

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E
NUCLEARES – PROTEN – CRCN-NE/CNEN

JAIR DE LIMA BEZERRA

ESTUDO DO PROCESSO DE HOMOGENEIZAÇÃO DO BORO
EM UMA BANCADA EXPERIMENTAL DE BAIXA PRESSÃO
SIMULANDO O PRESSURIZADOR DO REATOR IRIS

RECIFE
2012

JAIR DE LIMA BEZERRA

**ESTUDO DO PROCESSO DE HOMOGENEIZAÇÃO DO BORO
EM UMA BANCADA EXPERIMENTAL DE BAIXA PRESSÃO
SIMULANDO O PRESSURIZADOR DO REATOR IRIS**

Tese submetida ao Programa de Pós-graduação
em Tecnologias Energéticas e Nucleares da
Universidade Federal de Pernambuco, como
um dos requisitos necessários à obtenção do
título de Doutor em Tecnologias Energéticas e
Nucleares, Área de Concentração: Engenharia
Nuclear

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira

Co-Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos de Oliveira Barroso

RECIFE
2012

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

B574e Bezerra, Jair de Lima.

Estudo do processo de homogeneização do boro em uma bancada experimental de baixa pressão simulando o pressurizador do reator IRIS / Jair de Lima Bezerra – Recife: O Autor, 2012.

117f., il., figs., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira.

Co-Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos de Oliveira Barroso

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco.

CTG. Departamento de Energia Nuclear. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares – PROTEN – CRCN-NE/CNEN, 2012.

Inclui Referências e Apêndice.

1. Energia Nuclear. 2. Concentração de Boro. 3. Controle de Reatividade. 4. Processamento Digital de Imagens (PDI). I. Lira, Carlos Alberto Brayner de Oliveira (Orientador). II. Barroso, Antônio Carlos de Oliveira (Co-Orientador). III. Título.

621.48 CDD (22.ed.)

UFPE/BIBCTG 2012/144

**ESTUDO DO PROCESSO DE HOMOGENEIZAÇÃO DO BORO EM
UMA BANCADA EXPERIMENTAL DE BAIXA PRESSÃO
SIMULANDO O PRESSURIZADOR DO REATOR IRIS**

Jair de Lima Bezerra

APROVADO EM: 05.03.2012

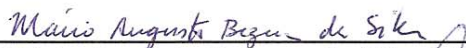
ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira

CO-ORIENTADOR: Dr. Prof. Antônio Carlos de Oliveira Barroso

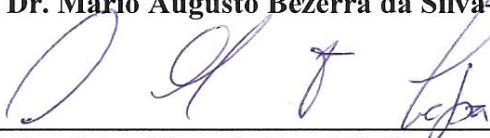
COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Fernando Roberto de Andrade Lima – CRCN-NE/CNEN



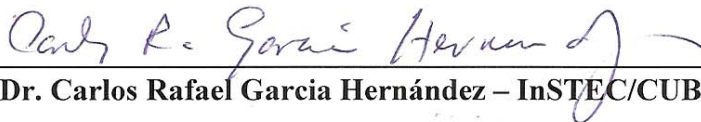
Prof. Dr. Mário Augusto Bezerra da Silva – DEN/UFPE



Prof. Dr. Celso Marcelo Franklin Lapa – IEN-RJ/CNEN

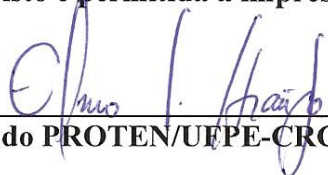


Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira – DEN/UFPE



Prof. Dr. Carlos Rafael Garcia Hernández – InSTEC/CUBA

Visto e permitida a impressão



Coordenador do PROTEN/UFPE-CRCN-NE/CNEN

Dedico este trabalho

Aos meus pais:

João e Celestina (In memorium)

Ao meu grande amor:

Maria Amélia

Aos meus irmãos:

Jadson, João, Jairo, Cildo, Jaci, Giva, Gabriela

Jaime e Tuta (In memorium)

Aos meus filhos:

André Luiz, Lorena e Renata

AGRADECIMENTOS

Aos professores Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira e Antônio Carlos de Oliveira Barroso, pela amizade e orientação.

Aos professores Fernando Roberto de Andrade Lima (CRCN-NE/CNEN), Carlos Rafael Garcia Hernández Garcia (InSTEC/CUBA), Celso Marcelo Franklin Lapa (IEN-RJ/CNEN) e Mário Augusto Bezerra da Silva (DEN/UFPE), pela participação da comissão examinadora, e aos professores Gustavo Koury (IFPE) e Lázara Silveira Castrillo (UPE) que, juntamente com o primeiro mencionado, compuseram o comitê de acompanhamento.

Aos professores Rajendra Narain (DEN/UFPE) e José Wilson Vieira (IF/PE-UPE pelas sugestões e colaborações.

Aos amigos: do *Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN/CNEN)* e do *Departamento de Energia Nuclear (DEN/UFPE)*: Joelan Ângelo, Marcus Aurélio, Hugo Roberto, Ricardo de Andrade Lima, Wellington Andrade, Tennyson Acetti, Mardson Alencar, Hilário Jorge, Wagner Eustáquio, Gilvan Farias, Gilvan Lindolfo, Viriato Leal, Vanildo Melo, Samira Ruana, Fernanda Lúcia, Éudice Vilela, André Maciel, Elmo Silvano, Magali, Nilvânia, Carla, Margarete, Renata, Elijane, Ângela, Rosângela, Vicente, Jô, Elias Silva Filho, João Filho, Chigueru Tiba, Carlos Costa Dantas. Da *Eletronuclear*: Pedro Ponzoni, Enio Vanni, Vanderlei Borba, Sadakatu Sato, Laércio Lucena, Gastão Lommez, Jorge Chapot, Astor Muniz, Sidnei, Cláudio Freire e Terezinha Ipojuca. Da *Família Bezerra Leite*: Sr. José Anchieta, Alfredo, Fred, Lisa, Fátima e Paul. Da *Família Lima*: Carlinhos, Fátima Walter, Inaldo, Neuma, Romero, Olívia, Zetinha, Kilza, Ana Olívia e Laura. Da *turma Máster Life*: Professora Rosane, Lula, Thelma, Helena, Gisele, Rose e Paulo. *Agradecimento especial*: José Edson, Murilo, Edelson e Lucas Alecrim.

A todos a minha gratidão, pela amizade e incentivo.

Ao CRCN/CNEN, a CAPES e a Itamaracá Transportes.

ESTUDO DO PROCESSO DE HOMOGENEIZAÇÃO DO BORO EM UMA BANCADA EXPERIMENTAL DE BAIXA PRESSÃO SIMULANDO O PRESSURIZADOR DO REATOR IRIS

Autor: Jair de Lima Bezerra

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira

Co-orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos de Oliveira Barroso

Resumo

O controle da reatividade de um reator nuclear à água pressurizada é realizado pelo uso de barras de controle ou por diluição de boro na água do refrigerante do circuito primário. O controle com diluição de boro apesar de inserir pequenas variações de reatividade no reator, tem grande importância, uma vez que não afeta significativamente a distribuição do fluxo de nêutrons.

Uma bancada experimental de baixa pressão, com seção de testes fabricada em acrílico, foi montada em escala reduzida para simulação do pressurizador do reator nuclear à água pressurizada IRIS (International Reactor Innovative and Secure). A bancada foi montada no Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE), Recife – PE, órgão vinculado à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Para se estudar os processos de diluição e homogeneização do boro, utilizou-se um corante com propriedades semelhantes ao do ácido bórico, e assim foi possível realizar várias tarefas durante a execução dos experimentos.

O presente trabalho tem como objetivos:

- Elaborar procedimentos para estudo e análise da homogeneização do boro no interior da seção de testes da bancada experimental;
- Registrar a dispersão do boro (corante) através de fotografias digitais e

vídeos;

- Quantificar o valor da concentração de corante através de processamento digital das imagens obtidas;

Os resultados obtidos experimentalmente estão de acordo com os das simulações do modelo teórico.

Palavras-chave – Concentração de boro, Controle de reatividade, Processamento Digital de Imagens (PDI).

STUDY OF THE PROCESS OF HOMOGENIZATION OF BORON IN A LOW PRESSURE EXPERIMENTAL BENCH SIMULATING IRIS REACTOR PRESSURIZER

Author: Jair de Lima Bezerra

Advisor: Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira

Co-advisor: Prof. Dr. Antônio Carlos de Oliveira Barroso

Abstract

Control of the reactivity of a pressurized water reactor is accomplished by the use of control bars or boron in water by dilution of the coolant of the primary circuit. The boron dilution control, despite entering minor variations in reactivity, is of great significance, since it does not significantly affect the distribution of neutron flux.

A experimental bench with low pressure tests section manufactured acrylic, was mounted on a small scale for simulation of pressurizer in pressurized water nuclear reactor IRIS (International Reactor Innovative and Secure). The bench was mounted at the Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE), Recife – PE, institution linked to Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). To study the processes of dilution and homogenization of boron, used a dye with properties similar to that of boric acid, and thus unable to perform several tasks in the implementation of experiments.

The present work aims to:

- Develop procedures for study and analysis of homogenization of boron within the pressurizer;
- register the dispersion of boron (dye) through digital photos and videos;

- quantify the value of dye concentration through processing digital images obtained;

The results obtained experimentally are in agreement with the theoretical model simulations.

Keywords

Boron concentration, Control of the reactivity, Digital image processing.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 01	Esquema simplificado de um pressurizador.....	18
Figura 02	Reator PWR com quatro circuitos primários.....	23
Figura 03	Corte transversal do núcleo de um reator PWR.....	24
Figura 04	Pressurizador de um reator PWR.....	27
Figura 05	Corte transversal do reator IRIS.....	30
Figura 06	Corte transversal do pressurizador do reator IRIS.....	33
Figura 07	(a) Transporte da massa de água sem boro durante circulação natural e partida de uma bomba do RCP. (b) Excesso de reatividade e valor de barra de controle durante o ciclo.....	35
Figura 08	Mecanismos de diluição de boro em um SBLOCA.....	37
Figura 09	Fluxograma da bancada experimental.....	42
Figura 10	Projeto da seção de testes (a) vista lateral e (b) vista superior.....	43
Figura 11	Seção de testes em três dimensões.....	43
Figura 12	Bancada experimental.....	44
Figura 13	Sistema de aquisição dos resultados experimentais.....	44
Figura 14	Detalhe de localização da peça.....	45
Figura 15	Diâmetro do furo de 1,0 cm – posição central.....	46
Figura 16	Diâmetro do furo de 1,5 cm – posição central.....	46
Figura 17	Diâmetro do furo de 2,5 cm – posição central.....	47
Figura 18	Diâmetro do furo de 1,0 cm – posição próxima à parede curva.....	47
Figura 19	Diâmetro do furo de 1,5 cm – posição próxima à parede curva.....	48

Figura 20	Diâmetro do furo de 2,5 cm – posição próxima à parede curva.....	48
Figura 21	Balança de precisão – Celtac Mod. FA2104N.....	50
Figura 22	Posição da máquina fotográfica durante um experimento.....	51
Figura 23	Evolução da pluma ao longo do tempo (início) – Exp. A.....	56
Figura 24	Evolução da pluma ao longo do tempo (0,5 h) – Exp. A.....	57
Figura 25	Evolução da pluma ao longo do tempo (1,0 h) – Exp. A.....	57
Figura 26	Evolução da pluma ao longo do tempo (1,5 h) – Exp.A.....	58
Figura 27	Evolução da pluma ao longo do tempo (2,0 h) – Exp.A.....	58
Figura 28	Evolução da pluma ao longo do tempo (2,5 h) – Exp.A.....	59
Figura 29	Evolução da pluma ao longo do tempo (3,0 h) – Exp.A.....	59
Figura 30	Evolução da pluma ao longo do tempo (3,5 h) – Exp.A.....	60
Figura 31	Evolução da pluma ao longo do tempo (4,0 h) – Exp.A.....	60
Figura 32	Evolução da pluma ao longo do tempo (4,5 h) – Exp.A.....	61
Figura 33	Amostra da ST (4,5 h) – Exp.A.....	62
Figura 34	Amostra do TB (4,5 h) – Exp.A.....	62
Figura 35	Imagem 1ª medida região superior - Exp. A (início).....	64
Figura 36	Imagem 1ª medida região inferior - Exp. A (início).....	64
Figura 37	Imagem 2ª medida região superior - Exp. A (0,5h).....	65
Figura 38	Imagem 2ª medida região inferior - Exp. A (0,5 h).....	65
Figura 39	Imagem 3ª medida região superior - Exp. A (1,0 h).....	66
Figura 40	Imagem 3ª medida região inferior - Exp. A (1,0 h).....	66
Figura 41	Imagem 4ª medida região superior - Exp. A (1,5 h).....	67
Figura 42	Imagem 4ª medida região inferior - Exp. A (1,5 h).....	67

Figura 43	Imagem 5ª medida região superior - Exp. A (2,0 h).....	68
Figura 44	Imagem 5ª medida região inferior - Exp. A (2,0 h).....	68
Figura 45	Imagem 6ª medida região superior - Exp. A (2,5 h),,,.....	69
Figura 46	Imagem 6ª medida região inferior - Exp. A (2,5 h).....	69
Figura 47	Imagem 7ª medida região superior - Exp. A (3,0 h).....	70
Figura 48	Imagem 7ª medida região inferior - Exp. A (3,0 h).....	70
Figura 49	Imagem 8ª medida região superior - Exp. A (3,5 h).....	71
Figura 50	Imagem 8ª medida região inferior - Exp. A (3,5 h).....	71
Figura 51	Imagem 9ª medida região superior - Exp. A (4,0 h).....	72
Figura 52	Imagem 9ª medida região inferior - Exp. A (4,0 h).....	72
Figura 53	Imagem 10ª medida região superior - Exp. A (4,5 h).....	73
Figura 54	Imagem 10ª medida região inferior - Exp. A (4,5 h).....	73
Figura 55	Amostra seção de testes – Exp. A (4,5 h).....	74
Figura 56	Amostra tanque de boração – Exp. A (4,5 h).....	74
Figura 57	Gráfico concentração normalizada x tempo – Experimento A.....	76
Figura 58	Gráfico concentração normalizada x tempo – Experimento B.....	78
Figura 59	Gráfico concentração normalizada x tempo - Experimento C.....	79
Figura 60	Concentração normalizada na ST em função do tempo – Exp. A.....	80
Figura 61	Concentração no TB em função do tempo – Exp. A.....	81
Figura 62	Concentração normalizada na ST em função do tempo – Exp. B.....	81
Figura 63	Concentração no TB em função do tempo – Exp. B.....	82
Figura 64	Concentração normalizada na ST em função do tempo – Exp. C.....	82
Figura 65	Concentração no TB em função do tempo – Exp. C.....	83

Figura 66	Concentração normalizada x tempo - Experimento A.....	84
Figura 67	Concentração normalizada x tempo - Experimento B.....	84
Figura 68	Concentração normalizada x tempo - Experimento C.....	85
Figura 69	Fluxograma da bancada experimental.....	97
Figura 70	Maquete da bancada experimental.....	97
Figura 71	Tanque de diluição.....	99
Figura 72	Tanque de boração.....	101
Figura 73	Tanque de armazenamento.....	103
Figura 74	Vaso de homogeneização.....	105
Figura 75	Plataforma.....	106
Figura 76	Seção de testes.....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 01	Tabela 1 – Organizações-membro do consórcio IRIS.....	29
Tabela 02	Tabela 2 – Variáveis do projeto IRIS.....	41
Tabela 03	Roteiro de aquisição das medidas dos experimentos.....	52
Tabela 04	Dados das condições iniciais do pressurizador do IRIS e ST.....	53
Tabela 05	Dados dos experimentos realizados.....	54
Tabela 06	Resultados do experimento A.....	75
Tabela 07	Resultados do experimento B.....	77
Tabela 08	Resultados do experimento C.....	78
Tabela 09	Parâmetros de projeto que balizam o dimensionamento da bancada.....	96
Tabela 10	Dimensões básicas da seção de testes.....	96

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Objetivos.....	20
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	22
2.1 Reatores a água pressurizada (PWR).....	22
2.2 Pressurizador do reator PWR.....	25
2.3 Reator IRIS.....	28
2.4 Pressurizador do reator IRIS.....	31
2.5 Controle de reatividade.....	33
2.6 Análise de diluição de boro em reatores PWR.....	34
2.7 Classificação das sequências de diluição de boro.....	35
2.8 SBLOCA – Pequeno acidente de perda de refrigerante.....	36
2.9 Problemas da diluição de boro - Experimentos e Simulações.....	37
3 METODOLOGIA.....	41
3.1 Descrição da bancada experimental.....	41
3.2 Procedimento experimental.....	49

3.2.1 Objetivos.....	49
3.2.2 Materiais e equipamentos.....	49
3.2.3 Preparação.....	49
3.3 Experimentos.....	54
3.4 Modelo teórico.....	54
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	56
4.1 Resultados experimentais.....	56
4.1.1 Experimento A – evolução da pluma de corante no tempo.....	56
4.2 Processamento digital das imagens.....	63
4.2.1 Experimento A.....	64
4.3 Resultados teóricos.....	80
4.3.1 Modelo teórico.....	80
4.4 Validação dos resultados.....	83
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88

APÊNDICES.....	94
 APÊNDICE 1.....	 95
APÊNDICE 2.....	109

1 INTRODUÇÃO

Para se operar um reator nuclear em um nível de potência constante, a taxa de produção de nêutrons através das reações de fissão e decaimentos radioativos deve ser equilibrada pela perda de nêutrons via absorção e fuga do sistema. Qualquer alteração dessa condição resultará em uma dependência temporal da população de nêutrons e, naturalmente, acarretará uma mudança no nível de potência do reator. O comportamento temporal de um reator nuclear depende essencialmente do balanço de nêutrons que são absorvidos, dos que escapam do sistema e os que induzem novas reações de fissão. O conhecimento do comportamento do fluxo de nêutrons e da reatividade do sistema nuclear é de fundamental importância para uma operação segura e controlada do reator. O controle da criticalidade de um reator à água pressurizada é realizado pelo uso de barras de controle e por diluição de boro na água do refrigerante do circuito primário.

A importância do controle com diluição de boro é que ele não afeta significativamente a distribuição do fluxo de nêutrons, porém, quando existe a necessidade de se desligar o reator, o sistema de barras de controle é o mais adequado devido à rapidez com que introduz reatividade negativa no núcleo.

Nos reatores à água pressurizada, os conhecidos PWRs, a função principal do Sistema de Refrigeração do Reator (SRR) é transportar a energia térmica gerada no reator até os geradores de vapor, de onde esta energia é transferida ao sistema secundário. O SRR ainda tem as funções de:

- remover a energia gerada no combustível devida ao decaimento dos produtos de fissão após o desligamento do reator;
- atuar como meio de transporte para o veneno solúvel (ácido bórico);
- funcionar como barreira de contenção dos produtos de fissão;
- melhorar a economia de nêutrons no reator atuando como refletor;
- atuar como moderador de nêutrons.

O pressurizador (PZR) é um componente importante no funcionamento de um reator PWR, uma vez que ele controla a pressão do SRR, mantendo-o sub-resfriado, fazendo esse controle através de aquecedores elétricos e válvulas de borrafo de água. O pressurizador é uma câmara bifásica, onde o vapor ocupa a parte superior e o líquido a parte inferior. A Figura 01 mostra um esquema simplificado de um pressurizador.

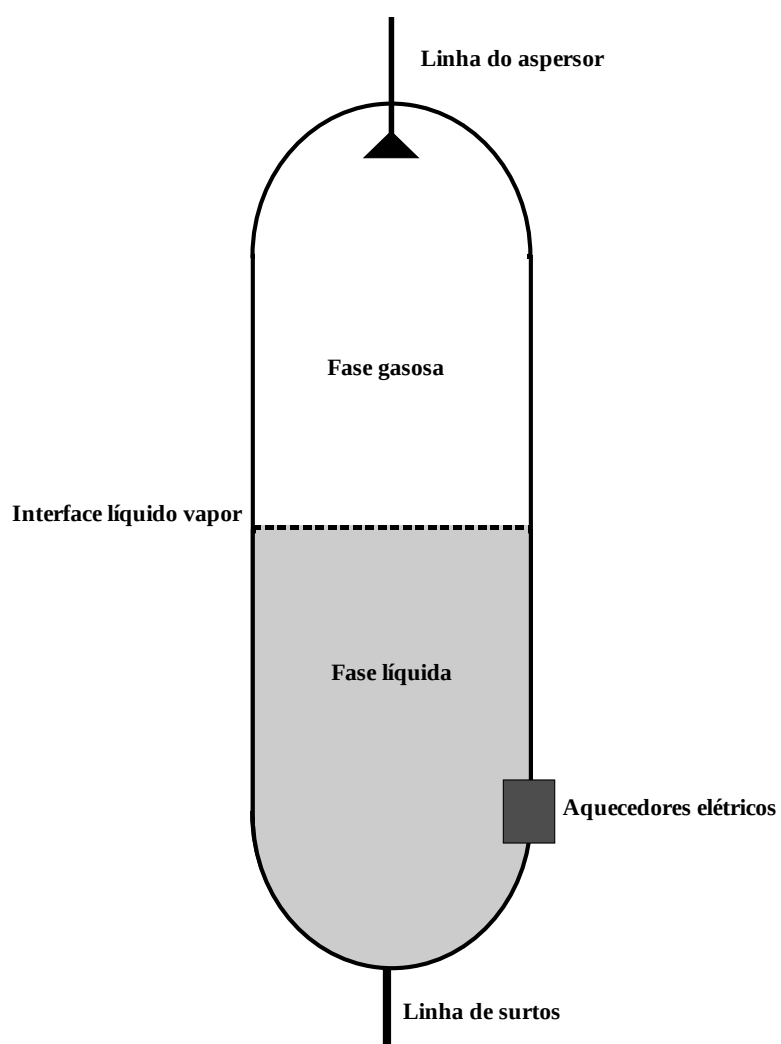


Figura 01 – Esquema simplificado de um pressurizador

Durante a operação normal do reator, a pressão do sistema é controlada pelo pressurizador através da atuação das válvulas de aspersão e dos aquecedores elétricos, que mantêm a temperatura do pressurizador em um valor de referência.

Quando a temperatura do SRR aumenta, ocorre uma expansão do volume e uma quantidade de refrigerante é deslocada do SRR para o pressurizador através da linha de surto (*insurges*) e, como consequência, um aumento na pressão do pressurizador e do SRR. Quando acontece uma diminuição na temperatura do SRR, há uma redução no volume, acarretando um deslocamento de refrigerante do pressurizador para o SRR via linha de surto (*outsurges*), causando também uma redução da pressão no pressurizador e no SRR. A variação da potência de um reator é, em geral, a principal causa das variações de pressão, uma vez que a cada valor de potência corresponde a um valor de temperatura média, ou seja, quando se aumenta a potência, a temperatura média aumenta; ocorrendo o contrário, a temperatura média diminui. O pressurizador atua de maneira a manter a pressão da usina dentro dos limites de projeto.

O IRIS (*International Reactor Innovative and Secure*) é um reator modular refrigerado a água leve pressurizada com uma configuração integral e visa a atender os quatro requisitos básicos dos reatores de Geração IV (CARELLI, 2003), que são:

- aumento da segurança;
- resistência à proliferação nuclear;
- diminuição de custos na geração de energia elétrica;
- redução do lixo nuclear.

O projeto de um reator integral contribui para a eliminação de acidentes, o que não ocorre em reatores tipo PWR, por exemplo. Uma das características mais importantes do reator IRIS é o seu conceito quanto a sua abordagem de segurança, que é o conceito (*Safety by Design*), que tira o máximo de proveito da configuração do sistema de refrigeração de um reator integral para, eliminar a possibilidade de alguns acidentes, e também, diminuir a consequência de outros cenários de acidentes, e ou, mesmo diminuir sua probabilidade de ocorrência (BARROSO et al., 2003). A ocorrência do Acidente de Perda de Refrigerante (*Loss of coolant accidents - LOCA*) é praticamente eliminada, uma vez que, nesses tipos de reatores, não há longos sistemas de tubulação (WESTINGHOUSE, 2003b).

O pressurizador do reator IRIS, está localizado na parte superior do vaso de pressão, acima dos mecanismos internos de barra de controle. O tamanho do pressurizador é projetado para não afetar as dimensões do vaso de pressão. É uma estrutura isolada e serve como divisor entre o fluxo de refrigeração circulante e a água saturada do pressurizador (BARROSO et al., 2003).

A razão água/vapor no interior do pressurizador, parâmetro importante no projeto de pressurizadores, deve ser concebida de modo a atender as respostas adequadas de pressão. O pressurizador do reator IRIS possui um grande volume de modo a acomodar muito bem as fases líquida e gasosa. A configuração integral desse reator possibilitará o desenvolvimento adequado de um sistema de pressurização. O pressurizador do IRIS, pelo fato de possuir uma razão elevada entre o volume de vapor e a potência, dispensa o uso de aspersores utilizados em reatores PWR.

1.1 Objetivos

O boro 10, como se sabe, é um excelente absorvedor de nêutrons térmicos e, na forma de ácido bórico diluído no refrigerante de reatores PWR, é utilizado no controle do excesso de reatividade no núcleo do reator. Do Início de Vida (IDV) ao Final de Vida (FDV) de um ciclo de combustível de um reator, a concentração de boro no SRR é reduzida para compensar a queima do combustível. A questão da homogeneização se torna um fator de grande importância para a segurança na operação de um reator em função de manobras inadequadas na homogeneização do boro. Se uma dada quantidade de água com baixa concentração de boro, abaixo da concentração do SRR, é bombeada para o núcleo, pode acarretar um aumento indesejável na potência do reator. O inverso acontece caso a água bombeada para o núcleo possua uma concentração superior ao do SRR. Manobras inadequadas na homogeneização do boro podem afetar a potência do reator, causando problemas para a operação.

A construção de uma bancada experimental simplificada com seção testes em acrílico permitirá a execução de experimentos para estudar como se processa a mistura e a homogeneização do volume de líquido no pressurizador em função dos mecanismos de circulação no sistema primário.

Os objetivos do presente trabalho são:

- estudar os processos de homogeneização do boro na seção de testes da bancada experimental de baixa pressão simulando o pressurizador do reator IRIS;
- elaborar procedimentos experimentais para estudo e análise da homogeneização do boro no interior do pressurizador;
- registrar a dispersão do boro (corante) através de fotografias digitais e vídeos;
- quantificar o valor da concentração de corante através de processamento digital das imagens obtidas;

Para o estudo do comportamento do boro no pressurizador, uma bancada experimental de baixa pressão, com seção de testes fabricada em acrílico, foi montada em escala reduzida simulando o pressurizador do reator nuclear à água pressurizada IRIS. A bancada foi montada no Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE), Recife-PE, órgão vinculado à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Reatores a água pressurizada (PWR)

O reator PWR, o mais utilizado reator de potência do mundo, utiliza a água leve como refrigerante, moderador e refletor. A característica principal de uma unidade do tipo PWR é a água de refrigeração pressurizada (circuito primário), mantendo sempre sua fase líquida, uma vez que a pressão é mantida a aproximadamente 15MPa ou 2250 psi (LAMARSH, BARATTA, 2001). O Sistema de Refrigeração do Reator PWR (SRR) é, praticamente, todo contido no interior do envoltório de contenção e é composto de dois circuitos, como no caso do reator de Angra-1 (ELETRONUCLEAR, 1999), que contém uma perna fria, uma perna quente, um gerador de vapor (GV) e uma bomba de refrigeração do reator (BRR). Um dos circuitos tem, ainda, o pressurizador ligado a ele através de uma linha de surto. O pressurizador, por sua vez, é ligado ao tanque de alívio através das linhas de descarga das suas válvulas de alívio e de segurança.

Durante operação normal, o refrigerante do reator é recirculado nos dois circuitos do SRR pelas BRRs, entrando no vaso do reator pelas pernas frias, descendo pelo espaço anelar entre o vaso do reator e o barril do núcleo, subindo através do núcleo e saindo pelas pernas quentes. O refrigerante do reator que remove o calor gerado pelo núcleo, funciona também como moderador, reduzindo a energia dos nêutrons que vão produzir as fissões nos elementos combustíveis e gerar energia. Além disso, ele também funciona como um refletor de nêutrons, reduzindo a fuga dos mesmos do interior do vaso do reator e, ainda, serve como meio solvente do ácido bórico que é usado para auxiliar no controle da geração de potência no núcleo, uma vez que ele absorve nêutrons e, com isso, pode ser utilizado para controlar as reações de fissões. No interior do vaso do reator, os elementos combustíveis aquecem o refrigerante, que permanece sub-resfriado (temperatura abaixo do ponto de saturação para a pressão existente), na sequência é levado até os geradores de vapor onde irá transferir calor, através dos tubos, para a água de alimentação que está no interior dos GVs (o lado secundário dos GVs trabalha saturado), transformando-a em vapor para ser utilizado na turbina. A Figura 02 mostra um reator PWR de quatro circuitos primários, todos conectados a um circuito secundário. Cada circuito primário contém um gerador de vapor e uma bomba para circulação de água. Ainda

em um dos quatro circuitos primários se encontram o pressurizador, responsável pela manutenção da pressão, e o sistema de emergência de refrigeração do núcleo.

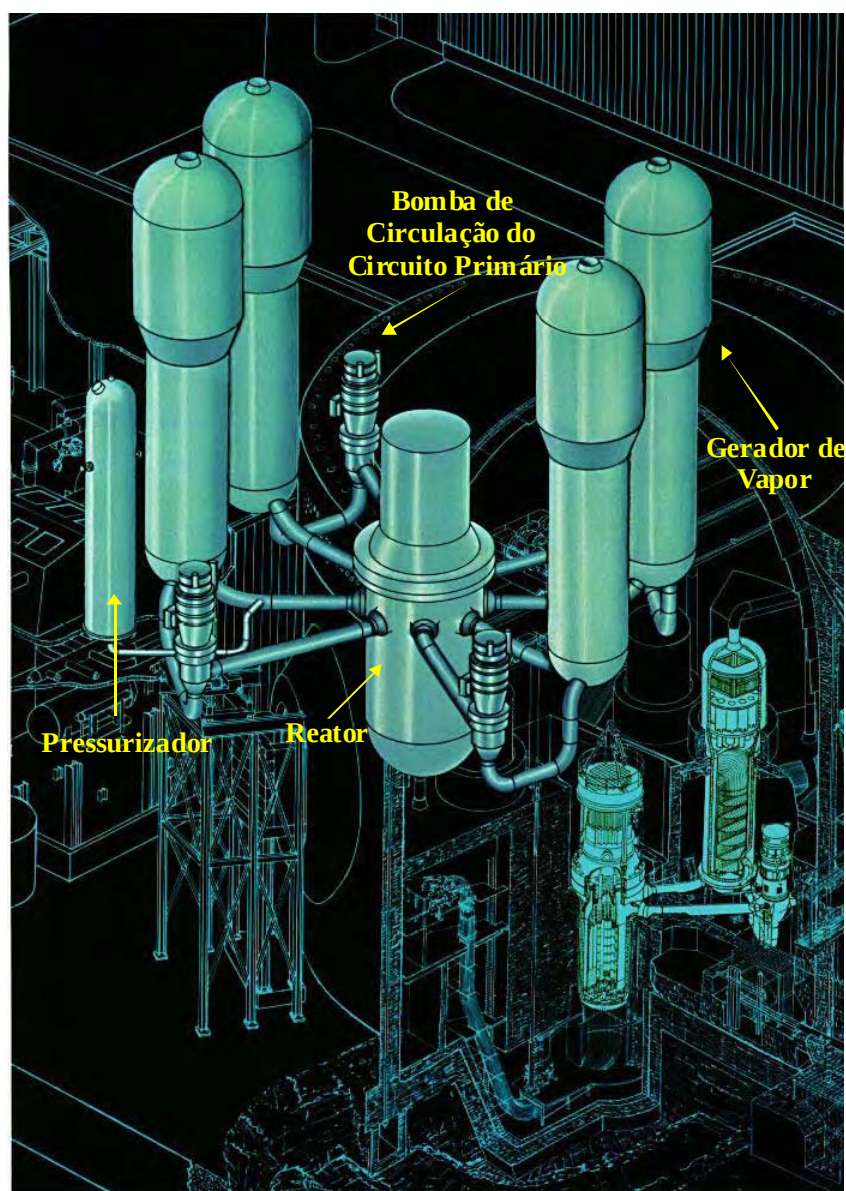


Figura 02 – Reator PWR com quatro circuitos primários
(WESTINGHOUSE - www.ipen.br/.../200807151601580.3A_TNR5764_6/01/2012)

A Figura 03 mostra um corte do núcleo de um PWR, o fluido impulsionado pelas bombas de refrigeração do reator, entra pela perna fria, desce pelo espaço anelar entre o vaso e o barril do núcleo, sobe através do núcleo e sai pela perna quente.

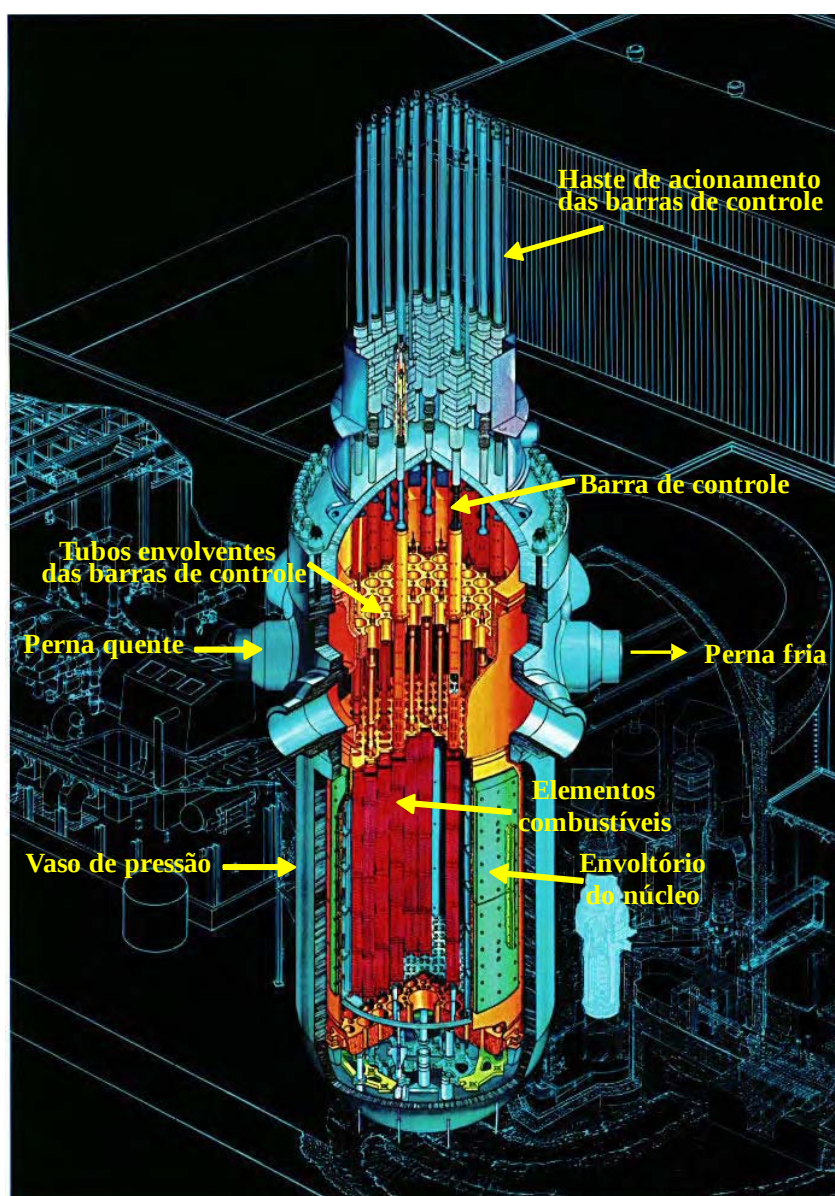


Figura 03 – Corte transversal do núcleo de um reator PWR
(WESTINGHOUSE - www.ipen.br/.../200807151601580.3A_TNR5764_6/01/2012)

2.2 Pressurizador do reator PWR

O pressurizador é um componente de grande importância para os reatores do tipo PWR, já que é responsável pelo controle da pressão do sistema de refrigeração, mantendo um nível de sub-resfriamento no núcleo e, conseqüentemente, previne que o combustível do núcleo venha a sofrer danos durante a operação da usina. Outra função do pressurizador é permitir a monitoração da quantidade de refrigerante no reator (BARROSO et al., 2004), embora haja situações em que tal função não é adequada, devendo o nível do refrigerante ser obtido diretamente (WENRAN et al., 1998).

A Figura 04 mostra o pressurizador de um PWR. Nele o vapor e líquido saturado coexistem em equilíbrio e, dessa forma, mantém o SRR sub-resfriado, já que a temperatura do PZR é maior do que a do SRR. A manutenção do equilíbrio entre vapor e líquido saturado permite o controle de pressão do SRR.

O pressurizador é um vaso cilíndrico vertical, com as tampas hemisféricas superior e inferior feitas de aço carbono, com revestimento de aço inoxidável austenítico em todas as superfícies em contato com o refrigerante do reator. Aquecedores elétricos de imersão são instalados na base do vaso, enquanto que as junções da linha de spray, válvulas de alívio e válvulas de segurança são instaladas na tampa superior do vaso. Os aquecedores podem ser removidos para manutenção ou substituição.

O pressurizador é projetado para acomodar as expansões e contrações volumétricas causadas por variações de carga. A linha de surto, que sai da base do pressurizador interliga o pressurizador à perna quente do circuito primário.

Durante expansões volumétricas (devidas a aumento de temperatura) o sistema de spray, cuja água vem das pernas frias do SRR, condensa parte do vapor existente no pressurizador, evitando que a pressão atinja o valor de atuação das válvulas de alívio (ELETRONUCLEAR, 1999).

Durante contrações volumétricas do SRR, a transformação de água em vapor e consequente geração de vapor por atuação automática dos aquecedores, mantém a pressão acima do valor em que ocorre o desligamento do reator por baixa pressão. Os aquecedores são também energizados quando ocorre alto nível de água no pressurizador vindo do SRR. Uma

tela instalada no bocal da linha de surto e defletores na parte inferior do pressurizador evitam que água fria vinda do SRR penetre diretamente na interface água / vapor e melhore as condições de mistura da água vinda do SRR com o fluido contido no pressurizador.

Em projetos de pressurizadores, a análise do comportamento dinâmico utiliza as equações de balanço de massa e energia entre os volumes de controle. O balanço de energia se baseia na primeira lei da termodinâmica e a análise teórica deve considerar os fenômenos físicos envolvidos no sistema. Os modelos mais utilizados pela maioria dos pesquisadores são aqueles que se baseiam no não-equilíbrio termodinâmico. Trabalhos como os de NAHAVANDI & MAKKENCHERY (1970); GOEMANS (1972), ABDALLAH et al., (1981); KIM (1987), KIM et al., (2005) utilizam as equações de conservação da massa e energia, aplicadas às duas fases, separadamente, e consideram temperaturas e volumes distintos para cada fase.

Em seu trabalho KIM (1984), destaca que os fenômenos físicos mais importantes para serem modelados, são:

- transferência de calor na parede do pressurizador por condensação;
- transferência de calor, por vaporização e por condução, na parede do pressurizador;
- transferência de calor entre o vapor e a parede do pressurizador por convecção natural;
- transferência de calor entre o líquido e a parede do pressurizador por convecção natural;
- transferência de calor entre as interfaces líquido e vapor;
- fenômeno da vaporização instantânea (*flashing*) em *outsurges* e a transferência de calor devida aos aquecedores elétricos;
- condensação dos “sprays”;
- a retirada dos gases não condensáveis acumulados e a vaporização da água, borrifada pelos aspersores, na parede do pressurizador;
- transitórios que aquecem ou resfriam as paredes do pressurizador e a abertura das válvulas de alívio ou de segurança.

As principais consequências termodinâmicas que podem ocorrer em um reator PWR, relativos a compressão do vapor (*insurge*) e queda de pressão (*outsurge*) são: com relação a

compressão é a condensação do vapor sobre as gotas do spray, fenômeno considerado o mais importante no controle da pressão do sistema. Com relação a queda de pressão o fenômeno que aparece é o surgimento de bolhas no início do *outsurge*.

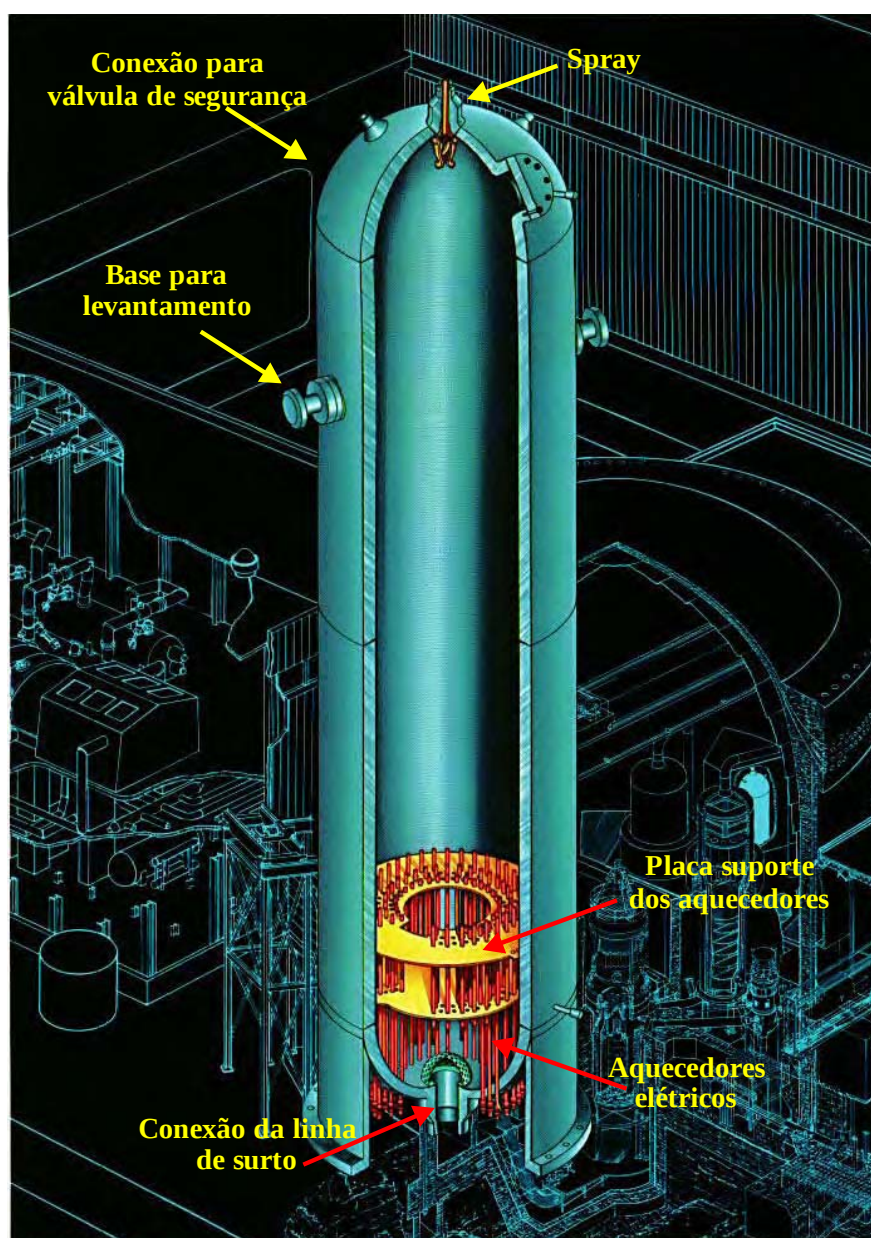


Figura 04 – Pressurizador de um reator PWR

(WESTINGHOUSE - www.ipen.br/.../200807151601580.3A_TNR5764_6/01/2012)

2.3 Reator IRIS

O IRIS é um reator modular refrigerado a água leve pressurizada com uma configuração integral da geração III+, com uma potência térmica de 1000MW (335 MW elétricos). O projeto do reator IRIS iniciado em 1999, é fruto de um consórcio envolvendo 20 organizações entre indústrias, laboratórios e universidades, e dez países, gerenciado pela Companhia Westinghouse Electric.

As contribuições dadas pelos membros do consórcio, através da transferência de tecnologia e fornecimento de dados experimentais, que vêm possibilitando um acúmulo de informações valiosas ao desenvolvimento do projeto IRIS, estão mostradas na Tabela 1 (CARELLI et al., 2004), onde são exibidas as organizações e os países envolvidos nesse projeto.

O vaso de pressão desse reator, abriga além do combustível e das barras de controle, a maior parte dos componentes do circuito primário que constituem o sistema de refrigeração, tais como, bombas, geradores de vapor, pressurizador, mecanismos de barras de controle e o refletor de nêutrons. O vaso de pressão do reator IRIS, comparado ao vaso de pressão de um reator PWR, é maior, porém, as dimensões do sistema de contenção é bem menor, resultando em uma redução do tamanho global da instalação (WESTINGHOUSE, 2003a).

O projeto de um reator integral contribui para a eliminação de acidentes, o que não ocorre em reatores do tipo PWR, por exemplo. A ocorrência do Acidente de Perda de Refrigerante (Loss of coolant accidents - LOCA) é praticamente eliminada, uma vez que nesses tipos de reatores não há longos sistemas de tubulação. Os reatores PWR convencionais, diferentes dos reatores integrais, possuem os componentes (gerador de vapor, bombas, pressurizador, etc), individualizados e conectados ao vaso de pressão pela tubulação do circuito primário. A Figura 05 mostra um corte do vaso do reator IRIS (CARELLI et al., 2004).

A eliminação de grandes LOCAs é possível graças a adoção de um sistema integral de refrigeração e a um amplo espaço acima do núcleo. Com esse espaço, é possível contar com um estoque adequado de água em casos de acidentes de perda de refrigerante de baixa e media intensidades, ao invés de depender de um sistema de injeção. O estoque de água ainda possui a

finalidade de servir como trocador de calor em eventos de aquecimento excessivo (WESTINGHOUSE, 2003c).

Tabela 1 – Organizações-membro do consórcio IRIS

Membros do consórcio	País (es)	Atividade desenvolvida
Westinghouse	Estados Unidos	Coordenação global, núcleo e licenciamento
BNFL	Reino Unido	Ciclo do combustível
Ansaldo Energia	Itália	Geradores de vapor
Ansaldo Camozzi	Itália	Geradores de vapor e barras de controle
ENSA	Espanha	Vaso de pressão
NUCLEP	Brasil	Pressurizador
OKBM	Rússia	Testes e dessalinização
ORNL	Estados Unidos	Blindagem, pressurizador e núcleo
CNEN	Brasil	Pressurizador e dessalinização
ININ	México	Avaliação de risco
LEI	Lituânia	Análise de risco
Universidade Politécnica de Milão	Itália	Análise térmicas e hidráulica
Tokyo Institute of Technology	Japão	Núcleos avançados, PRA
MIT	Estados Unidos	Manutenção e núcleo
Universidade de Zagreb	Croácia	Análise neutrônica e segurança
Universidade de Pisa	Itália	Vaso de contenção
Universidade Politécnica de Turim	Itália	Fatores humanos
Universidade de Roma	Itália	Rejeitos radioativos
TVA	Estados Unidos	Manutenção
Eletronuclear	Brasil	Aplicações gerais
Universidade Califórnia - Berkeley	Estados Unidos	Análise neutrônica
Universidade do Tennessee	Estados Unidos	Modularização
Universidade de Ohio	Estados Unidos	Monitoração do núcleo
Universidade de Iowa	Estados Unidos	Monitoração
Universidade de Michigan	Estados Unidos	Monitoração

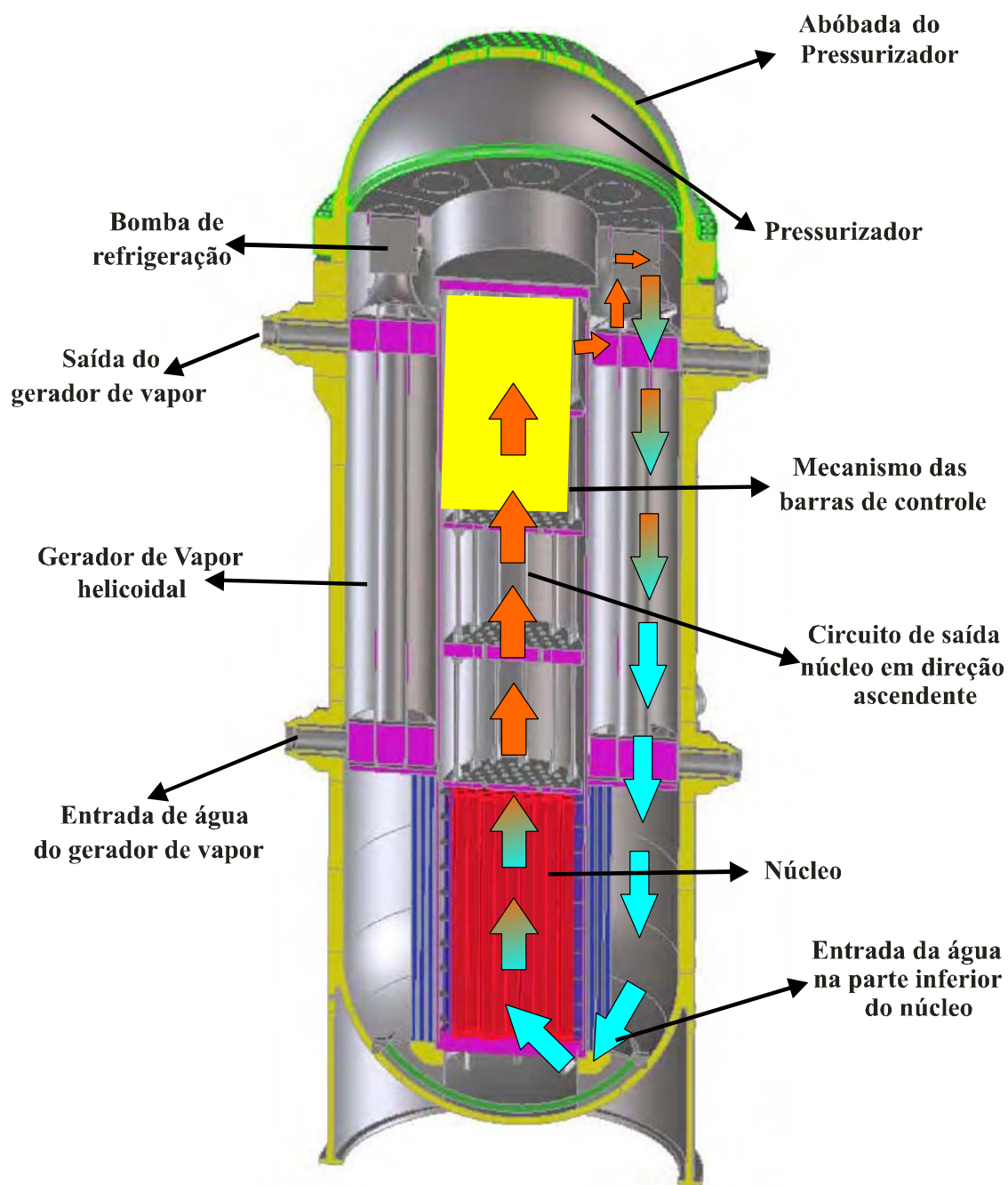


Figura 05 – Corte transversal do reator IRIS (CARELLI et al., 2004)

2.4 Pressurizador do reator IRIS

O pressurizador do reator IRIS fica situado na parte superior do vaso de pressão do reator. A água do pressurizador fica separada da água do fluido refrigerante do circuito primário por meio de uma estrutura interna em forma de um chapéu invertido, como mostrado na Figura 06 (BOTELHO et al., 2005a). Essa estrutura atenua a transferência de calor, mantendo a água saturada no interior do pressurizador. Na parte inferior do pressurizador estão situados os aquecedores, nessa região também estão localizados os orifícios de surto por onde passa a água do sistema primário.

O pressurizador do reator IRIS dispõe de um amplo volume para acomodar as fases líquida e gasosa. A configuração integral desse reator permite o desenvolvimento de um sistema de pressurização bem mais espaçoso sem qualquer custo adicional. A razão entre o grande volume de vapor e a potência é o motivo pelo qual o reator IRIS dispensa aspersores, os quais são comumente utilizados em PWRs convencionais durante surtos de pressão (CARELLI et al., 2004).

O flange superior e seus lacres não estão expostos à diferença de temperatura das águas sub-resfriada e saturada, reduzindo as tensões térmicas e garantindo a robustez da selagem.

O pressurizador do reator IRIS dispõe de um grande volume para acomodar as fases líquida e gasosa. A configuração integral desse tipo de reator possibilita o desenvolvimento de um projeto de um sistema de pressurização bem amplo, comparado aos pressurizadores tradicionais. A razão entre o grande volume de vapor e a potência é o motivo pelo qual nesse reator é dispensado o uso de aspersores, utilizados nos reatores PWRs (CARELLI et al., 2004).

Os transitórios de *insurge* geram uma estratificação no pressurizador, fazendo com que a fase líquida permaneça inteiramente sub-resfriada, enquanto a fase gasosa, superaquecida. Na ausência das circunstâncias que originam *insurges*, constata-se condições termodinâmicas diferentes daquelas encontradas em sistemas que usam aspersores. A ausência de aspersores no pressurizador IRIS, resulta em um retorno mais lento às condições estacionárias. Uma linha de aspersor poderá ser adotada, que durante as operações de potência, não terá nenhuma função, será utilizada durante o desligamento da instalação (BARROSO et al., 2004). Os aquecedores elétricos do pressurizador do reator IRIS são projetados para gerar

água saturada e vapor suficiente para prevenir a queda de pressão em casos de elevação de potência na turbina.

Com dados experimentais de situações de *outsurge* do reator Shippingport, (BOTELHO et al., 2005b) simularam *outsurges* com modelos de dois e três volumes (uma fase líquida e outra de vapor) e (duas fases líquidas e uma de vapor), respectivamente. Os resultados obtidos, mostraram uma boa concordância com os dados experimentais independente do modelo. Esses modelos aplicados ao pressurizador do reator IRIS apresentaram o mesmo tipo de comportamento, com independência dos resultados em relação ao modelo adotado, sugerindo que o comportamento do reator IRIS pode ser estimado quando *outsurges* ocorrerem.

O reator IRIS é um projeto com uma configuração diferente quando se compara com os reatores PWRs convencionais. A questão da homogeneização do boro no interior do pressurizador do reator IRIS é muito importante durante as operações de elevação e redução de potência. Em seu trabalho, SILVA, (2008), através de uma nova metodologia de similaridade, conhecida como Análise de Escala Fracional, ou FSA (ZUBER et al., 2005), (WULFF et al., 2005), projetou uma seção de testes que representa a concentração de boro no pressurizador do reator IRIS. Foram determinadas a ordem de grandeza dos principais parâmetros para construção de uma seção de testes, permitindo-se uma margem de segurança para ajustes posteriores. A construção de uma bancada experimental com seção de testes simulando o pressurizador do reator IRIS, permitirá a realização de experimentos com o objetivo de se estudar a homogeneização da concentração do boro no interior do pressurizador, gerando informações importantes para que se possa otimizar as condições de projeto.

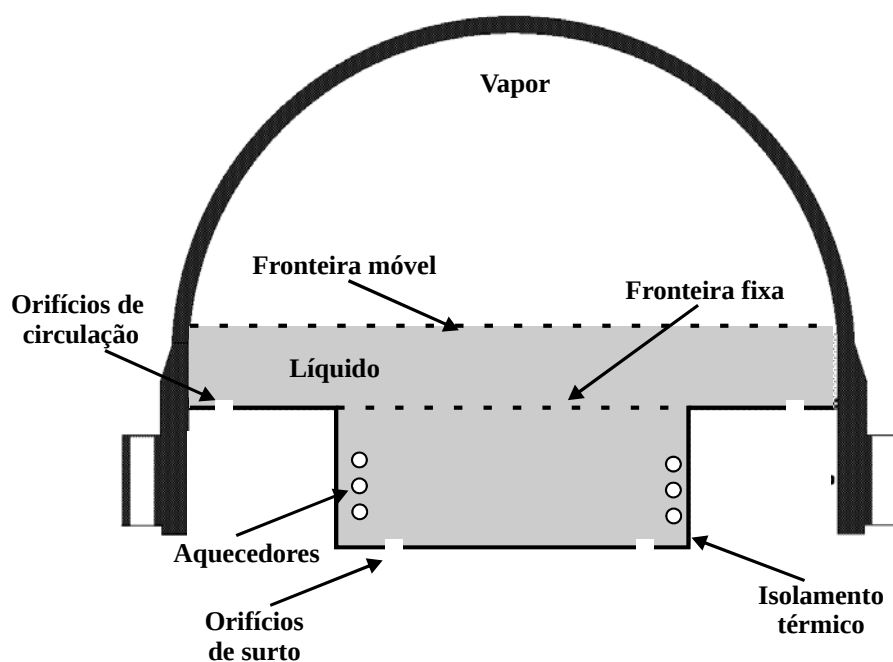


Figura 06 – Corte transversal do pressurizador do reator IRIS (BOTELHO et al., 2005a).

2.5 Controle de Reatividade

Em um reator nuclear de água pressurizada, vários sistemas são projetados e utilizados no controle do nível de potência e de segurança da usina. Os principais sistemas utilizados para controle da reatividade são: diluição de boro no moderador de nêutrons (Controle Químico e Volumétrico), e as barras de controle (Conjunto de Bancos de Controle). (ELETRONUCLEAR, 1999)

O Sistema de Controle Químico e Volumétrico permite controlar as mudanças na reatividade através do monitoramento dos seguintes efeitos:

- aquecimento do Sistema de Refrigeração do Reator da condição de Desligado Frio (DF) para a condição de Quente Potência Zero (QPZ);
- queima do combustível e acúmulo dos produtos de fissão;
- variações de xenônio;

2.6 Análise de diluição de boro em reatores PWR

Vários estudos têm identificado cenários envolvendo reatores a água pressurizada (PWR) que podem levar a excursões de reatividade devidas a diluição de boro. Como se sabe, o ácido bórico é utilizado no refrigerante do circuito primário como uma solução para absorver nêutrons com a finalidade de ajustar a reatividade do reator. Uma redução significativa na concentração de boro no núcleo do reator pode levar a uma excursão de reatividade.

Quando o reator é desligado, a função do boro no refrigerante é manter o sistema no estado de subcriticalidade. Caso água com baixa concentração de boro seja introduzida, torna-se necessário fazer uma homogeneização, aumentando a concentração e evitando que água com pouca quantidade de boro atinja o núcleo, fazendo com que o reator reinicie a criticalidade.

Durante a vida de uma usina nuclear, o reator estará sujeito a algumas situações anormais. Nessas situações, o operador da central deve tomar decisões rápidas para evitar ou minimizar as consequências de um acidente. Antes do acidente de Three Mile Island (TMI), pouco interesse existia no acidente conhecido como Small Break LOCA (Loss of Coolant Accidents), uma vez que esse acidente era considerado menos severo que Large Break LOCA. Porém, os Small Break LOCAs são, provavelmente, muito mais complicados que os Large Break LOCAs. Nesse acidente, a informação sobre o comportamento da pressão, por exemplo, é fundamental para se tomar uma ação preventiva ou otimizar a operação tentando alcançar uma parada segura (KIM, 1984). O acidente de TMI ganhou especial importância no contexto da análise de segurança de usinas nucleares, pois evidenciou que, mesmo em seqüências severas de acidentes, não previstas nas análises de segurança até então, os danos maiores ficaram restritos à instalação, não havendo liberação relevante de material radioativo para o meio ambiente. A importância desse acidente, se deu sobretudo pela introdução de mudanças nos procedimentos e critérios de segurança das instalações nucleares.

2.7 Classificação das sequências de diluição de boro

Segundo QUERAL e GONZÁLEZ (2004), as sequências de diluição de boro podem ser classificadas como homogêneas e heterogêneas. A sequência homogênea se caracteriza por uma diluição muito lenta, enquanto que a heterogênea é devida à formação de uma massa de água sem boro que é, na sequência, transportada para o núcleo do reator através de circulação natural ou pelo acionamento de uma bomba de refrigeração do reator (SRR), Figura 07a. A diferença principal entre os dois tipos é que a taxa de diluição da primeira é pequena e sua análise já é prevista pelo Relatório Final de Segurança (RFS) da usina. Na segunda, a taxa de diluição é muito grande e poderá causar grandes inserções de reatividade no núcleo do reator. Um acidente de reatividade só é possível se o excesso de reatividade é maior que o valor de barra de controle, e depende da queima e das condições termoidráulicas do Sistema de Refrigeração do Reator (SRR). A maior probabilidade de ocorrência é no início do ciclo para a condição de Quente Potência Zero (QPZ) sem xenônio, Figura 07b.

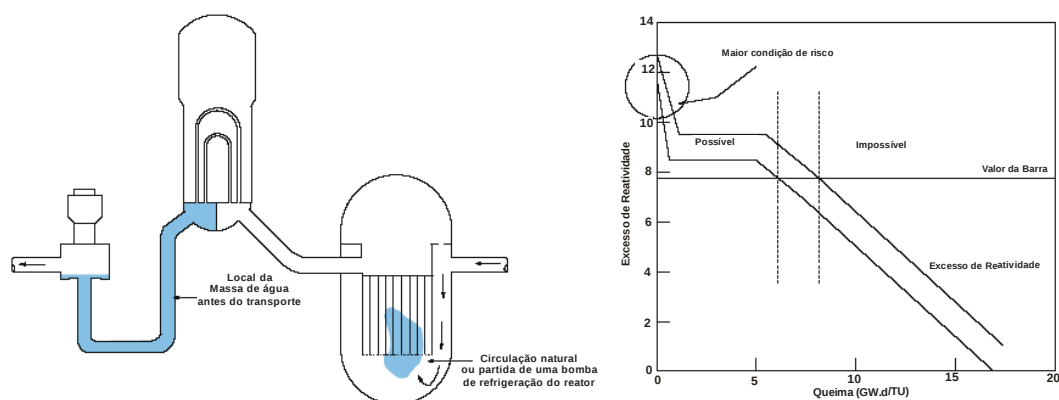


Figura 07 – (a) Transporte da massa de água sem boro durante circulação natural e partida de uma bomba do RCP. (b) Excesso de reatividade e valor de barra de controle durante o ciclo.

(QUERAL e GONZÁLEZ, 2004).

2.8 SBLOCA – Pequeno acidente de perda de refrigerante

Esse tipo de acidente tem sido uma questão de grande importância e motivo de investigação por pesquisadores de vários países. Um SBLOCA é caracterizado por uma taxa de escoamento por uma ruptura e que, embora superando a quantidade que pode ser injetada pelo sistema de controle de volume, não é suficiente para dissipar toda energia armazenada e o calor residual de decaimento e, reduzir a pressão do refrigerante à faixa de baixa pressão. Nesse caso, os geradores de vapor são utilizados temporariamente, para a remoção adicional de calor. Nesses eventos, o núcleo, mesmo com o nível de refrigerante baixo, geralmente permanece coberto pelo mesmo. (AZEVEDO, 2002).

Uma das características importantes no projeto do reator IRIS, é a eliminação do acidente de perda de refrigerante de grande intensidade, os conhecidos (LBLOCA). Sua eliminação é possível graças à adoção de um sistema integral de refrigeração e a um amplo espaço acima do núcleo. Nesse espaço, é possível armazenar um estoque adequado de água em casos de acidentes de perda de refrigerante de baixa e média intensidades, ao invés de depender de um sistema de injeção. O estoque de água ainda possui a finalidade de servir como trocador de calor em eventos de aquecimento excessivo (WESTINGHOUSE, 2003a).

No reator IRIS, apenas tubulações com diâmetro inferior a 0,1 m se encontram no vaso de pressão do reator, sempre acima do núcleo. Portanto, apenas pequenos LOCAs precisam ser levados em consideração. Uma vez garantida a eliminação de LOCAs de alta e média intensidades, LARSON et al. (2007) realizaram análises para identificar os fenômenos relevantes em LOCAs de pequena intensidade no reator IRIS. Essas análises, conhecidas como PIRT (do inglês *Phenomena Identification and Ranking Table*), além de classificarem os fenômenos de acordo com sua importância, organizam o planejamento para obtenção de dados analíticos e experimentais.

Em um SBLOCA as taxas de despressurização são lentas e apresentam baixas velocidades no SRR, em comparação com os acidentes de grande proporção os chamados LBLOCAs. Por causa dessa taxa de despressurização lenta, vários fenômenos de mudança/separação de fases dominam as características termoidráulicas desse tipo de acidente. De uma maneira geral, os fenômenos e processos de interesse nos eventos de

diluição de boro durante um SBLOCA, estão representados na Figura 08 (NOURBAKHSH; CHENG, 1995).

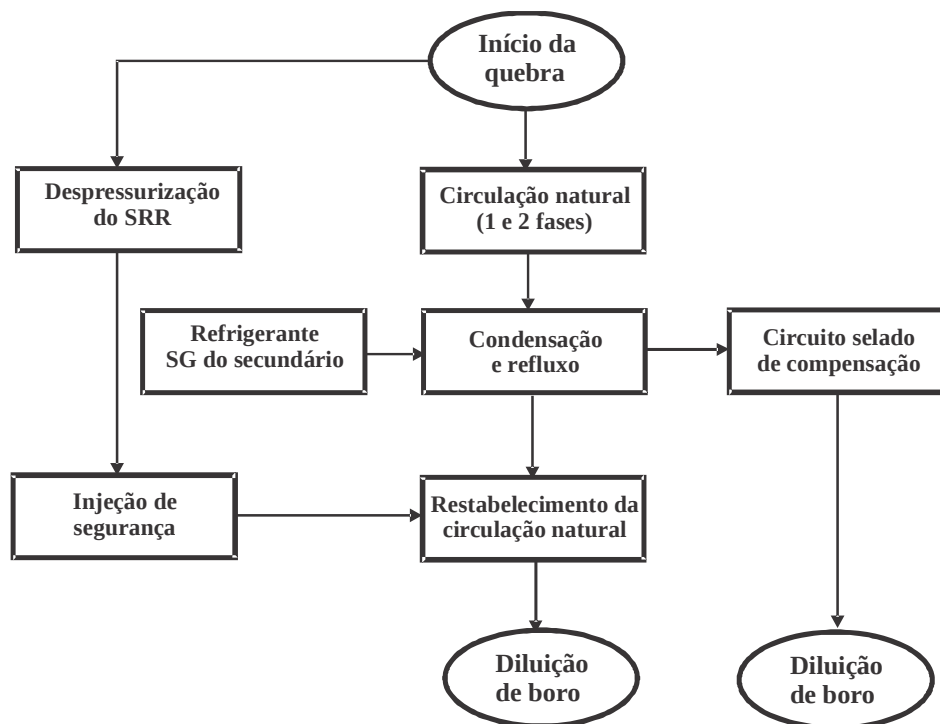


Figura 08 – Mecanismos de diluição de boro em um SBLOCA

2.9 Problemas da diluição de boro - experimentos e simulações

Em casos de um SBLOCA nos reatores PWR, a perda de água do circuito primário pode induzir, sob certas condições, a acumulação e o transporte de uma massa de água com baixa concentração de boro para o núcleo do reator. Esse fenômeno caracteriza uma diluição não homogênea de boro e, nesse caso, pode haver um retorno à criticalidade e a uma excursão de potência com prováveis danos ao combustível (SUN; SHA, 1995) e (GRAFFARD; GOUX, 2006).

Estações experimentais tais como PKL Test Facility – PrimärKreislauf e UPTF – Upper Plenum Test Facility (Alemanha), têm fornecido importantes dados experimentais para

o desenvolvimento e validação de códigos de sistemas termoidráulicos visando à predição de fenômenos relacionados com a termoidráulica e com o boro (BUCALOSS, 2005).

Fenômenos relacionados à termoidráulica:

- sequência de partida da circulação natural após o SBLOCA;
- comportamentos simétrico e assimétrico do circuito devidos à localização da quebra, conexão com o pressurizador, etc;
- comportamentos diferentes dos tubos em U com diferentes comprimentos;
- transferência de calor entre o circuito primário e secundário durante a circulação natural.

Fenômenos relacionados ao boro:

- formação de massa de água deborada;
- limitação do tamanho da massa;
- mistura e transporte da massa de água borada;
- mistura de diferentes massas de água borada em diferentes seções do sistema de refrigeração reator.

Estudos de transientes com diluição de boro foram iniciados na década de sessenta analisando-se eventos com diluição lenta, devido ao mau funcionamento do sistema de Controle Químico e Volumétrico (CQV). Todavia, poucos casos foram estudados entre os anos 70 e 80. No início dos anos 90, surgiu o interesse internacional em transientes com diluição de boro, e, com o lançamento de diversos projetos em diferentes campos da segurança nuclear, muitos projetos foram implementados. Em 1993, HYVARINEN propôs um novo mecanismo de diluição de boro. Em seu trabalho, ele descreve os fenômeno de condensação e refluxo que podem ocorrer durante acidentes de pequenos LOCAS (SBLOCA), transientes antecipados sem parada (SCRAM) e acidentes de fuga do primário para o secundário.

Em 1995 o Comitê de Segurança de Instalações Nucleares (CSNI) organizou um encontro de especialistas no State College (USA) chamado “Boron Reactivity Transients” para tratar de questões relativas com transientes rápidos de boro. Os objetivos principais dessa conferência era definir o estado da arte de transientes de diluição de boro e dar indicações de trabalhos futuros. A questão mais importante decorrente da reunião foi a relacionada com

acidentes inerentes de diluição de boro após condensação e refluxo. Ficou evidente também que outros estudos sobre acidentes inerentes à diluição de boro deveriam ser realizados (FREIXA et al, 2009). O grupo de Análise de Sistemas de Energia do Instituto de Tecnologias Energéticas da Universidade Técnica da Catalunha, tem estudado a questão do boro em três estágios:

- participação em projetos relacionados com a “Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) (REVENTÓS et al, 2008);
- melhorias de códigos (FREIXA et al, 2009);
- investigação em usinas nucleares de potência.

O terceiro estágio foi o principal objetivo desse grupo de trabalho, que consistiu em uma continuação de projetos anteriores no campo de análise de usinas nucleares de potência. A participação nos projetos OECD/SETH e OECD/PKL e a troca de informações com outras organizações participantes reuniram um grande número de informações sobre questões relativas a experimentos e estudos de simulações de SBLOCA com transientes de diluição de boro. Simulações realizadas com o código RELAP5, para a estação de ensaio PrimarKreisLauf (PKL), para analisar a formação de uma massa de água com boro e a sua evolução através do sistema primário, mostraram que o mesmo simulou completamente todos os fenômenos envolvidos na questão do SBLOCA com transientes com diluição de boro. Posteriormente, o código RELAP5 foi aplicado na simulação de transientes com diluição de boro para o reator Espanhol Asco-2, que é um reator PWR da Westinghouse, possui três circuitos e tem uma potência de 2940,6 MWth. (FREIXA et al, 2009).

GANGO, (1997), estudando o acionamento de bombas no reator VVER-440, juntamente com simulações computacionais, concluiu que, apesar de a mistura ser um processo bastante complicado, os gradientes de concentração eram suavizados pela turbulência, tendo a difusão molecular pouca importância. Essas análises serviram para constatar a dependência da homogeneização com as condições geométricas da instalação.

Também em 1997 RODHE e colaboradores investigaram reatores VVER-440, cuja característica é possuir válvulas isolantes principais nas pernas fria e quente de cada circuito primário. Essas válvulas permitem a desconexão de qualquer parte do circuito, ainda que

outras sejam mantidas em atividade, por exemplo, como nos casos de perda de refrigerante. Entretanto, a conexão de um setor previamente desconectado pode acarretar uma homogeneização deficiente para a solução de ácido bórico. Para as análises, combinou-se o uso dos códigos SiTAP (código neutrônico de cinética pontual) e o código DYN3D (código 3D para simulação de transientes).

Já em 1999 IVANOV e colaboradores fizeram análises comparativas de deficiências na homogeneização de boro nos reatores VVER-440 e VVER-1000, observando que, em situações de transitórios, as consequências mais favoráveis foram no primeiro reator. Estudos de homogeneização de boro em situações estacionária e transitória foram realizadas por KLIEN e colaboradores (2004) acoplando-se o código de neutrônica DYN3D e SAPR para modelagem de mistura de refrigerante. Nas análises, assumiu-se que água isenta de boro era formada em circuitos durante o desligamento do reator. Variando-se a quantidade inicial dessa água, foi verificado que, em uma situação estacionária, volumes inferiores a 14m^3 não reconduziriam à criticalidade; já em situações transitórias, volumes superiores iriam inserir quantidades significativas de reatividade, conduzindo o reator à supercriticalidade.

Análises em transientes com diluição de boro foram realizadas por DIAMOND e colaboradores (2004), acoplando-se um código de neutrônica (PARCS – Purdue Advanced Reactor Core Simulator) e um de termoidráulica (RELAP5). Vários eventos de diluição foram estudados com o objetivo de avaliar o potencial de dano no combustível. O estudo analisou as variáveis que são mais importantes, como o volume de água deborada e a sua concentração de boro, e os resultados foram analisados em diferentes plantas.

3 METODOLOGIA

3.1 Descrição da bancada experimental

Na Figura 09 tem-se um fluxograma da bancada experimental utilizada nos experimentos. Sua montagem baseou-se no estudo desenvolvido por (SILVA et al., 2010), que determinou, em seu trabalho, os parâmetros de uma seção de testes para o pressurizador do reator IRIS, Tabela 2 (CARELLI, 2003), utilizando uma nova metodologia de similaridade conhecida como Análise de Escala Fracional ou FSA. A bancada simplificada consta de dois tanques com volumes de 200 litros cada um, onde ocorrem os processos de diluição e boração, uma bomba dosadora, um frequencímetro, dois rotâmetros para medição da vazão, válvulas de precisão em aço inox, válvulas esfera de latão, conexões e tubulação com diâmetro interno de 3/8” em aço inox. A seção de testes, representando ¼ do pressurizador do IRIS, foi construída em acrílico transparente de 20mm de espessura nas bases maior e menor dos cilindros, e as paredes laterais em acrílico transparente de 10mm de espessura. A Figura 10 mostra o projeto da seção de testes.

Tabela 2 – Variáveis do projeto IRIS

Variável	Símbolo	Valor
Densidade da água do primário (kg/m ³)	$\rho_{in,p}$	656,0
Densidade média da água no pressurizador (kg/m ³)	ρ_p	594,1
Vazão total de circulação (m ³ /s)	$Q_{in,p}$	0,000504
Vazão dos tanques de boração ou deboração (m ³ /s)	q_p	0,0063
Volume de água do primário (m ³)	v_p	400
Volume total de água no pressurizador (m ³)	V_{ap}	32
Volume de vapor no pressurizador (m ³)	V_{vp}	43,6
Diâmetro dos orifícios de surto (m)	D_p	0,05

Na Tabela 2, para o diâmetro do orifício de surto e de circulação, foi adotado um valor de referência baseado em estimativas do projeto do reator IRIS*.

Na Figura 11 tem-se a seção de testes em três dimensões, enquanto a Figura 12 mostra uma foto da bancada experimental utilizada nas medidas.

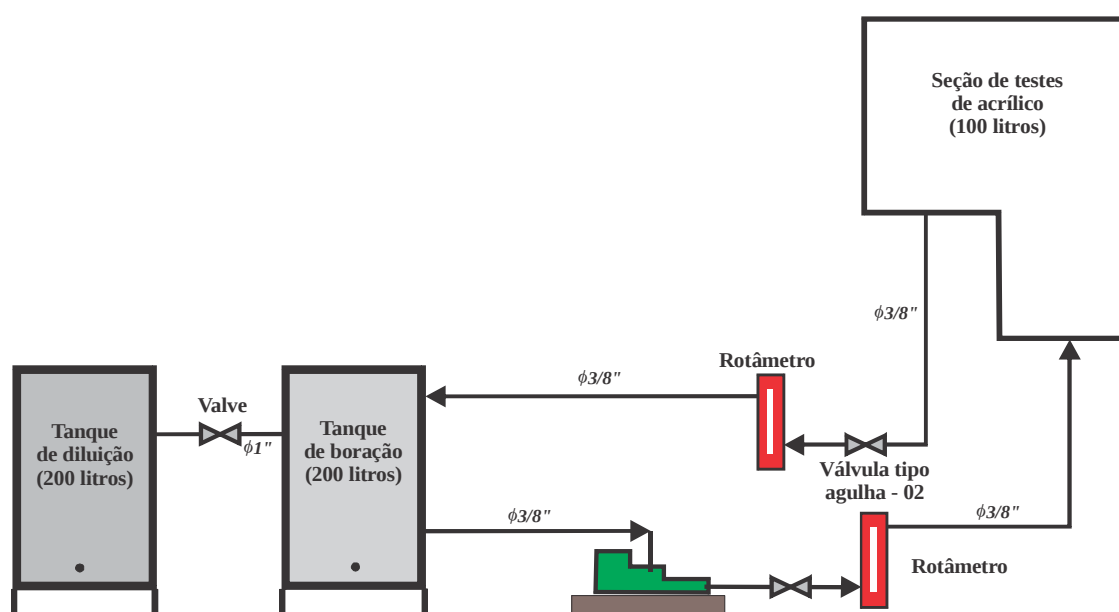


Figura 09 – Fluxograma da bancada experimental

* Barroso, A.C.O., comunicação pessoal, IPEN/CNEN, 2008

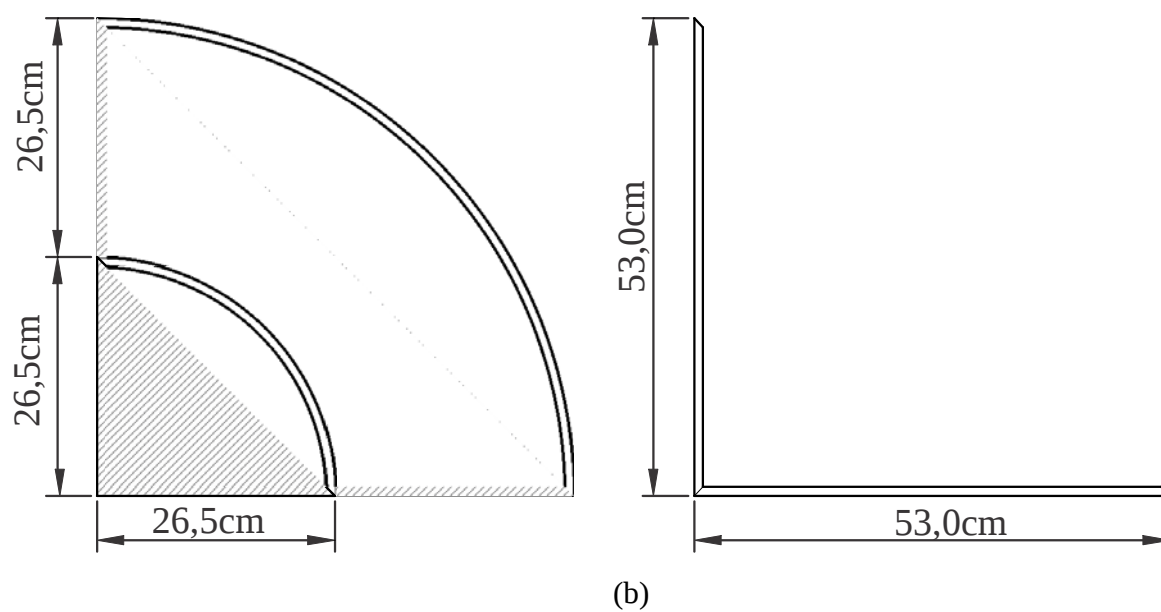


Figura 10 – Projeto da seção de testes (a) vista lateral e (b) vista superior

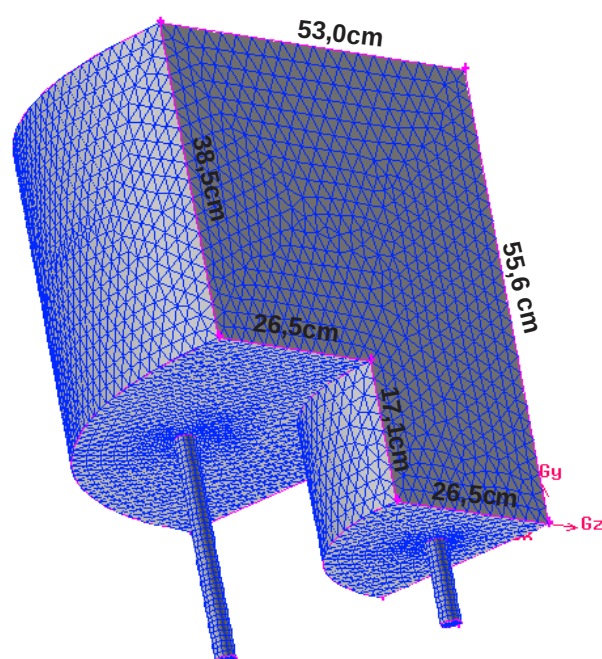


Figura 11 – Seção de testes em três dimensões

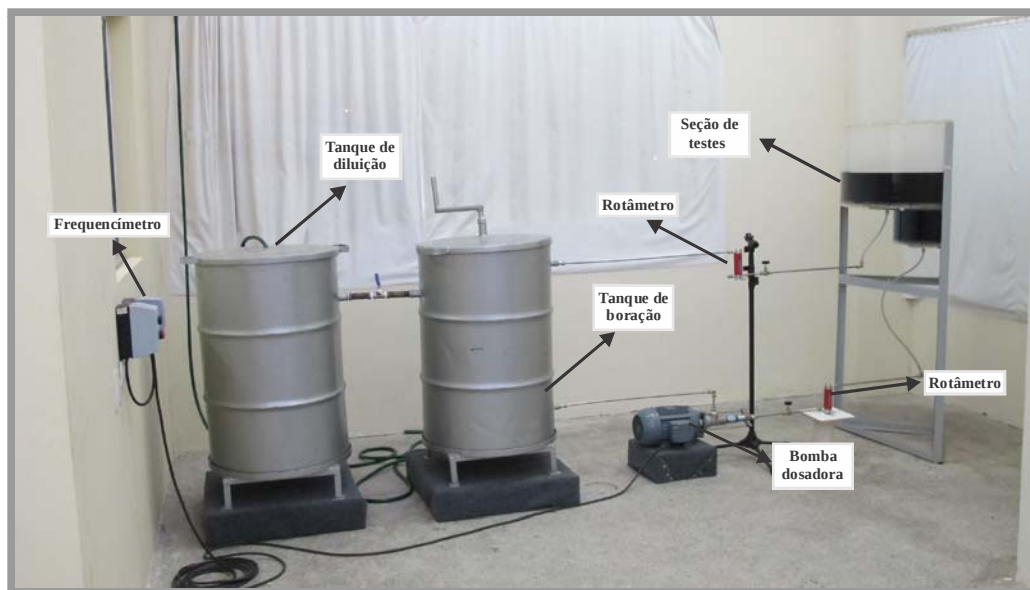


Figura 12 - Bancada experimental

Os resultados experimentais preliminares foram obtidos através de vídeos e fotografias digitais da Seção de Testes (ST) durante o processo de homogeneização do corante. O registro das imagens da evolução da pluma do corante na ST foram tomados a cada 30 minutos, durante aproximadamente 5 horas, quando já se tinha visualmente uma indicação da homogeneização do corante no sistema. A Figura 13 mostra o aparato de como foram obtidos esses resultados.



Figura 13 - Sistema de aquisição dos resultados experimentais

Para a circulação do fluido (água e corante) no sistema, foram confeccionadas doze peças em acrílico para serem utilizadas na seção de testes, como mostrado a Figura 14. Essas peças foram fabricadas em acrílico de 1,0 cm de espessura e consta de duas placas (15cmx10cm e 10cmx5cm), respectivamente. Essas placas foram coladas e nelas foram feitos os furos de surto, com variação dos diâmetros e das posições:

- Diâmetros - 1,0 cm, 1,5 cm e 2,5 cm
- Posições - Central, próxima às paredes curvas (região inferior e superior da ST) e próxima ao vértice.

As Figuras de 15, 16, 17, 18, 19 e 20 mostram os detalhes das peças fabricadas.

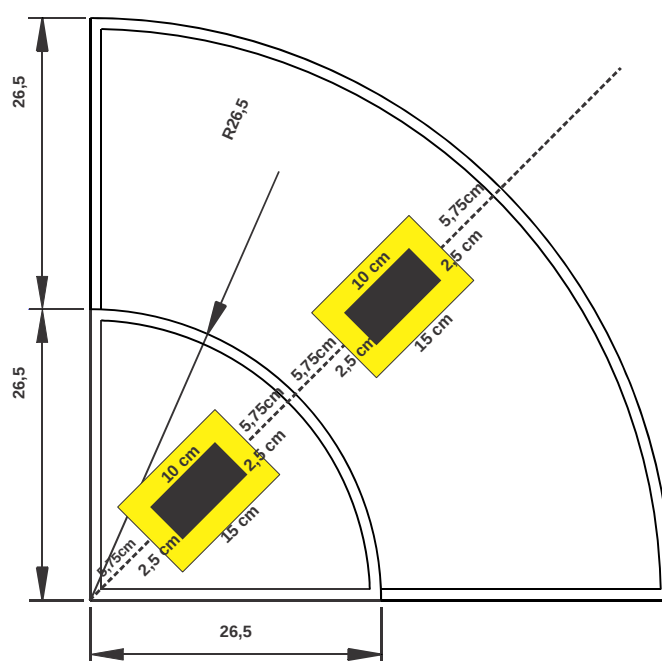


Figura 14 – Detalhe de localização da peça

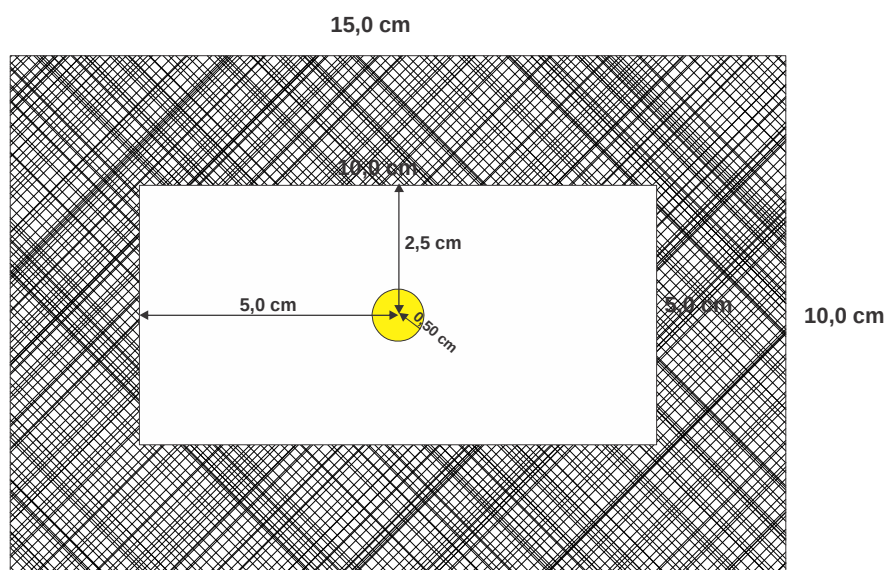


Figura 15 – Diâmetro do furo de 1,0 cm – posição central

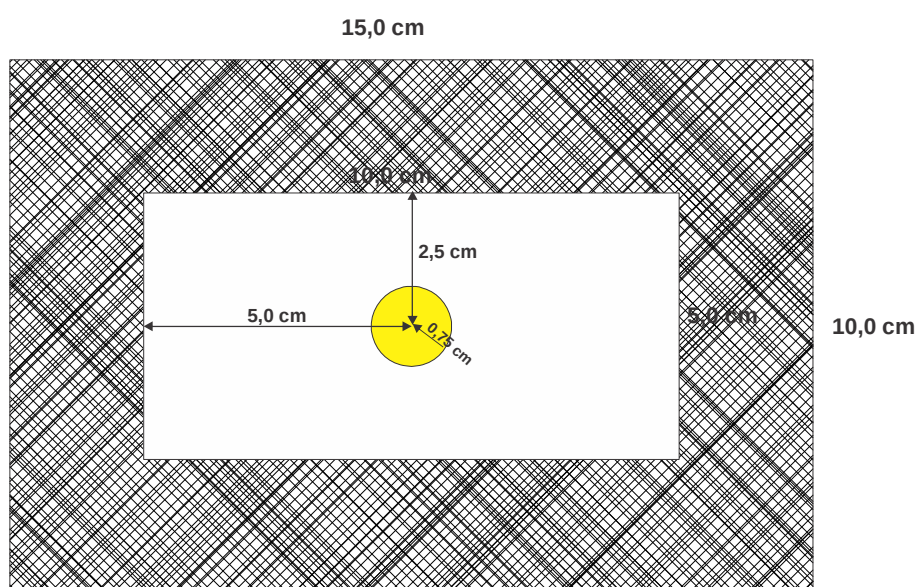


Figura 16 – Diâmetro do furo de 1,5cm – posição central

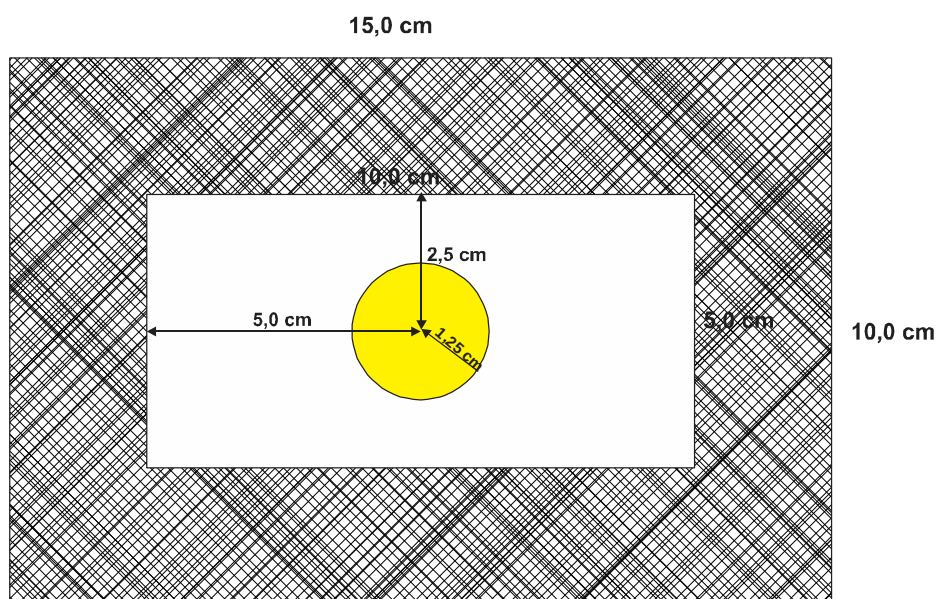


Figura 17 – Diâmetro do furo de 2,5cm – posição central

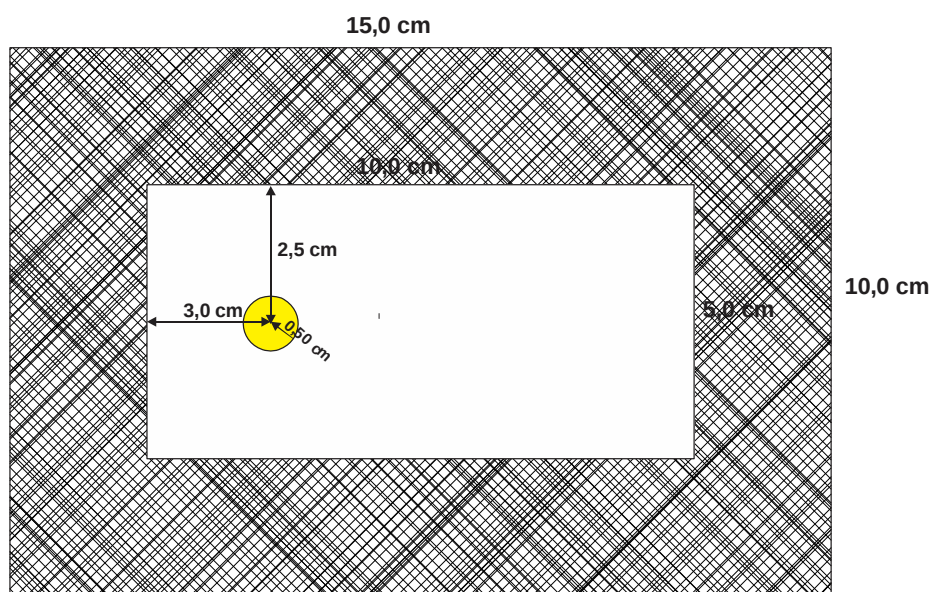


Figura 18 – Diâmetro do furo de 1,0cm – posição próxima à parede curva

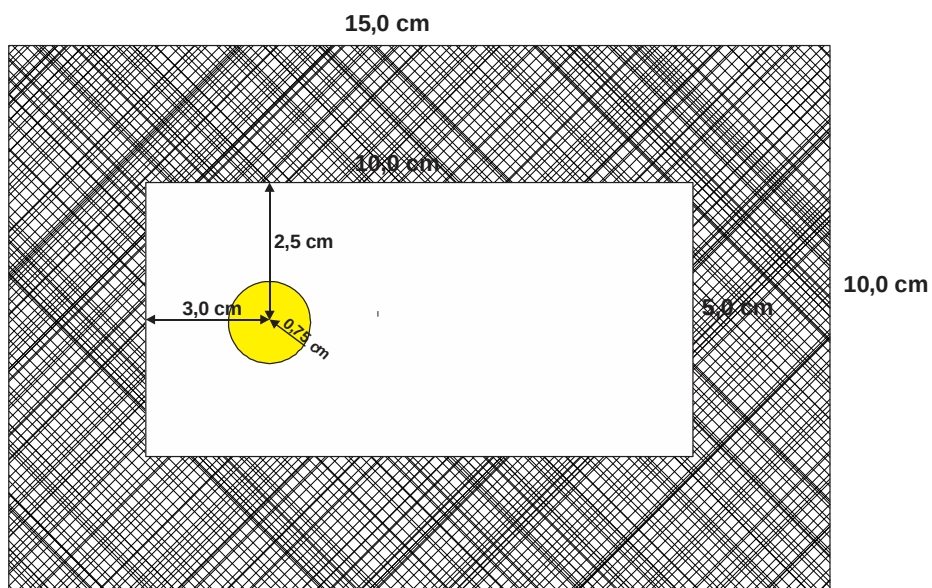


Figura 19 – Diâmetro do furo de 1,5cm – posição próxima à parede curva

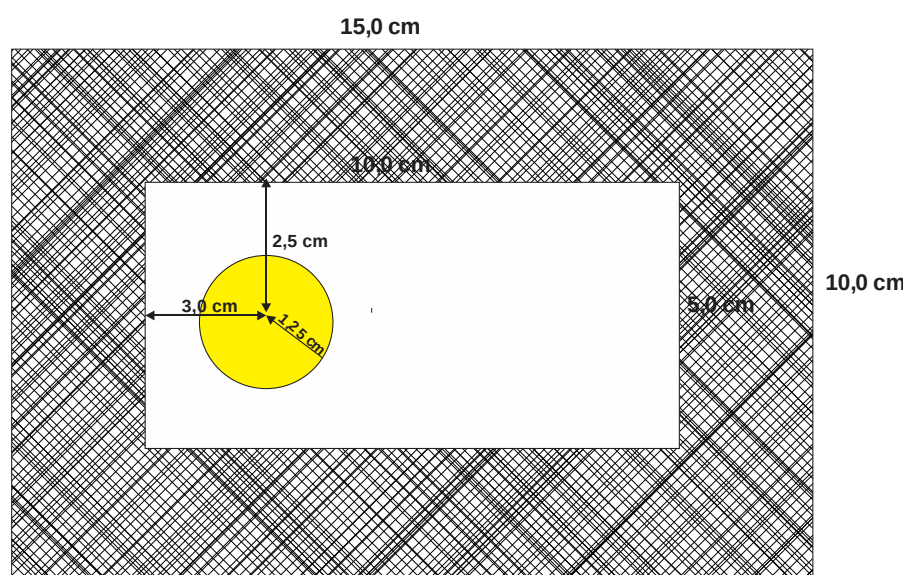


Figura 20 – Diâmetro do furo de 2,5cm – posição próxima à parede curva

Para os diâmetros com a posição próxima ao vértice da ST basta inverter a posição das peças mostradas nas Figuras 18, 19 e 20.

3.2 Procedimento experimental

3.2.1 Objetivos:

Observar a evolução, ao longo do tempo, da pluma de corante na seção de testes e registrar essa evolução através de vídeos e fotos, determinando, também, o tempo de homogeneização.

3.2.2 Materiais e equipamentos:

- Um tanque para diluição – volume de 200 litros;
- um tanque para boração com misturador manual – volume de 200 litros;
- uma bomba dosadora marca Nemo (Mod. NM008BY03S12B);
- dois rotâmetros marca modelo TRV 140 L 7 P da Tecnofluid;
- uma seção de testes com geometria de $\frac{1}{4}$ do pressurizador do reator IRIS fabricada em acrílico branco transparente;
- um frequencímetro;
- uma máquina fotográfica Canon modelo G12 com tripé.

3.2.3 Preparação

Antes do início para a execução de um experimento, deve-se verificar se os tanques, seção de testes, rotâmetros, bomba e tubulações estão limpos. Após essa verificação, começa o experimento, seguindo as seguintes etapas:

01- Preparação da amostra do corante :

Para cada experimento é utilizado um corante com uma cor caracterísitica. O corante utilizado é fabricado pela empresa Anilinas Gaúchas Ltda - CNPJ – 05.019.808/0001-34. Localizada na Av. Avaré, 413 – 91040-440 – Porto Alegre – RS.

Nome – Anilinas Gaúchas

Cores – Vermelha, azul e verde

Composição: corante e sulfato de sódio

Densidade – $1,464 \text{ g/cm}^3$ (Wikipédia – A enciclopédia livre)

A pesagem das amostras foi realizada por uma balança de precisão do laboratório Fricke (Celtec – Modelo FA204N) Figura 21 – Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste/ Comissão Nacional de Energia Nuclear.

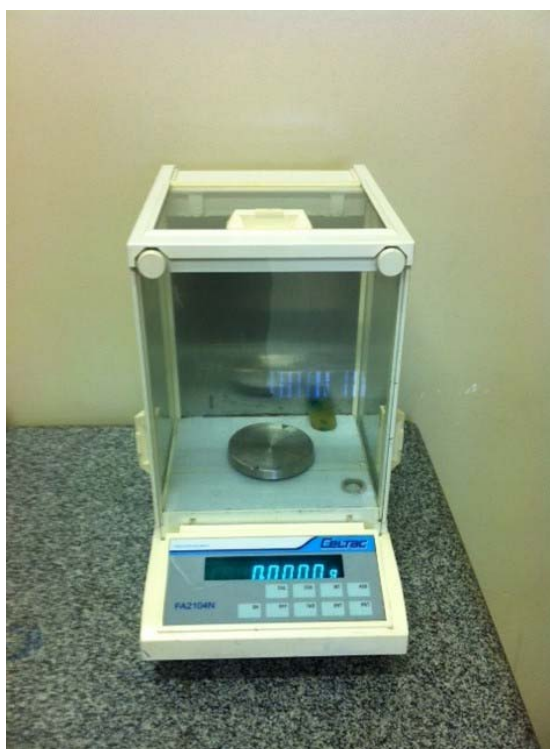


Figura 21 - Balança de precisão – Celtac Mod. FA2104N

02- Enchimento da seção de testes

Procede-se o enchimento dos tanques e da seção de testes até o atingir o nível programado. Após essas operações, verifica-se se as válvulas estão abertas para iniciar a partida da bomba e ajustar os equipamentos (rotâmetros, válvulas de precisão), criando-se

condições para que o sistema se estabilize, isto é, que o sistema apresente as mesmas vazões na entrada e saída da seção de testes.

03- Sistema de aquisição de dados

Montar o sistema de aquisição de dados, posicionar a máquina fotográfica na posição de interesse. Nos experimentos realizados, o posicionamento do sistema foi na frente da ST, como mostrado na Figura 22.



Figura 22 – Posição da máquina fotográfica durante um experimento

04- Início do experimento

Nesta etapa, com os ajustes realizados, inicia-se o experimento e, caso seja observado algum aumento ou redução de nível na ST, efetuam-se ligeiros ajustes nas válvulas de precisão ou nos rotâmetros para voltar ao nível de referência.

O início do transitório consiste na colocação do corante no tanque de boração e acionamento do misturador manualmente. A aquisição dos dados é feita através de fotografias, uma vez que o experimento é basicamente visual, e as variáveis de processo são monitoradas apenas para garantir que o regime continue estacionário, exceto pela adição do corante. Para as medidas foi utilizado o roteiro indicado na Tabela 03.

Tabela 03 - Roteiro de aquisição das medidas dos experimentos

Experimento				
Nível de Potência				
Concentração				
Volume Pressurizador				
Volume ST				
Diâmetro do Furo				
Medida	Hora	Vídeo	Fotos	Obsevação
1^a	Início			
2^a	0,5			
3^a	1,0			
4^a	1,5			
5^a	2,0			
6^a	2,5			
7^a	3,0			
8^a	3,5			
9^a	4,0			
10^a	4,5			
11^a	5,5			
12^a	6,0			
13^a	6,5			

Neste trabalho são apresentados 03 (três) experimentos, com o diâmetro do furo de surto igual a 1,0 cm na posição central.

Para a execução desses experimentos, foram tomados como referência três níveis de potência considerados no reator IRIS. Cada nível apresenta um volume e concentração

característicos. A Tabela 04* mostra esses dados e os correspondentes volumes na seção de testes (ST), considerando simetria de $\frac{1}{4}$ e escala volumétrica de 1/200. Foram realizados os experimentos A, B e C, e o diâmetro do furo de surto considerado foi de 10mm.

Tabela 04 – Dados das condições iniciais do pressurizador do IRIS e ST

Potência (%)	Concentração (ppm)	Pressurizador IRIS (m³)	Seção de Testes (litros)
0	1000	13,59	16,987
20	400	32,33	40,41
100	100	32,4	40,5

Para todos os experimentos foi considerada a seguinte vazão de operação:

$$V = 15 \text{ l/h (litros/hora)}$$

Os dados da Tabela 04 são baseados no fato de que o pressurizador do reator IRIS, exige um volume de água garantindo que os aquecedores fiquem completamente submersos, esse volume de água corresponde a 27m³ (CARELLI et al., 2004), para o reator operando a plena potência, ou seja 100%. A esse valor foi acrescentado, por razões de segurança mais 20%, resultando um volume inicial de líquido de 32,4m³, correspondendo a 42% do volume total. Uma vez definido um volume suficientemente seguro de água, a escolha óbvia de projeto é maximizar o volume de vapor, já que um grande volume de vapor fornece uma melhor resposta de atenuação das variações de pressão. Portanto, foi decidido que o volume de vapor seria de 44,75 m³, que corresponde a 58% do volume total do pressurizador. Pode-se observar na Tabela 04 que a elevação de potência de 0% (Quente Potência Zero – QPZ) para 100% (Quente Plena Potência), envolve uma movimentação de grande quantidade de água, ocorrendo uma diluição da concentração de boro (diminuição da concentração).

* Barroso, A.C.O., comunicação pessoal, IPEN/CNEN, 2009

3.3 Experimentos

Os dados característicos referentes aos experimentos realizados nesse trabalho, são mostrados a seguir na Tabela 05.

Tabela 05 – Dados dos experimentos realizados

E X P E R I M E N T O - A					
Potência (%)	Concentração (ppm)	Volume ST (l)	Volume TB (l)	Diâmetro Furo (mm)	Corante (cor)
100	100	40,5	100	10	Azul
E X P E R I M E N T O - B					
Potência (%)	Concentração (ppm)	Volume ST (l)	Volume TB (l)	Diâmetro Furo (mm)	Corante (cor)
20	400	40,4	100	10	Azul
E X P E R I M E N T O - C					
Potência (%)	Concentração (ppm)	Volume ST (l)	Volume TB (l)	Diâmetro Furo (mm)	Corante (cor)
0	1000	17,0	100	10	Azul

3.4 Modelo teórico

O modelo teórico que descreve os experimentos simulados na bancada experimental, (NARAIN, 2012), é descrito pelas equações:

$$V_1 \frac{dC_1}{dt} = Q[C_2 - C_1] \quad \mathbf{01}$$

$$V_2 \frac{dC_2}{dt} = Q[C_1 - C_2] \quad \mathbf{02}$$

Em que:

C_1 – Concentração na seção de testes

C_2 – Concentração no tanque de boração

V_1 – Volume na seção de testes

V_2 - Volume no tanque de boração

Q – Vazão na entrada e saída na seção de testes

As equações 01 e 02 podem ser reescritas na seguinte forma:

$$\frac{dC_1}{dt} = \frac{(C_2 - C_1)}{T_1} \quad \mathbf{03}$$

$$\frac{dC_2}{dt} = \frac{(C_1 - C_2)}{T_2} \quad \mathbf{04}$$

Em que: $T_1 = \frac{V_1}{Q}$ e

$$T_2 = \frac{V_2}{Q}$$

A solução do sistema formado pelas equações **01** e **02** é:

$$C_1(t) = C_2(0) \left(\frac{T_2}{T_1 + T_2} \right) \left[1 - e^{-\left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right) t} \right] \quad \mathbf{05}$$

e

$$C_2(t) = C_2(0) \left[\frac{T_2}{T_1 + T_2} + \frac{T_1}{T_1 + T_2} e^{-\left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right) t} \right] \quad \mathbf{06}$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

São apresentados os resultados experimentais do processo de homogeneização do boro na seção de testes e comparados com os resultados obtidos do modelo teórico.

4.1 Resultados experimentais

4.1.1 Experimento A - evolução da pluma de corante no tempo

A evolução da pluma formada pelo corante, ao longo do tempo, no experimento A, está mostrada nas Figuras de 23 a 32. Pode-se observar que, no cilindro menor da ST, praticamente não se observa o espalhamento da pluma. O espalhamento pode ser melhor observado na parte superior, devido ao fato de que a velocidade na entrada da ST ser maior, jogando o jato de pluma para cima, o que favorece uma melhor homogeneização na parte superior como mostra a Figura 24, onde se percebe a cor azulada, porém ainda com pouca intensidade, justificada pela baixa concentração (100ppm). O jato da pluma na entrada da ST é perfeitamente visível.



Figura 23 – Evolução da pluma ao longo do tempo (início) – Exp. A



Figura 24 – Evolução da pluma ao longo do tempo (0,5 h) – Exp. A

Decorrida uma hora do início do transitório, Figura 25, pode-se observar que a tendência da homogeneização será mais rápida na parte superior da ST, e isso; do ponto de vista de segurança do reator nuclear IRIS (formato do pressurizador), é muito importante, pois no caso de um *outsurge*, garante-se uma concentração de boro próxima à concentração do circuito primário.



Figura 25 – Evolução da pluma ao longo do tempo (1,0 h) – Exp. A

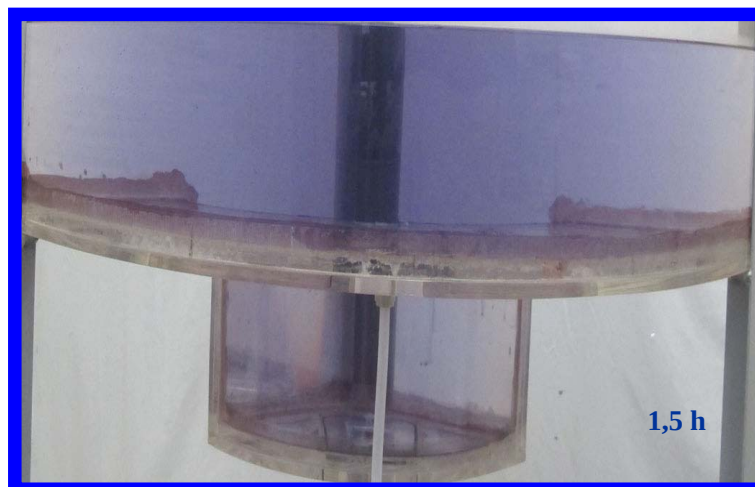


Figura 26 – Evolução da pluma ao longo do tempo (1,5 h) – Exp. A

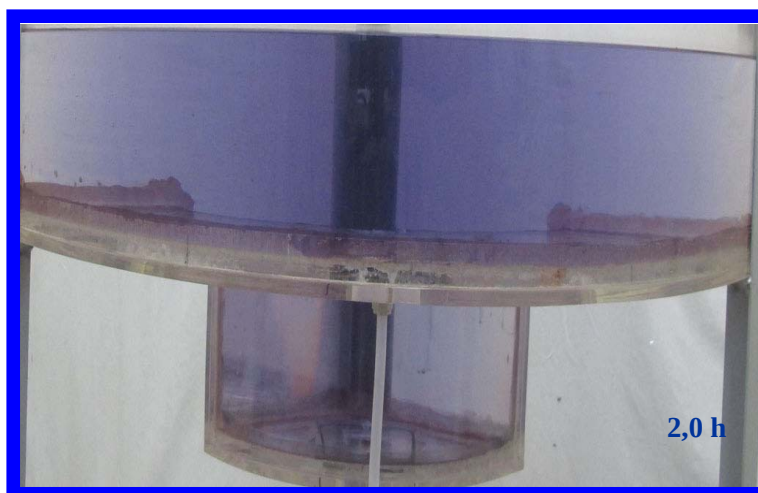


Figura 27– Evolução da pluma ao longo do tempo (2,0 h) – Exp. A

A tendência de uma homogeneização na região superior da ST, continua sendo observada nas Figuras 26, 27, 28 e 29 e, já se percebe também que a região inferior apresenta uma coloração maior.

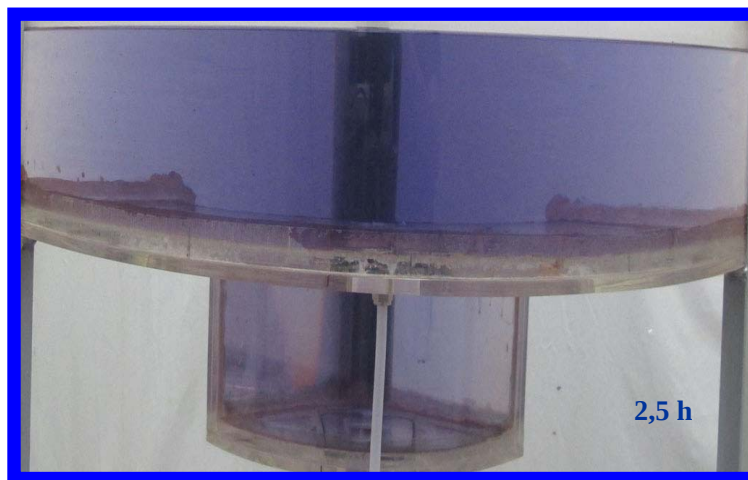


Figura 28 – Evolução da pluma ao longo do tempo (2,5 h) – Exp. A



Figura 29 – Evolução da pluma ao longo do tempo (3,0 h) – Exp. A

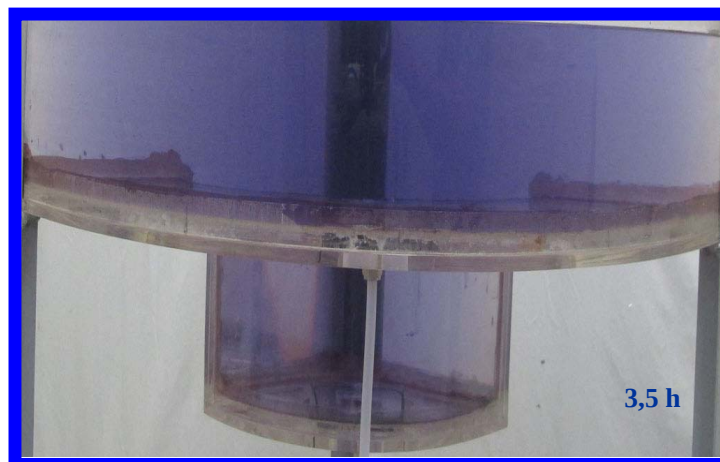


Figura 30 – Evolução da pluma ao longo do tempo (3,5 h) – Exp. A

Para $t=3,5$ h, Figura 30, já não se percebe diferenças entre as regiões superior e inferior da ST. O mesmo acontece nas medidas seguintes, Figuras 31 e 32 para $t=4,0$ h.



Figura 31– Evolução da pluma ao longo do tempo (4,0 h) – Exp. A

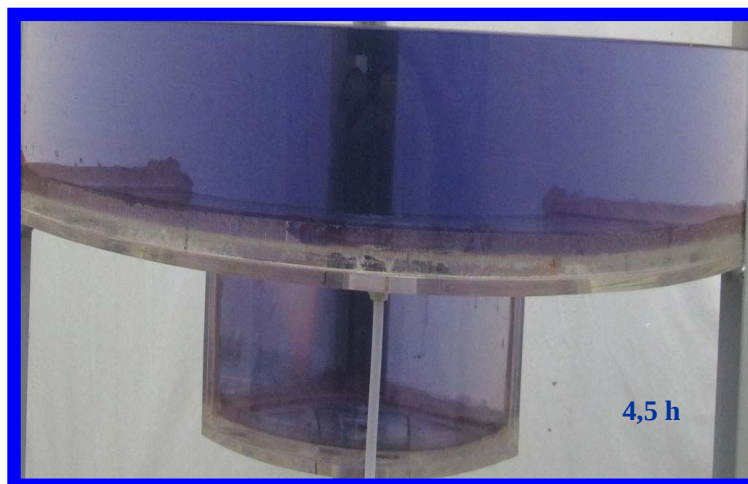


Figura 32 – Evolução da pluma ao longo do tempo (4,5 h) – Exp. A

As Figuras 33 e 34 são as amostras recolhidas no final do experimento ($t=4,5$ h), para serem fotografadas. Como se observa, praticamente não existe diferença na intensidade da cor do corante entre as duas amostras, sugerindo que o sistema apresenta a mesma concentração, isto é, a concentração na seção de testes é igual ao do tanque de boração.



Figura 33– Amostra da ST (4,5 h) – Exp. A



Figura 34 – Amostra do TB (4,5 h) – Exp. A

Para os experimentos B e C, as figuras mostrando a evolução da pluma de corante no tempo estão nos arquivos em PDF no CD anexo a esse trabalho.

4.2 Processamento digital das imagens

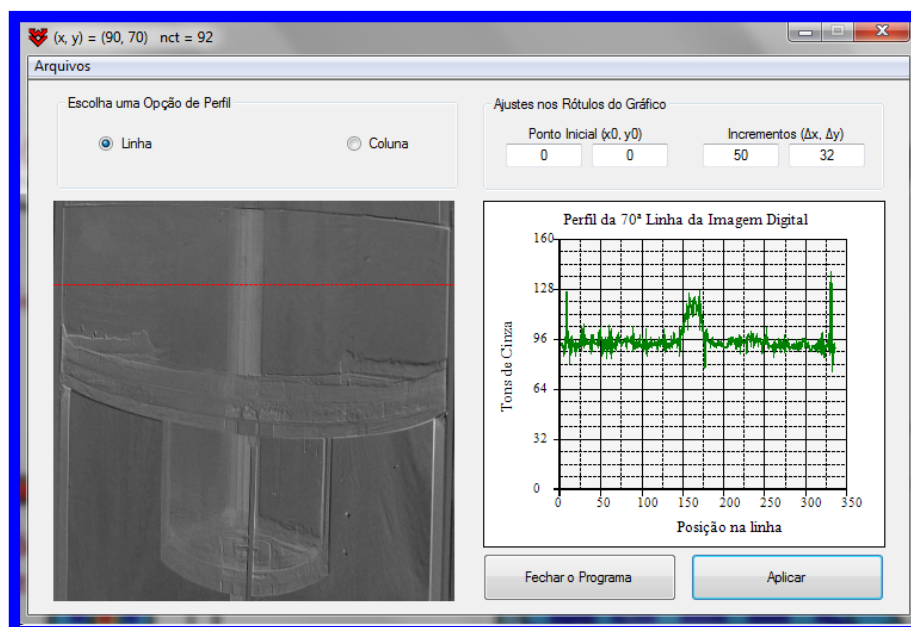
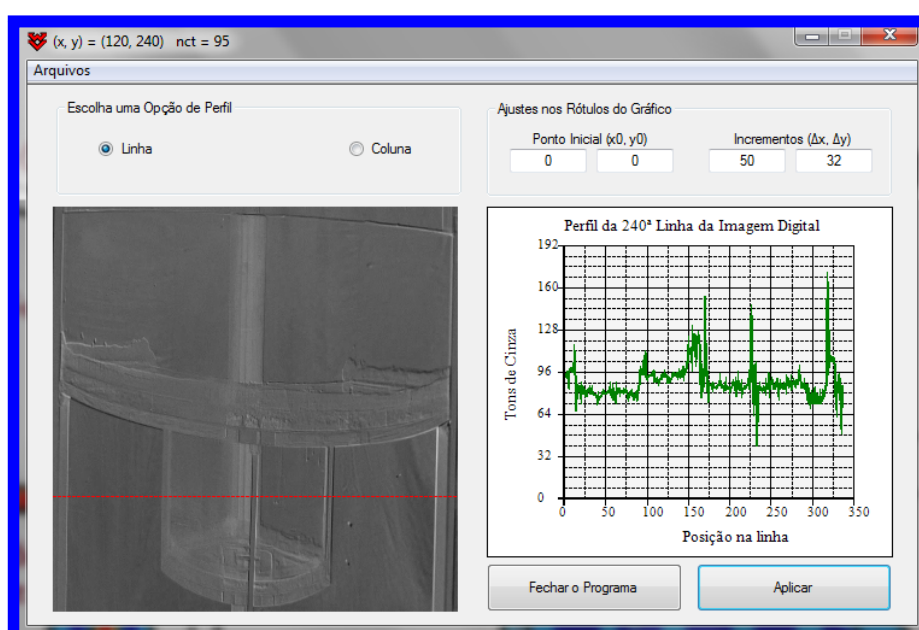
Para o processamento digital das imagens a fim de quantificar o valor da concentração (tons de cinza) e o tempo médio de homogeneização (T_h) do corante na seção de testes, foi utilizado o programa DIP (Digital Image Processing), em linguagem C++, utilizando o tipo de projeto Windows Form do Microsoft Visual Studio .NET 2003, desenvolvido pelo Grupo de Dosimetria Numérica (GDN) (VIEIRA; LIMA, 2009), (GONZALEZ e WOODS, 2010).

. Basicamente o processamento consistiu nas seguintes etapas:

- a-) Recorte das imagens coloridas obtidas nos experimentos (etapa realizada com o programa Adobe Photoshop CS 8 (1045-1318-0129-0510-2787-1349), com objetivo de eliminar áreas que não possuem informações, retirando assim os ruídos que interferem na leitura do resultado final.
- b-) Transformação das imagens coloridas em cor cinza (também realizada com o Photoshop CS 8, para posterior utilização no programa DIP.
- c-) Utilização do programa DIP (Menu → Visualizações → Perfis de Tons Cinza).

As Figuras de 35 à 54 mostram as imagens obtidas após o processamento com o programa DIP. Pode-se observar que em cada figura, são mostrados os perfis das linhas 70 e 240 (região superior e inferior da seção de testes respectivamente). Em cada linha foram lidos 10 pontos para os níveis de tons da cor cinza, obtendo-se um valor médio para a concentração para cada região e em seguida a média na ST. As leituras para os experimentos A, B e C, estão mostradas no Apêndice 02.

4.2.1 Experimento A

**Figura 35** – Imagem 1ª medida região superior - Exp. A (início)**Figura 36** – Imagem 1ª medida região inferior - Exp. A (início)

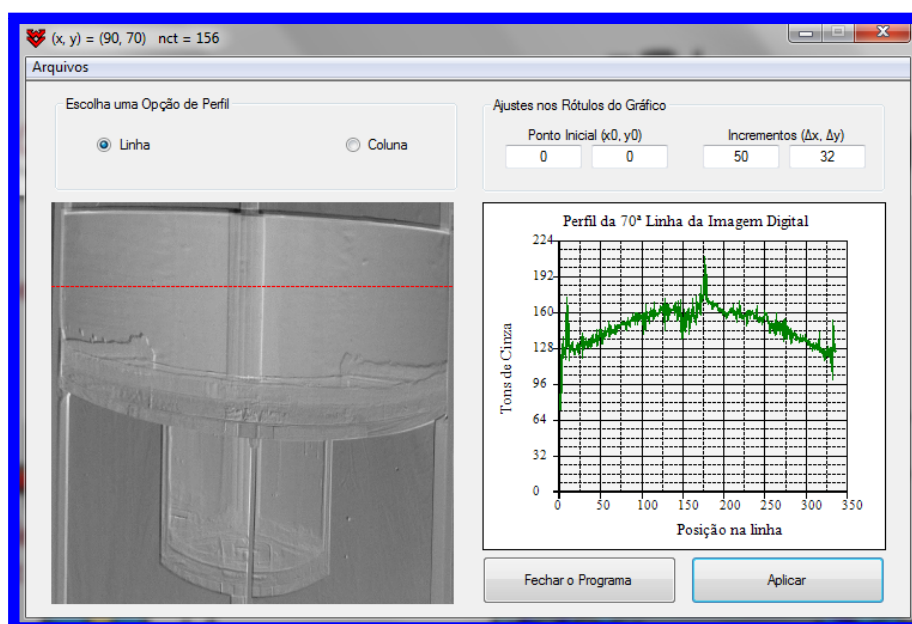


Figura 37 – Imagem 2ª medida região superior - Exp. A (0,5h)

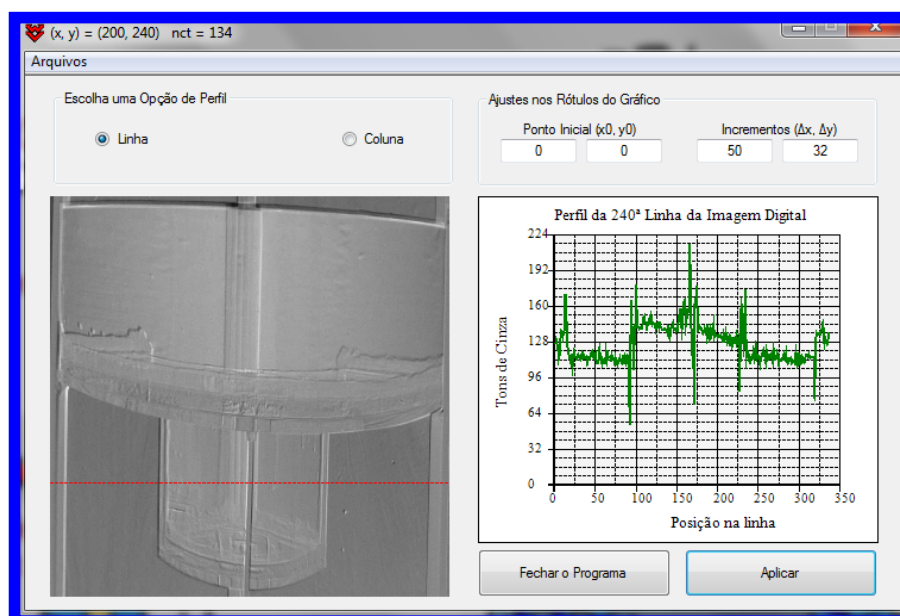


Figura 38 – Imagem 2ª medida região inferior - Exp. A (0,5 h)

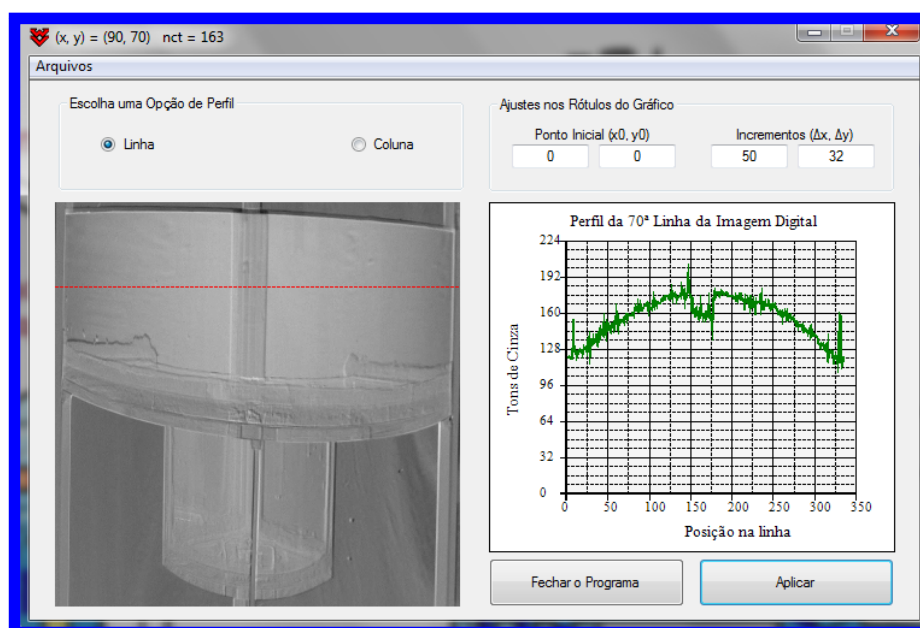


Figura 39 – Imagem 3ª medida região superior - Exp. A (1,0 h)

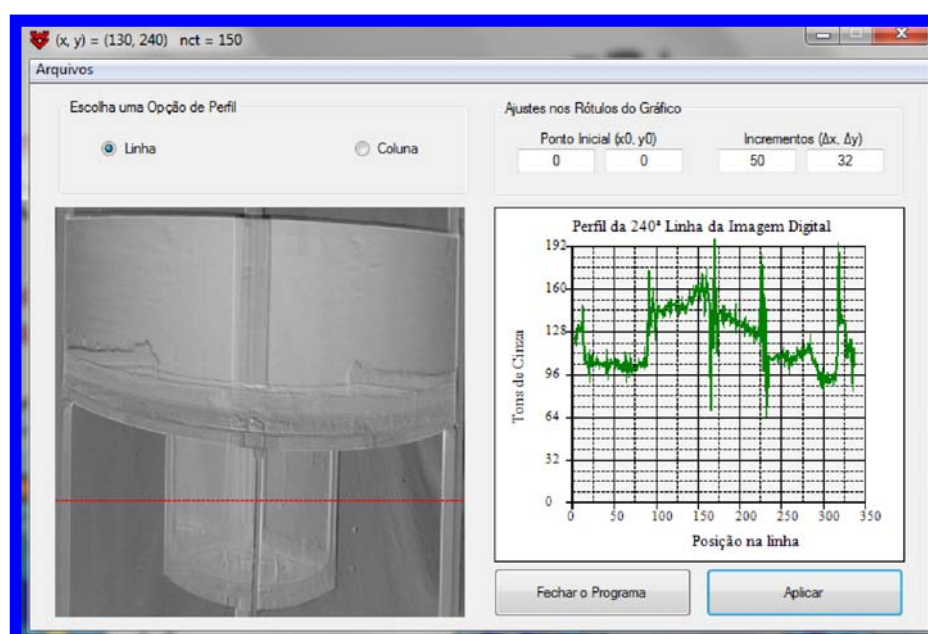


Figura 40 – Imagem 3ª medida região inferior - Exp. A (1,0 h)

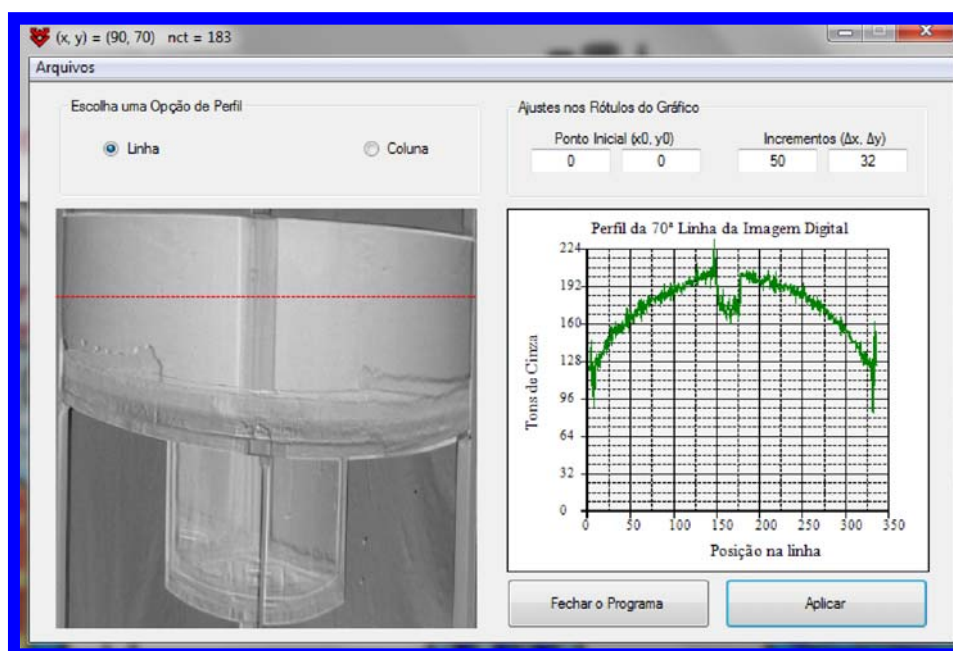


Figura 41 – Imagem 4ª medida região superior - Exp. A (1,5 h)

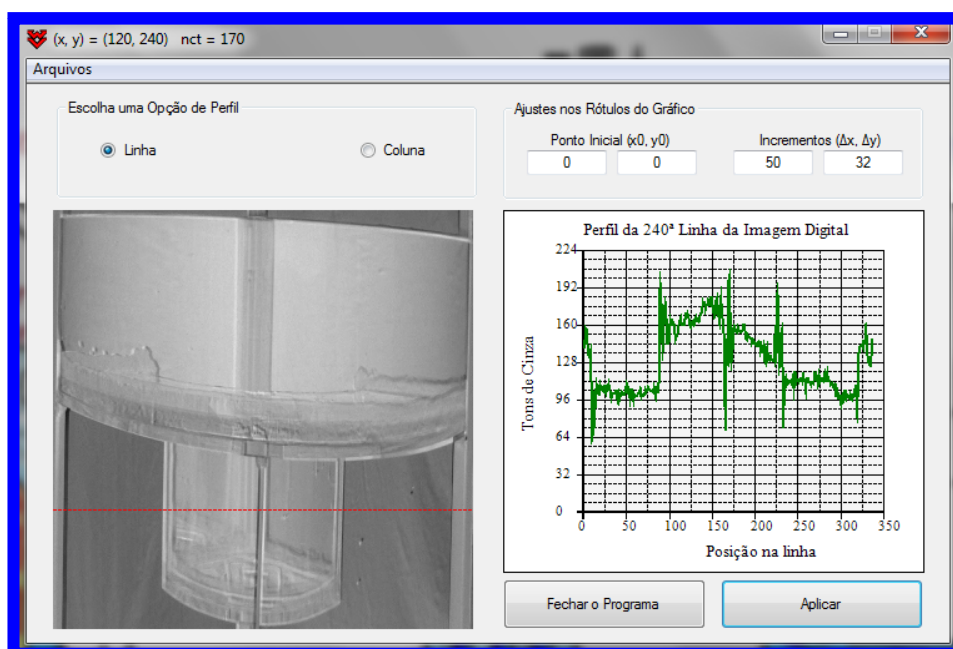


Figura 42 – Imagem 4ª medida região inferior - Exp. A (1,5 h)

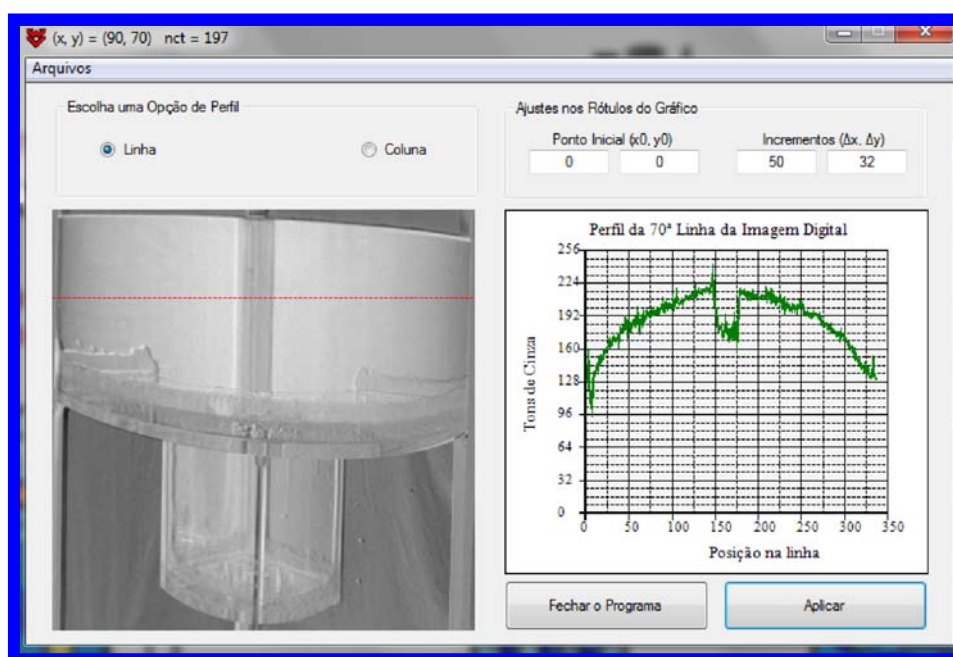


Figura 43 – Imagem 5ª medida região superior - Exp. A (2,0 h)

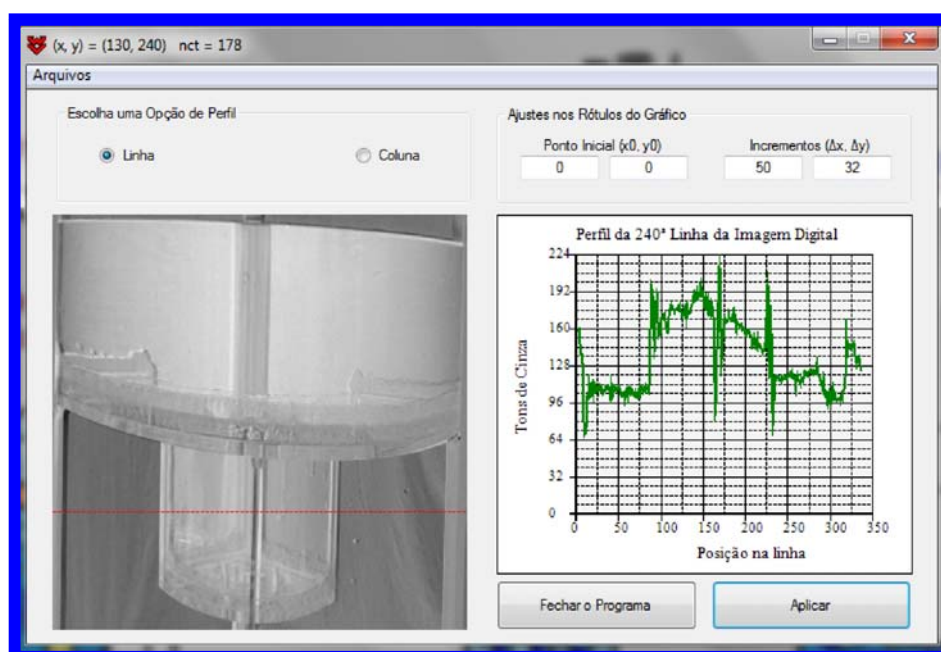


Figura 44 – Imagem 5ª medida região inferior - Exp. A (2,0 h)

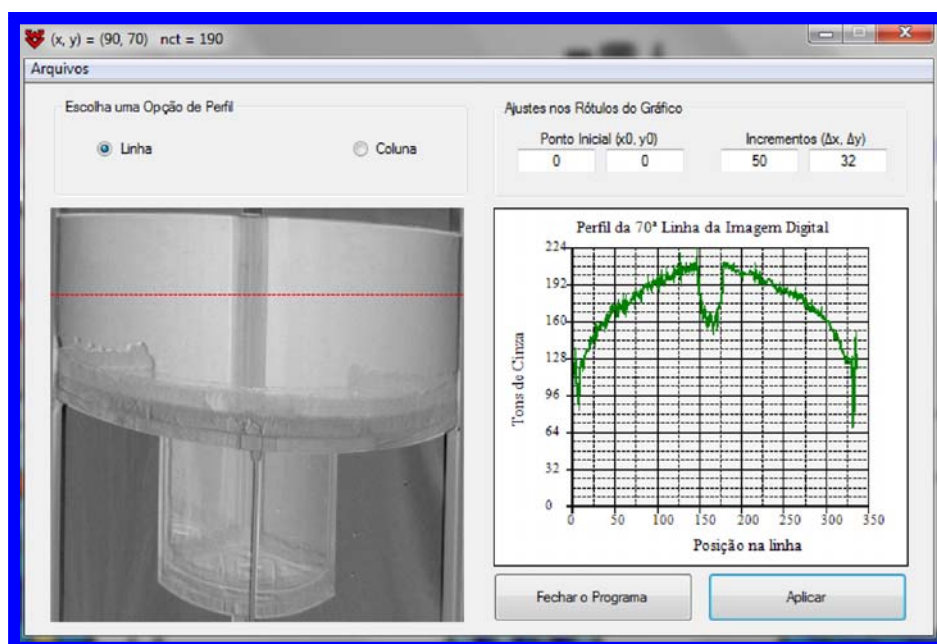


Figura 45 – Imagem 6ª medida região superior - Exp. A (2,5 h)

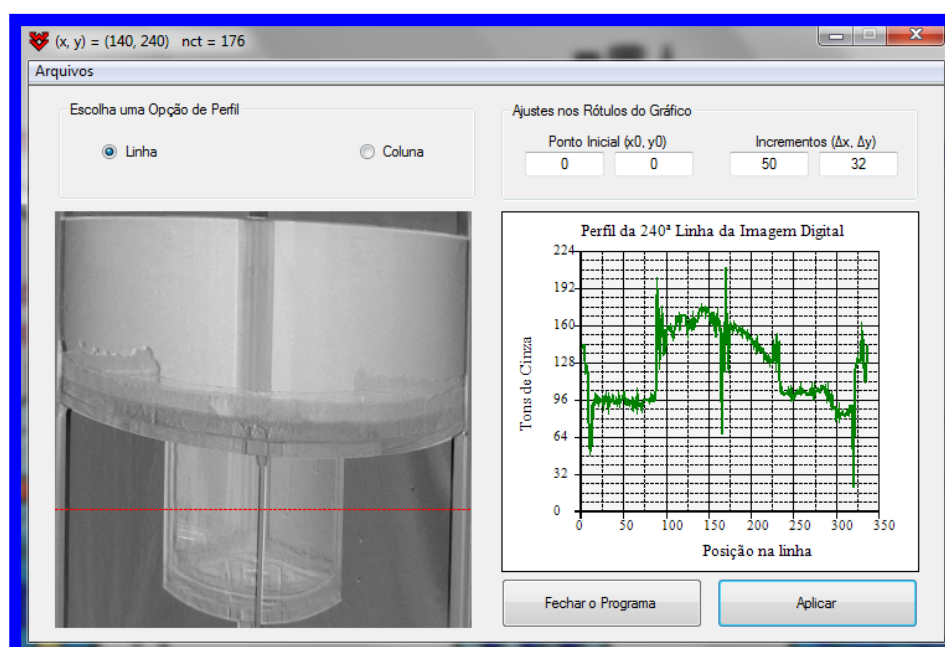


Figura 46 – Imagem 6ª medida região inferior - Exp. A (2,5 h)

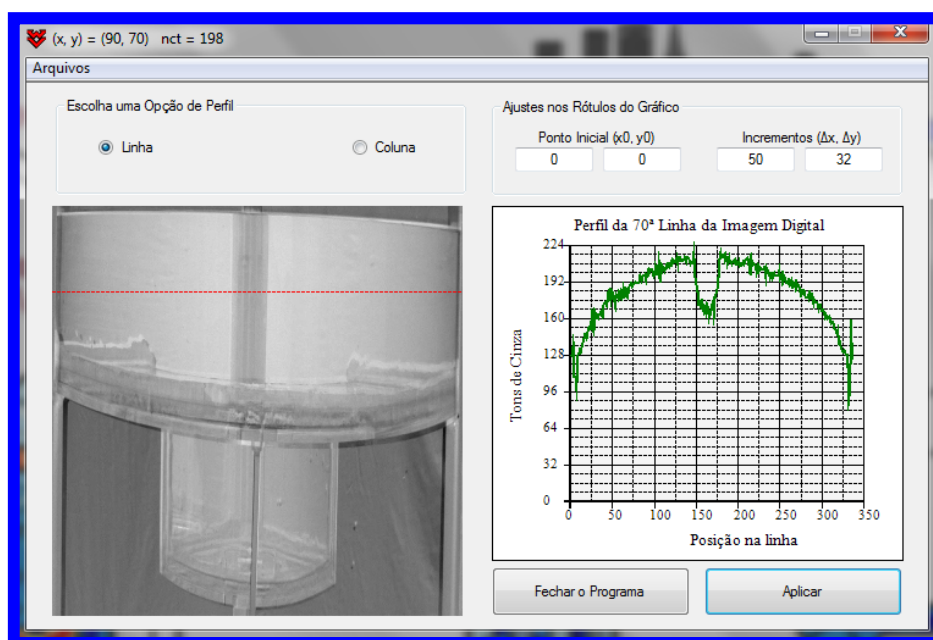


Figura 47 – Imagem 7ª medida região superior - Exp. A (3,0 h)

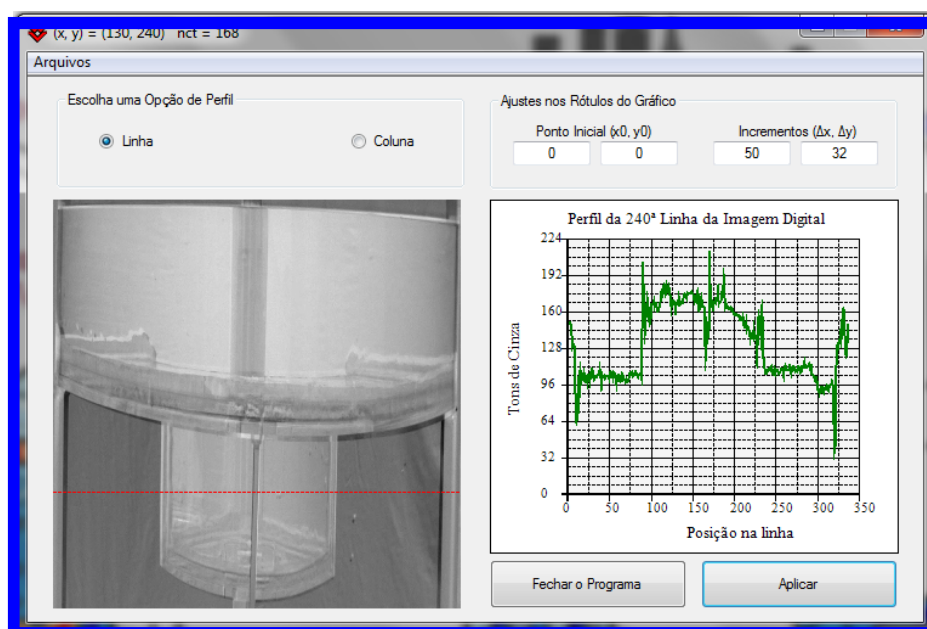


Figura 48 – Imagem 7ª medida região inferior - Exp. A (3,0 h)

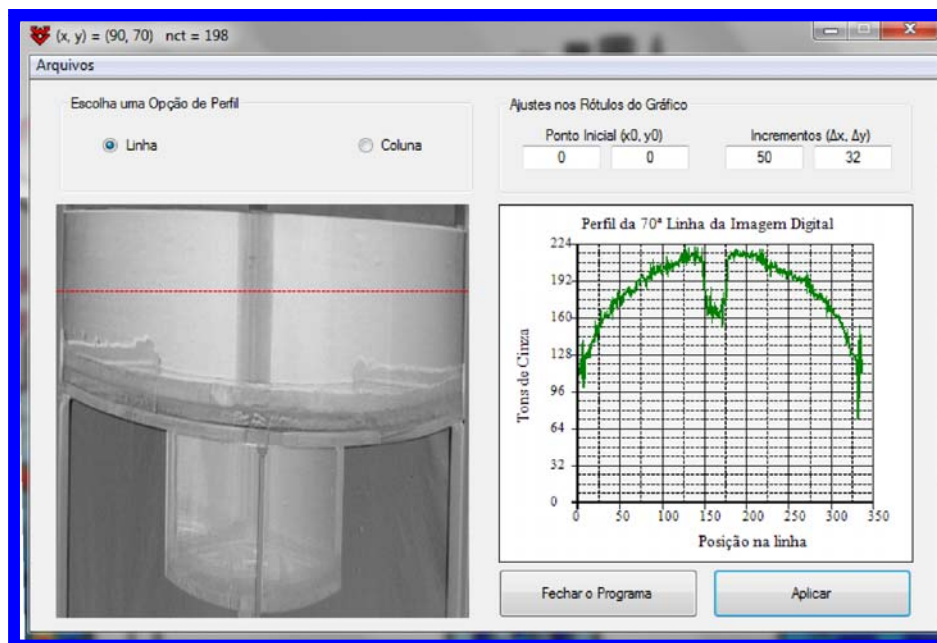


Figura 49 – Imagem 8ª medida região superior - Exp. A (3,5 h)

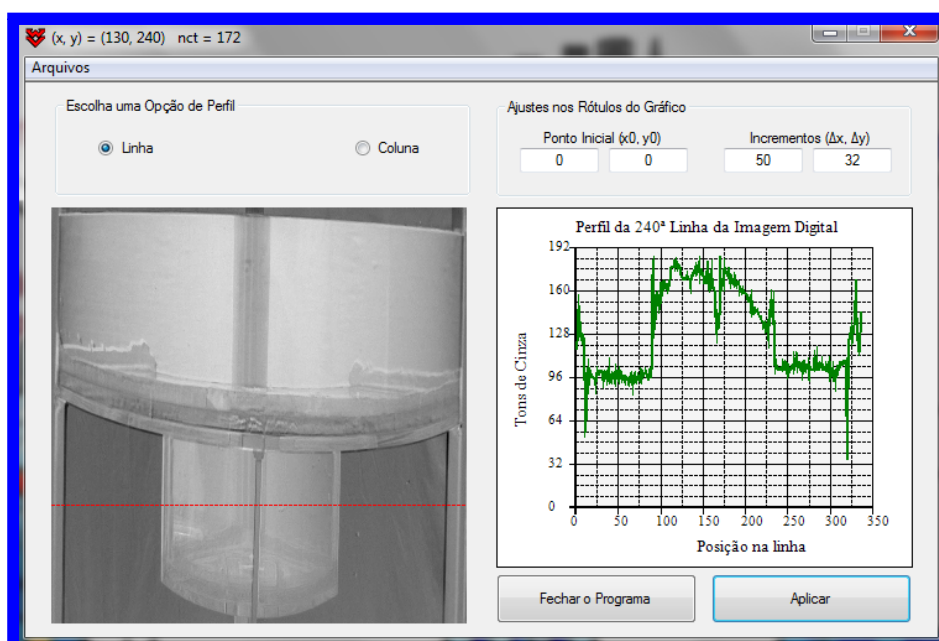


Figura 50 – Imagem 8ª medida região inferior - Exp. A (3,5 h)

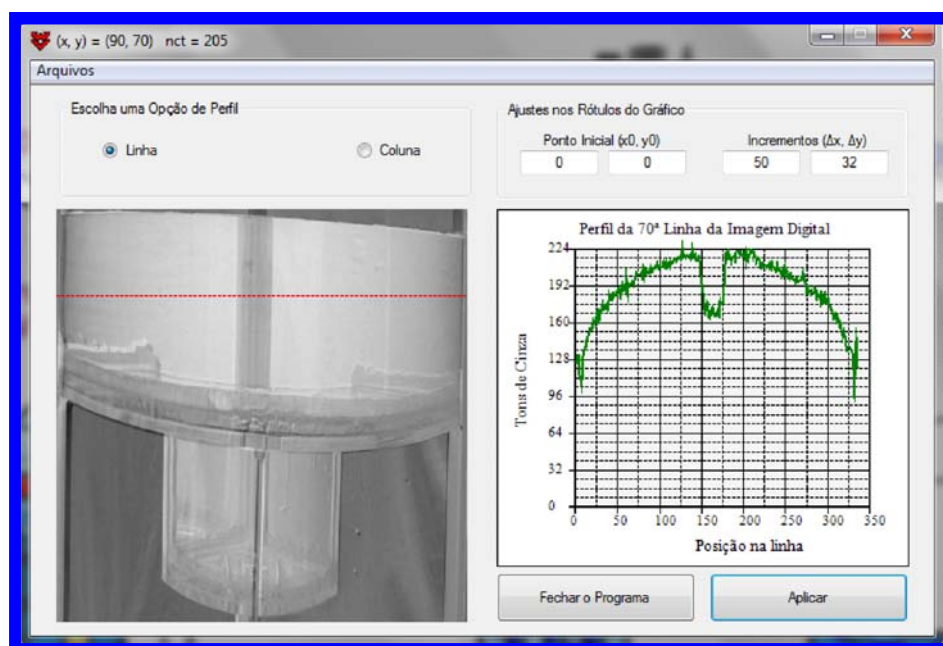


Figura 51 – Imagem 9ª medida região superior - Exp. A (4,0 h)

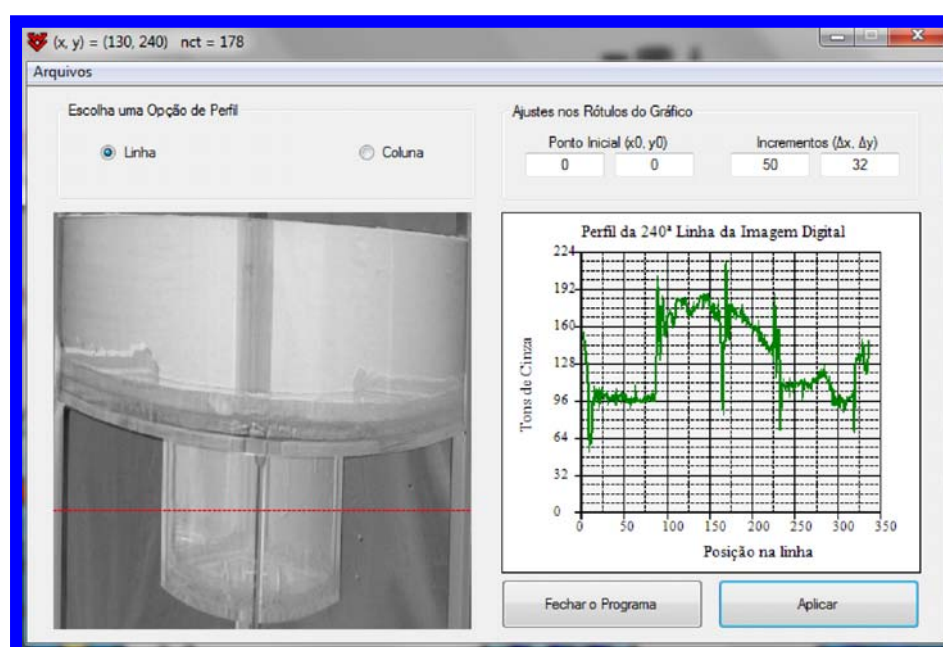


Figura 52 – Imagem 9ª medida região inferior - Exp. A (4,0 h)

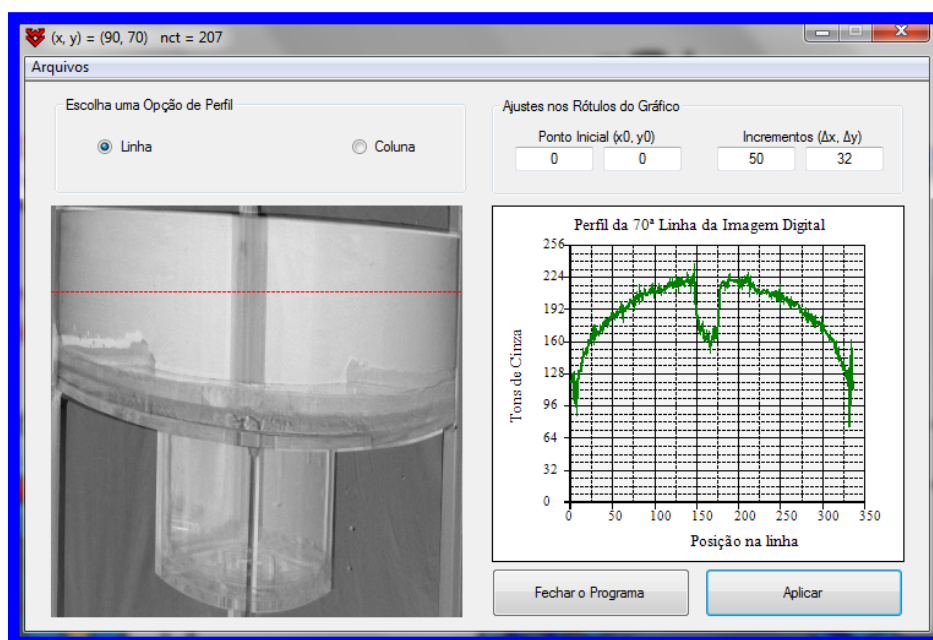


Figura 53 – Imagem 10ª medida região superior - Exp. A (4,5 h)

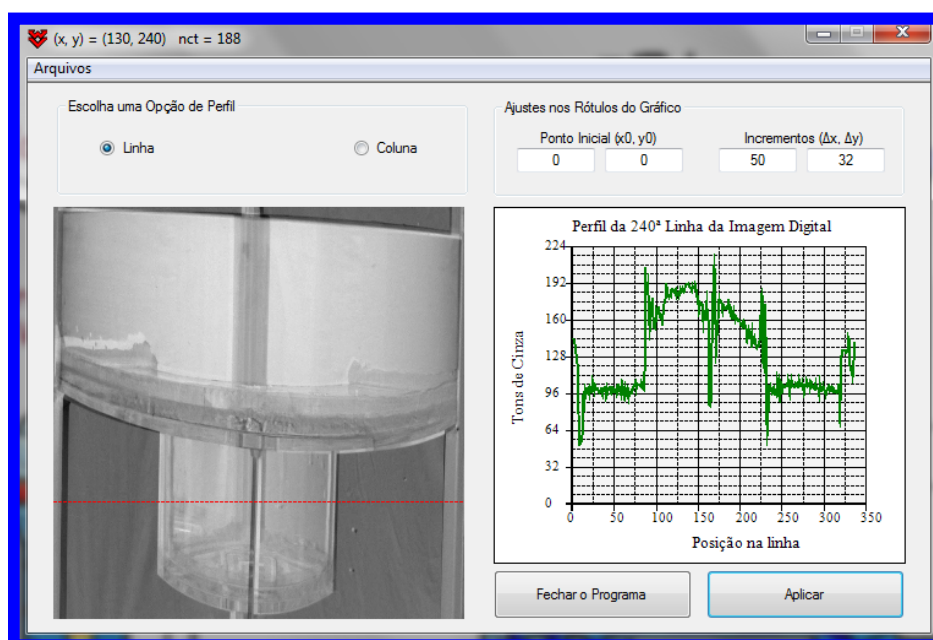


Figura 54 – Imagem 10ª medida região inferior - Exp. A (4,5 h)

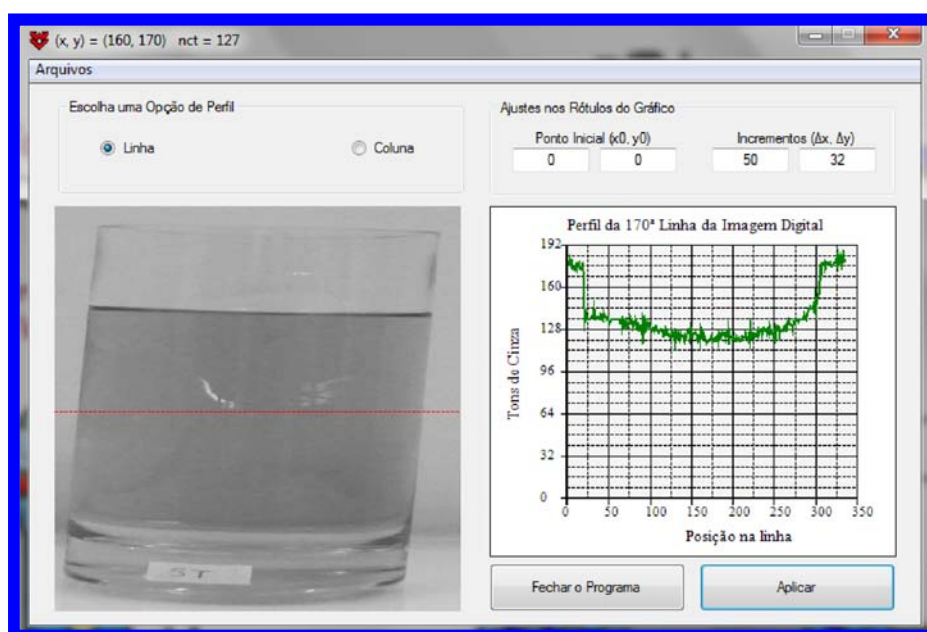


Figura 55 – Amostra seção de testes – Exp. A (4,5 h)

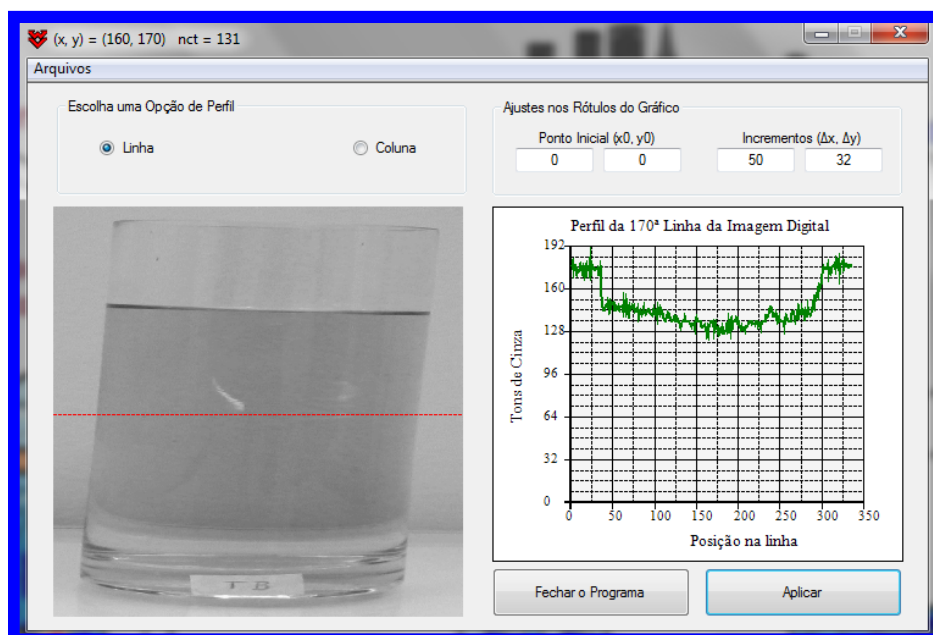


Figura 56 – Amostra tanque de boração – Exp. A (4,5 h)

A Tabela 06 mostra um resumo dos resultados obtidos do processamento das imagens.

Tabela 06 – Resultados do experimento A

Tempo (h)	Tons Cinza	Tons Cinza/N	Observação
Início	91,15	0,490	Aproximadamente 0,03h
0,5	144,2	0,776	
1,0	149,85	0,807	N = 185,8
1,5	167,85	0,903	
2,0	182,2	0,981	
2,5	168,3	0,906	
3,0	178,4	0,960	
3,5	178,8	0,962	
4,0	184,25	0,992	
4,5	185,8	1,000	

Os dados mostrados na Tabela 06 mostram os valores médios para a ST (coluna 2) e os valores normalizados para o maior valor médio (coluna 3, N=185,8), obtidos a partir do processamento digital das imagens com o programa DIP.

Com os dados obtidos, traçou-se o gráfico mostrado na Figura 57. Nele, pode-se observar o comportamento exponencial da curva obtida e que, aproximadamente a partir do tempo igual a 2,0 horas, o sistema já apresenta uma tendência ao equilíbrio, como mostra o comportamento assintótico da curva.

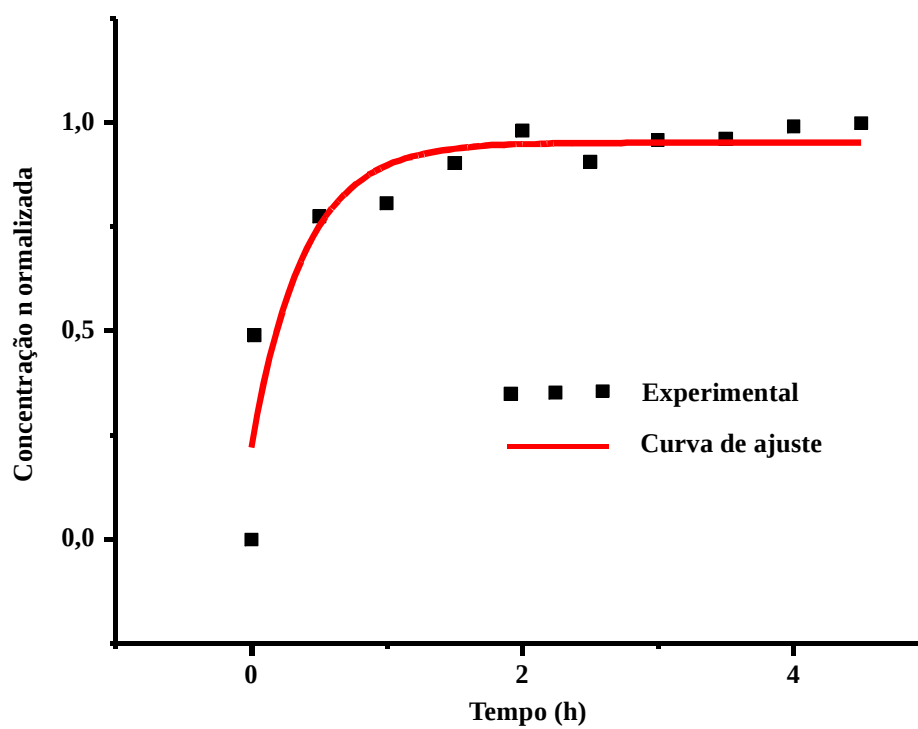


Figura 57 – Gráfico concentração normalizada x tempo – Experimento A

Os resultados dos processamentos das imagens para os experimentos B e C, estão mostrados nas Tabelas 07 e 08. As figuras correspondentes aos processamentos das imagens estão em arquivos PDF no CD anexo a esse trabalho.

Tabela 07 – Resultados do experimento B

Tempo (h)	Tons Cinza	Tons Cinza/N	Observação
0,083	130,5	0,636	N=205,2
0,166	148,8	0,725	
0,250	162,7	0,793	
0,333	181,1	0,881	
0,500	174,1	0,849	
1,000	190,1	0,927	
1,500	201,9	0,984	
2,500	205,0	0,999	
3,000	203,2	0,976	
3,500	205,2	1,000	

Com os dados da Tabela 07, traça-se o gráfico mostrado na Figura 58. Nele, pode-se observar também o comportamento exponencial da curva. No tempo de, aproximadamente, 2,0 horas, a concentração tende ao equilíbrio.

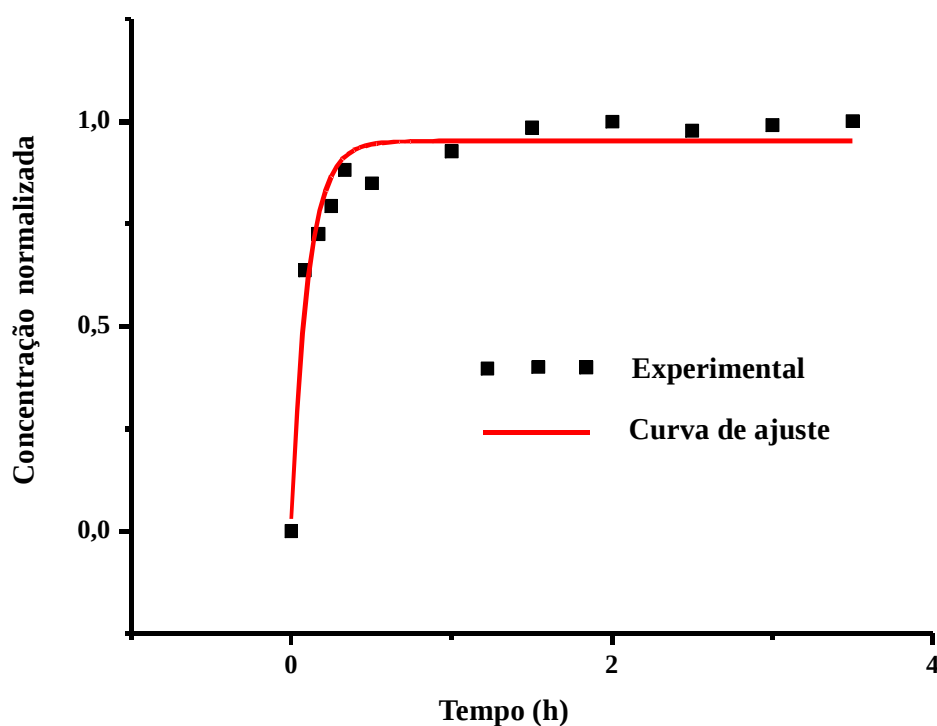


Figura 58 – Gráfico concentração normalizada x tempo – Experimento B

Tabela 08 – Resultados do experimento C

Tempo (h)	Tons Cinza	Tons Cinza/N	Observação
0,08	143,95	0,634	N=227,15
0,17	174,85	0,770	
0,25	182,15	0,802	
0,33	192,65	0,848	
0,50	222,7	0,980	
1,00	219,9	0,968	
1,50	227,15	1,000	
2,00	225,9	0,994	
2,50	224,75	0,989	
3,00	226,35	0,996	

Com os dados da Tabela 08, traçou-se o gráfico do experimento C mostrado na Figura 59.

Observa-se novamente um comportamento semelhante aos experimentos A e B.

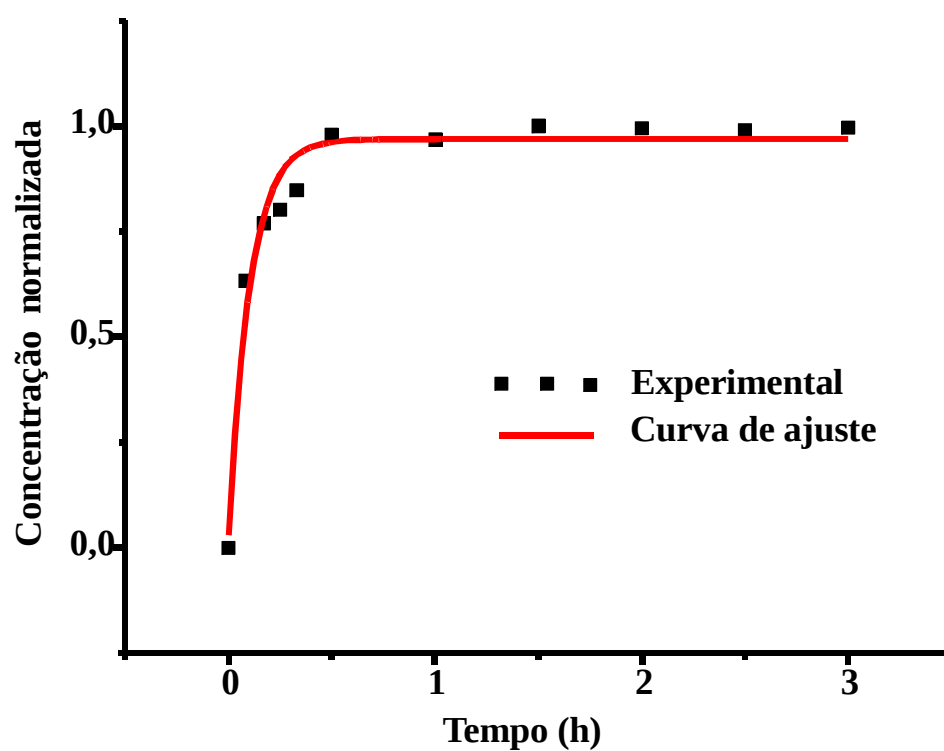


Figura 59 – Gráfico concentração normalizada x tempo - Experimento C

4.3 Resultados teóricos

4.3.1 Modelo teórico

As Figuras 60 a 65 mostram as curvas obtidas com as equações **05** e **06** do modelo teórico, para os experimentos A, B, C. Pode-se notar que, em todos os experimentos simulados, a concentração tende para um valor de equilíbrio, o que concorda com o comportamento das curvas obtidas com as medidas experimentais. As simulações foram realizadas através do código MATLAB 7.6.0.

Deve-se levar em consideração que esse é um modelo simplificado, e que não representa verdadeiramente o que acontece na seção de testes. O valor obtido por esse modelo, é um valor médio, não levando em consideração os diferentes fenômenos que acontecem nas regiões inferior e superior da ST.

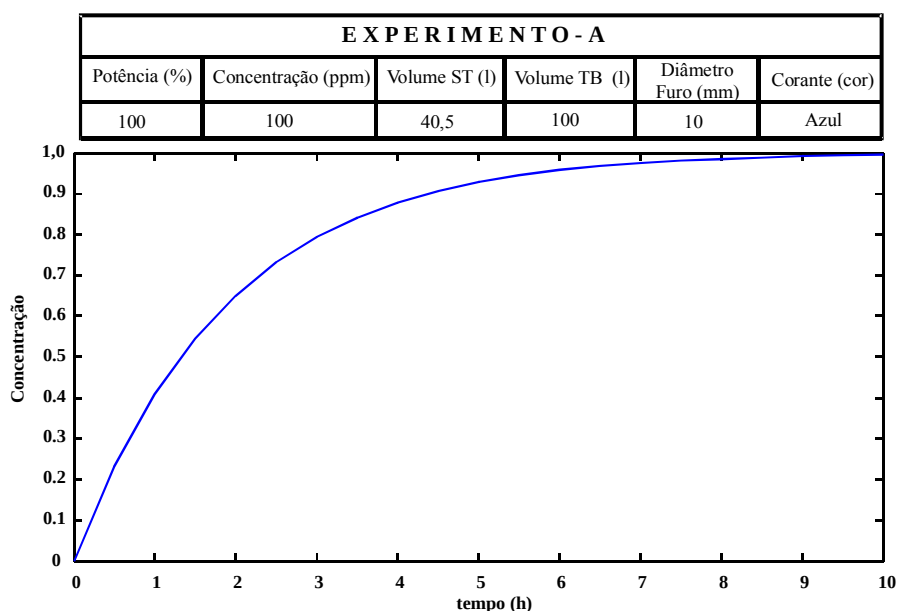


Figura 60 – Concentração normalizada na ST em função do tempo – Exp. A

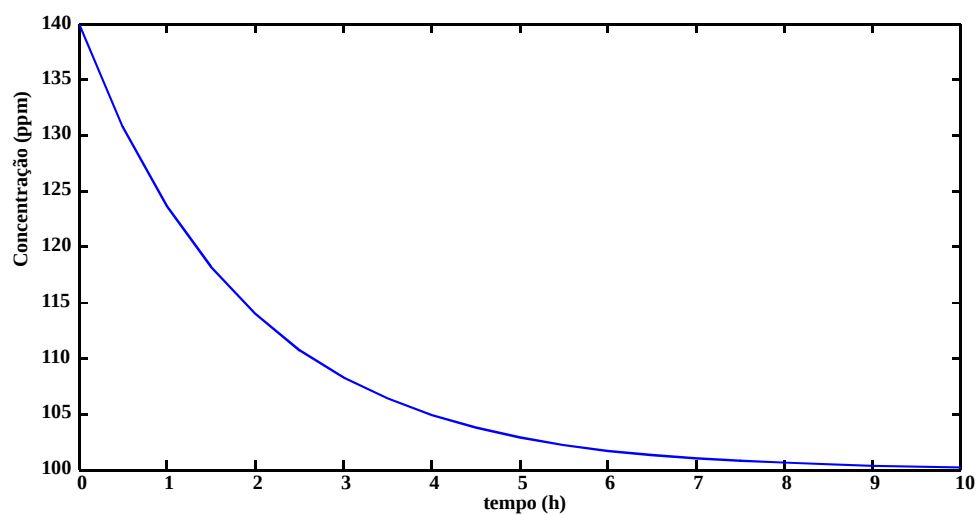


Figura 61 – Concentração no TB em função do tempo – Exp. A

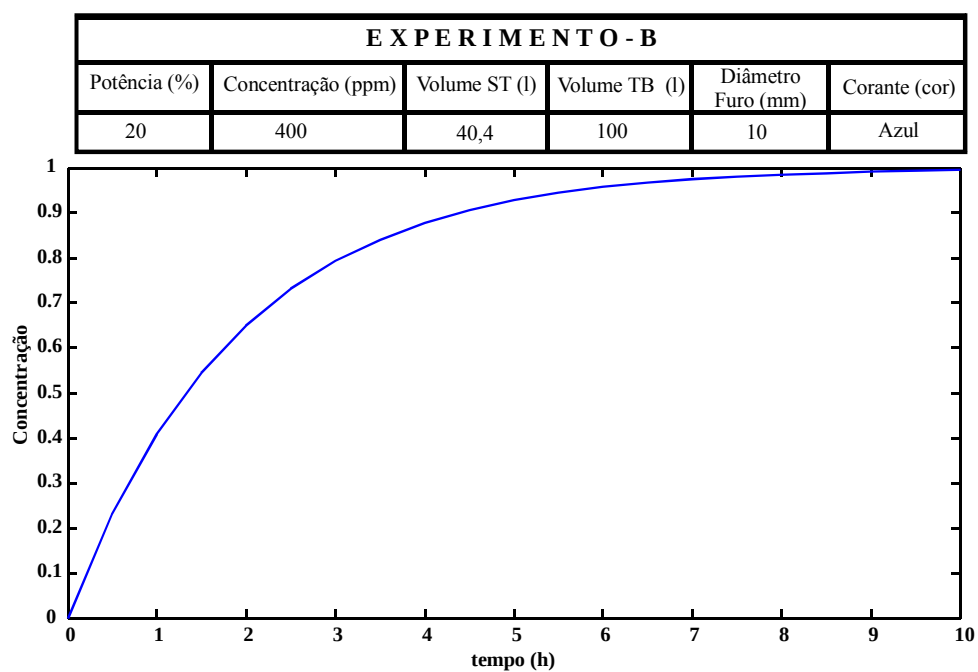


Figura 62 – Concentração normalizada na ST em função do tempo – Exp. B

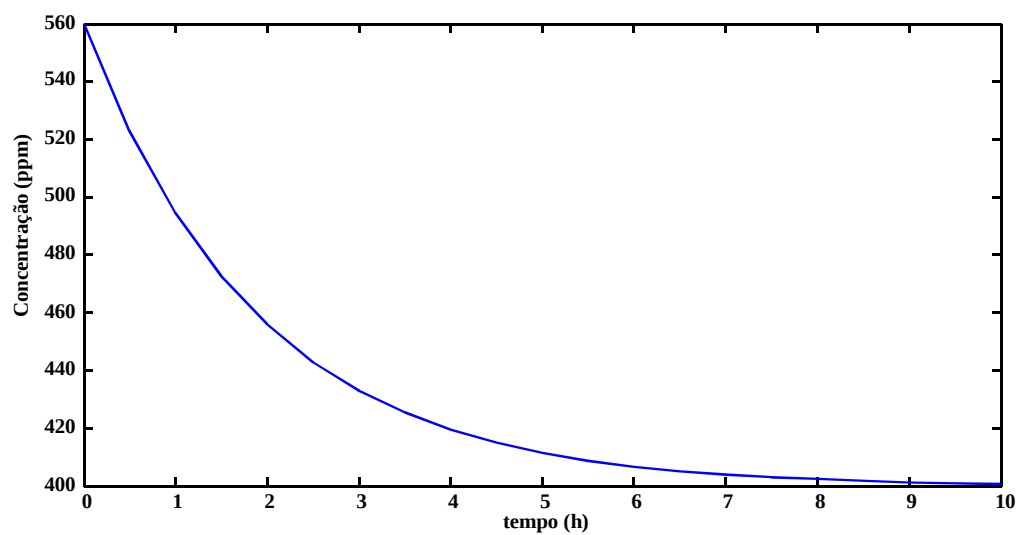


Figura 63 – Concentração no TB em função do tempo – Exp. B

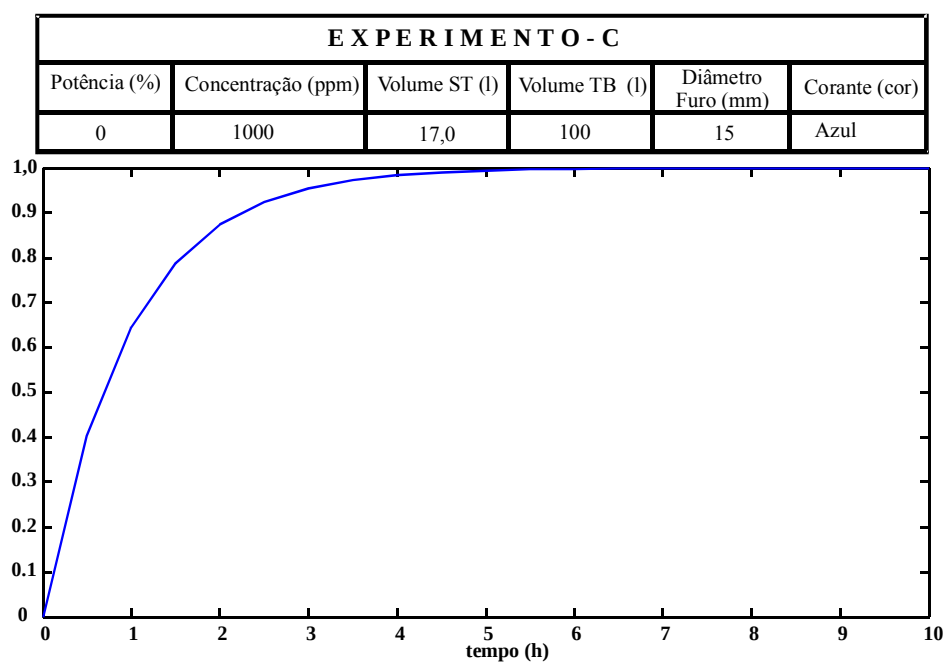


Figura 64 – Concentração normalizada na ST em função do tempo – Exp. C

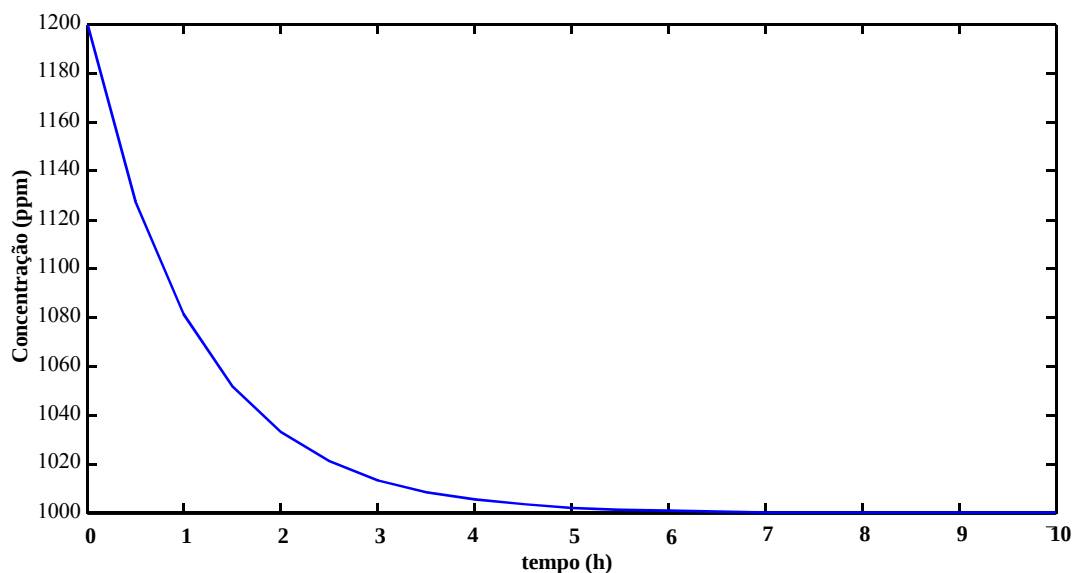


Figura 65 – Concentração no TB em função do tempo – Exp. C

4.4 Validação dos resultados

Os resultados obtidos da simulação numérica com o modelo teórico, quando comparados com os resultados dos ensaios experimentais, apresentam uma boa concordância tanto do ponto de vista qualitativo quanto quantitativo, considerando que o modelo teórico utilizado calcula um valor médio para o valor da concentração na seção de testes. Pode-se notar que as características das curvas obtidas tem o mesmo comportamento ao longo do tempo. Observa-se nos gráficos das Figuras 66, 67 e 68 dos três experimentos realizados (A, B e C), que o tempo médio de homogeneização no sistema, foi em torno de 2 horas ($T_h = 2h$).

É importante observar que as medidas realizadas para a obtenção das imagens digitais coloridas, apresentaram algumas falhas que podem ser corrigidas para evitar ruídos nas fotos. Essas falhas interferem diretamente quando se realiza o processamento das imagens digitais, mascarando os resultados.

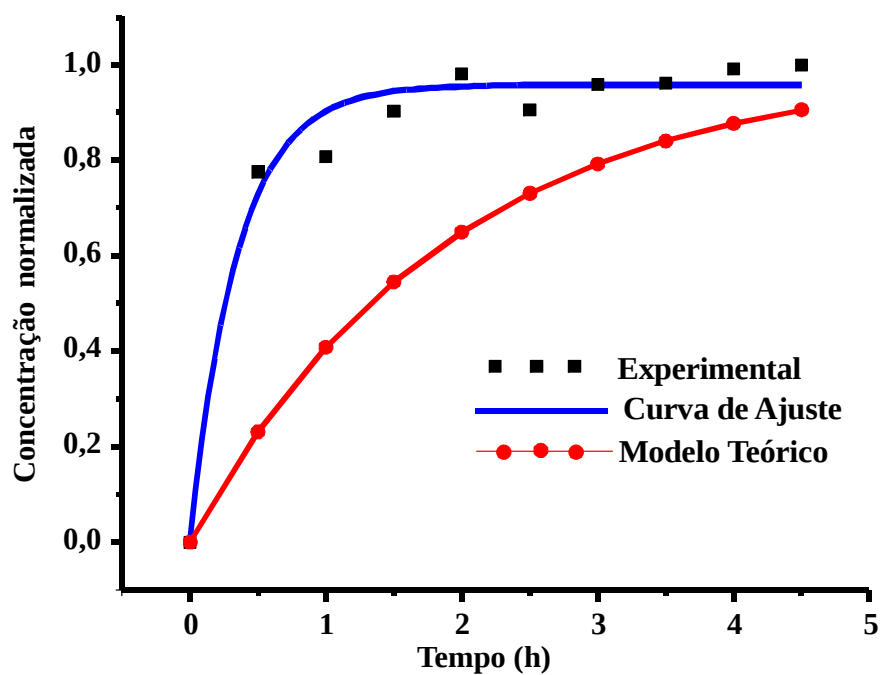


Figura 66 – Concentração normalizada x tempo - Experimento A

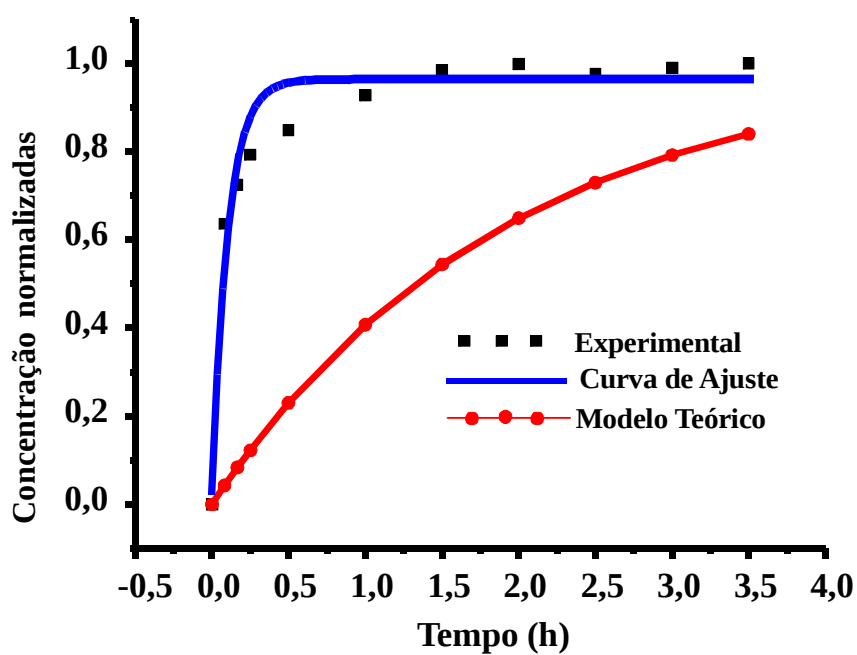


Figura 67 – Concentração normalizada x tempo - Experimento B

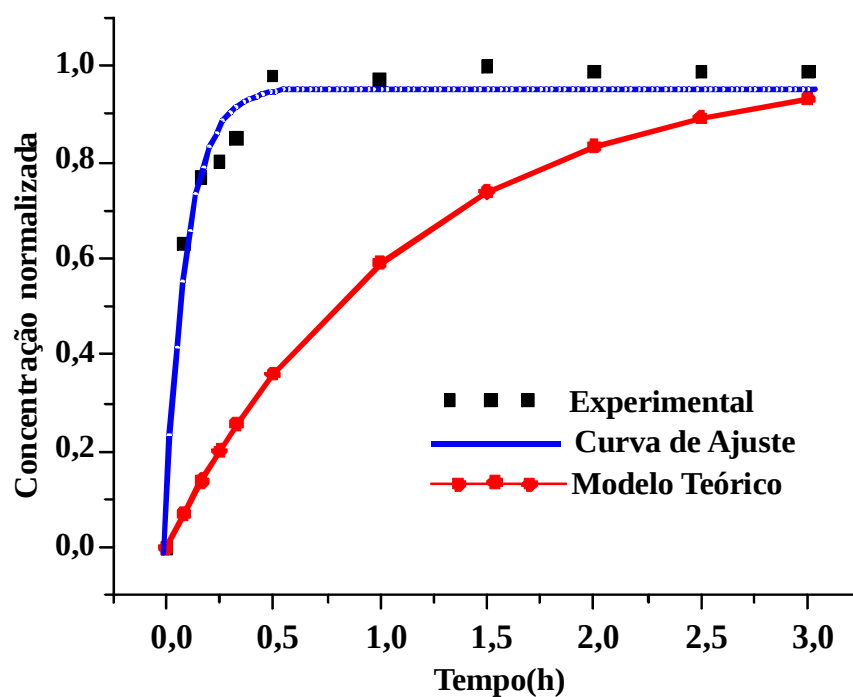


Figura 68 – Concentração normalizada x tempo - Experimento C

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Os resultados obtidos experimentalmente apresentaram, do ponto de vista qualitativo e quantitativo, uma boa concordância com os do modelo teórico, uma vez que, em ambas as curvas (experimental e teórica) apresentaram o mesmo comportamento assintótico. O tempo médio de homogeneização do corante no sistema ocorreu em torno de duas horas para os três experimentos realizados.

Como sugestão de trabalhos futuros, propõe-se:

- Realização de novos experimentos, fazendo-se variar a posição e o diâmetro do orifício de surto, e o estudo da influência desses efeitos no processo de homogeneização do corante na seção de testes.
- Simular os experimentos realizados utilizando técnicas de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD), códigos ANSYS FLUENT ou CFX e comparar com os resultados experimentais obtidos na seção de testes.
- Aprimorar o sistema de aquisição de dados, objetivando minimizar os ruídos durante a realização dos experimentos, inerentes à bancada experimental utilizada.

A experiência adquirida na montagem da bancada experimental simplificada e na realização dos experimentos nortearão a montagem de uma bancada mais sofisticada, cuja maquete já está pronta e cujo projeto executivo encontra-se no Apêndice 01. Essa bancada, cujos equipamentos já foram adquiridos em sua maioria, permitirá:

- a execução de experimentos que simulem, em escala adequada, todas as possíveis evoluções da concentração de boro no pressurizador, advindas das manobras possíveis de variação da mesma concentração no primário;
- apenas para fins didáticos, a simulação de pequenos transitórios de pressão, limitados a $\pm 10\%$ da pressão nominal (atmosférica);
- a execução de experimentos a frio, usando corantes, com a possibilidade de visualização e fotografia da seção de testes em diversas posições;

- a execução de experimentos a quente, usando sal ou ácido bórico, com a medida de concentração sendo feita por meio de células de condutividade em diversas posições do circuito e, principalmente, na seção de testes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLAH, A. M.; MARIY, A. H.; RABIE, M. A. **Pressurizer Transients Dynamic Model**. Nuclear Engineering and Design. 73 – 447 – 453. 1982.

ANSYS FLUENT, **FLUENT 6.3 User's Guide, 2006**

AZEVEDO, C. V. G.; PALMIERI, E. T.; ARONNE, I, D. **Cálculo do Acidente de Perda de Refrigerante Por Uma Ruptura de 160cm² na Perna Fria da Central Nuclear Angra 2**. XIII ENFIR – National Meeting of Reactor Physics and Thermal Hydraulics – International Nuclear Atlantic Conference, 2002.

BARROSO, A.C.O.; BAPTISTA FILHO, B.D.; ARONE,I.D.; MACEDO,L.A.; SAMPAIO, P.A.B.; MORAES, M. **IRIS Pressurizer Design**. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONGRESS ON ADVANCES IN NUCLEAR POWER PLANTS ICAPP'03. Cordoba, Spain, 2003.

BARROSO, A.C.O; BAPTISTA FILHO, B.D. **Refining the design and analysis of the IRIS pressurizer**. In: 5th INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUCLEAR OPTION IN COUNTRIES WITH SMALL AND MEDIUM ELECTRICITY GRIDS. Dubrovnik, Croatia, 2004.

BOTELHO, D. A.; SAMPAIO, P.A.B., LAPA, C.M.F.; PEREIRA, C.M.N.A. **Optimization Procedure to Design Pressurizer Experiments**. In: INAC 2005. Santos, Brasil, 2005a.

BOTELHO, D.A.; SAMPAIO, P.A.B.; MOREIRA, M.L.; BARROSO, A.C.O. **Simulation of IRIS pressurizer out-surge transient using two and three volumes simulation models**. In: INAC 2005. Santos, Brasil, 2005b.

BUCALOSSI, A. **Validation of thermal-hydraulic codes for boron dilution transients in the Context of the OECD/SETH Project.** Association Vinçotte Nuclear, Rue Walcourt 148, B-1070 Brussels, Belgium, 2005.

CARELLI, M. D. **IRIS – International Reactor Innovative and Secure – Final Technical Progress Report.** USA – DOE Report Number: STD-ES-03-40, Nov. 2003.

CARELLI, M.D.; CONWAY, L.E.; ORIANI, L.; PETROVIC, B.; LOMBARDI, C.V.; RICOTTI, M.E.; BARROSO, A.C.O.; COLLADO, J.M.; CINOTTI, L.; TODREAS, N.E.; GRGIC, D.; MORAES, M.M.; BOROUGHS, R.D.; NINOKATA, H.; INGERSOLL, D.T.; ORIOLLO, F. **The design and safety features of the IRIS reactor.** Nuclear Engineering Design. v. 230, p. 151-167. 2004.

DIAMOND, J.D.; BROMLEY, P.B.; ARONSON, L.A. **Analysis of Boron Dilution Transients in PWRs.** Brookhaven National Laboratory, Upton, NY, 11973-5000 USA – Atomic Energy of Canada, Ltd., Chalk River, ON, K0J1J0 Canada, February 4, 2004.

ELETRONUCLEAR, **Apostila de Treinamento – Sistema de Controle Químico e Volumétrico CQV – Módulo I.** 1999b.

ELETRONUCLEAR, **Apostila de Treinamento – Sistema de Refrigeração do Reator SRR-I.** 1999a.

FREIXA, J.; REVENTÓS, F.; PRETEL, C.; BATET,; SOL, L. **SBLOCA with boron dilution in pressurized water reactors. Impact on operation and safety.** Nuclear Engineering and Design 239 - 749–760. 2009.

GANGO, P. **Numerical Boron Mixing Studies for Loviisa Nuclear Power Plant.** Nuclear Engineering Design, v.177, p.239-254. 1997.

GOEMANS, T. **Mathematical modeling of pressurizer thermodynamics**. WTHD No.34 – Delft University of Technology – Department of Mechanical Engineering, Netherlands, 1972.

GONZALEZ, C. R.; WOODS, R. E. **Processamento Digital de Imagens** - 3ª edição – Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2010.

GRAFFARD, E.; GOUX, F. **CFX Code Application to the French Reactor for Inherent Boron Dilution Safety Issue**. CFD4NRS, Garching, Munich, 5-7 Sept. 2006.

HYVARINEN, J. **The Inherent Boron Dilution Mechanism in Pressurized Water Reactor**. Nuclear Engineering and Design, 145 - 227-240. 1993.

IVANOV, K.N.; GRUNDMANN, U.; MITTAG, S.; RODHE, U. **Comparative Study of a Boron Dilution Scenario in VVER Reactors**. Annals of Nuclear Energy, v26, p.1331-1339. 1999.

KIM, S.N. **An Experimental and Analytical Model of a PWR Pressurized During Transients**. Massachusetts Institute of Technology, February 1984.

KIM, S.N. **PWR Pressurizer Modeling**. Nuclear Engineering and Design 102 – 199 – 209. 1987.

KIM, T.W.; KIM, J. W.; PARK, G. C. **Development of Nonequilibrium Pressurizer Model With Noncondensable Gas**. Nuclear Engineering and Design 236 – 375 – 384. 2006.

KLIEN, S.; ROHDE, U.; WEIß, F.P. **Core Response of a PWR to Slug of Under-Borated Water**. Nuclear Engineering and Design, 2004, v.230, p.121-132.

LAMARSH, J.R.; BARATTA, A. J. **Introduction to Nuclear Engineering**. 3rd edition – Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458, 2001.

NAHAVANDI, A. N.; MAKKENCHERY, S. **An Improved Pressurizer Model With Bubble Rise and Condensate Drop Dynamics**. Nuclear Engineering and Design 12 – 135 – 147. 1970.

NARAIN, R. Comunicação – Departamento de Energia Nuclear – UFPE, 2012.

NOURBAKHS, H.P.; CHENG, Z. **Potential for Boron Dilution During Small-Break LOCAs in PWRs**. BNL-NUREG – 62261, October, 1995.

QUERAL, C.; GONZÁLEZ, I. **Analysis of Heterogeneous Boron Dilution Sequences**. International Conference – Nuclear Energy for New Europe – Portoroz – Slovenia – September 6-9. p.0104.1-0104.9. 2004.

REVENTÓS, F.; FREIXA, J.; BATET, L.; PRETEL, C.; LUEBBESMEYER, D.; SPAZIANI, D.; MACEK, J.; LAHOVSKY, F.; KASAHARA, F.; UMMINGER, K.; WEGNER, R. **An Analytical Comparative Exercise on the OECD-SETH PKL E2.2 Experiment**. Nuclear Engineering and Design 238 - 1146-1154. 2008.

RODHE, U.; ELKIN, I.; KALINENKO, V. **Analysis of Boron Dilution Accident for WWER-440 Combining the Use of the Codes DYN3D and SiTAP**. Nuclear Engineering and Design. v.170, p.95-99. 1997.

SHULTIS, J.K.; FAW, R.E. **Fundamentals of Nuclear Science and Engineering**. Marcel Dekker, Inc, Hutgasse 4, Postfach 812, CH-4001 Basel, Switzerland, 2002.

SILVA, M. A. B. **Determinação dos Parâmetros de uma Seção de Testes para o Pressurizador do Reator Nuclear IRIS**. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Energia Nuclear, 2008.

SILVA, M. A. B.; LIRA, C. A. B. O.; BARROSO, A. C. O. **Fractional Scaling Analysis for IRIS Pressurizer Reduced Scale Experiments**. *Annals of Nuclear Energy*, v37, p. 1415-1419, 2010.

SUN, J. G ; SHA, W. T.; **Analysis of Boron Dilution in a Four-Loop PWR**. Energy Technology Division – Argonne National Laboratory, 9700 South Cass Avenue, Argonne, IL 60439. October, 1995.

VIEIRA J. W.; LIMA F. R. A. **A Software to Digital Image Processing To Be Used in the Voxel Phantom Development**, *Cellular and Molecular Biology* (Online), 55, 16-22, (2009).

WENRAN, W.; YUEYUAN, J.; LIN, L.; YALI, W. **A novel encoding water level monitor system during and after LOCAs in a nuclear heating reactor**. *Nuclear Engineering and Design*, 1998, v.179, p.275-280.

WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY LCC. **IRIS Plant Description Document**. Westinghouse Proprietary Class 2 - WCAP-16062-P. Mar. 21, Pittsburgh, 2003a.

WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY LCC. **IRIS Preliminary Safety Assessment**. Westinghouse Non-Proprietary Class 3 – WCAP-16082-NP. vol.1. Jul. 15, 2003b. Pittsburgh.

WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY LCC . **Final Technical Progress Report – STD - ES-03-40**. Nov. 3, Pittsburgh, 2003c.

WULFF, W.; ZUBER, N.; ROHATGI, U.S.; CATTON, I.; **Application of Fractional Scaling Analysis (FSA) to Loss of Coolant Accidents (LOCA) – Part 2. System Level Scaling for System Depressurization**. In: The 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-11), Avignon, France, 2005.

ZUBER, N.; WULFF, W.; ROHATGI, U.S.; CATTON, I.; **Application of Fractional Scaling Analysis (FSA) to Loss of Coolant Accidents (LOCA) – Part 1. Methodology Development.** In: The 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-11), Avignon, France, 2005.

APÊNDICES

APÊNDICE 01

PROJETO EXECUTIVO

Objetivo

A idéia básica é projetar e construir uma bancada experimental e respectiva(s) seção(ões) de teste para estudar como se processa a mistura e a homogeneização do volume líquido do pressurizador em função dos mecanismos de circulação, que estão sendo considerados no desenvolvimento do projeto do reator IRIS. Tal bancada deve permitir a variação de vários parâmetros de projeto e de operação de forma a tornar possível a otimização dos mecanismos de homogeneização.

Descrição da bancada

Um estudo das condições de similaridade para determinação dos parâmetros da seção de testes, utilizando a técnica de Análise de Escala Fracional (FSA) foi desenvolvido por (SILVA, 2008).

Dimensões

O parâmetros que balizaram os cálculos para o dimensionamento da seção de testes estão mostrados na Tabela 09. A Tabela 10 apresenta os dados calculados para a seção de testes.

Tabela 09 – Parâmetros de projeto que balizam o dimensionamento da bancada

Grandezas do reator IRIS	Símbolo	Valor
Densidade da água do primário (kg/m ³)	$\rho_{in,p}$	656,0
Densidade média da água no pressurizador (kg/m ³)	ρ_p	594,1
Vazão total de circulação (m ³ /s)	$Q_{in,p}$	0,000504
Vazão dos tanques de boração ou deboração (m ³ /s)	q_p	0,0063
Volume de água do primário (m ³)	v_p	400
Volume total de água no pressurizador (m ³)	V_{ap}	32
Volume de vapor no pressurizador (m ³)	V_{vp}	43,6
Diâmetro dos orifícios de surto (m)	D_p	0,05
Velocidade da circulação no orifício de surto (m/s)	u	0,0321

Tabela 10 – Dimensões básicas da seção de testes

	(m ³)	Litros (l)
Vol. total	0,096	96,438
Vol. líquido	0,041	40,500
Vol. vapor	0,056	55,938

Descrição

As Figuras 69 e 70 mostram, respectivamente, o fluxograma e a maquete da bancada experimental. A maquete servirá para balizar a construção da bancada definitiva.

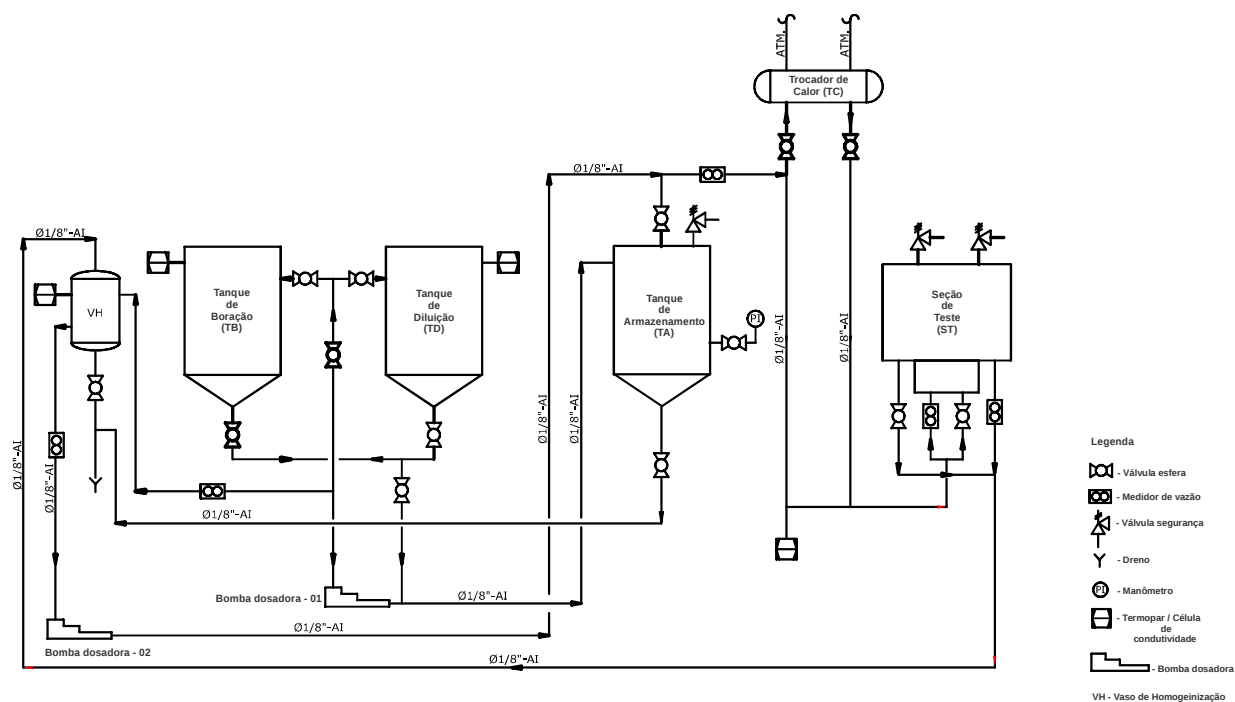


Figura 69 – Fluxograma da bancada experimental



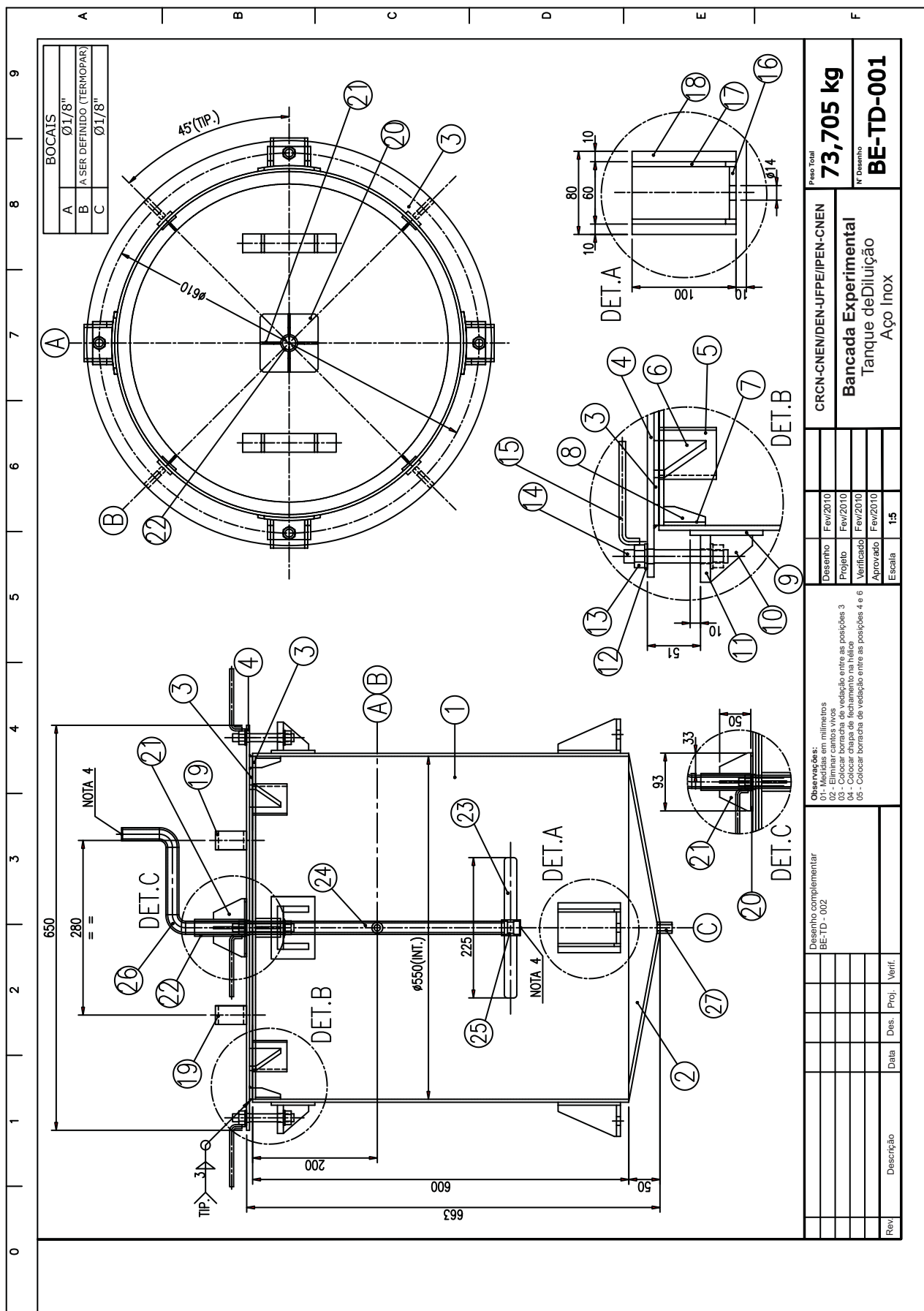
Figura 70 – Maquete da bancada experimental

Equipamentos e materiais já adquiridos:

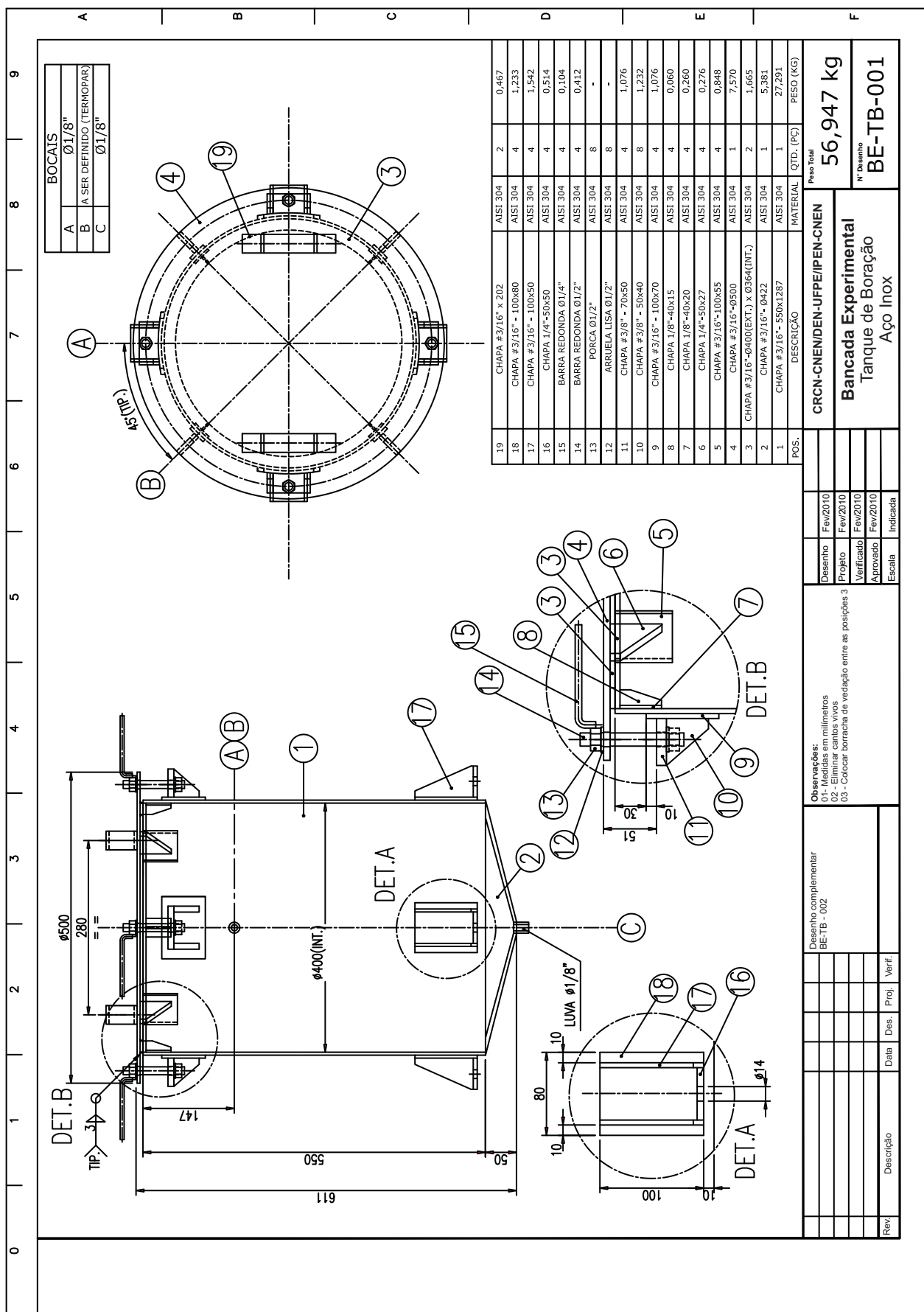
- Trocador de calor;
- Duas bombas dosadoras;
- Três medidores de vazão eletromagnéticos;
- Tubulações em aço inox com diâmetro de 3/8”;
- Conexões.

Desenhos dos equipamentos

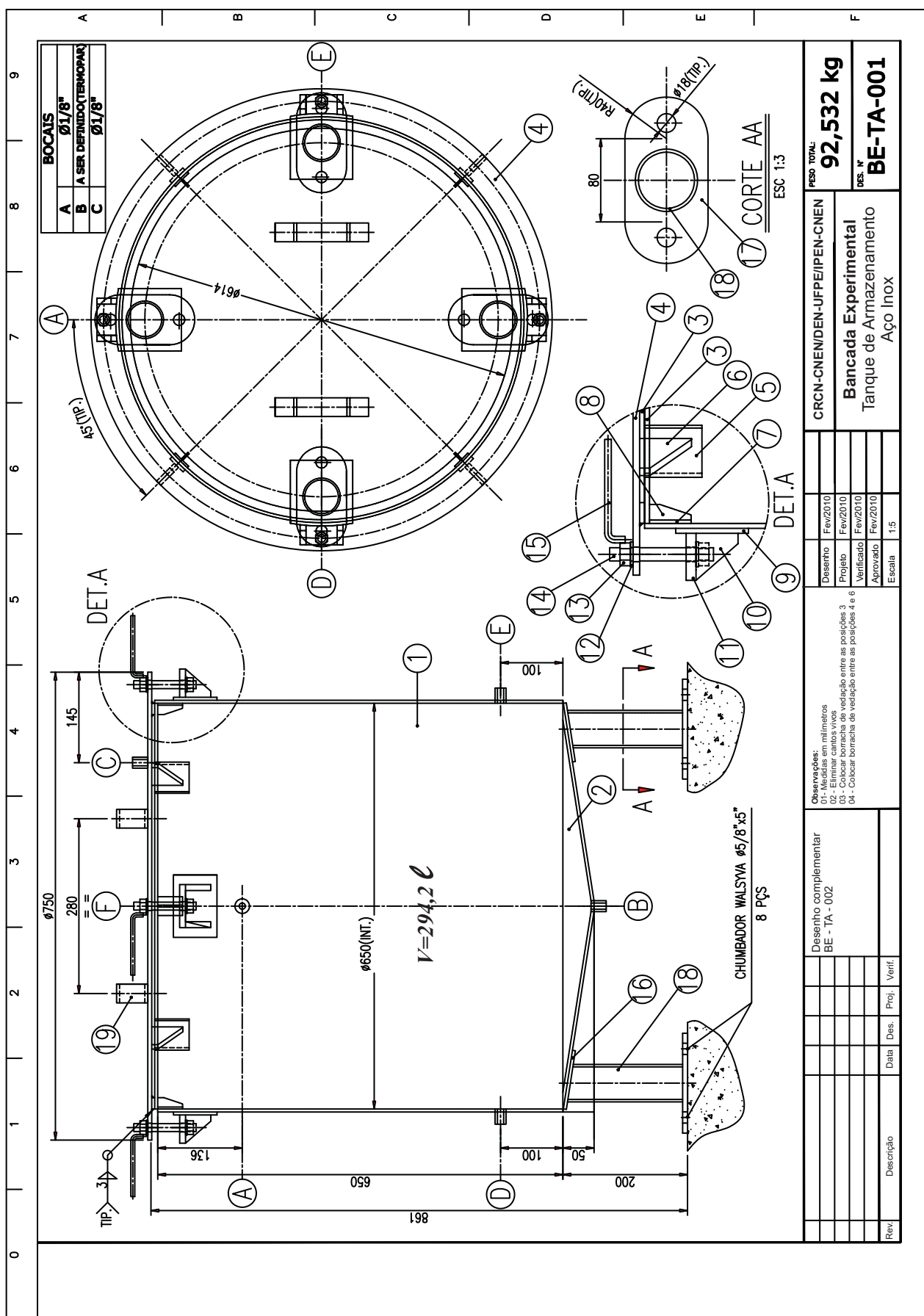
As Figuras de 71 à 76 mostram os desenhos com os detalhes dos equipamentos a serem fabricados, tanque de diluição, tanque de boração, tanque de armazenamento, vaso de homogeneização, plataforma e seção de testes.



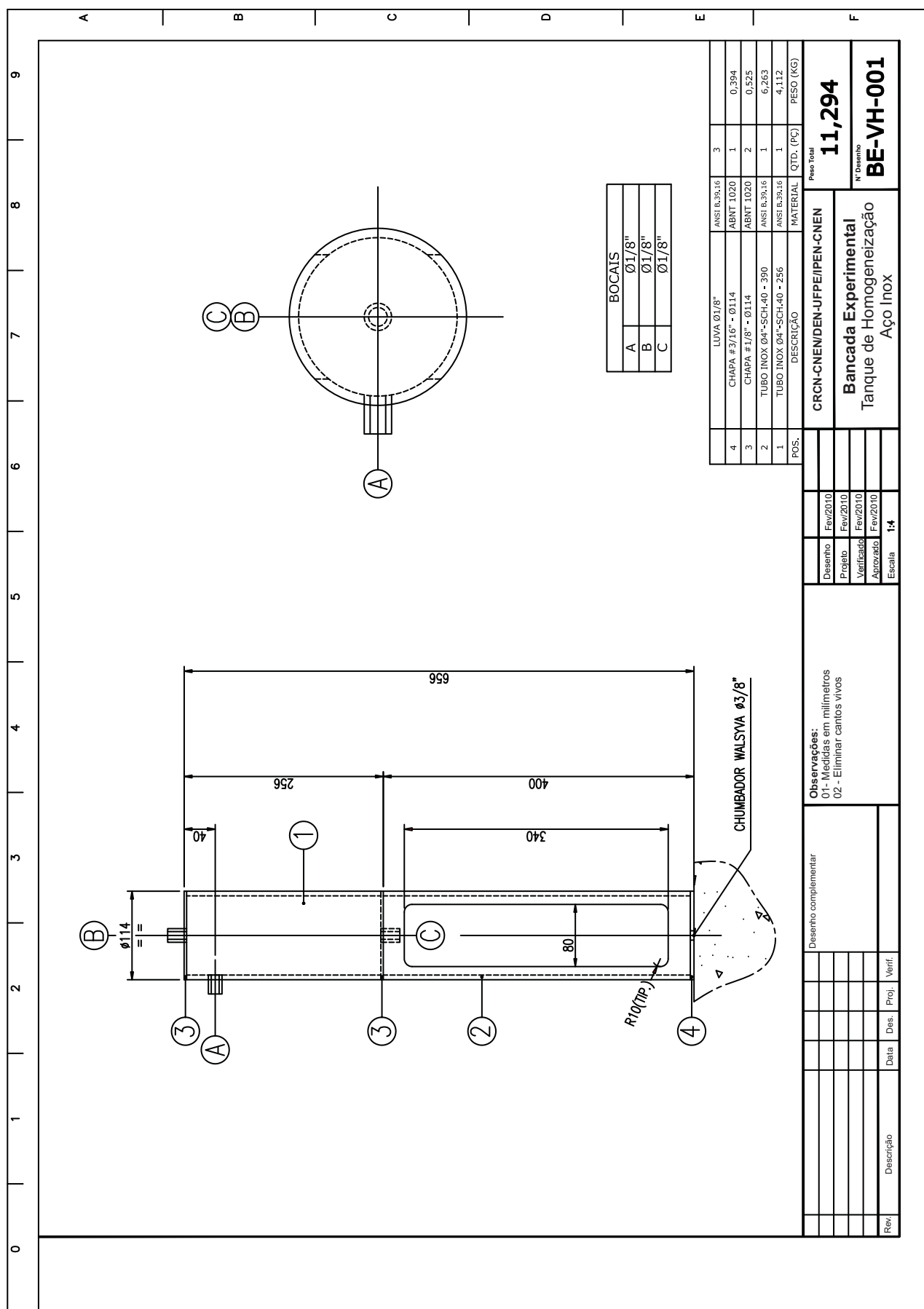
[illegible]

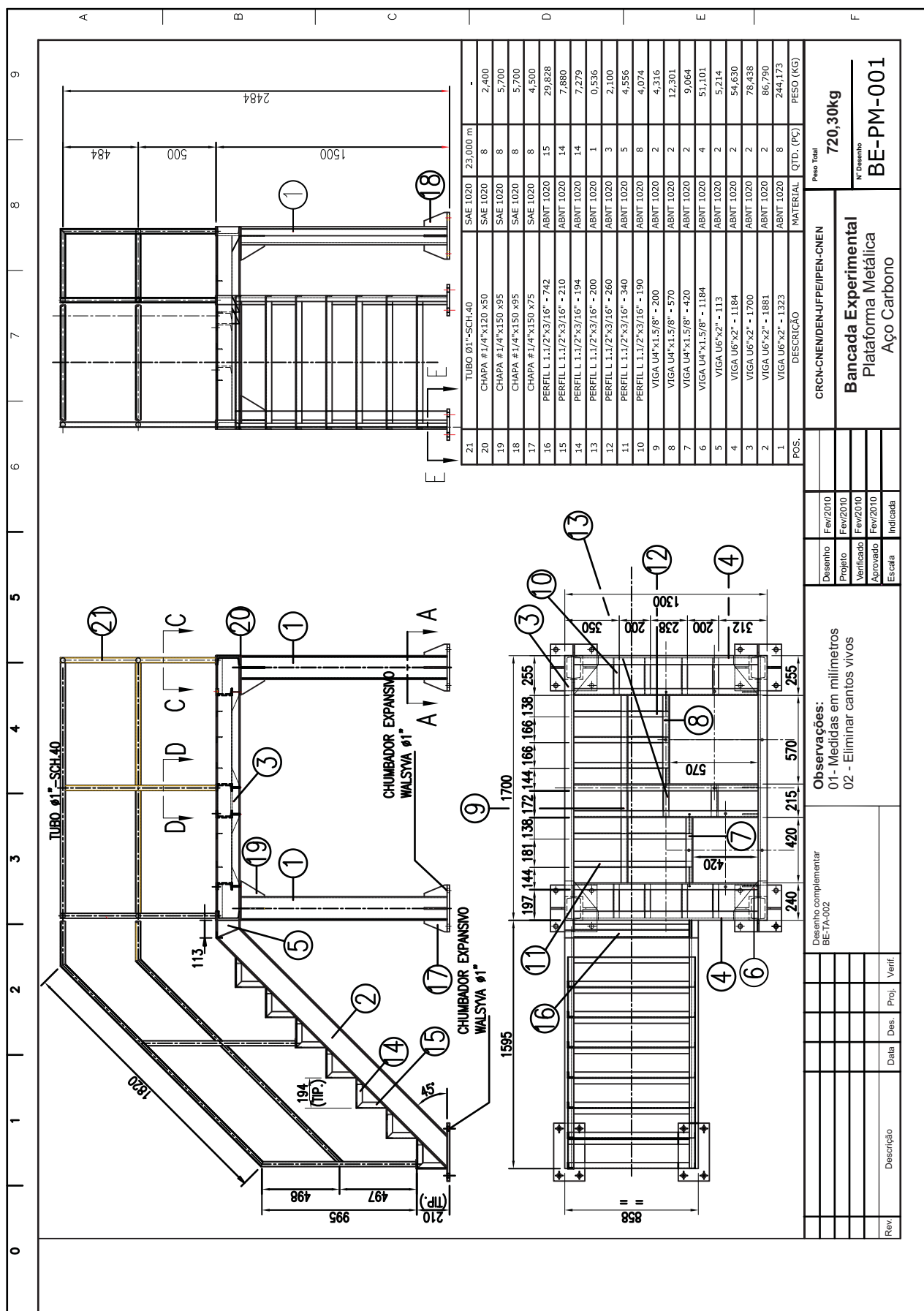


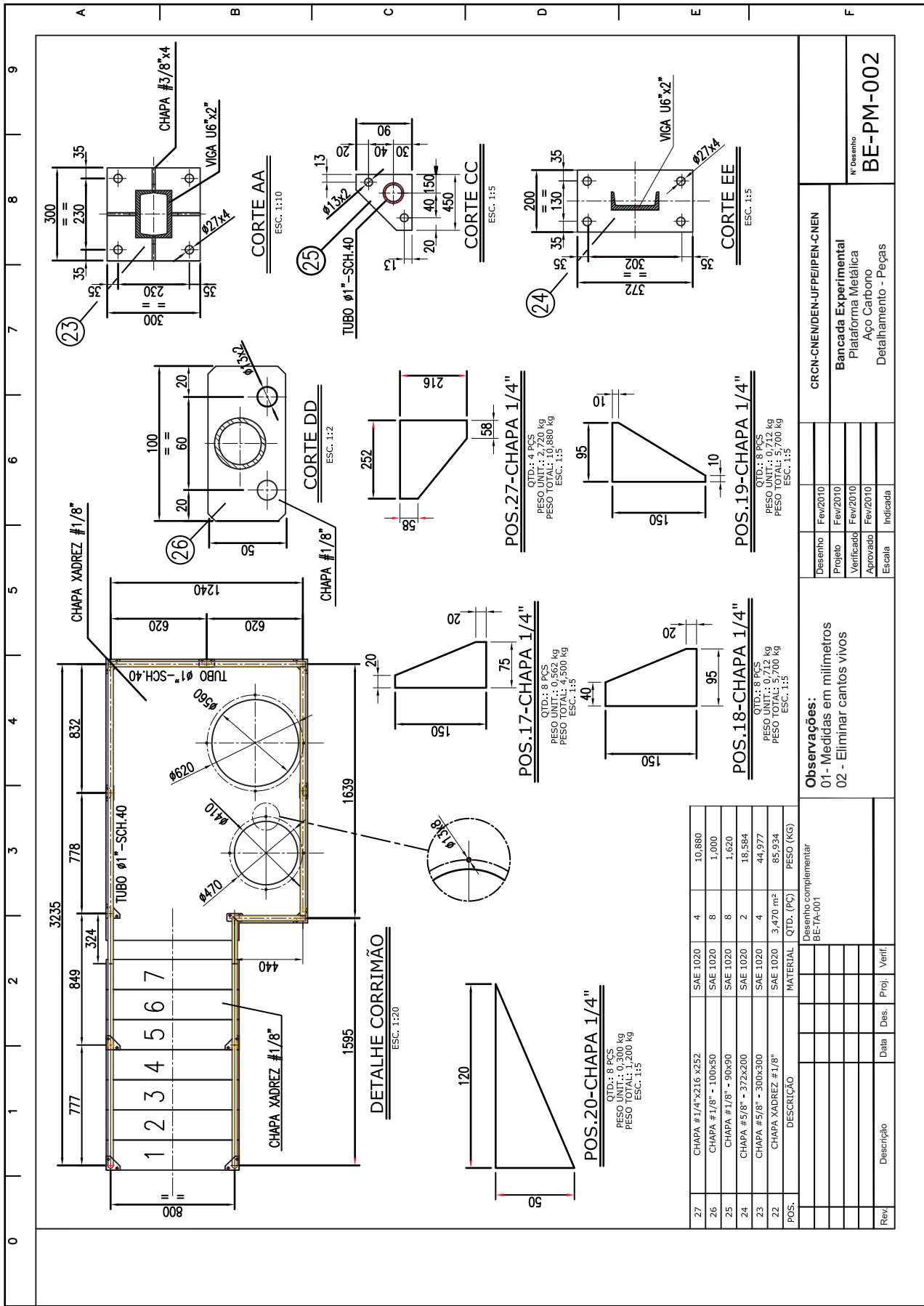
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		

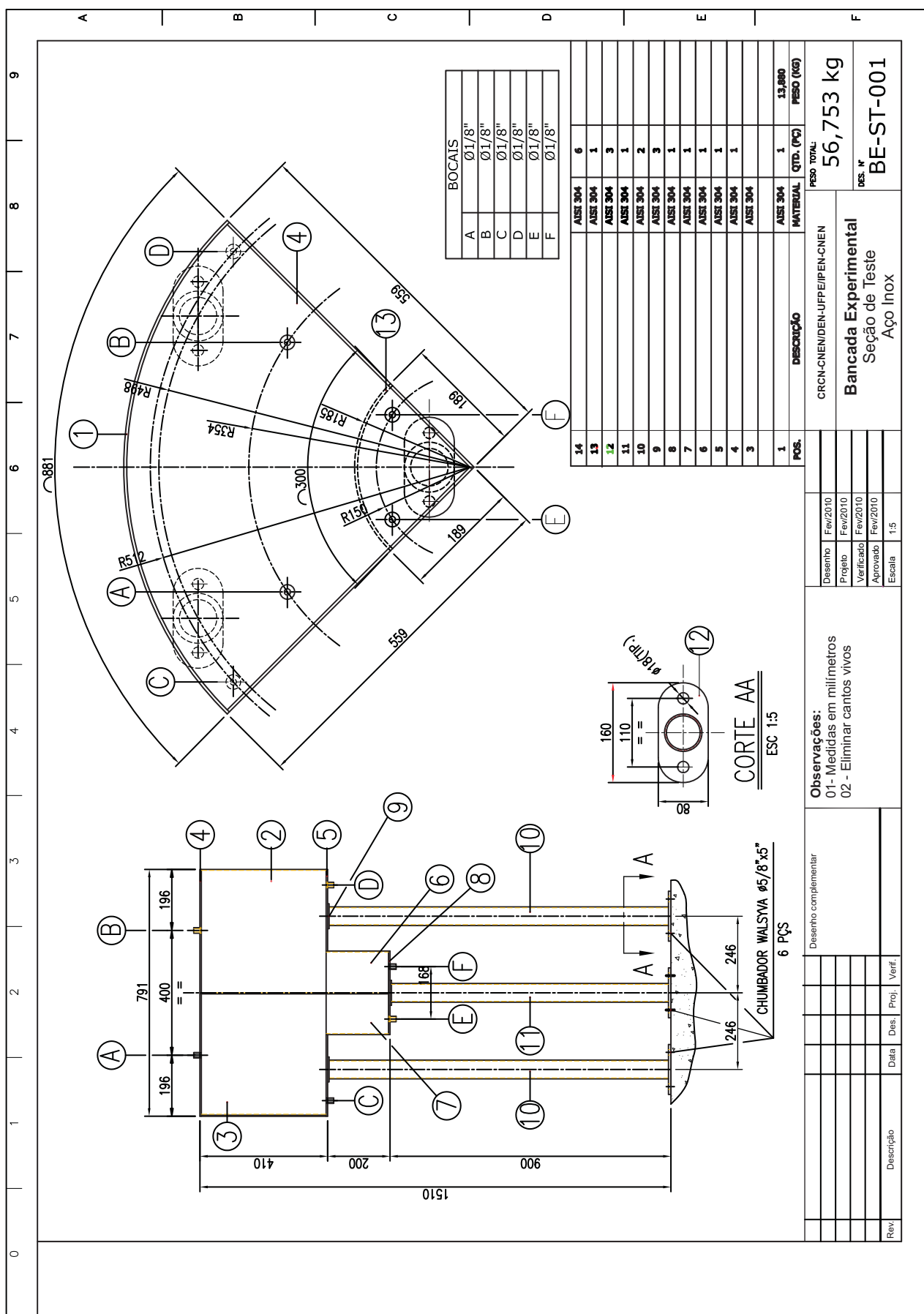


[illegible]









APÊNDICE 02

Dados referentes aos pontos obtidos no processamento digital das imagens, dos experimentos A, B e C. Foram determinados 10 pontos em cada uma das regiões (superior e inferior) da seção de testes, para se obter o valor médio da concentração do corante na ST.

Experimento A - Corante Azul -100ppm - 12/02/2012

1a Medida - Início		2a Medida - 0,5 hora	
Região Superior	Região Inferior	Região Superior	Região Inferior
96	93	132	144
90	89	140	144
92	95	156	147
96	95	159	141
95	95	168	139
91	86	159	141
96	85	158	134
96	85	154	130
89	84	146	124
91	84	137	131
93,2	89,1	150,9	137,5
Média	91,15	144,2	

3a Medida 1,0 h		4a Medida 1,5 h	
Região Superior	Região Inferior	Região Superior	Região Inferior
135	145	155	145
151	146	172	161
163	149	183	170
175	150	196	161
178	152	198	167
175	136	195	156
172	133	194	152
167	130	188	145
156	130	177	143
150	130	165	134
162,2	140,1	182,3	153,4
Média	149,85	167,85	

5a Medida 2,0h		6a Medida 2,5 h	
Região Superior	Região Inferior	Região Superior	Região Inferior
171	170	154	137
186	177	176	162
197	177	190	169
210	178	200	176
216	184	208	156
210	169	199	148
209	165	200	141
202	155	188	139
191	154	183	136
176	147	171	133
196,8	167,6	186,9	149,7
Média	182,2		168,3

7a Medida - 3,0 hora		8a Medida -3,5 hora	
Região Superior	Região Inferior	Região Superior	Região Inferior
164	151	160	147
178	170	182	169
198	182	198	179
208	168	212	172
215	173	216	178
213	167	216	171
205	166	204	167
199	157	198	158
190	148	188	144
176	140	175	142
194,6	162,2	194,9	162,7
Média	178,4		178,8

9a Medida - 4,0 horas		10a medida - 4,5 horas	
Região Superior	Região Inferior	Região Superior	Região Inferior
173	155	171	154
189	184	189	180
205	178	207	184
215	186	220	188
216	169	219	188
222	168	226	172
208	163	211	165
206	156	207	156
204	156	197	153
184	148	183	146
202,2	166,3	203	168,6
Média	184,25	185,8	

13a medida - Amostras - 4,5 horas

Seção de Testes	Tanque de Boração
137	147
136	147
132	139
128	141
126	136
120	136
127	131
122	133
123	136
130	136
Média	128,1
	138,2

Experimento B - Corante Azul - 400 ppm - 12/02/2012

1a Medida - 5 minutos		2a Medida - 10 minutos	
Região Superior	Região Inferior	Região Superior	Região Inferior
119	128	138	130
123	124	149	127
126	124	158	133
126	124	167	131
134	126	178	137
160	131	190	140
138	150	181	141
130	156	167	134
121	130	152	140
120	121	142	141
129,7	131,4	162,2	135,4
Média	130,55	148,8	

3a Medida - 15 minutos		4a Medida - 20 minutos	
Região Superior	Região Inferior	Região Superior	Região Inferior
147	143	166	160
167	143	186	161
177	144	194	164
186	144	204	165
190	150	211	171
187	149	193	161
196	170	216	178
181	163	203	193
166	149	187	169
154	147	171	169
175,1	150,2	193,1	169,1
Média	162,65	181,1	

5a Medida - 0,5 hora		6a Medida - 1,0 hora	
Região Superior	Região Inferior	Região Superior	Região Inferior
156	145	169	155
182	149	198	161
193	152	210	171
204	159	218	177
208	163	220	184
203	157	213	179
215	161	228	195
201	182	214	190
182	157	198	178
159	154	174	170
190,3	157,9	204,2	176
Média	174,1	190,1	

7a Medida - 1,5 horas		8a medida - 2,0 horas	
Região Superior	Região Inferior	Região Superior	Região Inferior
186	172	191	171
212	177	213	185
219	189	220	195
224	191	224	198
224	194	224	199
220	195	219	202
235	196	232	202
223	200	221	203
208	196	211	202
190	186	194	194
214,1	189,6	214,9	195,1
Média	201,85	205	

9a medida - 2,5 horas		10a medida - 3,0 horas	
Região Superior	Região Inferior	Região Superior	Região Inferior
191	171	199	184
208	185	210	188
212	195	215	194
217	198	218	197
216	199	217	201
210	202	211	198
223	202	224	199
220	203	216	195
207	202	207	199
192	194	197	189
209,6	195,1	211,4	195
Média	202,35		203,2

12a medida - 3,5 horas

Região Superior	Região Inferior
200	191
211	192
213	197
216	200
217	205
209	194
228	199
222	196
213	204
198	198
212,7	197,6
Média	205,15

Experimento C - Corante Azul -1000ppm - 12/02/2012

1a Medida - 5 minutos		2a Medida - 10 minutos	
Região Superior	Região Inferior	Região Superior	Região Inferior
149	127	198	143
154	128	199	145
167	129	206	147
163	130	202	147
163	126	203	146
167	127	208	150
163	128	202	151
162	125	199	151
160	126	199	154
158	127	199	148
160,6	127,3	201,5	148,2
Média	143,95	174,85	

3a Medida - 15 minutos		4a Medida - 20 minutos	
Região Superior	Região Inferior	Região Superior	Região Inferior
201	152	209	163
203	152	208	165
209	161	212	172
206	162	210	172
206	157	209	176
207	165	211	182
203	165	209	184
203	164	208	185
202	164	209	182
201	160	209	178
204,1	160,2	209,4	175,9
Média	182,15	192,65	

5a Medida - 25 minutos		6a Medida - 05 hora	
Região Superior	Região Inferior	Região Superior	Região Inferior
197	155	238	189
203	160	242	204
204	164	244	210
203	163	242	218
203	169	240	200
204	176	241	209
203	177	234	212
201	176	241	211
202	174	241	207
202	173	238	193
202,2	168,7	240,1	205,3
Média	185,45	222,7	
7a Medida - 1,0 horas		8a Medida - 1,5 horas	
Região Superior	Região Inferior	Região Superior	Região Inferior
231	203	238	223
232	213	237	227
234	217	237	228
234	224	237	231
228	202	232	206
228	213	233	222
227	213	231	220
226	213	232	219
227	209	234	218
227	197	233	205
229,4	210,4	234,4	219,9
Média	219,9	227,15	

9a medida - 2,0 horas		10a medida - 2,5 horas	
Região Superior	Região Inferior	Região Superior	Região Inferior
234	223	233	219
234	229	233	230
236	228	234	226
235	235	235	233
232	206	229	207
230	221	228	215
227	218	227	218
232	218	228	217
231	216	233	216
229	204	229	205
232	219,8	230,9	218,6
Média	225,9	224,75	

11a medida - 3,0 horas		13a medida - Amostras - 3,5 horas	
Região Superior	Região Inferior	Seção de Testes	Tanque de Boração
233	225	202	188
234	227	203	200
234	226	209	206
231	235	213	210
232	206	214	205
232	217	208	198
227	219	210	206
230	217	208	203
233	217	209	195
231	204	208	195
231,7	221	208,4	200,6
Média	226,35		