo da passagem da corrente, com base nas informações visuais da figura 24. As protuberâncias indicadas pelas setas estão contidas dentro de um intervalo de tempo visualmente bem determinado nos gráficos dessa figura, que corresponde ao tempo de passagem do fluxo, justamente porque as maiores leituras de velocidades do equipamento são os pontos contidos nesse intervalo.

Figura 24 – Evolução das velocidades médias no tempo para cada sonda do UVP



(fonte: elaborado pelo autor)

Dessa forma, o algoritmo de seleção dos dados desenvolvido neste trabalho utiliza as séries temporais de velocidades pertencentes à tabela da figura 23 para selecionar os dados de concentração e velocidades, que posteriormente serão inseridos como parâmetro de entrada nos métodos de cálculo modelados para determinar as tensões de cisalhamento da corrente de densidade do ensaio. O programa dispensa os dados referentes às sondas que estão fora dos limites do fluxo estimado pelo algoritmo de tratamento inicial e irá comparar os tempos inseridos pelo usuário com os instantes de tempo presentes nessa planilha. O programa aproxima os valores numericamente e caso não consiga encontrar nenhum tempo próximo o suficiente para referenciar no arquivo de dados, retornará um erro e pedirá que o usuário insira novos valores para prosseguir com os procedimentos. Estes instantes de tempo também serão utilizados para pesquisar registros aproximados no arquivo do UHCM para selecionar as concentrações do fluxo referentes ao intervalo de tempo estipulado pelo usuário, além de selecionar corretamente os registros pertinentes ao grupo de equipamentos escolhido na interface gráfica. A figura 25 apresenta os dados de velocidade e concentração selecionados para o ensaio E1. O intervalo de tempo estipulado foi o do instante de 118,607 s ao 463,503 s

(na tentativa de cobrir o tempo de passagem da corrente) e o intervalo de canais escolhido foi do canal 11 ao 21.

Figura 25 – Dados de velocidades e concentrações selecionados pelo programa

Narvaez 7.0 - IPH-NECOD																			
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	T	
	Velo_0	Velo_1	Velo_2	Velo_3	Velo_4	Velo_5	Velo_6	Velo_7		Dens_0	Dens_1	Dens_2	Dens_3	Dens_4	Dens_5	Dens_6	Dens_7		
1																			
2	118.607	0	-51.9818	-72.7545	-56.4273	-11.1455	3.709091	17.08182	7.436364	1806.823	1645.458	1342.899	1040.34	1030.446	1020.552	1000.764	1000.638		
3	119.449	0	-33.4091	-82.4091	-60.8818	39.33636	0.009091	4.454545	14.85455	1822.734	1658.23	1349.784	1041.339	1031.004	1020.669	1000	1000		
4	120.29	0	-53.4636	-70.5273	-57.9091	-63.1091	32.67273	2.972727	20.79091	1852.315	1684.659	1370.302	1055.946	1042.055	1028.163	1000.381	1000.318		
5	121.131	0	-30.4364	-70.5182	-55.6818	-35.6364	-5.21818	3.727273	29.69091	1862.936	1690.704	1367.768	1044.833	1033.698	1022.563	1000.293	1000.244		
6	121.972	0	-44.5455	-105.4	-39.3364	-40.1091	-17.8273	10.40909	100.9636	1865.699	1693.167	1369.669	1046.17	1034.746	1023.322	1000.473	1000.395		
7	122.813	0	-37.1273	-87.6091	-48.9909	-22.2727	3.718182	6.7	11.88182	1860.894	1686.674	1360.011	1033.349	1025.107	1016.865	1000.381	1000.318		
8	123.655	0	-28.2091	-81.6636	-51.2273	-41.5818	-23.7818	7.436364	13.36364	1875.17	1700.331	1372.508	1044.685	1033.73	1022.775	1000.865	1000.723		
9	124.496	0	-60.1364	-94.2727	-49	-50.4909	-22.2818	9.654546	5.209091	1876.011	1700.778	1372.217	1043.656	1033.119	1022.583	1001.509	1001.26		
10	125.337	0	-32.6727	-97.2455	-54.9364	-32.6636	-49	12.62727	2.227273	1910.107	1726.292	1381.64	1036.987	1027.836	1018.684	1000.381	1000.318		
11	126.178	0	-20.7818	-100.973	-55.6818	-38.6091	-34.1636	4.454545	5.936364	1907.981	1726.516	1386.268	1046.021	1035.247	1024.474	1002.927	1002.445		
12	127.02	0	-0.75455	-104.691	-58.6636	-43.0727	-24.5091	7.436364	11.15455	1905.032	1723.383	1382.793	1042.202	1031.77	1021.337	1000.473	1000.395		
13	127.861	0	-46.7727	-100.964	-75.7091	-24.4909	-13.3545	9.672728	6.690909	1923.157	1735.913	1384.829	1033.746	1025.405	1017.063	1000.381	1000.318		
14	128.702	0	-46.7818	-107.636	-59.3818	-39.3545	-51.2455	9.663636	6.690909	1917.367	1733.676	1389.254	1044.833	1033.841	1022.849	1000.865	1000.723		
15	129.543	0	-40.8273	-103.2	-51.2182	-54.2	-19.3091	23.77273	34.14545	1917.502	1733.228	1387.715	1042.202	1032.029	1021.856	1001.509	1001.26		
16	130.384	0	-46.0364	-111.355	-52.7182	-35.6455	-14.8636	8.172728	14.1	1926.041	1739.94	1390.999	1042.058	1031.557	1021.057	1000.057	1000.047		
17	131.226	0	-55.6818	-102.464	-61.6091	-28.9636	-16.3455	5.209091	16.32727	1930.627	1743.742	1393.335	1042.927	1032.29	1021.654	1000.381	1000.318		
18	132.067	0	-63.8545	-116.545	-60.1364	-25.2455	-19.3182	8.927273	4.463636	1937.431	1747.321	1390.867	1034.412	1026.827	1019.241	1004.071	1003.4		
19	132.908	0	-47.5182	-98.7364	-60.1364	-45.2909	-19.3091	-0.74545	21.52727	1925.564	1736.808	1382.891	1028.973	1022.221	1015.469	1001.965	1001.641		
20	133.749	0	-50.4909	-96.5091	-64.5909	-33.4182	43.8	2.981818	10.39091	1927.791	1738.15	1382.573	1026.996	1021.2	1015.404	1003.812	1003.183		
21	134.59	0	-49.7364	-90.5636	-61.6182	-46.0273	-33.4182	0	14.1	1938.133	1747.321	1389.55	1031.778	1024.325	1016.872	1001.965	1001.641		
22	135.432	0	-74.9818	-97.2636	-60.8727	-44.5455	-24.5091	-21.5364	8.181818	1924.969	1738.821	1389.794	1040.767	1031.338	1021.909	1003.051	1002.548		
23	136.273	0	-62.3636	-101.709	-80.9091	-56.4182	-35.6455	-2.23636	3.727273	1933.216	1743.966	1389.122	1034.278	1026.534	1018.79	1003.302	1002.758		
24	137.114	0	-69.0455	-100.209	-83.1545	-39.3545	-12.6182	-1.47273	16.34546	1914.094	1727.858	1378.667	1029.476	1022.402	1015.328	1001.18	1000.986		
25	137.955	0	-60.1273	-112.836	-61.6273	-60.1273	-25.2636	2.981818	4.472727	1929.045	1741.506	1389.869	1038.232	1028.942	1029.653	1001.074	1000.897		
26	138.796	0	-71.2727	-100.227	-88.3455	-51.2364	-8.9	-0.73636	8.909091	1921.296	1735.242	1386.39	1037.538	1028.645	1019.752	1001.965	1001.641		
27	139.638	0	-59.3818	-98.7364	-78.6909	-64.6	-8.91818	-0.74545	15.59091	1927.973	1739.94	1387.377	1034.814	1026.69	1018.566	1002.319	1001.937		
28	140.479	0	-49.7455	-109.136	-86.8364	-54.1909	-26	10.40909	16.31818	1919.506	1732.781	1382.67	1032.56	1025.029	1017.499	1002.439	1002.037		
29	141.32	0	-71.2818	-103.209	-68.2909	-38.6182	-28.9455	-0.75455	8.172728	1938.699	1748.663	1392.347	1036.03	1027.573	1019.115	1002.2	1001.838		
30	142.161	0	-69.7909	-103.209	-72.7545	-57.1727	17.07273	5.209091	8.918181	1934.071	1745.532	1392.021	1038.51	1029.645	1020.781	1003.051	1002.548		
31	143.003	0	-71.2727	-105.427	-71.2727	-27.4636	-8.91818	2.972727	17.09091	1947.493	1752.689	1387.433	1022.176	1017.748	1013.32	1004.464	1003.729		
32	143.844	0	-79.4273	-80.9091	-54.2	-49.0091	-19.3091	9.645454	163.3091	1905.927	1719.803	1370.82	1021.838	1017.763	1013.689	1005.54	1004.627		
33	144.685	0	-61.6182	-97.2545	-69.0364	-54.1909	-30.4455	149.9454	9.663636	1934.486	1741.506	1379.667	1017.829	1014.197	1010.565	1003.302	1002.758		
34	145.526	0	-66.0727	-96.5182	-63.8545	-43.8091	-32.6727	-5.93636	8.9	1923.379	1733.676	1377.982	1022.289	1017.094	1011.899	1001.509	1001.26		
35	146.367	0	-77.2091	-95.0273	-66.0818	-31.1909	-14.1091	-7.43636	5.218182	1933.73	1743.071	1385.587	1028.102	1021.933	1015.765	1003.428	1002.863		

(fonte: elaborado pelo autor)

Na montagem da planilha da figura 25, o programa simplesmente extrai os valores de velocidades da planilha da figura 23 e insere uma coluna depois da coluna dos tempos, preenche-a com zeros, indicando que na base do canal todas as velocidades são nulas, em todos os instantes de tempo. Já para os dados de concentração, depois de pesquisados e encontrados os tempos de referência, o programa insere os valores já calibrados para concentração em massa, com base nas curvas da tabela 4 e utilizando a equação 11, do grupo de equipamentos que foi escolhido na interface gráfica, inicialmente pelo usuário. Como o UHCM somente dispõe de três sondas de leitura para cada grupo, as demais massas específicas foram determinadas através do procedimento de interpolação linear simples, completando a planilha da figura 25, tendo para cada valor de velocidade, em um dado instante de tempo, um dado de massa específica associado. Para esses procedimentos foi estabelecido como 1191 kg/m<sup>3</sup> a massa específica do carvão e 1000 kg/m<sup>3</sup> para a massa específica da água



## 7.2 PERFIL DE VELOCIDADES

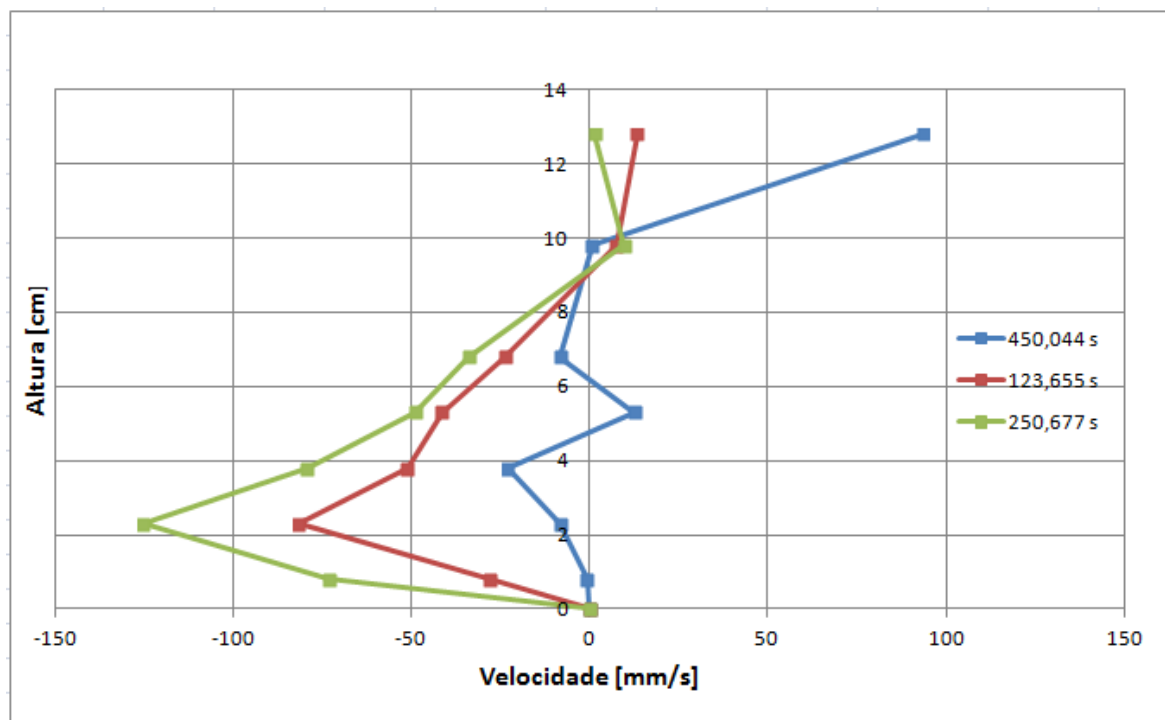
A partir dos dados de velocidade da figura 25 foram tomados três instantes de tempo para gerar três perfis de velocidades, apresentados na figura 26, respectivamente escolhidos próximos do início, meio e fim do intervalo de tempo inicialmente estipulado. Nessa figura podem ser notadas mudanças drásticas nos perfis de velocidade, reforçando o caráter profundamente dinâmico do fenômeno.

De acordo com a literatura uma corrente de densidade pode ser dividida em três partes: cabeça, corpo e cauda. Para o fluxo manter a sua taxa de avanço constante, a corrente aumenta a velocidade do corpo para compensar o déficit de densidade criado (Middleton, 1993). Dessa forma, seguindo a ordem temporal da corrente, pode-se notar nos dois primeiros perfis esse comportamento, onde o perfil do instante de tempo mais próximo da metade do intervalo possui velocidades superiores do próximo à extremidade inicial do intervalo. Segundo Manica (2012, p. 266, tradução nossa):

A terceira parte do fluxo de gravidade de sedimento é caracterizada por uma zona de desaceleração e estágio final de diluição da corrente, normalmente chamado de cauda. Em termos de dinâmica de propriedades do fluxo, os fluxos de gravidade de sedimentos diferem significativamente dos fluxos de canal aberto (rios) quanto ao seu perfil de velocidade. Nesse caso, de escoamento por gravidade de sedimentos, a principal diferença é devido ao fato de não ser possível ignorar os efeitos cisalhantes na superfície superior da corrente.

Assim o autor sugere que o terceiro perfil, marcado em cor azul na figura 26, deva descrever um estágio da corrente situado próximo à sua cauda, entrando em concordância com o que era esperado pela relação entre as séries de velocidade temporais da corrente com os perfis gerados pelo programa. No terceiro perfil, além dessa desaceleração dos pontos próximos à sua base, pode ser notado também uma contra corrente na parte superior, onde as velocidades aumentam, porém em direção oposta ao fluxo, conforme mecanismo de leitura do aparelho explicado na seção 6.2.3 (página 66). Essa contra corrente pode ser causada pela turbulência na interface superior, justamente proveniente da inércia das camadas inferiores.

Figura 26 – Perfis de velocidade no início, meio e fim do intervalo de tempo



(fonte: elaborado pelo autor)

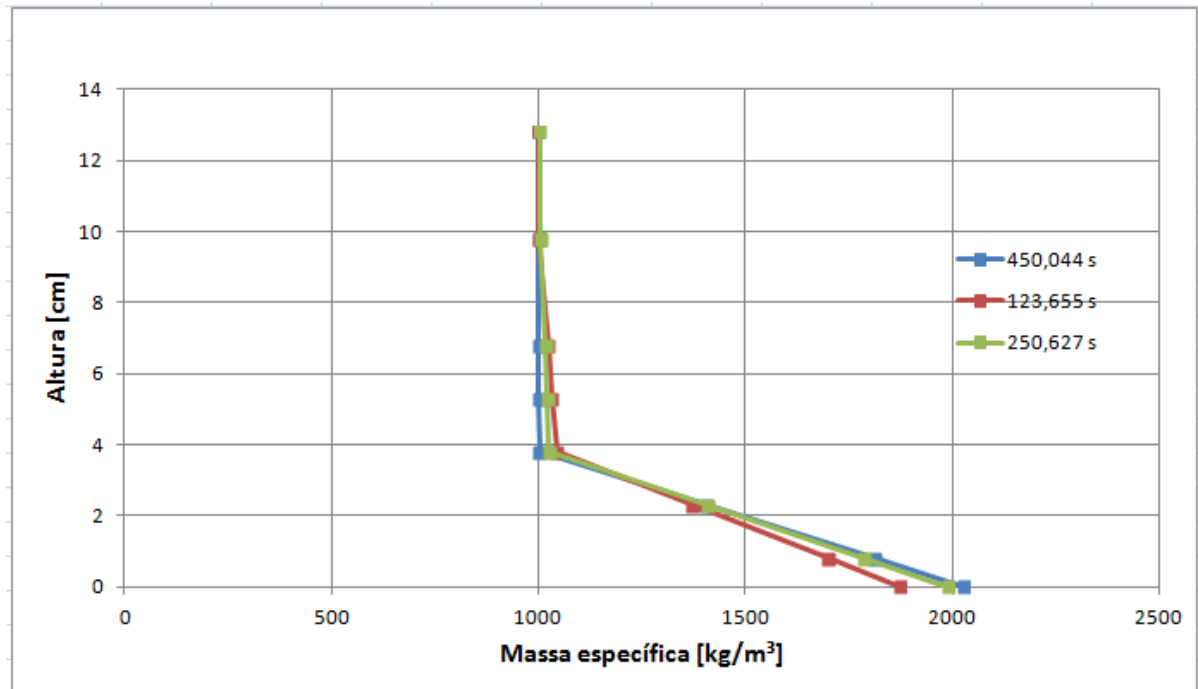
### 7.3 PERFIL DE CONCENTRAÇÕES

O corpo de uma corrente de densidade é dividido em duas zonas: perto da zona de fundo, onde as densidades são altas; e acima desta, uma zona de suspensão, onde a mistura com o fluido ambiente ocorre (MANICA, 2012, p. 265). A figura 27 apresenta os perfis de concentração obtidos neste trabalho para os mesmos instantes de tempo escolhidos na distribuição de velocidades da seção anterior. Próximas à velocidade máxima as concentrações começam a diminuir mais bruscamente criando uma assíntota nos gráficos da figura 27. Esse comportamento da função já era esperado, conforme foi relatado na seção 3.2.2, página 37. Além desse efeito, também pode ser notado na figura 27 o aumento nas concentrações de fundo do fluxo, conforme aumenta o instante tempo. Esse comportamento é justificado pela deposição dos sedimentos em suspensão no fluxo pelo efeito da atração gravitacional provocado nas partículas do mesmo.

Os perfis de concentrações encontrados satisfazem a coerência da dinâmica deposicional desse tipo de fluxo, pois conforme se esperava, as concentrações da base da corrente do ensaio E1

deveriam ser maiores, sendo decrescentes com o aumento da altura de leitura, até um limite de densidade próximo da água a 20°C.

Figura 27 – Perfis de concentração no início meio e fim do intervalo de tempo



(fonte: elaborado pelo autor)

#### 7.4 PERFIL DE TENSÕES POR CLAUSER (1954)

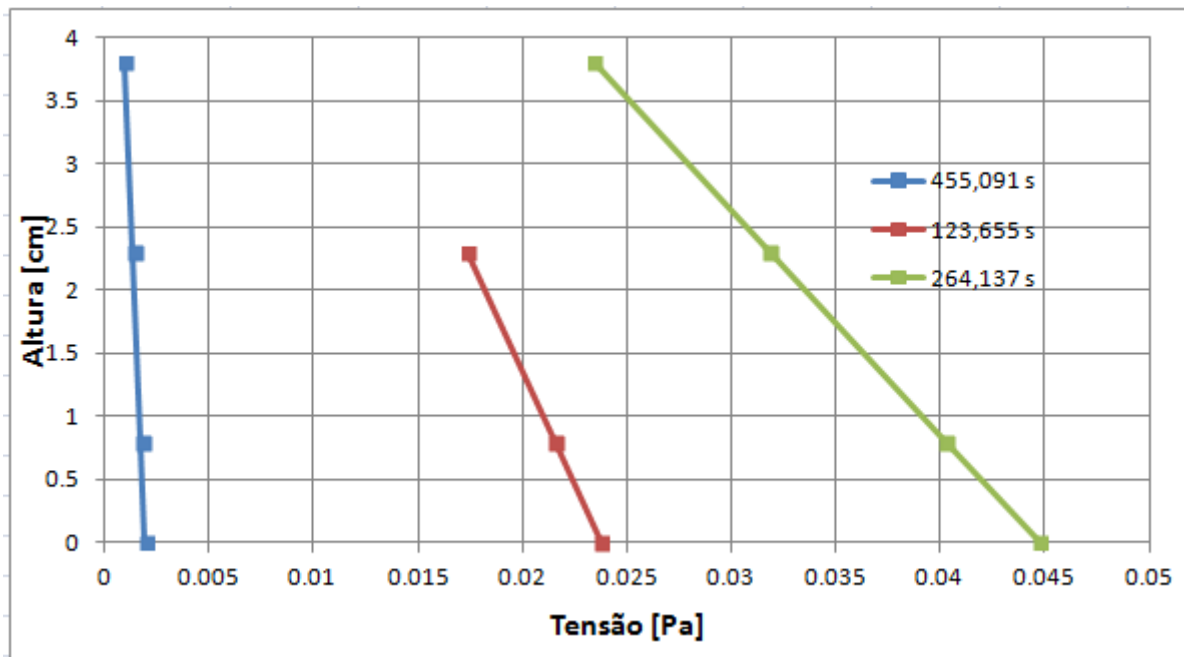
Os cálculos das tensões de cisalhamento pelo método de Clauser (1954), efetuados com base nos dados inseridos no programa, tem como saída uma planilha com forma semelhante à mostrada na figura 28, onde as células com valor de tensão são marcadas em cor verde e as demais em cor azul claro, fazendo referência às cotas das alturas de cada tensão. O método de Clauser foi modificado para calcular somente as tensões de fundo de uma corrente de densidade, ou seja, somente tensões que correspondem à cota zero indo até a altura onde a velocidade é máxima, na corrente. Portanto, os procedimentos realizados pelo algoritmo criado realizam exatamente essas características de cálculos, fazendo com que o perfil de tensões (figura 29) varie sua altura nos instantes de tempo contidos no intervalo estipulado inicialmente, conforme se observa na sequência de dados da figura 28.

Figura 28 – Resultados das tensões de cisalhamento pelo método de Clauser

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	T
1	118.607	0.026792	0.024399	0.019912		0	0.8	2.3											
2	119.449	0.02473	0.022498	0.018314		0	0.8	2.3											
3	120.29	0.027204	0.024742	0.020125		0	0.8	2.3											
4	121.131	0.019751	0.017925	0.014501		0	0.8	2.3											
5	121.972	0.039508	0.035855	0.029004		0	0.8	2.3											
6	122.813	0.028568	0.025893	0.020879		0	0.8	2.3											
7	123.655	0.023749	0.021534	0.017382		0	0.8	2.3											
8	124.496	0.04037	0.036599	0.029529		0	0.8	2.3											
9	125.337	0.03253	0.0294	0.02353		0	0.8	2.3											
10	126.178	0.03143	0.028441	0.022836		0	0.8	2.3											
11	127.02	0.030735	0.027805	0.02231		0	0.8	2.3											
12	127.861	0.039243	0.035422	0.028258		0	0.8	2.3											
13	128.702	0.042591	0.038511	0.03086		0	0.8	2.3											
14	129.543	0.038182	0.034512	0.027632		0	0.8	2.3											
15	130.384	0.044523	0.040221	0.032154		0	0.8	2.3											
16	131.226	0.043687	0.039458	0.031529		0	0.8	2.3											
17	132.067	0.055146	0.049735	0.039589		0	0.8	2.3											
18	132.908	0.038446	0.034678	0.027611		0	0.8	2.3											
19	133.749	0.038522	0.034733	0.027628		0	0.8	2.3											
20	134.59	0.035564	0.032063	0.025498		0	0.8	2.3											
21	135.432	0.050067	0.045225	0.036147		0	0.8	2.3											
22	136.273	0.046309	0.041775	0.033275		0	0.8	2.3											
23	137.114	0.048252	0.043558	0.034755		0	0.8	2.3											
24	137.955	0.051128	0.046157	0.036837		0	0.8	2.3											
25	138.796	0.04955	0.044751	0.035755		0	0.8	2.3											
26	139.638	0.043328	0.039102	0.031179		0	0.8	2.3											
27	140.479	0.044559	0.040225	0.032097		0	0.8	2.3											
28	141.32	0.051538	0.046486	0.037014		0	0.8	2.3											
29	142.161	0.050666	0.045727	0.036466		0	0.8	2.3											
30	143.003	0.052936	0.047641	0.037713		0	0.8	2.3											
31	143.844	0.071928	0.064904	0.051734	0.038563	0.038409	0.038256	0.037948	0.037914		0	0.8	2.3	3.8	5.3	6.8	9.8	12.8	
32	144.685	0.059471	0.053538	0.042415	0.031291	0.031179	0.031067	0.030844		0	0.8	2.3	3.8	5.3	6.8	9.8			
33	145.526	0.045212	0.040753	0.032392		0	0.8	2.3											
34	146.367	0.050376	0.045409	0.036096		0	0.8	2.3											
35	147.209	0.053041	0.047713	0.037723		0	0.8	2.3											

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 29 – Perfis de tensões por Clauser, em três instantes de tempo do intervalo estipulado



(fonte: elaborado pelo autor)

Essa variação do perfil de tensões prossegue em todo o intervalo de tempo, sendo uma peculiaridade do método e melhor visualizada na figura 29, que representa três perfis de tensões em três instantes de tempo diferentes, um no início, outro no meio e o último no fim no intervalo de tempo. Nessa mesma figura pode ser observado também que as tensões de fundo aumentam e depois diminuem com o passar do tempo, entrando em conformidade com a distribuição de velocidades encontradas na seção anterior.

## 7.5 PERFIL DE TENSÕES POR MICHON ET AL (1955)

Como no método de cálculo anterior, o programa retorna uma planilha com as tensões calculadas pelo método de Michon et al. (1955) no intuito de apresentar os resultados ao usuário. Porém, nessa planilha, a disposição das informações foi projetada um pouco diferente que no método anterior, sendo colocados somente cabeçalhos na parte superior, indicando as tensões e as alturas de cada instante de tempo do ensaio, respectivamente, em dois grandes grupos de colunas de células. Isso se deve ao fato do método propor calcular as tensões de cisalhamento em todo o perfil longitudinal da corrente do ensaio, não tendo por que variar a cota de cada perfil de tensões calculado, como acontece no método anterior. A figura 30 apresenta o início dessa planilha.

O autor estipulou, dentro das rotinas de programação, que a última cota de tensão sempre terá valor igual zero, porque os valores dessas tensões davam, na maioria das vezes, senão iguais, muito próximas a zero. O outro ponto onde as tensões, pelo método, sempre serão nulas será na cota onde a velocidade é máxima,

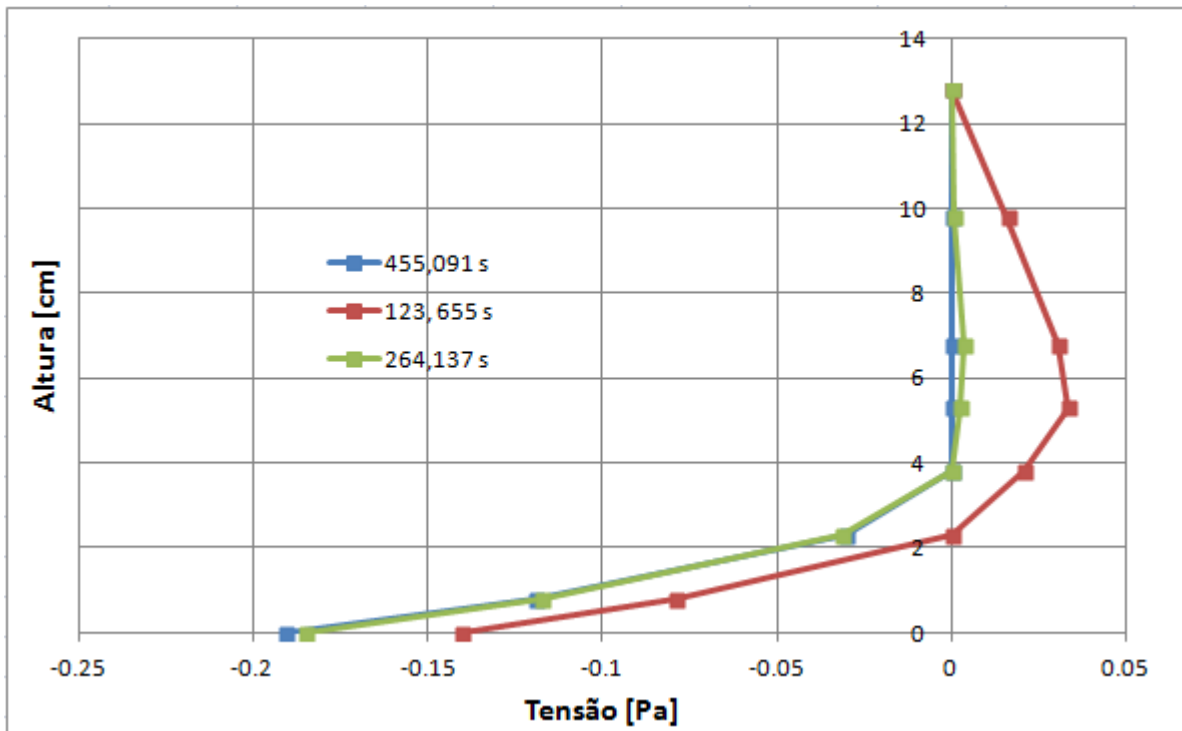
Na figura 31 são apresentados os três perfis de tensões pelo método de Michon et al. (1955) nos mesmos instantes de tempo que foram apresentadas as tensões no método de Clauser (1954). Nessa figura pode ser notado o mesmo comportamento das tensões que ocorre na figura 29, onde as tensões de fundo sofrem um aumento e logo após um decaimento no tempo, além de serem sempre as maiores tensões no perfil em questão, justamente porque a velocidade sempre será nula nesse ponto.

Figura 30 – Resultados das tensões de cisalhamento pelo método de Michon et al

Narvaez 7.0 - IPH-NECOD																			
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	Tens_0	Tens_1	Tens_2	Tens_3	Tens_4	Tens_5	Tens_6	Tens_7		Dist_0	Dist_1	Dist_2	Dist_3	Dist_4	Dist_5	Dist_6	Dist_7		
2	118.607	-0.12971	-0.07272	0	0.022583	0.012573	0.009005	0.030718	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
3	119.449	-0.13228	-0.07416	0	0.022266	0.029977	0.007	0.010786	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
4	120.29	-0.13793	-0.07762	0	0.026873	0.055401	0.047554	0.016212	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
5	121.131	-0.13884	-0.07788	0	0.025518	0.036322	0.022263	0.026482	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
6	121.972	-0.13937	-0.0782	0	0.021696	0.041919	0.051351	0.072183	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
7	122.813	-0.13774	-0.07701	0	0.017466	0.017842	0.008403	0.012372	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
8	123.655	-0.14076	-0.07893	0	0.020727	0.033525	0.030381	0.01581	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
9	124.496	-0.14082	-0.07895	0	0.017442	0.0342	0.024382	0.014537	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
10	125.337	-0.14573	-0.08152	0	0.01858	0.022947	0.046557	0.018333	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
11	126.178	-0.14601	-0.08187	0	0.019022	0.02682	0.034088	0.006957	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
12	127.02	-0.14529	-0.08139	0	0.019013	0.028188	0.02515	0.011512	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
13	127.861	-0.14756	-0.08246	0	0.02374	0.017627	0.015263	0.014157	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
14	128.702	-0.14741	-0.08262	0	0.019124	0.025995	0.046039	0.013435	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
15	129.543	-0.14725	-0.08247	0	0.018638	0.03727	0.027496	0.043921	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
16	130.384	-0.14858	-0.08321	0	0.016951	0.023674	0.017339	0.012665	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
17	131.226	-0.14936	-0.08366	0	0.020836	0.022108	0.020379	0.010789	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
18	132.067	-0.14985	-0.08374	0	0.01727	0.016081	0.018028	0.011553	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
19	132.908	-0.14761	-0.08238	0	0.019744	0.030374	0.022749	0.007558	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
20	133.749	-0.14783	-0.08246	0	0.020855	0.022732	0.041873	0.006192	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
21	134.59	-0.14978	-0.08365	0	0.022018	0.033263	0.036513	0.003525	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
22	135.432	-0.14832	-0.08304	0	0.020954	0.030897	0.026551	0.032933	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
23	136.273	-0.14918	-0.08337	0	0.025263	0.03552	0.033928	0.003559	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
24	137.114	-0.14584	-0.08141	0	0.025398	0.025971	0.015616	0.005691	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
25	137.955	-0.14879	-0.08324	0	0.01847	0.03481	0.023556	0.004083	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
26	138.796	-0.14753	-0.08252	0	0.027833	0.033381	0.012215	0.002279	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
27	139.638	-0.14839	-0.08294	0	0.025389	0.041606	0.013334	0.00468	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
28	140.479	-0.14691	-0.08207	0	0.024893	0.032116	0.025057	0.016446	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
29	141.32	-0.15016	-0.08395	0	0.021767	0.025717	0.028605	0.002091	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
30	142.161	-0.1496	-0.0837	0	0.023174	0.036342	0.01897	0.008532	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
31	143.003	-0.1506	-0.08388	0	0.021052	0.018147	0.011444	0.007909	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
32	143.844	-0.57168	-0.4264	-0.19336	-0.01168	-0.00824	-0.00539	-0.0015	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
33	144.685	-0.45079	-0.3288	-0.14088	-0.00622	-0.00386	-0.00204	0	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
34	145.526	-0.14681	-0.08179	0	0.020087	0.027917	0.031152	0.009776	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		
35	146.367	-0.14884	-0.08304	0	0.021758	0.021683	0.015798	0.011787	0	0	0.008	0.023	0.038	0.053	0.068	0.098	0.128		

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 31 – Perfis de tensões por Michon et al, em três instantes de tempo



(fonte: elaborado pelo autor)

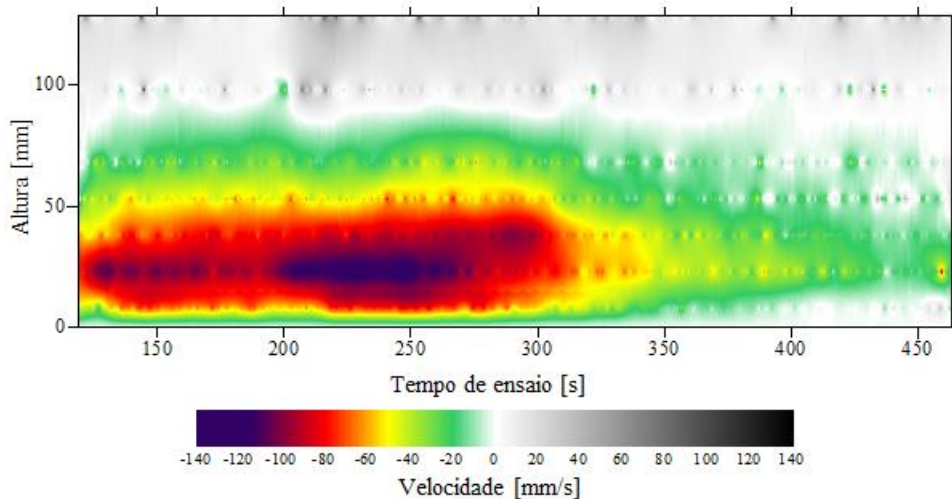
## 8 CAMPO DE TENSÕES E VELOCIDADES

Todos os campos de tensões e velocidades foram criados com base nos dados resultantes das saídas geradas pelo programa desenvolvido neste trabalho. Para tanto foram simulados três ensaios: E1 (ensaio base utilizado nas demonstrações do programa na seção anterior), E7 e o E8. O critério de escolha dos ensaios adotado foi com relação às concentrações iniciais de cada um, sendo as maiores concentrações descartadas, de acordo com o problema relatado na seção 7, página 75. Todos os gráficos foram gerados com o auxílio de um *software* específico para criação de curvas de contorno e regiões em cores, Surfer.

### 8.1 CAMPOS DE VELOCIDADES

As figuras 32, 33 e 34 apresentam respectivamente os campos de velocidades dos ensaios E1, E7 e E8.

Figura 32 – Campo de velocidades obtido do ensaio E1

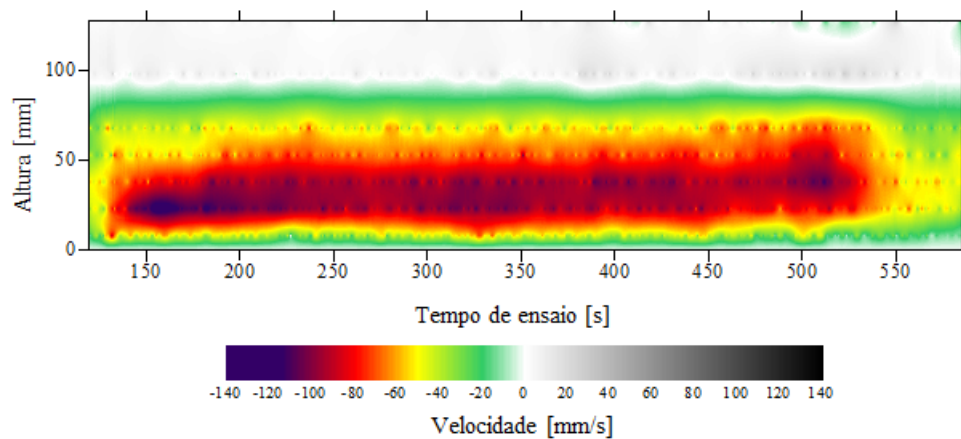


(fonte: elaborado pelo autor)

Para os ensaios E7 e E8 foi utilizado o mesmo intervalo de canais do UVP do ensaio E1 (11 ao 21), simplesmente para manter um padrão na apresentação dos resultados nesse texto, não impedindo a possibilidade do cálculo a partir de medições em outros intervalos de canais. Os intervalos de tempo, porém, foram alterados. Para o ensaio E7 se escolheu como tempo inicial

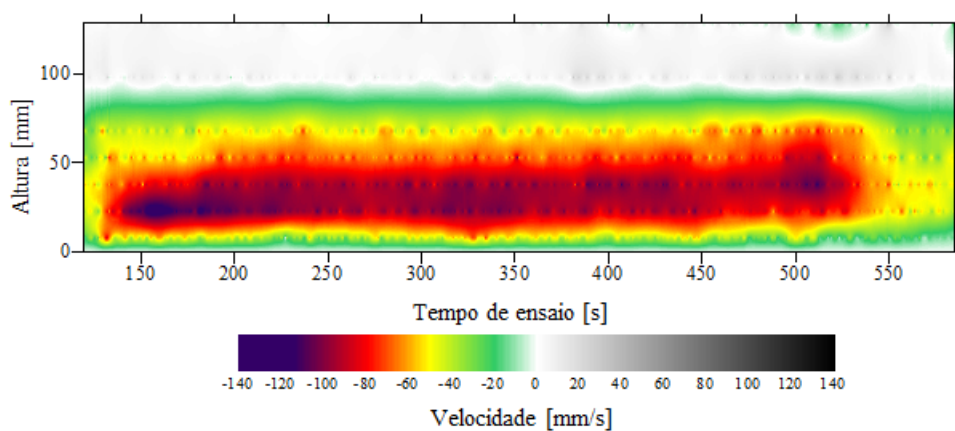
119,05 s e final 585,261 s. No ensaio E8 foi tomado como tempo de início do intervalo 99,683 s e tempo final igual a 583,078 s.

Figura 33 – Campo de velocidades obtido do ensaio E7



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 34 – Campo de velocidades obtido do ensaio E8



(fonte: elaborado pelo autor)

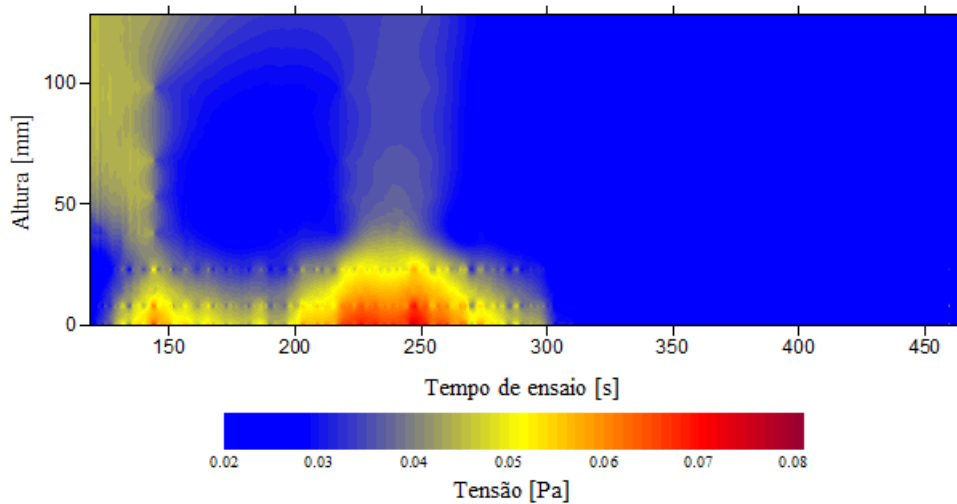
Pela análise das figuras acima, pode-se constatar a diferença de valores na corrente ao longo do tempo, e os diferentes comportamentos apresentados por correntes de densidade distintas. Com o campo gerado, espera-se avançar no entendimento desse parâmetro em correntes de turbidez.



## 8.2 CAMPOS DE TENSÕES PELO MÉTODO DE CLAUSER (1954)

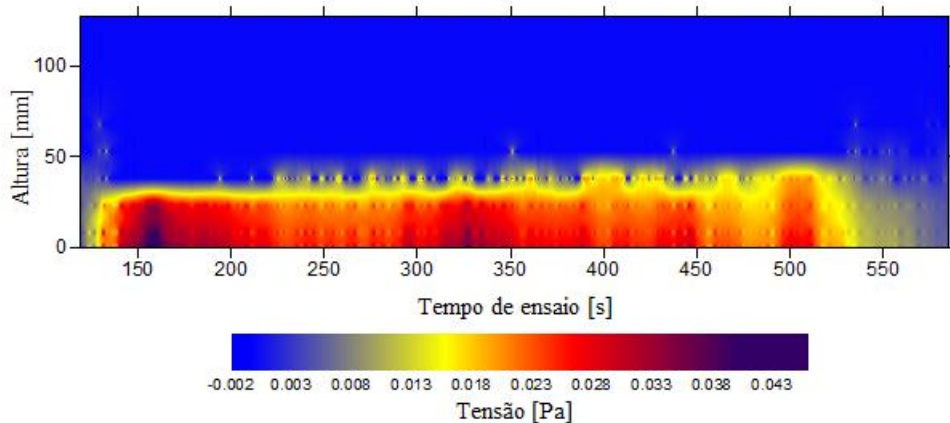
A seguir, nas figuras 35 a 37, serão apresentados os campos de tensões obtidos dos ensaios considerados a partir dos dados calculados pelo método de Clauser (1954) no tempo e no espaço.

Figura 35 – Campo de tensões obtido do ensaio E1 pelo método de Clauser (1954)



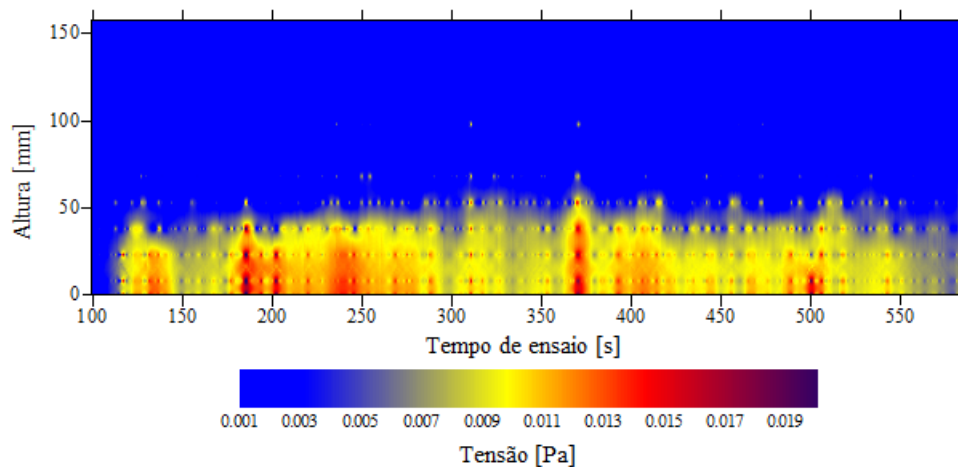
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 36 – Campo de tensões obtido do ensaio E7 pelo método de Clauser (1954)



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 37 – Campo de tensões obtido do ensaio E8 pelo método de Clauser (1954)

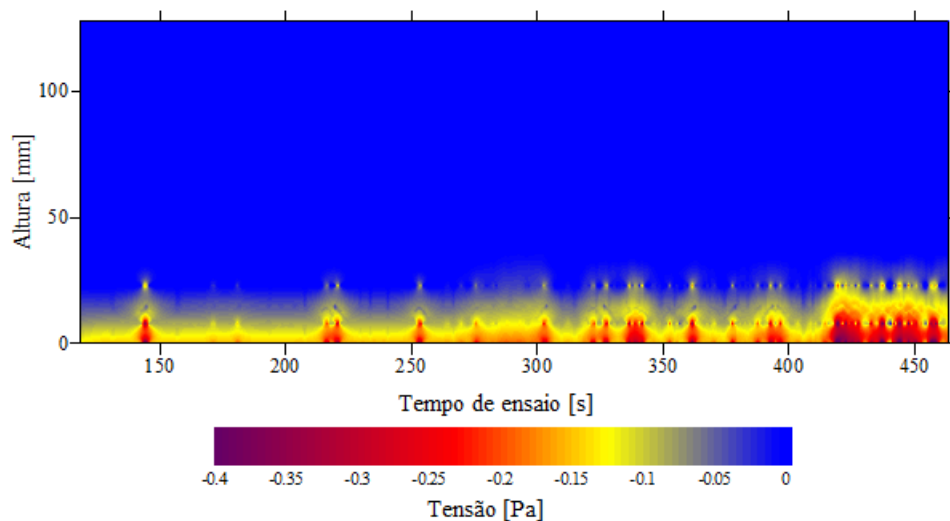


(fonte: elaborado pelo autor)

### 8.3 CAMPOS DE TENSÕES PELO MÉTODO DE MICHON ET AL. (1955)

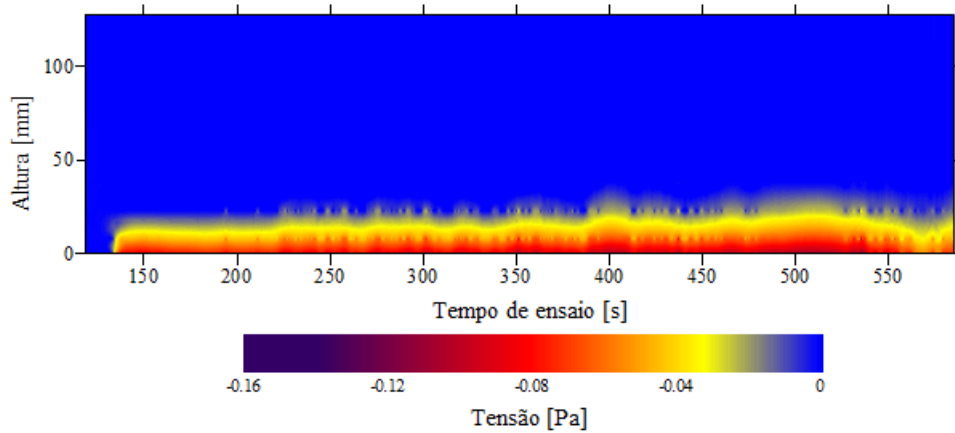
A seguir, nas figuras 38 a 40, serão apresentados os campos de tensões obtidos dos ensaios considerados a partir dos dados calculados pelo método de Michon et al. (1955).

Figura 38 – Campo de tensões obtido do ensaio E1 pelo método de Michon et al. (1955)



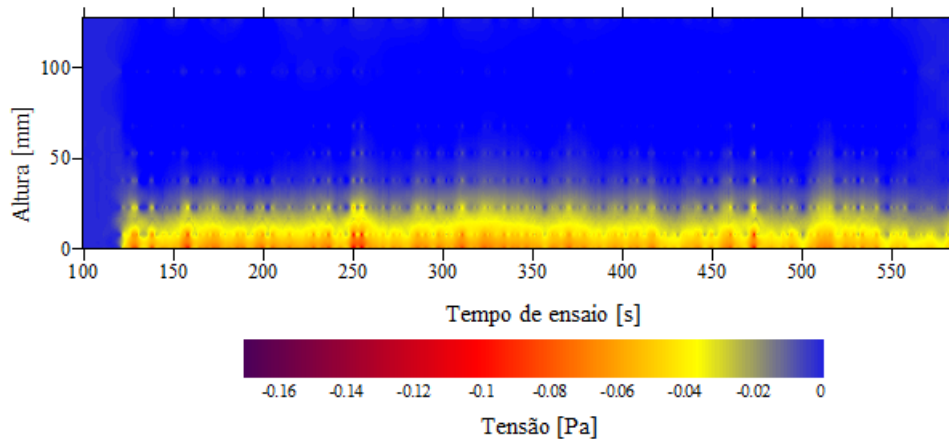
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 39 – Campo de tensões obtido do ensaio E7 pelo método de Michon et al. (1955)



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 40 – Campo de tensões obtido do ensaio E8 pelo método de Michon et al. (1955)



(fonte: elaborado pelo autor)

Pela análise das figuras 35 a 40 apresentadas anteriormente, pode-se constatar a diferença de valores das tensões na corrente ao longo do tempo para os diferentes métodos e para os diferentes comportamentos apresentados pelas correntes de densidade distintas. Com o campo de tensões gerado, espera-se avançar no entendimento desse parâmetro em correntes de turbidez, explorando suas características junto ao fundo (método adaptado de Clauser), bem como ao longo da corrente (p. ex. Michon). Dessa forma o aplicativo permite, de maneira mais sistemática, apresentar ao usuário os dados calculados para posterior avaliação.

## 9 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo prático de correntes de densidade simuladas em laboratório, cujo objetivo principal era gerar os campos de tensões, a partir de dados experimentais, com a utilização de ferramenta computacional.

A partir do desenvolvimento de um programa computacional nesse trabalho, foi possível encontrar os perfis de velocidades, os perfis de concentração, os perfis de tensões e os campos de tensões de uma série de seis experimentos (de um total de 10) realizados no NECOD, criando a possibilidade de analisar os dados de tensões calculados por dois métodos de cálculo desse parâmetro hidráulico, apresentados de maneira mais simplificada e sistemática.

Os equipamentos utilizados se mostraram adequados para a obtenção dos campos de tensões. Entretanto, a análise mais criteriosa dos dados brutos resulta em uma melhora dos resultados já apresentados. Também, as configurações do programa desenvolvido para inserir os dados do intervalo de tempo desejado para análise do ensaio e para escolher o intervalo de canais do aparelho UVP permitem a extrapolação e complementação dos resultados obtidos neste trabalho. Ou seja, basta alterar os dados nesses campos para que sejam obtidos novos resultados para o mesmo ensaio.

A ferramenta construída englobou diversas funcionalidades para simplificar a operação da mesma, diante dos diversos resultados possíveis de serem obtidos através dela. Todavia, a mesma fica limitada a calcular as tensões de cisalhamento para as correntes de densidade de correntes não coesivas, salvo se outros ensaios tiverem as mesmas características de configuração dos aparelhos de captura dos dados e de misturas.

Em suma, espera-se também que, o programa criado sirva de incentivo para novos alunos que se interessam por essa área ou de outras áreas acadêmicas, a desenvolverem as suas próprias ferramentas, visto que na formação de um engenheiro, às vezes, é necessário trabalhar com fontes inovadoras para solucionar problemas que surgem.

## REFERÊNCIAS

- ALTINAKAR, M.S. **Weakly depositing turbidity currents on small slopes**. 1988. These (Doutorado em Ciências Técnicas) – Département de génie civil, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, Suíça, 1993.
- BOFFO, C. **Caracterização física de correntes de densidade em ambientes salinos sob diferentes contrastes de densidade**. 2010. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- BOFFO, C. Projeto PROCESSOS - **Characterization of turbidity currents formed by different sedimentary materials: correlation between the concentration and clay content of the mixtures and hydrodynamic and depositional processes**. Reunião da Rede de Modelagem de Bacias, CENPES/UFRJ - RJ, 2015.
- CLAUSER, H. F. Turbulent boundary layers in adverse pressure gradients. **Journal of the Aeronautical Sciences**. v. 21, n. 2, p. 91-108, 1954.
- DÜCKER, R. **Avaliação da capacidade portante de frações finas nas correntes de turbidez**. 2007. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- FERREIRA, P. L. C. **Análise comparativa entre correntes de densidade e jatos**. 2013. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- FICK, C. **Modelagem física tridimensional de correntes de turbidez: comportamento espacial e granulométrico de depósitos turbidíticos**. 2012. 81 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- HISCOTT, N. R. Loss of capacity, not competence, as the fundamental process governing deposition from turbidity currents. **Journal of Sedimentary Research**. v. 64, n. 2, p. 209-214, 1994.
- KNELLER, B.; BUCKEE, C. The structure and fluid mechanics of turbidity currents: a review of some recent studies and their geological implications. **Sedimentology**, Oxford, v. 47, Suppl. 1, p. 62-94, Jan. 2000. Disponível em: <[http://www.researchgate.net/publication/227529355\\_The\\_structure\\_and\\_fluid\\_mechanics\\_of\\_gravity\\_currents\\_A\\_review\\_of\\_some\\_recent\\_studies\\_and\\_their\\_geological\\_implications](http://www.researchgate.net/publication/227529355_The_structure_and_fluid_mechanics_of_gravity_currents_A_review_of_some_recent_studies_and_their_geological_implications)>. Acesso em: 16 nov. 2015.
- MANICA, R. **Geração de correntes de turbidez de alta densidade: condicionantes hidráulicos e deposicionais**. 2009. 382 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de pós graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- MANICA, R. Sediment Gravity Flows: Study Based on Experimental Simulations, Hydrodynamics - Natural Water Bodies. **Intech**. p. 265-286, Jan. 2012. Disponível em:

<<http://www.intechopen.com/books/hydrodynamics-natural-water-bodies/sediment-gravity-flows-study-based-on-experimental-simulations>>. Acesso em: 10 jun. 2016.

MANICA, R. **Modelagem física de correntes de densidade não conservativas em canal tridimensional de geometria simplificada**. 2002. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

McCAFFREY, W.D; CHOUX, C.M; BASS, J.H. HAUGHTON, P.D.W. Spatio-temporal evolution of velocity structure, concentration and grain-size stratification within experimental particulate gravity currents. **Marine and Petroleum Geology**. v. 20, p. 851-860, Feb. 2003. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026481720300117X>>. Acesso em: 16 nov. 2015.

MICHON, X.; GODDET, J.; BONNEFILLE, R. **Etude thorique et experimentale des courants de densite**. França: *Laboratoire national d'hydraulique Chatou*, 1955.

MIDDLETON, G.V.; SOUTHARD, J. B. **Mechanics of Sediment Movement**. 2. ed. Tulsa, Okla: *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists*, 1984.

MUTTI, E.; TINTERRI, R.; REMANCHA, E.; MAVILLA, N.; ANGELLA, S.; FAVAL, L. 1999. Na introduction to the analysys of ancient turbidity current (dinamics, processes, sediment budget and seafloor impact). *Sedimentology*, Oxford, v.44, p. 305-326.

NITTROUER, A. C.; AUSTIN, A. J.; FIELD, E. M.; KRAVITZ, H. J.; SYVITSKI, M. P. J.; WIBERG, L. P. Continental margin sedimentation: from sediment transport to sequence stratigraphy. In: PARSONS, D. J.; FRIEDRICHS, T. C.; TRAYKOVSKI, A. P.; MOHRIG, D.; IMRAN, J.; SYVITSKI, M. P. J.; PARKER, G.; PUIG P.; BUTTLES, L. J.; GARCÍA, H. M. **The mechanics of marine sediment gravity flows**. Malden: Blackwell Publishing, 2007. p. 275-328. Disponível em: < [http://www.researchgate.net/publication/227622583\\_The\\_Mechanics\\_of\\_Marine\\_Sediment\\_Gravity\\_Flows](http://www.researchgate.net/publication/227622583_The_Mechanics_of_Marine_Sediment_Gravity_Flows) >. Acesso em: 16 nov. 2015.

SIMPSON, J. E. **Gravity currents in the enviroment and the laboratory**. 2. ed. Cambridge, Uk: Cambridge University Press, 1997.